

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS - PPGEM

TIAGO ALEXANDRE ROSSO

USO DO ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO ABRASÃO PARA
AVALIAÇÃO DA ABRASIVIDADE DE PARTÍCULAS DE ALUMINA E
CARBETO DE BORO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2017

TIAGO ALEXANDRE ROSSO

**USO DO ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO ABRASÃO PARA
AVALIAÇÃO DA ABRASIVIDADE DE PARTÍCULAS DE ALUMINA E
CARBETO DE BORO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Guisepe Pintaúde, Dr.

Co-orientador: Ane Cheila Rovani, Dr^a.

CURITIBA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R838u Rosso, Tiago Alexandre
2017 Uso do ensaio de desgaste por micro abrasão para avaliação da abrasividade de partículas de alumina e carbetto de boro / Tiago Alexandre Rosso.-- 2017.
106 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web.
Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2017.
Bibliografia: p. 69-73.

1. Abrasivos. 2. Partículas (Física, química, etc.).
3. Usinagem. 4. Hidroerosão. 5. MATLAB (Programa de computador). I. Pintaúde, Giuseppe, orient. II. Rovani, Ane Cheila, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 300

A Dissertação de Mestrado intitulada: **USO DO ENSAIO DE DESGASTE POR MICRO ABRASÃO PARA AVALIAÇÃO DA ABRASIVIDADE DE PARTÍCULAS DE ALUMINA E CARBETO DE BORO**, defendida em sessão pública pelo candidato **Tiago Alexandre Rosso**, no dia 24 de agosto de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva - UTFPR

Prof. Dr. Cherlio Scandian - UFES

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, ____ de _____ de 20__.

Carimbo e Assinatura do (a) Coordenador (a) do Programa

À minha esposa Alessandra, e à minha família, pela
compreensão, incentivo e exemplo.

AGRADECIMENTOS

Certamente estas palavras não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa conquista, porém podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Ao Professor Dr. Giuseppe Pintaúde pela sua dedicação, disponibilidade e conhecimentos transmitidos na orientação deste trabalho.

À Dra. Ane Rovani pelas contribuições e auxílios durante o decorrer do trabalho.

Ao professor Dr. Paulo André de Camargo Beltrão pelo auxílio no ingresso no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela contribuição durante o curso.

À Robert Bosch pelo fornecimento das partículas de carbetos de boro e à Santana & Branco pelo fornecimento das partículas de alumina.

À aluna de iniciação científica Anna Borges pela incansável ajuda com as caracterizações das partículas, aos colegas Diogo Rosso, Aline Redua, Hamilton Almeida e Roberto Assumpção com a confecção dos corpos-de-prova para os ensaios, ao colega Alexandre pela ajuda com o MEV e ao colega Mario Coseglio pela disponibilização do programa em MatLab para caracterização da angularidade das partículas.

Ao Professor Dr. Carlos Henrique da Silva pelos comentários durante a apresentação do projeto de dissertação.

À minha família pelo apoio durante o decorrer deste desafio e à minha esposa pelo carinho, amor e compreensão.

RESUMO

ROSSO, T. A. **Uso do ensaio de desgaste por micro abrasão para avaliação da abrasividade de partículas de alumina e carbeto de boro**, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

Processos de fabricação que fazem uso de abrasão como modo de remoção de material são discutidos constantemente pela literatura. Entretanto, a abrasividade, ou a capacidade de remoção de material pelos abrasivos pouco tem sido abordada na literatura especificamente para partículas micrométricas. Esta capacidade de remoção pode ser atribuída a variações da concentração, geometria, dureza e distribuição de tamanho das partículas no fluido abrasivo. Logo, um melhor entendimento acerca da abrasividade das partículas faz-se necessário para uma melhor caracterização dos modos e mecanismos atuantes no processo, visto que a seleção do abrasivo é um fator econômico significativo em diversos processos de fabricação, tais como retificação e hidroerosão.

Esta dissertação tem por objetivo utilizar-se do ensaio de desgaste por micro abrasão para a avaliação da abrasividade de partículas de alumina e carbeto de boro. Como corpos-de-prova foram utilizadas amostras de aço AISI D2 e as esferas de aço AISI 52100 temperado e revenido com diâmetro de 25,4 mm. Foram realizados ensaios com dois tipos diferentes de abrasivo (Al_2O_3 e B_4C) com tamanho de partícula semelhante e ensaios com o mesmo abrasivo (Al_2O_3) com diferentes tamanhos de partícula para verificar a influência da concentração do abrasivo, da velocidade e do desgaste da esfera e do tempo de ensaio.

As distribuições de tamanho das partículas foram determinadas através da técnica de difração a laser na forma de distribuição de frequência em volume e na forma de frequência acumulada. Além disso, a caracterização quanto à geometria, por meio do fator SPQ (parâmetro de ponta), foi realizada utilizando um programa computacional desenvolvido em linguagem MatLab. As distribuições de tamanho mostraram uma percentagem de volume de partículas finas maior nas amostras de carbeto de boro e uma percentagem de volume de partículas mais grossas superiores para a alumina. O valor de SPQ médio apresentou-se maior para o carbeto de boro do que para a alumina, quando com tamanhos médios diferentes. Porém para os abrasivos diferentes com tamanho médio semelhante, a alumina apresentou um

valor maior para este parâmetro. Esse valor maior sugere uma maior capacidade de remoção de material.

Os resultados mostraram que a variação do tempo de ensaio é responsável por uma mudança no modo de desgaste. Além disso, foi verificado que as partículas abrasivas de Al_2O_3 apresentam menor abrasividade quando comparadas às partículas abrasivas de B_4C , pois o coeficiente de desgaste mostrou-se maior para este após o alcance do regime permanente. Um aumento da concentração do abrasivo e um acréscimo no tempo de ensaio levaram a um crescimento no volume de desgaste do material para ambos os abrasivos, enquanto que um aumento na rotação da esfera de ensaio não proporcionou um aumento significativo no volume de material removido. Os valores de dureza das partículas abrasivas e do corpo de prova, além do tamanho e da angularidade das partículas abrasivas foram utilizados para discussão das causas do regime permanente de desgaste ter ocorrido em diferentes tempos de ensaio para a comparação dos dois tipos de abrasivos.

Palavras-chave: abrasividade, partículas abrasivas, ensaio de desgaste micro-abrasivo.

ABSTRACT

ROSSO, T. A. **Use of micro abrasion wear tests for the evaluation of alumina and boron carbide abrasiveness**, Dissertation (Master in Engineering) - Post-graduate in Mechanical Engineering and Materials. Federal Technology University of Paraná. Curitiba, 2017.

Manufacturing processes that use abrasion for material removal are constantly discussed in the literature. However, the abrasiveness, or the ability of material removal by particles has not been widely discussed in the literature specifically for micrometric particles. This removal capacity can be attributed to changes in the particle concentration, geometry, hardness and size distribution in the fluid abrasive. Therefore, a better understanding of the particles abrasiveness is necessary for a proper characterization of the modes and mechanisms acting in the process, since the abrasive selection is a significant economic factor in several manufacturing processes, such as grinding and hydroerosive grinding.

The purpose of this work is to use the micro abrasion wear test to evaluate the abrasiveness of alumina and boron carbide particles. Samples of AISI D2 steel and quenched and tempered AISI 52100 steel balls with 25.4 mm diameter were used. Tests were performed with different abrasives (Al_2O_3 e B_4C) of similar sizes and with the same abrasive (Al_2O_3) of different particle sizes to verify the influence of the abrasive concentration, ball rotation and wear and test time.

Particle size distribution was determined by laser diffraction in terms of frequency distribution and cumulative frequency volumes. Moreover, the particle geometry characterization was also determined using the SPQ factor (Spike value) using a MatLab computer program. The size distribution indicated a higher percentage of fine particles for boron carbide and a higher percentage of coarse particles for alumina. The mean SPQ value was higher for boron carbide than for alumina with different average sizes. However, for different abrasives with similar average size, the alumina presented a bigger value for the parameter. This bigger value suggests a higher material removal capacity.

The results showed that test time is responsible for a change in the wear mode. Moreover, Al_2O_3 abrasive particles presented a lower abrasiveness when compared to B_4C particles because the wear coefficient was bigger for B_4C after reaching the steady state regime. An

increase in abrasive concentration and in test time led to a growth in material volume wear for both abrasives, while an increase in the ball rotation did not provide a significant increase in the material volume removed. The particles and specimen hardness and the particle abrasive size and angularity were used to discuss the causes of the steady state regime occur at different times for the two abrasives.

Keywords: abrasiveness, abrasive particles, micro abrasive wear testing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Equipamento típico para ensaio de abrasão para identificação do número de Miller. | 5 |
| Figura 2 - Diagrama esquemático do aparato de ensaio de roda de borracha. | 7 |
| Figura 3 - Perda de massa de ferro fundido branco como função da fração volumétrica de carboneto com SiO_2 (a) e Al_2O_3 (b). | 8 |
| Figura 4 - Equipamento para ensaio abrasivo SSWAT: (a) dispositivo; (b) câmara de testes; (c) dispositivo para adição de abrasivo. | 9 |
| Figura 5 - Taxa de desgaste para abrasão a três corpos para aço martensítico com diferentes abrasivos..... | 9 |
| Figura 6 - Relações entre taxa de desgaste, conteúdo de quartzo e energia de desgaste específica para condições de desgaste a três corpos. | 10 |
| Figura 7 - Equipamento utilizado para ensaio abrasivo CIAT..... | 12 |
| Figura 8 - Esboço do pino de aço com forma piramidal antes do ensaio (esquerda) e após o ensaio (direita) com o plano de desgaste d_d | 13 |
| Figura 9 - Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa. | 15 |
| Figura 10 - Equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa livre. | 16 |
| Figura 11 - Equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa. | 17 |
| Figura 12 - Marcas de desgaste abrasivo por riscamento para um copo de prova de aço ferramenta desgastado por esfera de aço e partículas abrasivas de diamante (a) e por rolamento para um copo de prova de aço ferramenta desgastado por esfera de aço e partículas abrasivas de SiC (b)..... | 18 |
| Figura 13 - Desgaste abrasivo com atuação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e riscamento. | 19 |
| Figura 14 - Grandezas geométricas (a) diâmetro d ; (b) profundidade h ; (c) volume V obtidas a partir do ensaio de desgaste por esfera rotativa. | 20 |

| | |
|--|----|
| Figura 15 - Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio para ensaios realizados em um corpo-de-prova revestido com nitreto de titânio..... | 22 |
| Figura 16 - Dureza em função da resistência à fratura para diferentes materiais abrasivos.... | 23 |
| Figura 17 - Efeito do tamanho do abrasivo na perda de massa de ferro fundido com diferentes teores de austenita retida..... | 24 |
| Figura 18 - Partícula abrasiva descrita pelos parâmetros D e β . Superfície inferior movendo-se da esquerda para a direita..... | 25 |
| Figura 19 - Interação de uma partícula e as superfícies da esfera e da amostra submetida à ΔN | 27 |
| Figura 20 - Arredondamento em uma contração abrupta (a) antes e (b) após processo de hidroerosão. | 31 |
| Figura 21 - Microestrutura do aço D2 para amostra tratada termicamente..... | 33 |
| Figura 22 - Exemplo de imagem para seleção de partículas de carbetos de boro. | 35 |
| Figura 23 - Equipamento utilizado para os ensaios de desgaste micro abrasivo. | 36 |
| Figura 24 - Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para carbetos de boro e alumina I..... | 40 |
| Figura 25 - Frequência acumulada de tamanho de partículas em volume para carbetos de boro e alumina I..... | 40 |
| Figura 26 - Representação da geometria das partículas de alumina I para partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ (a) e partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ (b). | 41 |
| Figura 27 - Representação da geometria das partículas de carbetos de boro para partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ (a) e partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ (b). | 41 |
| Figura 28 - Volume das crateras de desgaste para os ensaios de desgaste abrasivo. | 45 |
| Figura 29 - Volume de desgaste em função da porcentagem em volume de SiC..... | 46 |
| Figura 30 - Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para carbetos de boro e alumina II. | 49 |
| Figura 31 - Frequência acumulada de tamanho de partículas em volume para carbetos de boro e alumina II. | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 - Representação da geometria das partículas de alumina II para partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ (a) e partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ (b). | 50 |
| Figura 33 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de carbeto de boro para ensaio com tempo de 1 minuto (a) e 2 minutos (b)..... | 53 |
| Figura 34 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de alumina II para ensaio com tempo de 1 minuto (a) e 2 minutos (b)..... | 54 |
| Figura 35 - Marcas de desgaste abrasivo em um corpo-de-prova de WC-Co P20 em ensaio com distância de deslizamento de 15 metros com partículas abrasivas carbeto de silício. | 54 |
| Figura 36 - Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio. | 56 |
| Figura 37 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de carbeto de boro para ensaio com tempo de 4 minutos (a) e 8 minutos (b), 12 minutos (c) e 16 minutos (d). .. | 57 |
| Figura 38 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de alumina II para ensaio com tempo de 4 minutos (a) e 8 minutos (b), 12 minutos (c) e 16 minutos (d). | 58 |
| Figura 39 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de carbeto de boro para ensaio durante 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d)... | 59 |
| Figura 40 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de alumina II para ensaio durante 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d)..... | 60 |
| Figura 41 - Perfil da cratera da amostra desgastada por carbeto de boro para ensaio com tempo de 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d). | 61 |
| Figura 42 - Perfil da cratera da amostra desgastada por por alumina II para ensaio com tempo de 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d). | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Propriedades típicas do B ₄ C..... | 29 |
| Tabela 2 - Propriedades típicas nominais das cerâmicas de alumina..... | 30 |
| Tabela 3 - Composição química aproximada do aço D2 (% em massa). | 32 |
| Tabela 4 - Dureza do aço D2 para estado de fornecimento e tratado termicamente. | 34 |
| Tabela 5 - Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios preliminares. | 37 |
| Tabela 6 - Parâmetros de tamanho para partículas de carbetos de boro e alumina I. | 39 |
| Tabela 7 - Resultado do parâmetro SPQ para partículas de alumina I..... | 42 |
| Tabela 8 - Resultado do parâmetro SPQ para partículas de carbetos de boro. | 43 |
| Tabela 9 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para a alumina I como abrasivo. | 44 |
| Tabela 10 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para o carbetos de boro como abrasivo. | 44 |
| Tabela 11 - Parâmetros de tamanho para partículas de carbetos de boro e alumina II. | 48 |
| Tabela 12 - Resultado do parâmetro SPQ para partículas de alumina II..... | 51 |
| Tabela 13 - Resumo do parâmetro SPQ. | 51 |
| Tabela 14 - Valores dos parâmetros estabelecidos para verificação do desgaste da esfera..... | 52 |
| Tabela 15 - Rugosidade superficial S_q para as esferas em estado de fornecimento e após ensaios em diferentes condições com alumina II e carbetos de boro como abrasivos..... | 52 |
| Tabela 16 - Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios com diferentes tempos de ensaio. | 53 |
| Tabela 17 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para o carbetos de boro como abrasivo. | 55 |
| Tabela 18 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para a alumina II como abrasivo..... | 55 |
| Tabela 19 – Parâmetros de rugosidade S_a e S_q para as amostras desgastadas. | 63 |

| | |
|--|----|
| Tabela 20 - Parâmetros de rugosidade S_{ds} e λ_q para as amostras desgastadas por carbetos de boro e alumina II. | 64 |
| Tabela 21 - Resultado do parâmetro SPQ e $d_{50}(\%)$ para partículas de carbetos de boro..... | 65 |
| Tabela 22 - Resultado do parâmetro SPQ e $d_{50}(\%)$ para partículas de alumina II. | 65 |

LISTA DE SÍMBOLOS

ASTM: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS

SAR Number: Slurry Abrasion Response of Materials

RWAT: Rubber Wheel Abrasion Test

SWAT: Steel Wheel Abrasion Test

SSWAT: Slurry Steel Wheel Abrasion Test

CIAT: Cyclic Impact Abrasion Test

CAI: índice de abrasividade Cerchar [-]

d_d : diâmetro da superfície desgastada para índice Cerchar [mm]

c: fator de correção para índice Cerchar [1 mm]

n: rotação [rpm]

A_t : área total da cratera de desgaste [mm^2]

A_g : a área com desgaste por riscamento [mm^2]

A_r : área com desgaste por rolamento [mm^2]

d: diâmetro da cratera de desgaste [mm]

h: profundidade da cratera de desgaste [μm]

V: volume de material removido da cratera de desgaste [mm^3]

k: coeficiente de desgaste ($\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$)

R: raio da esfera [mm]

N: força normal entre a esfera e o corpo-de-prova [N]

t: tempo de ensaio [min]

n: rotação da esfera [rpm]

k_t : coeficiente de desgaste total [$\frac{\text{mm}^3}{\text{N.m}}$]

k_s : coeficiente de desgaste do substrato [$\frac{mm^3}{N.m}$]

k_c : coeficiente de desgaste do revestimento [$\frac{mm^3}{N.m}$]

D: diagonal maior da seção transversal da partícula [mm]

β : ângulo que descreve a forma da partícula [°]

h_i : espessura da película [mm]

H_b: dureza da superfície mais dura [HV]

H_j: dureza da superfície menos dura [HV]

H_a: dureza das partículas abrasivas [HV]

S: severidade de contato [-]

ΔN : força normal sobre uma partícula abrasiva [N]

D_E: profundidade de penetração da partícula abrasiva na esfera de ensaio [mm]

D_S: profundidade de penetração da partícula abrasiva no corpo-de-prova [mm]

A: área entre a esfera e o corpo-de-prova para 1 rotação da esfera [mm²]

SPQ: *Spike Parameter - Quadratic fit* [-]

v: fração em volume de abrasivo na mistura [%]

N_T: número total de partículas na área de entre a esfera e o corpo-de-prova

c: constante de proporcionalidade [-]

N_R: número real de contatos durante o desgaste abrasivo a dois corpos

k': constante [-]

d_p: diâmetro médio das partículas abrasivas [mm]

s_v: parâmetro de ponta

d₁₀: diâmetros das partículas para os quais 10% em volume de partículas são menores do que os respectivos diâmetros [mm]

d₅₀: diâmetros das partículas para os quais 50% em volume de partículas são menores do que os respectivos diâmetros [mm]

d_{90} : diâmetros das partículas para os quais 90% em volume de partículas são menores do que os respectivos diâmetros [mm]

MO: microscopia ótica

MEV: microscopia eletrônica de varredura

S_a : desvio médio de um perfil de sua linha média [μm]

$S_{\Delta q}$: inclinação média quadrática do perfil [μm]

S_{ds} : densidade de picos por unidade de área [$1/\text{mm}^2$]

S_q : valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade [μm]

λ_q : largura do sulco de desgaste causado por uma partícula [μm]

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Contexto | 1 |
| 1.2 | Caracterização do problema e justificativa | 1 |
| 1.3 | Objetivo geral | 2 |
| 1.3.1 | Objetivos específicos | 2 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 | Desgaste abrasivo | 4 |
| 2.2 | Abordagem de tipos de ensaio para analisar a abrasividade | 5 |
| 2.2.1 | Ensaio para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75) | 5 |
| 2.2.2 | Ensaio de roda de borracha (ASTM G65) | 6 |
| 2.2.3 | Ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81) | 11 |
| 2.2.4 | Ensaio de abrasão por impacto cíclico | 11 |
| 2.2.5 | Ensaio de abrasividade Cerchar | 12 |
| 2.3 | Micro abrasão | 13 |
| 2.3.1 | Uso do ensaio de desgaste micro abrasivo | 14 |
| 2.3.2 | Determinação de taxas de desgaste por esfera rotativa | 15 |
| 2.3.3 | Determinação da abrasividade usando micro-abrasão | 28 |
| 2.4 | Aplicações do Carbetto de Boro | 29 |
| 2.5 | Alumina | 30 |
| 2.6 | Usinagem por hidroerosão | 30 |
| 3 | METODOLOGIA | 32 |
| 3.1 | Corpos de prova e caracterização | 32 |
| 3.2 | Abrasivos e caracterização | 34 |
| 3.3 | Equipamento de Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo por Esfera Rotativa | 36 |
| 3.4 | Procedimento experimental | 36 |
| 4 | RESULTADOS PRELIMINARES | 39 |
| 4.1 | Caracterização das partículas abrasivas | 39 |
| 4.1.1 | Distribuição granulométrica dos abrasivos | 39 |
| 4.1.2 | Caracterização geométrica dos abrasivos | 41 |
| 4.2 | Volume de desgaste das crateras | 43 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 48 |
| 5.1 | Caracterização das partículas | 48 |
| 5.1.1 | Distribuição granulométrica dos abrasivos | 48 |
| 5.1.2 | Caracterização geométrica dos abrasivos | 50 |
| 5.2 | Influência do desgaste na esfera | 52 |
| 5.3 | Influência do tempo de ensaio | 53 |
| 5.4 | Perfilometria da cratera de desgaste e parâmetros de rugosidade | 61 |
| 5.5 | Caracterização das partículas após ensaio de desgaste | 65 |
| 6 | CONCLUSÕES | 67 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 68 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 69 |
| | APÊNDICE A – EQUAÇÕES PARA ENSAIO DE MICRO-ABRASÃO | 74 |
| | APÊNDICE B – TRABALHO PUBLICADO – COBEF 2017 | 77 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O desgaste abrasivo vem sendo discutido constantemente em diversos estudos científicos (HUTCHINGS, 1992; WILLIAMS & HYNICICA, 1992; STACHOWIAK & STACHOWIAK, 2001; KRELLING *et al.*, 2017; PHANEENDRA & CHIKKANNA, 2017; TURATTI & PEREIRA, 2017) onde abrasivos podem ser utilizados desde o polimento até a remoção de material. Tal remoção pode se dar no sentido de minimizar a perda de massa de um sistema sujeito à presença de abrasivos ou no de melhorar a qualidade superficial em processo de fabricação (HUTCHINGS, 1992).

Um exemplo da utilização de abrasivos para a melhoria da qualidade superficial na indústria automotiva é o processo de usinagem por hidroerosão, o qual promove um arredondamento da região de entrada dos canais de injeção de motores a diesel (COSEGLIO, 2013). Este processo proporciona uma melhora na eficiência do *spray* de diesel na saída dos furos de injeção dos bicos injetores de combustível, acarretando em um melhor desempenho do sistema, que pode ter influência em uma redução de emissão de poluentes (POTZ *et al.*, 2000).

O fluido é considerado um dos fatores mais importantes no processo de hidroerosão. A remoção de material é dada pelo impacto das partículas presentes no fluido, o qual provoca um arredondamento nas regiões de entrada dos canais internos de injeção (MOREIRA, 2015). A eficiência do processo de hidroerosão está intimamente ligada à combinação e interação entre o fluido, as partículas abrasivas e o material do componente.

1.2 Caracterização do problema e justificativa

No processo de hidroerosão, após um determinado período de processamento sem intervenção no fluido circulante, a alteração na composição e nas características do fluido erosivo bem como das partículas presentes no fluido provocam uma redução da eficiência de remoção de material (MOREIRA, 2015).

Esta perda de capacidade de remoção pode ser atribuída a variações da concentração, geometria e distribuição de tamanho das partículas. Um fator determinante para a eficiência

da remoção é a concentração de abrasivos. Uma redução na quantidade de abrasivos no sistema resulta em uma diminuição do número de colisões, o que representa consequentemente um efeito negativo para a eficiência da remoção (COSEGLIO, 2013).

Efeitos de diferentes tipos de abrasivos sobre a integridade superficial de superfícies usinadas com fluxo abrasivo foram estudados por Gov & Eyercioglu (2016). Quatro grupos de meios abrasivos foram preparados com diferentes tipos de abrasivos: SiC, Al₂O₃, B₄C e granada. Resultados mostraram que a remoção de material está diretamente relacionada à dureza do abrasivo, ou seja, abrasivos de granada, Al₂O₃, SiC e B₄C proporcionaram remoções de material cada vez maiores, à medida que a dureza do abrasivo aumenta.

O custo despendido com a aquisição de determinadas partículas abrasivas utilizadas no processo de hidroerosão figuram entre os mais altos para os materiais de consumo de tal processo (MOREIRA, 2015). Logo, tal fato torna-se um motivador para que soluções alternativas sejam encontradas de forma a aumentar a eficiência do processo e a reduzir o impacto econômico gerado no processo de hidroerosão.

Diante do exposto, nota-se que uma análise da abrasividade das partículas abrasivas mostra-se importante para o estudo da eficiência da remoção de material. Como a quantificação do efeito da abrasividade ainda é deficiente, o estudo se propõe a contribuir com o desenvolvimento da tecnologia e entender os efeitos dos diferentes fatores relacionados às partículas abrasivas e as interações entre o fluido, as partículas sólidas e a superfície submetida ao desgaste.

1.3 Objetivo geral

O principal objetivo desse estudo é avaliar a abrasividade de partículas de carbetto de boro e de alumina através de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, a fim de verificar a possibilidade de obter resultados de remoção de material com as mesmas características e com uma melhor relação custo-benefício, visto que o custo de partículas de carbetto de boro é superior ao da alumina.

1.3.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Avaliar a influência de diferentes parâmetros do processo no ensaio de desgaste, tais como concentração de abrasivo na mistura, rotação da esfera e tempo de ensaio;
- Determinar o regime de desgaste apresentado;
- Verificar os fatores que mais contribuem para a eficiência na remoção de material.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica inicia-se com uma definição de desgaste abrasivo e a apresentação dos principais ensaios para se avaliar a abrasividade de partículas. A seguir, uma revisão sobre micro abrasão é apresentada e o ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa, suas grandezas geométricas e seus parâmetros são detalhados. Os modos de desgaste são analisados e os efeitos do tamanho, dureza, geometria e concentração das partículas abrasivas são discutidos. A revisão se encerra com uma análise do carbetto de boro (B_4C), da alumina (Al_2O_3) e do processo de usinagem por hidroerosão, motivador do estudo das partículas abrasivas.

2.1 Desgaste abrasivo

O termo desgaste pode ser definido como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo deste com outro corpo sólido, líquido ou gasoso (ZUM GAHR, 1987) e ocorre devido ao movimento relativo entre a superfície e o meio interfacial em contato (BARTALINI, 1999).

Segundo a AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM G40 (2015) a definição de desgaste abrasivo é citada como: “o desgaste abrasivo é a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras (abrasivo) que são forçadas contra uma superfície e se movem ao longo da mesma”.

O desgaste abrasivo é resultado da interação entre o material e o abrasivo, logo não se caracteriza como uma propriedade de um material, mas de um sistema. O comportamento do material não depende somente de suas propriedades, mas também das propriedades do abrasivo, da geometria das peças e das condições operacionais (BARTALINI, 1999).

De acordo com Stachowiak & Stachowiak (2001) o estudo da abrasividade, ou capacidade de remoção de material pelos abrasivos, deve incluir a angularidade das partículas abrasivas além de fatores como tamanho das partículas, durezas das partículas e da superfície de desgaste, carga e velocidade.

2.2 Abordagem de tipos de ensaio para analisar a abrasividade

No presente tópico, uma revisão dos seguintes ensaios para medir abrasividade é apresentada: ensaios para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75), ensaios de roda de borracha (ASTM G65) e micro abrasão, nas escalas micrométricas, e ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81), ensaio de abrasão por impacto cíclico e ensaio de abrasividade Cerchar, na escala milimétrica de tamanho de partículas. Em particular, futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de micro abrasão são apresentadas com maior detalhamento.

2.2.1 Ensaio para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75)

O ensaio que permite determinar um índice denominado número de Miller tem sido amplamente utilizado para medir a abrasividade relativa de muitas suspensões (UREEL & MOMAYEZ, 2014). Em 2001 foi adotado pela ASTM que estabeleceu a norma ASTM G75 “*Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)*”.

Esta norma apresenta um método de ensaio que descreve um procedimento laboratorial que pode ser usado para se encontrar dados relativos à abrasividade de qualquer lama (número de Miller) ou a resposta de diferentes materiais para a abrasividade de diferentes lamas (número SAR).

Conceitualmente, o número de Miller é uma medida de abrasividade relacionada à taxa de perda de massa de um bloco de metal padrão (liga Ferro-27%Cromo). O número é calculado a partir da curva de perda de massa acumulada em função do tempo, obtida com a realização de vários ensaios sucessivos e cumulativos (ASTM G75, 2015). A Figura 1 exibe um típico equipamento para o ensaio para determinação do número de Miller.



Figura 1 - Equipamento típico para ensaio de abrasão para identificação do número de Miller.

Fonte: Ureel & Momayez, 2014.

Neste ensaio uma carga direta é aplicada ao bloco de desgaste e no final de cada curso, este é retirado por tempo suficiente para permitir que o fluido abrasivo novo flua entre o bloco de desgaste e o corpo de prova (ASTM G75, 2015).

O Número SAR é uma medida da resposta à abrasão relativa de qualquer material em qualquer fluido abrasivo, onde se relacionam taxa de perda de massa de uma amostra, a partir da curva de perda de massa acumulada em função do tempo obtida segundo o mesmo procedimento para determinação do número de Miller. A evolução do desgaste é registrada acumulando-se a perda de massa em intervalos regulares durante o ensaio (ASTM G75, 2015).

O ensaio para determinação do número SAR é mais abrangente que o ensaio para o número de Miller, pois ao invés de adotar um material padrão a ser desgastado, ele permite avaliar a resposta de vários materiais. Então, constitui-se em um ensaio recomendado para a seleção adequada de materiais.

2.2.2 Ensaio de roda de borracha (ASTM G65)

O ensaio abrasivo de roda de borracha é estabelecido pela norma ASTM G65 (2016). O seu princípio consiste em desgastar um corpo de prova padronizado com areia, cujo tamanho de grão, fluxo e composição são conhecidos e controlados. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando o desgaste.

Nesse equipamento, um motor de corrente contínua aciona o contra-corpo, que consiste de um disco metálico recoberto por um anel de borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore A. Como ilustra a Figura 2, a amostra é fixada a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força normal à amostra via peso morto, enquanto o fluxo de abrasivo escoia por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a presença de abrasivo novo durante a realização do ensaio de desgaste.

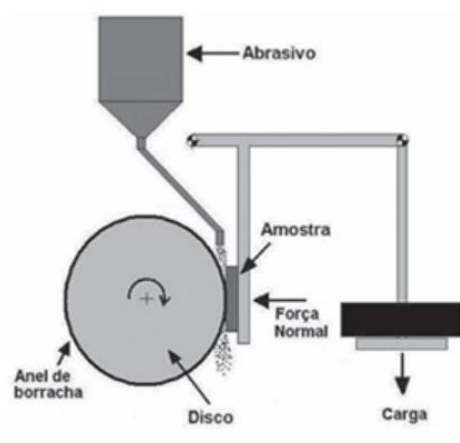


Figura 2 - Diagrama esquemático do aparato de ensaio de roda de borracha.

Fonte: Adaptado de ASTM G65, 2016.

A configuração deste sistema permite a utilização de um contra-corpo com baixa dureza e promove o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. Os eventos resultantes da movimentação das partículas abrasivas apresentam um forte direcionamento de acordo com o movimento do contra-corpo.

Woldman *et al.* (2012) estudaram a influência das propriedades das partículas de areia sobre o desgaste abrasivo utilizando areia seca (*Rubber Wheel Abrasion Test* - RWAT). Mostrou-se que diferentes variedades de areia apresentam diferentes taxas de desgaste específicas. O tamanho, a forma e a dureza da partícula e a taxa de alimentação de abrasivo não podem explicar essas diferenças separadamente. Contudo, quando se utiliza uma combinação destas propriedades de partícula, pode-se derivar uma relação entre as propriedades da areia e a abrasão que é causada.

Alguns resultados mostram que a abrasividade de partículas pode ser determinada usando o ensaio roda de borracha. Por exemplo, Fulcher *et al.* (1983) investigaram o papel da fração volumétrica de carboneto na resistência à abrasão. A resistência à abrasão das ligas foi medida contra areia de quartzo (SiO_2) e alumina (Al_2O_3).

Resultados ilustrados na Figura 3 mostram que a resistência à abrasão chegou a um valor máximo para uma fração volumétrica de carboneto intermediária próximo da composição eutética para o quartzo, enquanto que a perda de massa diminuiu monotonicamente com a fração volumétrica de carboneto para testes com o Al_2O_3 mais duro (FULCHER *et al.*, 1983).

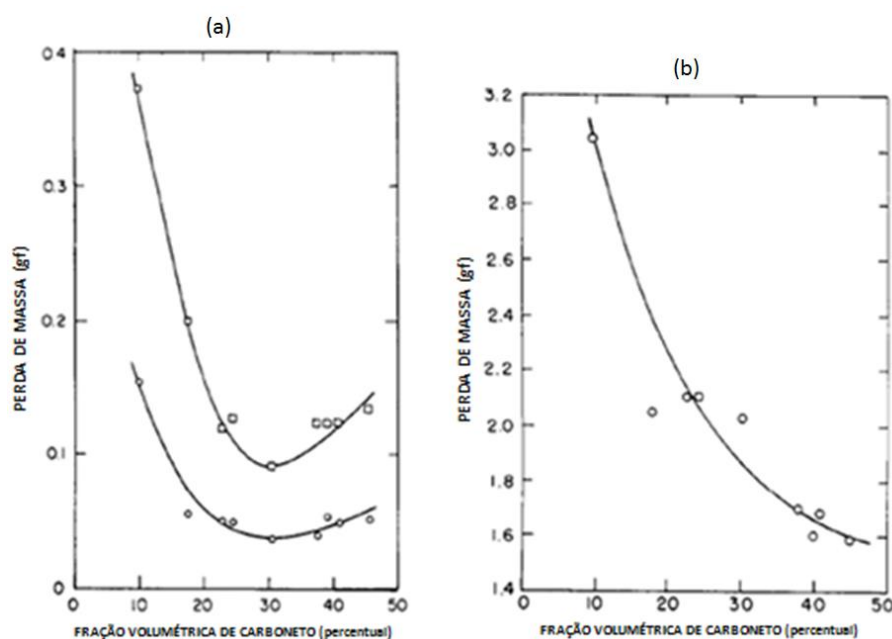


Figura 3 - Perda de massa de ferro fundido branco como função da fração volumétrica de carboneto com SiO₂ (a) e Al₂O₃ (b).

Fonte: Adaptado de Fulcher *et al.*, 1983.

A dureza do abrasivo em relação à superfície desgastada é um fator importante na determinação da resistência ao desgaste, e esse fator é pelo menos, parcialmente, responsável pelas diferenças de comportamento do SiO₂ e do Al₂O₃ (FULCHER *et al.*, 1983).

2.2.2.1 Ensaio de abrasão com roda de aço

O ensaio de abrasão com roda de aço (*Steel Wheel Abrasion Test - SWAT*) apresenta um bom potencial para o controle e medição de todas as variáveis que afetam o desgaste abrasivo (RADZISZEWSKI, 2009).

Radziszewski (2009) mostrou que o desgaste abrasivo com roda de aço em condições secas depende da interação entre o material da amostra, do abrasivo e da carga aplicada.

Petrica *et al.* (2013) realizaram ensaios de desgaste abrasivo a três corpos através de um método de ensaio de abrasão modificado a partir do ensaio de roda de borracha com areia seca. Um dispositivo, exemplificado na Figura 4, equipado com uma roda de aço em vez da roda de borracha foi usado para o teste de abrasão (*Slurry Steel Wheel Abrasion Test - SSWAT*).

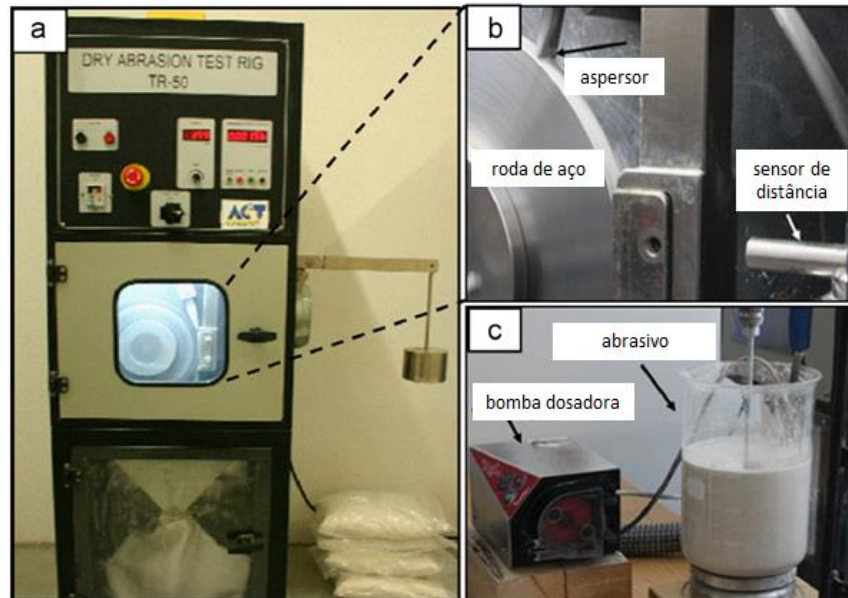


Figura 4 - Equipamento para ensaio abrasivo SSWAT: (a) dispositivo; (b) câmara de testes; (c) dispositivo para adição de abrasivo.

Fonte: Adaptado de Petrica *et al.*, 2013.

As maiores taxas de desgaste foram observadas em testes com o quartzo como abrasivo. O quartzo resultou em uma taxa de desgaste 7,5 vezes superior a do granito, que conduziu ao menor desgaste de todos os abrasivos testados, como ilustrado na Figura 5.

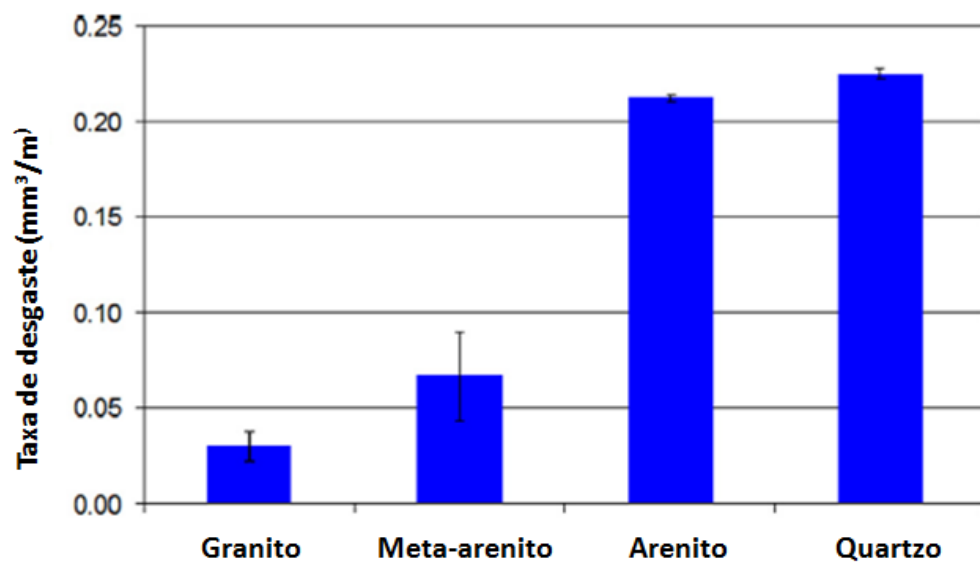


Figura 5 - Taxa de desgaste para abrasão a três corpos para aço martensítico com diferentes abrasivos.

Fonte: Adaptado de Petrica *et al.*, 2013.

Neste trabalho os autores observaram que uma superfície fortemente deformada é obtida na abrasão a três corpos com os diferentes abrasivos. Os mecanismos de desgaste podem ser descritos como arranhões e ranhuras combinados com múltiplas indentações no caso do granito, onde a menor taxa de desgaste foi obtida, devido a partículas de granito rolantes / deslizantes. Já as ranhuras pronunciadas são causadas por partículas de quartzo duro.

A Figura 6 mostra a correlação entre o teor de quartzo equivalente e a taxa de desgaste em condições de abrasão a três corpos. O granito tem o menor valor percentual de quartzo equivalente levando a uma menor taxa de desgaste e, além disso, a energia específica necessária para o granito produzir desgaste é alta. Por outro lado, o arenito tem o maior valor de quartzo equivalente e produz a maior taxa de desgaste de todos os abrasivos testados. A energia de desgaste específica mostra um valor baixo, e isso faz o arenito altamente abrasivo no caso de condições a três corpos (PETRICA *et al.*, 2013).

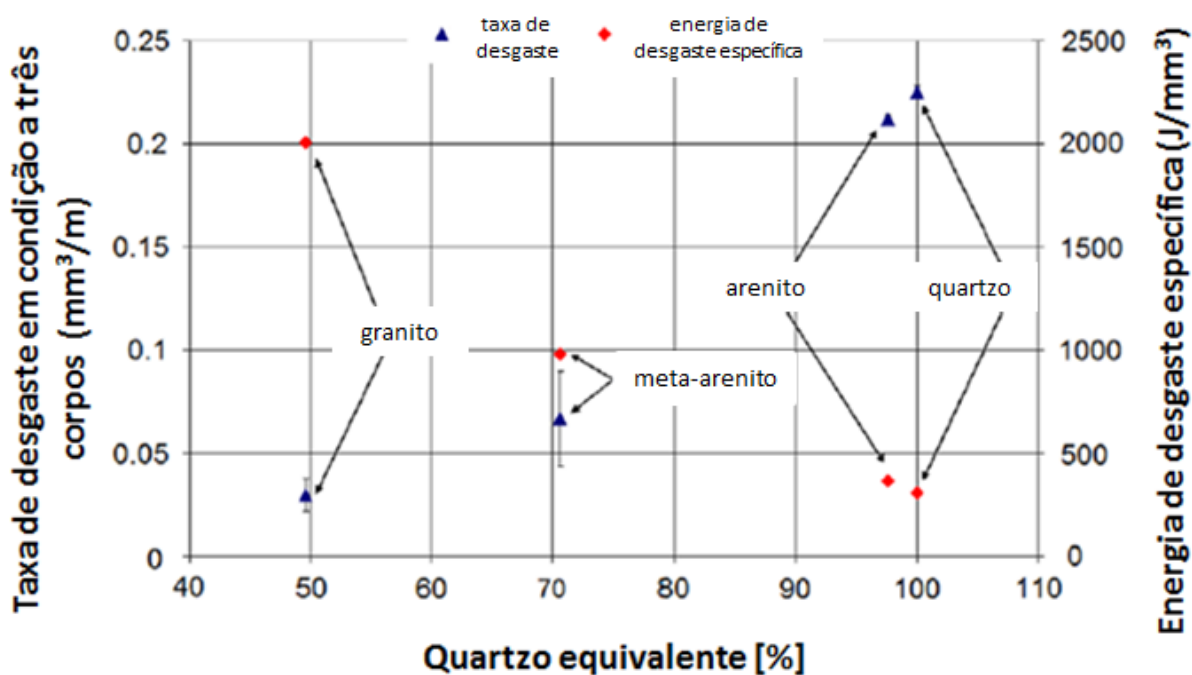


Figura 6 - Relações entre taxa de desgaste, conteúdo de quartzo e energia de desgaste específica para condições de desgaste a três corpos.

Fonte: Adaptado de Petrica *et al.*, 2013.

2.2.3 Ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81)

O ensaio em britadores de mandíbulas, normalizado pela norma ASTM G81 (2013), determina a resistência à abrasão de materiais e simula abrasão sob condições de impacto (PETRICA *et al.*, 2013).

Diferentes tipos de trituradores de mandíbula têm sido usados para ensaios de abrasão, e uma quantidade limitada de dados tem sido publicada. Este método de ensaio classifica os materiais através desse tipo de abrasão definido como abrasão de goivagem, como é encontrado em equipamentos de britagem e em muitas aplicações de mineração (ASTM G81, 2013).

Materiais homogêneos em sua estrutura e propriedades são os mais apropriados para esse ensaio (ASTM G81, 2013). Esta prática permite fazer uma escala de materiais em equipamentos de britagem e em algumas aplicações na mineração e movimentação de solo, pois o desgaste pode variar drasticamente com a mudança das características (geológica, química, geométrica e mecânica) do material britado e do tipo de equipamento (BARTALINI, 1999).

Resultados de Bartalini (1999) em ensaios de britador de mandíbulas mostram que a ordem crescente de abrasividade das rochas ensaiadas para mandíbulas fixa e móvel é: calcário → carbonatito → basalto → diabásio → granito → quartzito. Esta ordem mostra que o principal fator no desgaste das mandíbulas é o conteúdo de quartzo nas rochas britadas.

2.2.4 Ensaio de abrasão por impacto cíclico

Petrica *et al.* (2013) realizaram ensaios de desgaste abrasivo utilizando um método de ensaio denominado abrasão por impacto cíclico (*Cyclic Impact Abrasion Test* - CIAT) a dois corpos onde as amostras são montadas em um tambor externo que gira lentamente, como representado na Figura 7.

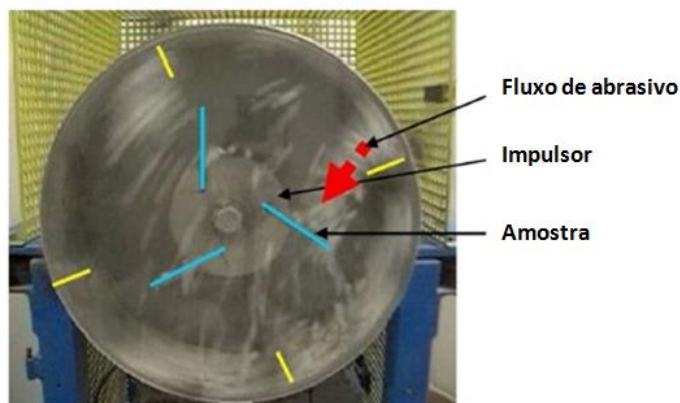


Figura 7 - Equipamento utilizado para ensaio abrasivo CIAT.

Fonte: Petrica *et al.*, 2013.

Resultados mostraram que alta resistência à compressão uniaxial, como no caso do granito, produz mecanismos tais como *cutting* ou *ploughing*. Valores intermediários de resistência à compressão uniaxial produz mecanismos tais como a deformação plástica e sulcos de abrasão, enquanto que baixos valores de resistência à compressão uniaxial resultam na incrustação abrasiva pronunciada na superfície metálica (PETRICA *et al.*, 2013).

2.2.5 Ensaio de abrasividade Cerchar

O ensaio de abrasividade Cerchar tem se destacado como um teste amplamente utilizado e seu procedimento é estabelecido pela norma ASTM D7625, 2010. O princípio de ensaio baseia-se em um risco contra a superfície de uma amostra de rocha (corpo) em uma distância de 10 mm, realizado por um pino de aço (contra-corpo), com geometria e dureza definidas, sob carga estática de 70N. O índice de abrasividade Cerchar (*CAI - Cerchar-Abrasivity-Index*) é calculado a partir do diâmetro do desgaste resultante medido em plano sobre o pino pela Equação 1 (KÄSLING & THURO, 2010).

$$CAI = 10 * \frac{d_d}{c} \quad (1)$$

Onde CAI: índice de abrasividade Cerchar (-); d_d : diâmetro da superfície desgastada (mm), ilustrado na Figura 8 e c: fator de correção (c = 1 mm).

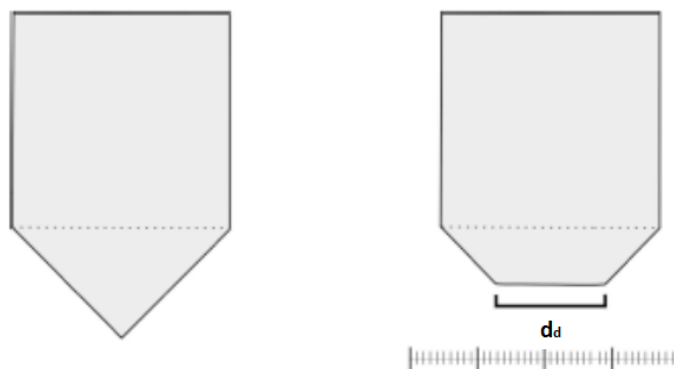


Figura 8 - Esboço do pino de aço com forma piramidal antes do ensaio (esquerda) e após o ensaio (direita) com o plano de desgaste d_a .

Fonte: Käsling & Thuro, 2010.

Plinninger *et al.* (2004) indicam que o índice de abrasividade CERCHAR tem aplicabilidade como um indicativo para a abrasividade de rochas. Käsling & Thuro (2010) afirmam que os resultados confiáveis destes testes são necessários para garantir a obtenção de informações sobre a abrasividade das rochas.

2.3 Micro abrasão

O ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa foi inicialmente desenvolvido para medir a espessura dos revestimentos, entretanto, pelo seu potencial, pode ser utilizado também para estimar o comportamento do desgaste abrasivo de um sistema em condições reais de trabalho.

Em ensaios de desgaste por micro abrasão, uma força normal comprime a amostra contra uma esfera na presença de uma pasta abrasiva e o desgaste é analisado com base na evolução do diâmetro da cratera em função do tempo (GANT & GEE, 2011). Uma das principais características deste ensaio é a identificação dos modos de desgaste na amostra, que são normalmente classificados em abrasão por riscamento e abrasão por rolamento (TREZONA *et al.*, 1999; ADACHI & HUTCHINGS, 2005).

Vários estudos de modo de desgaste são baseados na mecânica do movimento de partículas. Mais especificamente, as cargas e restrições em uma partícula abrasiva são avaliadas a fim de compreender as condições que resultariam na sua rotação no interstício entre os dois corpos em contato (WILLIAMS & HYNICICA, 1992; TREZONA *et al.*, 1999; ADACHI & HUTCHINGS, 2005).

Trezona *et al.* (1999) estudaram o efeito da carga, da concentração da pasta abrasiva e do material abrasivo. Observou-se um comportamento não linear quando o volume de desgaste foi traçado como uma função da fração de volume de partículas abrasivas. Valores máximos no volume de desgaste foram observados em curvas obtidas para diferentes cargas normais. Além disso, com baixas concentrações de abrasivos, foram obtidos volumes de desgaste semelhantes para três cargas normais aplicadas.

Stachowiak *et al.* (2006) verificaram que a morfologia da superfície de desgaste é também afetada pela angularidade das partículas e pelas propriedades dos materiais envolvidos.

2.3.1 Uso do ensaio de desgaste micro abrasivo

O ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa foi desenvolvido por Rutherford & Hutchings (1996). Tal ensaio é usado principalmente para medir a espessura e a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos finos ou camadas superficiais (STACHOWIAK & STACHOWIAK, 2004) e equipamentos comerciais baseados neste método estão disponíveis (CSEM *Calotest*, *Calowear* e *Plint TE-66*).

Inicialmente, a finalidade desse ensaio era somente determinar a espessura de revestimentos e também aplicado no controle de qualidade (SCHIFFMANN *et al.*, 2005). Entretanto, devido ao grande potencial do ensaio, este é aplicado em diversas pesquisas que envolvem o desgaste abrasivo de materiais metálicos e não metálicos recobertos ou não (KUSANO & HUTCHINGS, 2005; GEE *et al.*, 2005) e de superfícies revestidas de engenharia (GEE *et al.*, 2005).

O ensaio de abrasão em microescala tem sido cada vez mais usado para testar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais como metais não ferrosos e suas ligas (RUTHERFORD & HUTCHINGS, 1997; TREZONA *et al.*, 1999; ASTM G65, 2016), aços para ferramentas (STACHOWIAK & STACHOWIAK, 2004), aço carbono simples (RUTHERFORD & HUTCHINGS, 1997), cerâmica (STACHOWIAK & STACHOWIAK, 2004), vidro (ASTM G65, 2016), polímeros (STACHOWIAK & STACHOWIAK, 2004) e até mesmo compósitos restauradores dentários (RUTHERFORD & HUTCHINGS, 1996). Pesquisas recentes mostraram que o ensaio de desgaste abrasivo com esfera rotativa também é

adequado para caracterizar o poder abrasivo de grãos com diferentes angularidades, isto é, medir a abrasividade das partículas abrasivas (KELLY & HUTCHINGS, 2001).

Segundo Rutherford & Hutchings (1997), ensaio de desgaste micro abrasivo com esfera rotativa pode ser estendido para materiais recobertos, podendo os coeficientes de desgaste do substrato e do recobrimento serem calculados a partir de um único teste. Neste caso, podem ser aplicados testes perfurantes ou não perfurantes, sendo que, no primeiro, o processo de desgaste é realizado até que o substrato seja exposto, possibilitando a determinação do coeficiente de desgaste do recobrimento e do substrato. Já para os testes não perfurantes a cratera de desgaste não ultrapassa o limite de espessura do filme, permitindo a avaliação da resistência ao desgaste do recobrimento sem a interferência do substrato (SCHIFFMAN *et al.*, 2005).

Adicionalmente, o ensaio microabrasivo tem sido usado na avaliação da sinergia abrasão-corrosão (Wood *et al.*, 2010), sendo este tópico fora do escopo desta Dissertação.

2.3.2 Determinação de taxas de desgaste por esfera rotativa

O ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa vem sendo amplamente adotado em estudos envolvendo desgaste abrasivo de materiais (STACHOWIAK *et al.*, 2006; COZZA, 2011; TURATTI & PEREIRA, 2017; KRELLING *et al.*, 2017; PHANEENDRA & CHIKKANNA, 2017). A Figura 9 ilustra, de forma esquemática, o princípio do ensaio de desgaste.

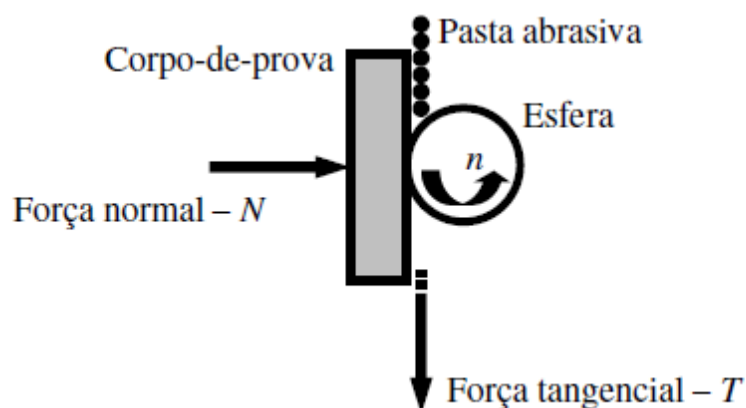


Figura 9 - Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa.

Fonte: Cozza, 2011.

De acordo com a Figura 10, a esfera, sob movimento de rotação (n), encontra-se em contato com o corpo-de-prova. Uma pasta abrasiva, geralmente composta por um pó abrasivo disperso em solução é utilizada durante a realização dos ensaios. A aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova, o contato e o movimento relativo entre os componentes do sistema tribológico gera uma força tangencial e conseqüentemente uma calota esférica forma-se no corpo de prova (COZZA *et al.*, 2009). Dependendo do tipo de ensaio, a esfera rotativa pode estar fixa ou livre.

Duas configurações de equipamento para o ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa são utilizadas: ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa e ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa livre (COZZA, 2011).

Na configuração esfera livre, que é a utilizada neste trabalho, a esfera é apoiada sobre o eixo-motor. A mesma se movimenta em sentido de rotação contrário ao eixo, o qual é acionado por um motor elétrico. A força normal atuante sobre o corpo-de-prova pode ser variada em função da inclinação do corpo-de-prova e da dimensão da esfera. A Figura 10 ilustra esse tipo de equipamento.

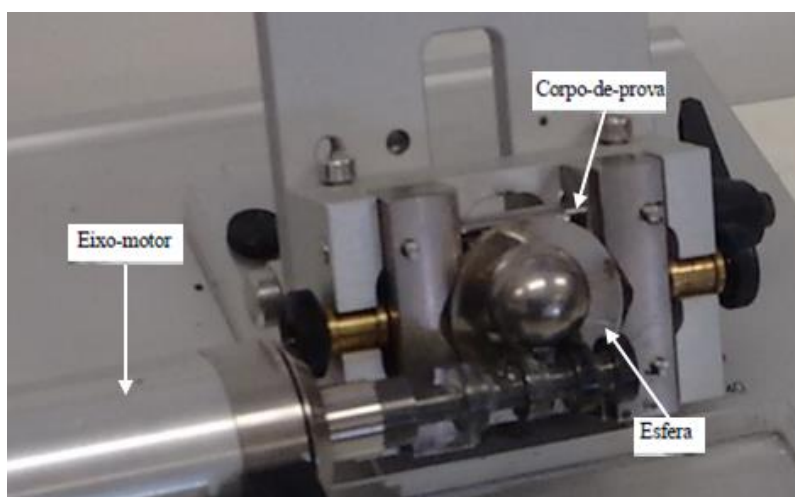


Figura 10 - Equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa livre.

Fonte: Autoria própria.

Na configuração esfera fixa, conforme mostra a Figura 11, a mesma é fixada em um eixo-motor e tem a mesma velocidade e sentido de rotação do eixo. A força normal aplicada é ajustada por um sistema auxiliar, que pode ser um sistema de peso-morto ou uma mesa de translação.



Figura 11 - Equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa.

Fonte: Cozza, 2011.

Ambos os ensaios geram calotas esféricas no corpo de prova e a análise destas calotas permite a avaliação do comportamento ao desgaste abrasivo do material em estudo.

2.3.2.1 Modos e mecanismos de desgaste abrasivo

Dois modos de desgaste podem ocorrer durante os ensaios de desgaste micro abrasivo (HUTCHINGS, 1992): abrasão a "três corpos" ou abrasão a "dois corpos" ou desgaste abrasivo por "rolamento" e desgaste abrasivo por "riscamento", respectivamente (TREZONA *et al.*, 1999).

O "riscamento" é resultado quando partículas abrasivas deslizam sobre a superfície do corpo de prova, enquanto o "rolamento" é observado quando partículas abrasivas rolam sobre a superfície do corpo de prova (TREZONA *et al.*, 1999). As marcas de desgaste podem ser observadas na Figura 12.

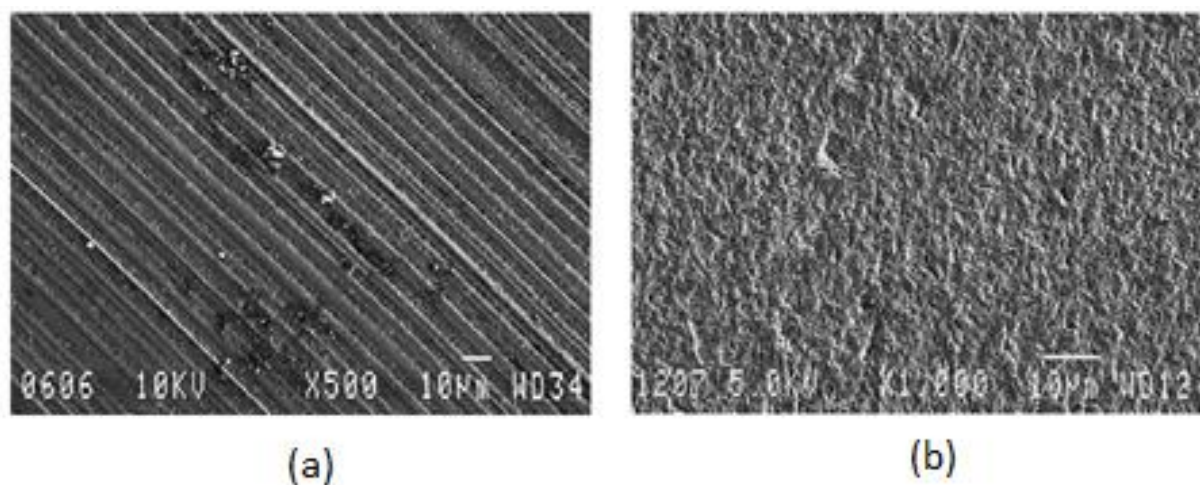


Figura 12 - Marcas de desgaste abrasivo por riscamento para um copo de prova de aço ferramenta desgastado por esfera de aço e partículas abrasivas de diamante (a) e por rolamento para um copo de prova de aço ferramenta desgastado por esfera de aço e partículas abrasivas de SiC (b).

Fonte: Trezona *et al.*, 1999.

Dependendo das condições de ensaio, há uma predominância de ocorrer "riscamento", "rolamento", ou a ocorrência simultânea de ambos os modos (ADACHI & HUTCHINGS, 2005). Cozza *et al.* (2007) sugerem que partículas abrasivas maiores estão sujeitas a forças normais maiores. Logo, essas partículas realizam somente movimento de translação e geram somente riscamento. Já as partículas abrasivas menores, as quais estão submetidas a forças normais menores, estão sujeitas a rotação + translação. Logo, o movimento de translação das partículas maiores e movimento de rotação + translação das partículas menores podem produzir o chamado "micro-rolling abrasion".

Esse terceiro modo de desgaste (o "modo misto"), no qual se observa a ocorrência da sobreposição do "grooving abrasion" (riscamento) no centro da cratera de desgaste e do "rolling abrasion" (rolamento) nas bordas, é denominado de "micro-rolling abrasion". A Figura 13 apresenta uma imagem desse fenômeno, onde A_t é a área total da cratera de desgaste, A_g a área com desgaste por riscamento e A_r a área com desgaste por rolamento.

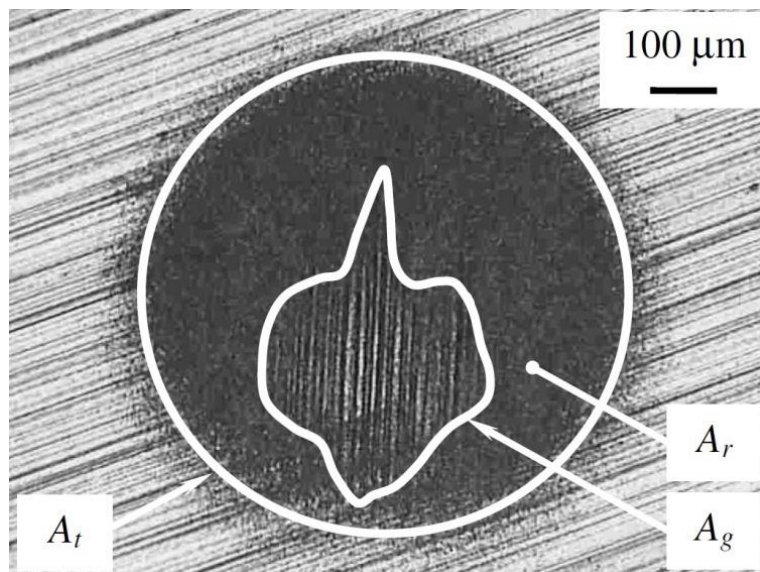


Figura 13 - Desgaste abrasivo com atuação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e riscamento.

Fonte: Cozza *et al.*, 2007.

A maneira como as partículas interagem com a superfície influencia fortemente no comportamento de desgaste. As partículas podem rolar e / ou deslizar sobre a superfície e, de acordo com esta suposição, os mecanismos de desgaste resultantes também podem diferir. É geralmente mostrado que em condições de desgaste a três corpos a taxa de desgaste é menor do que em condições a dois corpos, principalmente devido à mudança de interação entre as partículas e a superfície (TREZONA *et al.*, 1999).

Um aspecto importante na descrição do desgaste abrasivo que ocorre sob condições de dois ou três corpos é a caracterização das partículas abrasivas, pois as propriedades das partículas têm impacto na caracterização do comportamento de desgaste. Na literatura, o desgaste abrasivo de dois e três corpos tem sido estudado em detalhe nos últimos anos, porém apenas alguns concentraram seu estudo na análise dos abrasivos e suas propriedades, os quais geram desgaste (PETRICA *et al.*, 2013).

2.3.2.2 **Grandezas geométricas relacionadas**

A partir do ensaio de desgaste por esfera rotativa são geradas calotas esféricas, também chamadas de crateras de desgaste. Em uma cratera esférica de desgaste três grandezas geométricas são geralmente analisadas: o diâmetro (d), a profundidade (h) e o volume de material removido (V). A Figura 14 exemplifica tais grandezas.

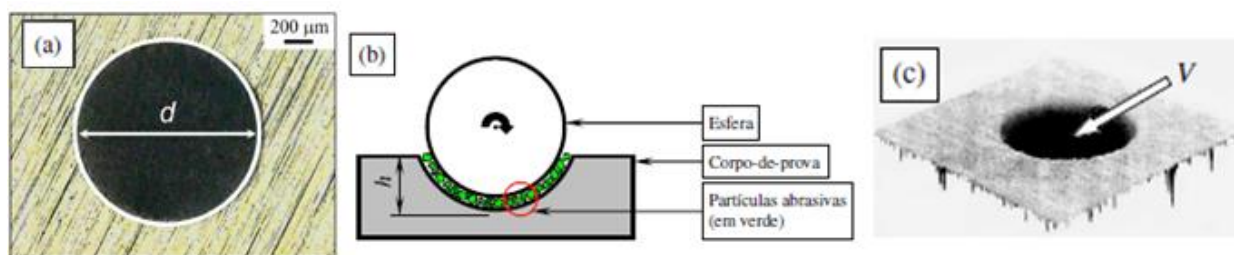


Figura 14 - Grandezas geométricas (a) diâmetro d ; (b) profundidade h ; (c) volume V obtidas a partir do ensaio de desgaste por esfera rotativa.

Fonte: Cozza *et al.*, 2009.

Um dos métodos para se medir o diâmetro d da calota é por meio da técnica chamada de microscopia ótica (MO). Já a profundidade (h) e o volume de material removido (V) podem ser calculados pelas Equações 2 e 3 (deduzidas no Apêndice B).

$$h = 12,70 - \sqrt{161,29 - 0,25d^2} \quad (2)$$

$$V = \pi\left(12,7h^2 - \frac{h^3}{3}\right) \quad (3)$$

Unidades: h [mm], d [mm], e V [mm³].

Os ensaios podem ser conduzidos sobre força normal constante ou não-constante sobre o corpo-de-prova. Além da força normal, diversos outros parâmetros, como rotação da esfera, material da esfera e do corpo-de-prova, entre outros, podem ser variados para análise da variação das condições de ensaio por esfera rotativa, conforme apresentado a seguir.

2.3.2.3 Parâmetros de ensaio e coeficiente de desgaste

Os parâmetros normalmente utilizados em ensaios de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa são os que seguem: velocidade de deslizamento, carga normal aplicada, diâmetro e rotação da esfera de ensaio, distância de deslizamento, dureza, forma e tamanho das partículas abrasivas, quantidade de abrasivo na mistura, viscosidade do fluido da mistura, vazão da mistura e materiais dos corpos de prova.

A variação desses fatores pode alterar a intensidade do desgaste gerado no corpo-de-prova, e esta pode ser verificada pela mudança no volume da cratera de desgaste formada ou pela mudança no coeficiente de desgaste.

O coeficiente de desgaste (k) pode ser definido como o volume de material desgastado por unidade de força e por unidade de distância de deslizamento ($\frac{mm^3}{N.m}$). Quando o coeficiente de desgaste permanece constante ao longo do tempo o processo de desgaste atinge o regime permanente.

O coeficiente de desgaste (k) pode ser calculado pela Equação 4, de acordo com Cozza (2006).

$$k = \frac{d^4}{128NR^2tn} \quad (4)$$

Sendo R [mm] é o raio da esfera, N [N], t [s] e n [rpm] são parâmetros de ensaio (força normal, tempo de ensaio e rotação da esfera, respectivamente) e d [mm] o diâmetro da cratera de desgaste.

A Figura 15 apresenta resultados de ensaios realizados com um corpo-de-prova de aço ferramenta AISI D2 revestido com um filme com espessura de 2 μm de nitreto de titânio (TiN). Uma esfera de aço rápido AISI 52100 de diâmetro de 25,4 mm foi utilizada sob uma rotação de 37,6 rpm. Partículas abrasivas de carbetto de silício (SiC) preto com tamanho médio de 5 μm foram selecionadas para produzir uma pasta abrasiva com concentração de 25% de SiC e 75% de água destilada. O regime permanente de desgaste foi obtido a partir de 800 segundos de ensaio (COZZA *et al.*, 2009).

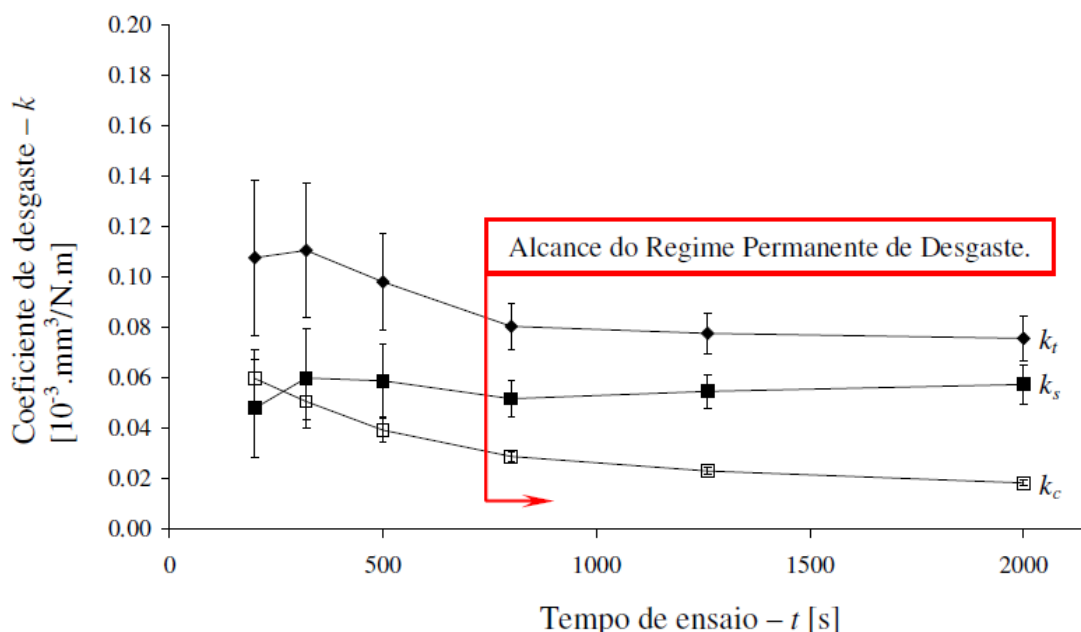


Figura 15 - Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio para ensaios realizados em um corpo-de-prova revestido com nitreto de titânio.

Fonte: Cozza *et al.*, 2009.

Os termos k_t , k_s e k_c referem-se ao coeficiente de desgaste total, coeficiente de desgaste do substrato e coeficiente de desgaste do revestimento, respectivamente.

Não existe um tempo de ensaio padrão para o qual o desgaste atinja o regime permanente de desgaste. Tal tempo depende de variáveis como materiais do corpo-de-prova e da esfera de ensaio, força normal, tamanho médio e forma das partículas abrasivas, entre outros.

2.3.2.4 Efeito do tamanho, dureza, geometria e concentração das partículas no comportamento ao desgaste micro abrasivo

A resistência ao desgaste abrasivo depende das condições de ensaio e/ou do tribossistema envolvido. A taxa e os mecanismos de desgaste podem diferir significativamente com diferentes condições de ensaio, como velocidade de deslizamento ou carga normal aplicada (ADACHI *et al.*, 1997). O modo de desgaste pode ser alterado em função da carga aplicada, das partículas abrasivas, da concentração de abrasivo na mistura, da condição da superfície e da natureza da esfera e também da forma e do material que compõe a partícula abrasiva (STACHOWIAK *et al.*, 2006). A geometria das partículas que compõem a

fase sólida do fluido também se mostra determinante na taxa de remoção de material (DESALE *et al.*, 2006).

A geometria, a dureza e o tamanho das partículas abrasivas podem ser consideradas as características mais importantes que afetam a taxa de desgaste. É possível verificar na literatura que quanto maior a dureza destas partículas, maior a tenacidade à fratura, como representado na Figura 16 (PINTAÚDE, 2011).

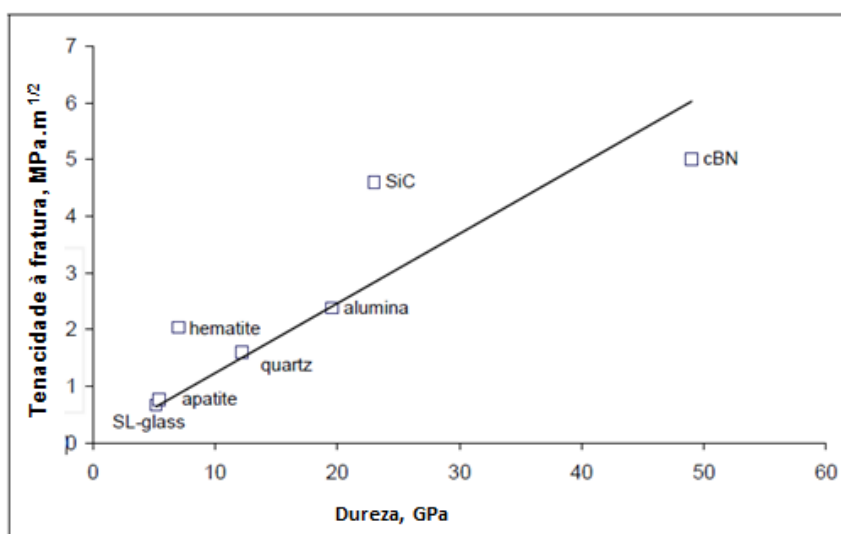


Figura 16 - Dureza em função da resistência à fratura para diferentes materiais abrasivos.

Fonte: Adaptado de Pintaúde, 2011.

Um possível efeito decorrente da fragmentação de partículas é a redução de tamanho, o que afeta as taxas de desgaste. O conhecido efeito de tamanho de partícula em taxas de desgaste foi estudado por Coronado & Sinatora (2009) em ensaio pino-contra-lixia para o ferro fundido com diferentes teores de austenita retida.

Pode ser observado na Figura 17 um aumento de perda de massa com o aumento do tamanho do abrasivo, até cerca de 70 μm . Após esta faixa, as perdas de massa não aumentam na mesma taxa.

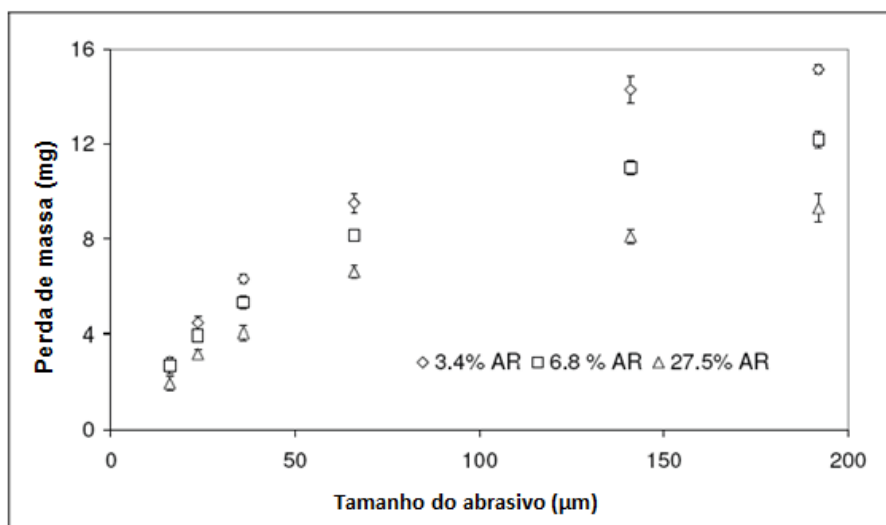


Figura 17 - Efeito do tamanho do abrasivo na perda de massa de ferro fundido com diferentes teores de austenita retida.

Fonte: Adaptado de Coronado & Sinatora, 2009.

Autores explicaram esse comportamento do efeito do tamanho considerando a geometria da partícula. Sin *et al.* (1979) assumiram que as partículas abrasivas apresentam forma cônica com uma ponta hemisférica. Assim, foi explicado o efeito do tamanho das partículas sobre as taxas de desgaste devido às mudanças no raio de ponta. Portanto, quanto menor a partícula abrasiva, maior o raio da ponta, isto é, as pequenas partículas têm pontas arredondadas, e pode-se supor uma superfície de abrasão da mesma forma como a de partículas esféricas.

A combinação de parâmetros leva a diferentes comportamentos e modos de desgaste, e a maneira como as partículas interagem com a superfície influencia fortemente o comportamento de desgaste.

2.3.2.5 Espessura de filme, tamanho da partícula e razão de dureza

Williams & Xie (1992) verificaram a influência da espessura da película em relação à dimensão máxima das partículas abrasivas. Para essa análise a partícula foi definida como um longo prisma com uma seção transversal rômbrica, como indicado na Figura 18.

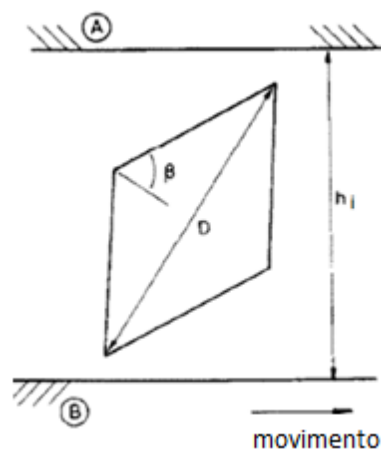


Figura 18 - Partícula abrasiva descrita pelos parâmetros D e β . Superfície inferior movendo-se da esquerda para a direita.

Fonte: Adaptado de Williams & Xie, 1992.

A diagonal maior da seção transversal é D e o ângulo β (que descreve a sua forma) deve ser tal que $45^\circ < \beta < 90^\circ$. A espessura da película é h_i e a superfície inferior (B) se move da esquerda para a direita em relação à superfície superior (A).

Os resultados de Williams & Xie (1992) mostram que para uma relação $(D/h_i = \sec[\beta])$ - considerando-se D a diagonal principal da partícula idealizada e h_i a espessura de filme) pequena (ângulos β menores que 55°), a superfície apresenta padrão de desgaste aleatório, com poucos sinais de direcionamento. Para um aumento dessa relação (D/h_i) , a superfície apresenta um agrupamento de ranhuras paralelas e espaçadas. Com um valor da razão (D/h_i) pequeno, a partícula atravessa a espessura de filme fazendo apenas impactos ocasionais com as superfícies sólidas produzindo poucos danos e com poucos sinais de direcionamento.

Além do efeito da morfologia da partícula para uma distância determinada entre os corpos com maior e menor dureza, algumas partículas poderão ter o movimento de rolamento e outras de deslizamento (Williams & Xie, 1992).

Em alguma relação crítica entre a dimensão das partículas e a espessura da película, o modo de desgaste da superfície muda para um caracterizado por ranhuras paralelas e espaçadas em um ou ambos os sólidos. Se as superfícies são de dureza comparável, ambas apresentarão desgaste nas superfícies de desgaste. No entanto, se uma das superfícies é mais macia do que a outra, as partículas podem se incrustar nesta e assim produzir mais danos na superfície mais dura, provocando um desgaste com ranhuras paralelas e espaçadas no material de maior dureza. A implicação é que a severidade de contato no desgaste abrasivo na

superfície mais dura pode ser aumentada, e o volume de desgaste e danos da superfície crescer, como resultado do aumento dessa relação de dureza (Adachi & Hutchings 2003).

O desgaste abrasivo também pode ser estudado através da interdependência das razões de dureza entre duas superfícies de contato (H_b/H_j) e a superfície mais dura e as partículas abrasivas (H_j/H_a) (Xuan *et al.*, 1989).

Os resultados de Xuan *et al.* (1989) indicaram uma diminuição do desgaste com o decorrer do tempo de ensaio devido à quebra das pontas das partículas. Como o número de partículas abrasivas permaneceu praticamente o mesmo, pode-se concluir que não houve incrustação das partículas no material menos duro.

Xuan *et al.* (1989) ainda verificaram que o volume de desgaste aumentou com a diminuição da razão de durezas do corpo-de-prova e das partículas. Além disso, o volume de desgaste diminuiu quando uma superfície é muito mais dura que a outra.

Pode-se afirmar, então, que as durezas das superfícies e dos abrasivos são variáveis que afetam o desgaste abrasivo. Quando uma superfície é muito mais dura que a outra (H_b/H_j pequeno) e a razão de dureza da superfície mais dura para a dos abrasivos é alta (H_j/H_a alto) a taxa de desgaste é pequena. Assim como diminuir a dureza de um dos pares de um par tribológico lubrificado pode aumentar o dano sofrido pela superfície mais dura (Xuan *et al.* 1989).

2.3.2.6 Severidade de contato e número de partículas entre a esfera e o corpo-de-prova

De acordo com Adachi & Hutchings (2003), a severidade de contato S e a relação de dureza entre a esfera e corpo-de-prova presumem o tipo de movimento das partículas abrasivas.

A Figura 19 mostra a atuação de uma partícula abrasiva submetida à força ΔN , que age sobre uma única partícula abrasiva. D_E é a profundidade de penetração da partícula abrasiva na esfera de ensaio e D_S a profundidade de penetração da partícula abrasiva no corpo-de-prova.

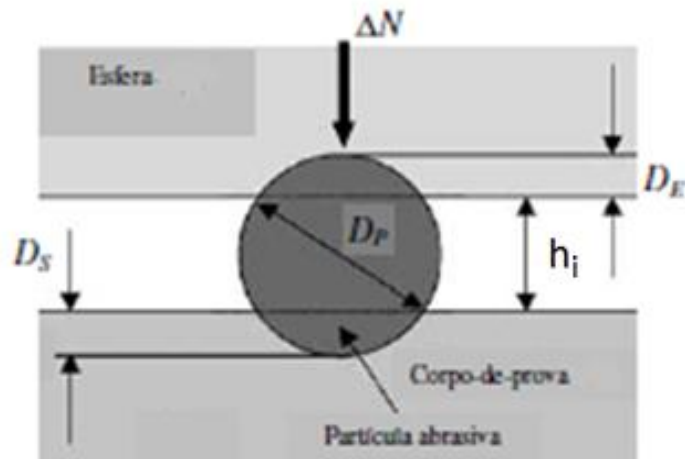


Figura 19 - Interação de uma partícula e as superfícies da esfera e da amostra submetida à ΔN .

Fonte: Adaptado de Adachi & Hutchings (2003).

Adachi & Hutchings (2003) mostraram que a condição crítica para a transição do movimento de riscamento para o de rolamento, para certo valor de (D/h_i) , deve ocorrer em um valor crítico da severidade de contato $(N/A\upsilon H')$, onde N é a carga aplicada entre a esfera e o corpo-de-prova, A é a área de interação entre a partícula abrasiva e as superfícies da esfera e da amostra para 1 rotação da esfera, υ a fração em volume de abrasivo na mistura e H' dado pela Equação 5.

$$\frac{1}{H'} = \frac{1}{H_b} + \frac{1}{H_j} \quad (5)$$

A concentração de partículas abrasivas na zona de contato é proporcional à fração volumétrica do abrasivo na pasta abrasiva (υ) e o número total de partículas N_T na área de entre a esfera e a amostra na calota de desgaste é dada pela Equação 6.

$$N_T = \frac{Ac\upsilon}{\pi D_p^2} \quad (6)$$

Sendo c é uma constante de proporcionalidade.

De acordo com Wang & Hutchings (1989), no desgaste abrasivo a dois corpos o número real de contatos N_R é uma fração do número total de partículas abrasivas na área de contato. Tal valor é função da dureza do material do contra-corpo, da área de contato nominal A e do diâmetro médio d_p das partículas abrasivas, como mostra a Equação 7.

$$N_R = k' d_p^{-2} \left(\frac{N}{H_b} \right)^{\frac{1}{2}} A^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Sendo k' é uma constante.

2.3.3 Determinação da abrasividade usando micro-abrasão

A morfologia da superfície de desgaste é também afetada pela angularidade das partículas e pelas propriedades dos materiais das amostras de desgaste (Stachowiak & Stachowiak, 2001).

Stachowiak & Stachowiak (2001) mostraram com ensaios de esfera sobre placa uma correlação entre as taxas de desgaste e a angularidade das partículas. Os resultados indicaram que partículas arredondadas geraram crateras redondas, enquanto partículas mais angulares produziram ranhuras de corte estreitas.

Resultados de Stachowiak & Stachowiak (2004) com quatro tipos diferentes de partículas abrasivas para ensaios de desgaste por esfera rotativa (vidro, areia de sílica, quartzo e alumina) sugeriram que o desgaste depende da forma das partículas abrasivas, da dureza e da microestrutura do material de desgaste.

Stachowiak *et al.* (2006) verificaram através de ensaios com as mesmas partículas abrasivas que a rugosidade da superfície da esfera afeta significativamente as taxas de desgaste. Além disso, a rugosidade superficial da esfera foi afetada pelo tempo de ensaio e pela angularidade das partículas abrasivas. Partículas com dureza e tamanho semelhantes, mas de angularidade diferente (areia de sílica e quartzo) podem gerar diferentes morfologias de superfície de desgaste nos corpos.

Não é consenso qual rugosidade da superfície da esfera seria ideal em ensaios de desgaste abrasivo por esfera rotativa. Segundo Stachowiak *et al.* (2006) alguma rugosidade é preferível à uma superfície polida. De acordo com Allsopp *et al.* (1998) certa rugosidade da superfície da esfera antes do início do ensaio de desgaste pode ser benéfica, pois facilita a interação das partículas entre a esfera de desgaste e o corpo-de-prova e a repetibilidade dos resultados de desgaste.

Logo, pode-se avaliar a abrasividade de diferentes partículas abrasivas através de ensaios de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa a fim de encontrar possíveis

alternativas de abrasivos com resultados de remoção de material semelhantes, a partir da utilização de partículas de abrasivos com comportamento semelhante e com um melhor custo-benefício. Tal ensaio permite identificar os modos de desgaste, além da possibilidade de combinação de diversas variáveis de ensaio para avaliação da abrasividade.

2.4 Aplicações do Carbeto de Boro

O carbeto de boro apresenta propriedades importantes para a engenharia, tais como: elevada dureza, resistência mecânica e alto ponto de fusão (SANTOS, 1995).

O B_4C apresenta a terceira maior dureza entre os materiais conhecidos. Na escala de Mohs, a dureza do B_4C é igual a 12, tendo apenas o nitreto de boro (14) e o diamante (15) com durezas superiores (SANTOS, 1995). As principais propriedades do B_4C , como densidade, dureza, resistência à compressão e módulo de Young estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades típicas do B_4C .

| Propriedade | Unidade | Valor |
|--------------------------|----------|-------|
| Densidade | g/cm^3 | 2,51 |
| Dureza | HV | 4980 |
| Resistência à compressão | MPa | 2800 |
| Módulo de Young (20°C) | GPa | 450 |

Fonte: Adaptado de Lipp (1966) *apud* Oliveira, 1995.

Devido ao seu alto custo e à oxidação ao ar, componentes de B_4C geralmente têm utilização limitada (MELO, 1994).

A alta dureza e a grande resistência à abrasão permitem que o B_4C seja utilizado como abrasivo e como ferramenta de corte e também usado no polimento e lapidação de materiais duros como carbeto cementado e cerâmicas (MELO, 1994).

Além dessas aplicações, o carbeto de boro também pode ser utilizado como componente de termopar para altas temperaturas, aplicado na área militar para blindagem balística de aeronaves e em coletes à prova de bala (MELO, 1994).

2.5 Alumina

A alumina tem sido largamente utilizada devido às suas propriedades como dureza, resistência à abrasão e inércia química. Entre as aplicações podem ser citadas: material para indústrias mineradoras, químicas e siderúrgicas, armaduras balísticas, aplicações biomédicas, substratos eletrônicos para circuitos integrados e velas de ignição automotivas (HEIMANN, 2010).

As principais propriedades da alumina são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades típicas nominais das cerâmicas de alumina.

| Propriedade | Unidade | Valor |
|--------------------------|-------------------|-------------|
| Densidade | g/cm ³ | 3,4 - 3,7 |
| Dureza | HV | 2370 |
| Resistência à compressão | Mpa | 1000 - 2800 |
| Módulo de Young (20°C) | Gpa | 350 - 400 |

Fonte: Adaptado de Heimann, 2010.

A alumina (Al₂O₃) é frequentemente utilizada como material de jateamento e produz rugosidade superficial de acordo com sua granulometria. O tamanho de partícula de alumina, dureza, velocidade, morfologia, fluxo e ângulo de impacto determinam a proporção da abrasão e o padrão de rugosidade criado na superfície cerâmica (ADDISSON *et al.*, 2007).

2.6 Usinagem por hidroerosão

A hidroerosão é um processo de usinagem utilizado para remoção de rebarbas e arredondamento de canais internos de bicos injetores. O arredondamento e polimento das superfícies são obtidos pela passagem de um fluido através dos canais de injeção (POTZ *et al.*, 2000).

Segundo Moreira (2014), a remoção de material neste processo ocorre através do desgaste das arestas e da superfície do material pela passagem do fluido pelas áreas confinadas, devido a uma mudança de trajetória e um aumento de velocidade das partículas. A Figura 20 representa os canais de injeção antes e depois do processo de hidroerosão.

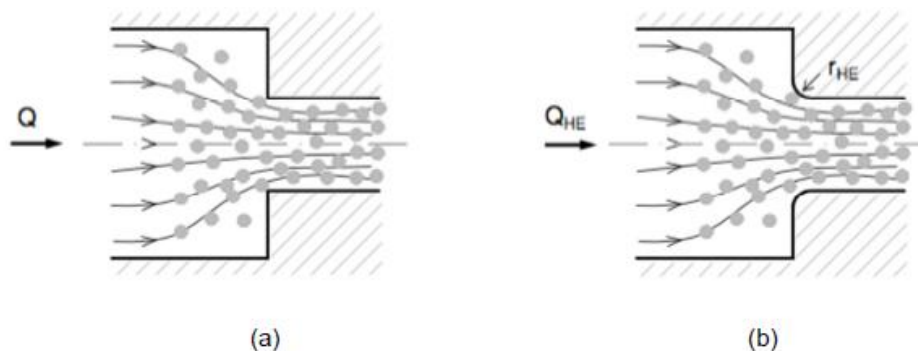


Figura 20 - Arredondamento em uma contração abrupta (a) antes e (b) após processo de hidroerosão.

Fonte: Coseglio, 2013.

Dentre as variáveis que controlam o processo podem ser citadas e agrupadas em variáveis relacionadas ao fluido (viscosidade e densidade), às partículas sólidas (distribuição de tamanho, geometria, dureza) e ao material do canal (dureza e acabamento superficial).

Coseglio (2013) apresentou as principais variáveis que constituem o processo, bem como os seus efeitos na eficiência da remoção de material. A caracterização de partículas também é discutida (distribuições de tamanho das partículas de B_4C), uma vez que o efeito das mesmas nas propriedades do fluido afeta sobremaneira o processo.

3 METODOLOGIA

3.1 Corpos de prova e caracterização

Os corpos-de-prova utilizados para os experimentos foram de aço-ferramenta AISI D2, amplamente utilizado em ferramentais para corte e conformação de metais por possuir uma excelente combinação entre resistência mecânica (dureza elevada) e resistência ao desgaste, temperados de acordo com a norma ASTM G65 (temperatura de austenitização de 1010°C por 25 minutos e resfriamento a ar). O aço AISI D2 foi escolhido por dois motivos: i) a dureza do material utilizado no processo de hidroerosão é possível de ser atingida ou mesmo ultrapassada (de acordo com Cardoso (2014), o tratamento térmico tem grande influência nas propriedades mecânicas do material e pode ser considerado um fator de grande importância na usinabilidade dos aços) e ii) há uma referência para o resultado obtido no tratamento térmico na ASTM G65 (2016). Todos os corpos-de-prova foram cortados com 35 mm de diâmetro e 3 mm de espessura, usinados no Laboratório de Usinagem do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Para a análise da microestrutura do aço-ferramenta D2, os corpos-de-prova foram embutidos em baquelite. Após o embutimento, a superfície do corpo-de-prova foi lixada, obedecendo a seguinte sequência de lixas: grão 220, 320, 400, 600 e 1200. Em seguida, a superfície foi polida com pasta diamantada com granulometria de 1 µm. Por fim, foi realizado o ataque químico da superfície com uma solução de Nital a 2%.

Para a análise da microestrutura e da composição química do aço D2, utilizou-se o espectrômetro de energia dispersiva acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Carl Zeiss / EVO MA 15, pertencente ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A análise de composição química do material foi realizada a partir da média de três medições obtidas em três regiões diferentes da amostra.

A Tabela 3 apresenta a composição química aproximada do aço ferramenta AISI D2.

Tabela 3 - Composição química aproximada do aço D2 (% em massa).

| Mn (%) | S (%) | Si (%) | Cr (%) | Mo (%) | V (%) |
|---------------|---------------|---------------|---------|---------------|---------------|
| 0,12 +/- 0,02 | 0,07 +/- 0,02 | 0,40 +/- 0,04 | 9 +/- 2 | 0,22 +/- 0,04 | 0,63 +/- 0,22 |

Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 apresenta a microestrutura do aço ferramenta D2 após têmpera e revenimento.

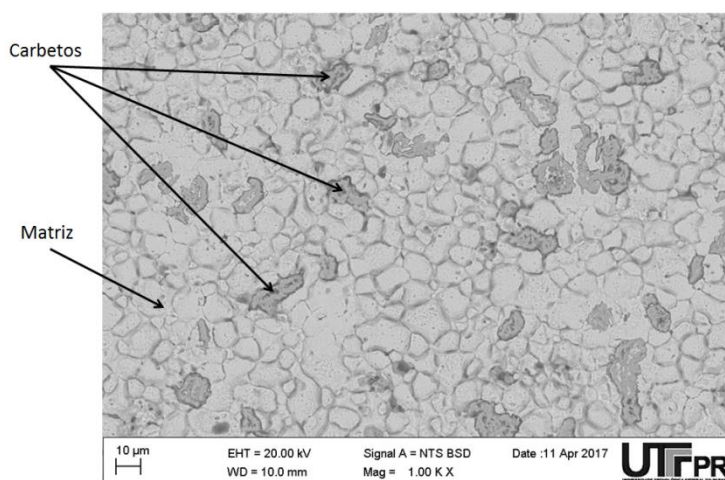


Figura 21 - Microestrutura do aço D2 para amostra tratada termicamente.

Fonte: Autoria própria.

Variáveis fundamentais relacionadas à têmpera e ao revenimento afetam as propriedades metalúrgicas finais do aço AISI D2, principalmente no que se refere ao endurecimento, teor de austenita retida e resistência à fratura.

De acordo com Mendanha *et al.* (2008), nos revenimentos a baixa temperatura a microestrutura pode apresentar matriz de martensita revenida clara, o que indica uma baixa reversão da austenita retida. Tal comportamento pode ser observado na microestrutura apresentada, conforme Figura 21.

A dissolução dos carbonetos de cromo, molibdênio e vanádio são fundamentais para um endurecimento da martensita na têmpera, um teor de austenita retida após a têmpera e um potencial de endurecimento secundário no revenimento pela dissolução dos carbonetos de cromo (Cr), molibdênio (Mo) e vanádio (V) (MENDANHA *et al.*, 2008).

A caracterização mecânica do aço D2 se deu por microdureza, a qual foi determinada no microdurômetro Shimadzu HMV-2, pertencente ao laboratório de materiais do DAMEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba. Foram feitos ensaios de microdureza Vickers com carga 0,1 kgf e tempo de aplicação 10 s. As durezas do material em estado de fornecimento e tratado foram determinadas pela média aritmética dos cinco valores mais próximos entre si. Todas as amostras foram tratadas para uma dureza entre 58-60 HRC, de acordo com a norma ASTM G65.

A Tabela 4 reúne os valores das durezas HRC e microdureza HV dos corpos-de-prova para o estado de fornecimento e para as amostras tratadas termicamente.

Tabela 4 - Dureza do aço D2 para estado de fornecimento e tratado termicamente.

| Aço D2 - Estado de fornecimento | | | Aço D2 - Tratado termicamente | | |
|---------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|---------------------|------------------|
| Amostra | Dureza (HRC) | Microdureza (HV) | Amostra | Dureza (HRC) | Microdureza (HV) |
| 1 | 19,4 | 235 | 1 | 59,6 | 689 |
| 2 | 19,9 | 238 | 2 | 58,7 | 668 |
| 3 | 21,2 | 244 | 3 | 59,3 | 682 |
| 4 | 21 | 243 | 4 | 58,8 | 671 |
| 5 | 20,1 | 239 | 5 | 58,9 | 674 |
| Média | 20,3 +/- 0,8 | 240 +/- 4 | Média | 59,1 +/- 0,4 | 677 +/- 9 |

Fonte: Autoria própria.

Os valores de dureza estão de acordo com o esperado considerando-se a norma ASTM G65, que apresenta a dureza entre 58,5 - 60,5 HRC. O aumento na dureza para as amostras tratadas termicamente é decorrente da transformação martensítica.

3.2 Abrasivos e caracterização

A análise granulométrica de distribuição de tamanho das partículas abrasivas foi realizada utilizando o método de difração a laser. O equipamento utilizado para esta análise foi o granulômetro a laser da marca Microtrac, modelo S3500, com limites de detecção de tamanho entre 0,02 μm e 2800 μm .

As amostras foram posicionadas no suporte do equipamento e dispersas com uso de ultrassom, com álcool isopropílico como meio dispersante. O método de difração a laser utiliza a teoria do espalhamento Mie de luz para o cálculo do tamanho das partículas. O feixe de luz incide sobre as partículas dispersas e forma padrões de difração que são utilizados para determinação do tamanho da partícula, considerando o diâmetro equivalente de uma partícula esférica.

As partículas foram caracterizadas quanto à distribuição de tamanho e geometria.

Para cada abrasivo foram obtidas as distribuições de frequência de tamanho e os parâmetros estatísticos d_{10} , d_{50} e d_{90} , que representam os diâmetros das partículas para os quais 10%, 50% e 90% em volume de partículas são menores do que os respectivos diâmetros.

Imagens das partículas abrasivas foram obtidas utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR. Uma

pequena quantidade de partículas foi dispersa em uma placa de vidro e uma fina camada de ouro foi depositada sobre as partículas pelo processo de deposição por *sputtering*. A dispersão das partículas sobre uma placa de vidro contribuiu de forma a minimizar a sobreposição e puderam-se obter imagens das partículas para a determinação do parâmetro geométrico.

A geometria das partículas foi caracterizada utilizando o parâmetro de ponta com ajuste quadrático, SPQ (*Spike Parameter - Quadratic fit*).

Este parâmetro, desenvolvido por Hamblin & Stachowiak (1996), é utilizado para quantificar numericamente a angulosidade da partícula através da detecção de geometrias favoráveis para o corte. Valores de SPQ próximos a zero indicam baixa angulosidade e, conseqüentemente, menor capacidade de remoção de material. Já valores de SPQ próximos a 1 indicam alta angulosidade.

Uma ferramenta computacional desenvolvida por Coseglio (2013) no software MatLab foi utilizada para a determinação do parâmetro SPQ. O cálculo do parâmetro SPQ foi realizado para amostras de carbetos de boro e alumina. Foram analisadas 20 partículas com diâmetro maior do que 7 μm e 20 partículas com diâmetro menor do que 7 μm , levando-se em consideração este valor como o do diâmetro médio das partículas, obtido primeiramente pela análise de difração a laser. As partículas foram selecionadas aleatoriamente em diferentes posições das imagens obtidas no MEV, conforme exemplo apresentado na Figura 22 para o carbetos de boro. É importante destacar que as medições foram realizadas apenas nas partículas que não estavam agrupadas ou aglomeradas, conforme mostra a Figura 22.

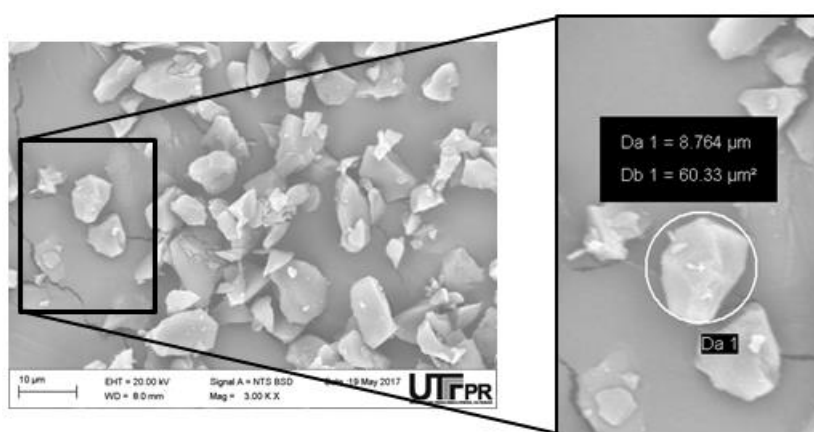


Figura 22 - Exemplo de imagem para seleção de partículas de carbetos de boro.

Fonte: Autoria própria.

3.3 Equipamento de Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo por Esfera Rotativa

Para os ensaios de desgaste micro abrasivo, utilizou-se o equipamento fabricado pela Anton-Paar denominado *Coating Thickness Measurement* (Figura 23), disponível no Laboratório de Superfícies e Contato (LASC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Os ensaios foram realizados com esferas de 25,4 mm de diâmetro de aço AISI 52100 temperado e revenido de 716 ± 9 HV. A rugosidade da esfera em estado de fornecimento foi medida e apresentou um valor de rugosidade quadrática média, $Sq = 0,05 \pm 0,01$ μm . Não foi realizado nenhum condicionamento prévio da esfera para os ensaios, de modo que esta rugosidade pode ser considerada como fornecida.

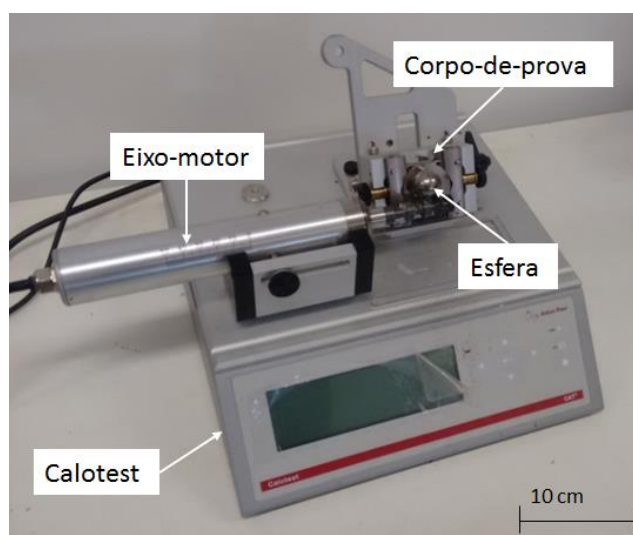


Figura 23 - Equipamento utilizado para os ensaios de desgaste micro abrasivo.

Fonte: Autoria própria.

3.4 Procedimento experimental

Este trabalho foi dividido em duas etapas experimentais. Primeiramente, foram realizados ensaios preliminares avaliando-se três (03) variáveis experimentais: rotação da esfera, tempo de ensaio e concentração (em volume) da pasta abrasiva. A partir destas variáveis, foram estabelecidas nove condições de ensaio, conforme Tabela 5, a qual apresenta os valores dos parâmetros definidos para os ensaios preliminares.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios preliminares.

| Condição de ensaio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Rotação do eixo – n [rpm] | 300 | 300 | 300 | 450 | 450 | 450 | 300 | 300 | 300 |
| Tempo de ensaio – t [min] | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| Concentração – [% vol] | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 |

Fonte: Autoria própria.

Os valores de rotação do eixo de transmissão de $n = 300$ rpm e $n = 450$ rpm foram escolhidos devido a limitações de operação do equipamento e o gotejamento da solução abrasiva (preparada com água destilada) foi selecionado como 1gota/15s. Todos os ensaios foram realizados com repetições de três vezes, sem paradas intermediárias e com uma inclinação fixa do corpo de prova de 30° .

Os ensaios foram realizados com ambos os abrasivos, Al_2O_3 e B_4C , e as dimensões analisadas após os ensaios de desgaste foram diâmetro (d), altura (h) e volume (V) da cratera formada. Após os ensaios, o diâmetro de cada cratera foi medido através da análise da imagem obtida por microscopia ótica e os mecanismos de desgaste verificados pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A partir dos parâmetros avaliados na primeira etapa, a segunda etapa do trabalho aborda os efeitos do tempo como principal variável de ensaio.

Adicionalmente, nesta segunda etapa foi utilizada uma alumina com valores de tamanhos de partícula em volume mais próxima à do carbetto de boro, para uma análise que tenha o tamanho médio de partícula como uma constante. Dessa forma, definiu-se que a alumina utilizada na primeira etapa do trabalho se chamaria alumina I e alumina II para a alumina utilizada na segunda etapa do trabalho.

A rotação da esfera foi fixada em $n = 300$ rpm, devido ao fato de que este foi o valor de rotação que proporcionou um comportamento mais estável com relação ao não deslizamento e à vibração da esfera e a concentração do abrasivo foi mantida em 10%. A angulosidade das partículas, a rugosidade da esfera após os ensaios e o tamanho e a forma das partículas após os ensaios também foram quantificados.

Para uma caracterização do perfil da calota, uma análise da perfilometria das crateras de desgaste foi realizada com o equipamento *Talysurf CCI Lite Non-contact 3D Profilometer* do Laboratório de Metrologia do DAMEC da UTFPR. Foram verificados os seguintes parâmetros de rugosidade para uma faixa de 0,5mm da perfilometria da calota: parâmetros de amplitude S_a e S_q e parâmetros híbridos $S_{\Delta q}$ e S_{ds} .

O parâmetro S_a pode ser expresso como o desvio médio de um perfil de sua linha média e seu valor não define a forma das irregularidades. Já o parâmetro S_q representa o valor médio quadrático de todos os desvios do perfil de rugosidade e seu valor acentua o efeito dos valores do perfil que se afastam da média.

O parâmetro $S_{\Delta q}$ representa a inclinação média quadrática do perfil e o parâmetro S_{ds} indica a densidade de picos por unidade de área. Já o parâmetro λ_q , obtido através da Equação 8, representa a largura do desgaste proporcionado pelas partículas.

$$\lambda_q = \frac{2\pi S_q}{S_{\Delta q}} \quad (8)$$

4 RESULTADOS PRELIMINARES

Inicialmente, os abrasivos utilizados foram carbeto de boro e alumina I com tamanhos médios de partículas diferentes para avaliar o comportamento de desgaste proporcionado pelo tamanho médio.

4.1 Caracterização das partículas abrasivas

4.1.1 Distribuição granulométrica dos abrasivos

A Tabela 6 apresenta valores dos parâmetros estatísticos d_{10} , d_{50} e d_{90} e d_{90}/d_{10} após a análise de difração a laser.

Tabela 6 - Parâmetros de tamanho para partículas de carbeto de boro e alumina I.

| % | Carbeto de boro | Alumina I |
|-----------------|-----------------|---------------|
| d_{10} | $4,0 \pm 0,3$ | $3,0 \pm 0,3$ |
| d_{50} | $6,5 \pm 0,1$ | $5,0 \pm 0,3$ |
| d_{90} | $10,1 \pm 0,3$ | $8,3 \pm 0,3$ |
| d_{90}/d_{10} | $2,6 \pm 0,2$ | $2,8 \pm 0,1$ |

Fonte: Autoria própria.

O parâmetro d_{50} pode ser considerado o tamanho médio de cada abrasivo. Os valores de d_{10} e d_{90} indicam a quantidade de partículas finas e grossas, respectivamente. O baixo valor de d_{90}/d_{10} indica uma dispersão menor para as partículas de carbeto de boro em relação à alumina, enquanto que o valor maior de d_{50} apresenta um tamanho médio maior para o mesmo abrasivo.

As distribuições de tamanhos das partículas para as amostras de carbeto de boro e de alumina I estão apresentadas na Figura 24 na forma de distribuição de frequência em volume e na Figura 25 na forma de frequência acumulada.

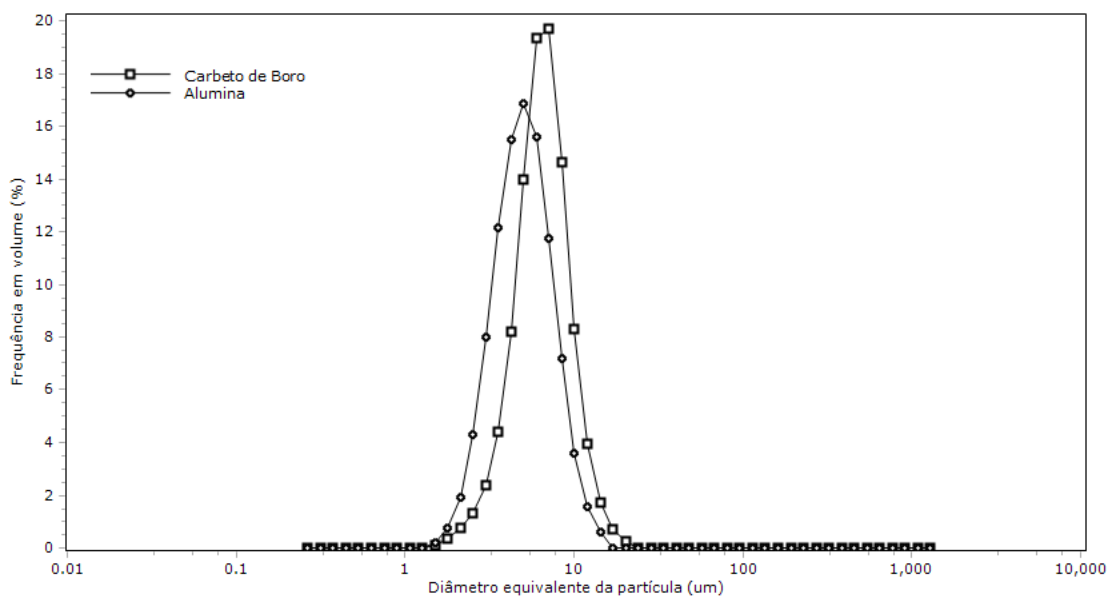


Figura 24 - Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para carbeto de boro e alumina I.

Fonte: Autoria própria.

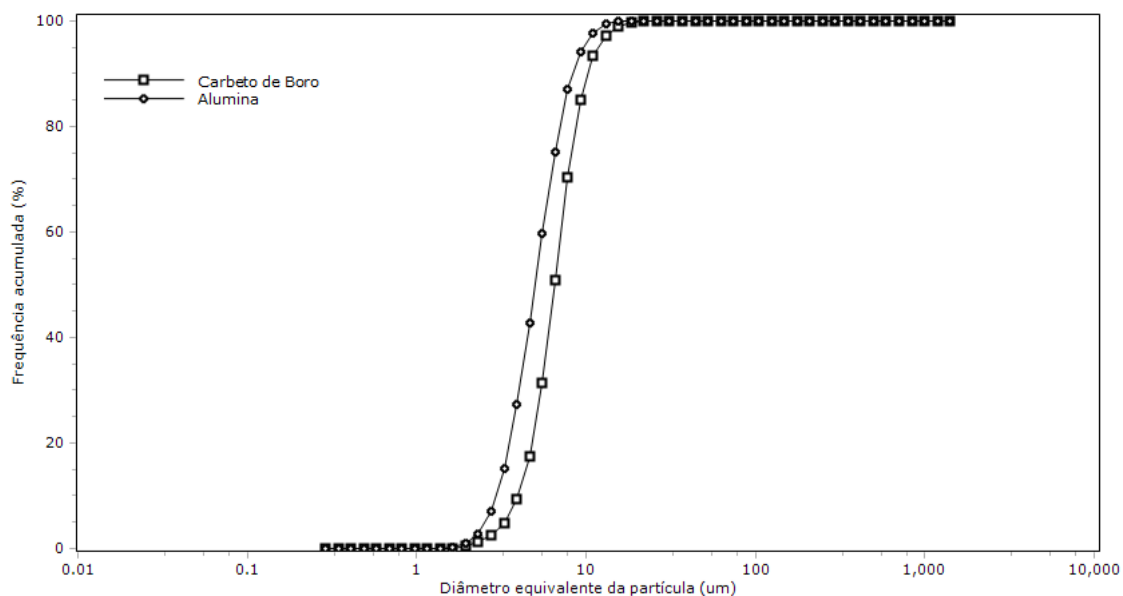


Figura 25 - Frequência acumulada de tamanho de partículas em volume para carbeto de boro e alumina I.

Fonte: Autoria própria.

Uma comparação entre as amostras de alumina I e carbeto de boro mostra que a porcentagem de volume de partículas finas é maior na amostra de alumina I. Para a amostra de carbeto de boro, a porcentagem de volume de partículas mais grossas é superior. Um fator que pode contribuir para o aumento de partículas finas é a fragmentação das partículas oriundo possivelmente do processo de fabricação.

4.1.2 Caracterização geométrica dos abrasivos

As Figuras 26 e 27 apresentam um conjunto de 20 partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ e 20 partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ para a alumina I e para o carbeto de boro, respectivamente. Tal valor de diâmetro foi escolhido devido ao diâmetro médio obtido pela distribuição granulométrica.

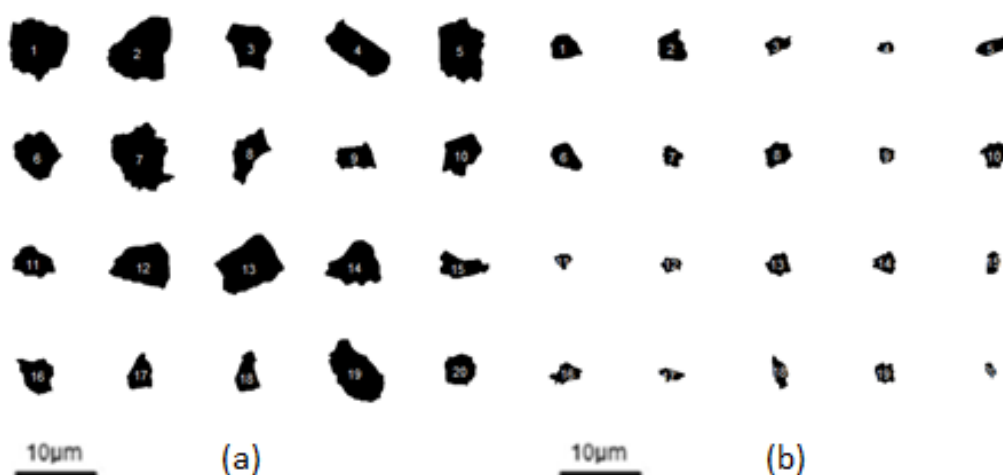


Figura 26 - Representação da geometria das partículas de alumina I para partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ (a) e partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ (b).

Fonte: Autoria própria.

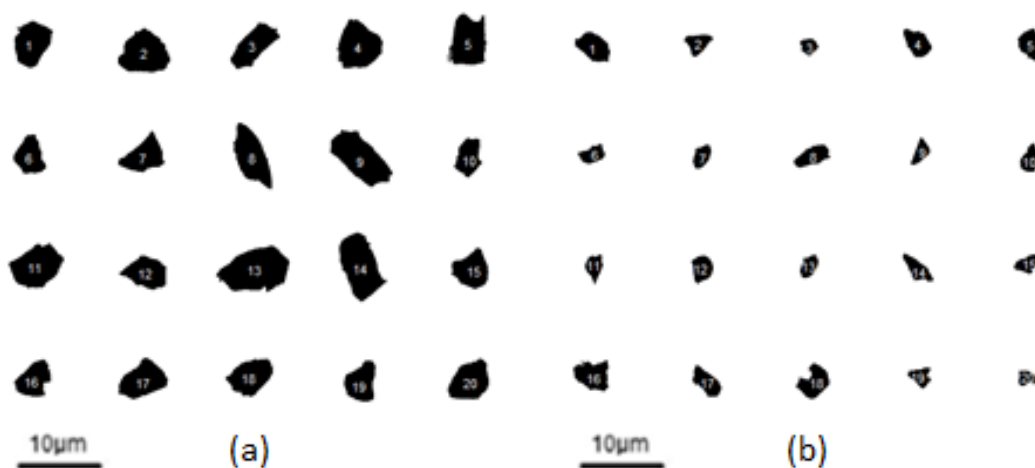


Figura 27 - Representação da geometria das partículas de carbeto de boro para partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ (a) e partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ (b).

Fonte: Autoria própria.

Uma forma de avaliar a angulosidade das partículas é por meio do parâmetro de ponta com ajuste quadrático, SPQ (*Spike Parameter - Quadratic fit*), e essas imagens binárias foram utilizadas para a determinação deste parâmetro.

Para a alumina I, formatos mais arredondados como os da partícula 1 (Figura 26a) possuem valores de SPQ menores que 0,2, o que indica baixa angulosidade e, conseqüentemente, menor capacidade de remoção de material. As partículas com alta angulosidade, como a partícula 17 (Figura 26b), cujos valores de SPQ de aproximadamente 0,6, possuem maior angulosidade e uma geometria favorável para remoção de material.

Para o carbetto de boro, as partículas 14 (Figura 27b) e 12 (Figura 27b) são exemplos de alto e baixo valor de SPQ, respectivamente.

Os valores obtidos para o parâmetro SPQ estão apresentados na Tabela 7 para a alumina I e na Tabela 8 para o carbetto de boro. São mostrados valores de ponta s_v para cada ponta detectada, diâmetro d_p e SPQ de cada partícula para cada uma das 20 partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ e das 20 partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$. Os valores de SPQ máximo, mínimo e médio também são apresentados, juntamente com o desvio padrão.

Tabela 7 - Resultado do parâmetro SPQ para partículas de alumina I.

| Partícula | Partículas $d_p > 7 \mu\text{m}$ | | | | | | Partículas $d_p < 7 \mu\text{m}$ | | | | | | SPQ | d_p (μm) | | |
|-----------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------|-------------------------|--------|-----|
| | valor de ponta (spyke value) s_{vi} | | | | | Número de pontas | valor de ponta (spyke value) s_{vi} | | | | | Número de pontas | | | | |
| | s_{v1} | s_{v2} | s_{v3} | s_{v4} | s_{v5} | | s_{v1} | s_{v2} | s_{v3} | s_{v4} | s_{v5} | | | | | |
| 1 | 0,1703 | 0,8280 | 0,1745 | | | 3 | 0,1425 | 13,4 | 0,6699 | 0,4370 | | | 2 | 0,5534 | 6,3 | |
| 2 | 0,2872 | 0,3903 | 0,1805 | 0,0379 | 0,4040 | 5 | 0,2600 | 11,7 | 0,3435 | 0,0950 | | | 3 | 0,2192 | 3,5 | |
| 3 | 0,2673 | 0,7186 | | | | 2 | 0,2439 | 12,2 | 0,3998 | 0,3156 | 0,2919 | | 3 | 0,3358 | 3,8 | |
| 4 | 0,2366 | 0,5487 | 0,5359 | | | 3 | 0,4404 | 9,4 | 0,4482 | 0,3029 | 0,1638 | | 3 | 0,3050 | 5,5 | |
| 5 | 0,1654 | 0,3439 | 0,3501 | 0,1740 | 0,4155 | 5 | 0,2898 | 8,9 | 0,1342 | 0,4315 | 0,2057 | 0,1671 | 4 | 0,2346 | 6,3 | |
| 6 | 0,1306 | 0,3338 | 0,5049 | 0,2283 | | 4 | 0,2994 | 11,6 | 0,4383 | 0,1355 | | | 2 | 0,2869 | 6,6 | |
| 7 | 0,4553 | 0,1420 | | | | 2 | 0,2987 | 9,6 | 0,1053 | 0,0501 | 0,3743 | 0,1373 | 4 | 0,1667 | 5,5 | |
| 8 | 0,2565 | 0,2992 | 0,3758 | | | 3 | 0,3105 | 12,9 | 0,1305 | 0,2534 | 0,2271 | | 3 | 0,2037 | 5,0 | |
| 9 | 0,5745 | 0,3695 | | | | 2 | 0,4720 | 8,6 | 0,1854 | 0,2538 | 0,2185 | 0,0875 | 0,0690 | 5 | 0,1629 | 5,6 |
| 10 | 0,6008 | 0,6464 | | | | 2 | 0,6236 | 11,1 | 0,3890 | 0,3242 | 0,2255 | | 3 | 0,3129 | 4,0 | |
| 11 | 0,0108 | 0,0766 | 0,4645 | 0,4659 | | 4 | 0,2544 | 13,2 | 0,2855 | 0,1233 | 0,1750 | | 3 | 0,1946 | 4,1 | |
| 12 | 0,1990 | 0,2986 | 0,1648 | | | 3 | 0,2208 | 9,4 | 0,1074 | 0,2061 | 0,4913 | | 3 | 0,2683 | 3,8 | |
| 13 | 0,2199 | 0,3140 | | | | 2 | 0,3432 | 7,1 | 0,0503 | 0,2921 | 0,0364 | 0,0965 | 4 | 0,1188 | 5,1 | |
| 14 | 0,1696 | 0,3442 | 0,0738 | 0,5502 | | 4 | 0,2845 | 12,7 | 0,2326 | 0,2594 | 0,2469 | | 3 | 0,2496 | 4,8 | |
| 15 | 0,2035 | 0,5630 | | | | 2 | 0,3833 | 11,4 | 0,0687 | 0,4232 | 0,4408 | | 3 | 0,3109 | 6,1 | |
| 16 | 0,1024 | 0,2584 | | | | 2 | 0,1804 | 13,1 | 0,5279 | 0,3446 | | | 2 | 0,4363 | 5,3 | |
| 17 | 0,1878 | 0,3271 | 0,3937 | 0,1937 | | 4 | 0,2756 | 8,4 | 0,6621 | 0,3927 | | | 2 | 0,5274 | 5,5 | |
| 18 | 0,3403 | 0,5734 | 0,3654 | | | 3 | 0,4264 | 9,4 | 0,0529 | 0,2580 | | | 2 | 0,1554 | 4,0 | |
| 19 | 0,4694 | 0,1889 | 0,1179 | | | 3 | 0,2587 | 7,1 | 0,7071 | 0,2538 | 0,3944 | 0,1026 | 4 | 0,3645 | 3,6 | |
| 20 | 0,06624 | 0,18023 | | | | 2 | 0,12323 | 7,8 | 0,40827 | 0,79205 | | | 2 | 0,60016 | 6,0 | |
| | SPQ médio | | | | | 0,29 | SPQ médio | | | | | 0,28 | | | | |
| | Desvio Padrão | | | | | 0,12 | Desvio Padrão | | | | | 0,14 | | | | |
| | SPQ máx | | | | | 0,62 | SPQ máx | | | | | 0,60 | | | | |
| | SPQ mín | | | | | 0,12 | SPQ mín | | | | | 0,12 | | | | |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Resultado do parâmetro SPQ para partículas de carbeto de boro.

| Partícula | Partículas $d_p > 7 \mu\text{m}$ | | | | Número de pontas | SPQ | $d, (\mu\text{m})$ | Partículas $d_p < 7 \mu\text{m}$ | | | | | SPQ | $d, (\mu\text{m})$ | |
|-----------|----------------------------------|---------|---------|---------|------------------|----------------------|--------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------------|--------------------|-----|
| | valor de ponta (spyke value) svi | | | | | | | valor de ponta (spyke value) svi | | | | | | | |
| | sv1 | sv2 | sv3 | sv4 | | | | sv1 | sv2 | sv3 | sv4 | sv5 | | | |
| 1 | 0,62087 | 0,31368 | 0,08809 | | 3 | 0,3409 | 8,3 | 0,49968 | 0,31442 | | | 2 | 0,4071 | 6,6 | |
| 2 | 0,34927 | 0,2574 | 0,25503 | | 3 | 0,2872 | 9,0 | 0,343 | 0,29057 | 0,46465 | | 3 | 0,3661 | 4,4 | |
| 3 | 0,16512 | 0,23715 | | | 2 | 0,2011 | 10,2 | 0,34367 | 0,10308 | 0,27539 | | 3 | 0,2407 | 3,1 | |
| 4 | 0,41451 | 0,1281 | 0,59128 | 0,38559 | 4 | 0,3799 | 9,1 | 0,19062 | 0,43596 | | | 2 | 0,3133 | 6,0 | |
| 5 | 0,28096 | 0,80292 | 0,34203 | | 3 | 0,4753 | 10,2 | 0,72352 | 0,53389 | | | 2 | 0,6287 | 5,6 | |
| 6 | 0,42723 | 0,22003 | 0,38268 | | 3 | 0,3433 | 7,2 | 0,63081 | 0,10405 | | | 2 | 0,3674 | 4,8 | |
| 7 | 0,8063 | 0,4143 | 0,50542 | | 3 | 0,5753 | 8,2 | 0,57704 | 0,3744 | | | 2 | 0,4757 | 4,8 | |
| 8 | 0,71369 | 0,83072 | 0,10445 | | 3 | 0,5496 | 12,7 | 0,21248 | 0,24307 | | | 2 | 0,2278 | 6,4 | |
| 9 | 0,3912 | 0,13721 | | | 2 | 0,2642 | 12,7 | 0,61485 | 0,61866 | | | 2 | 0,6168 | 4,6 | |
| 10 | 0,11953 | 0,60841 | | | 2 | 0,3640 | 7,1 | 0,66541 | 0,29639 | | | 2 | 0,4609 | 5,1 | |
| 11 | 0,31498 | 0,25084 | 0,30124 | | 3 | 0,2890 | 9,6 | 0,53106 | 0,91896 | | | 2 | 0,7250 | 4,9 | |
| 12 | 0,35401 | 0,6961 | | | 2 | 0,5251 | 8,3 | 0,16268 | 0,48069 | 0,08833 | | 3 | 0,2439 | 5,2 | |
| 13 | 0,32063 | 0,59532 | | | 2 | 0,4580 | 13,0 | 0,46239 | 0,44939 | | | 2 | 0,4559 | 4,8 | |
| 14 | 0,46805 | 0,17964 | | | 2 | 0,3239 | 12,5 | 0,62775 | 0,69972 | | | 2 | 0,6637 | 7,0 | |
| 15 | 0,4106 | 0,27067 | 0,43719 | | 3 | 0,3728 | 7,1 | 0,42589 | 0,41717 | | | 2 | 0,4215 | 5,4 | |
| 16 | 0,36795 | 0,45694 | 0,1126 | 0,19193 | 4 | 0,2824 | 7,2 | 0,68145 | 0,69005 | 0,40606 | 0,88874 | 0,27055 | 5 | 0,5874 | 6,8 |
| 17 | 0,12201 | 0,46203 | | | 2 | 0,2920 | 8,8 | 0,2715 | 0,66807 | | | 2 | 0,4698 | 6,7 | |
| 18 | 0,38287 | 0,37211 | 0,52227 | 0,42675 | 4 | 0,4261 | 8,4 | 0,48035 | 0,31946 | | | 2 | 0,3999 | 6,6 | |
| 19 | 0,26324 | 0,34501 | | | 2 | 0,3041 | 7,6 | 0,60733 | 0,44104 | 0,47375 | | 3 | 0,5074 | 4,2 | |
| 20 | 0,08276 | 0,38315 | | | 2 | 0,2330 | 8,5 | 0,2108 | 0,3271 | 0,5248 | | 3 | 0,3542 | 3,5 | |
| | | | | | | SPQ médio | 0,34 | | | | | | SPQ médio | 0,44 | |
| | | | | | | Desvio Padrão | 0,11 | | | | | | Desvio Padrão | 0,14 | |
| | | | | | | SPQ máx | 0,58 | | | | | | SPQ máx | 0,73 | |
| | | | | | | SPQ mín | 0,20 | | | | | | SPQ mín | 0,23 | |

Fonte: Autoria própria.

Comparando os dados da Tabela 7 com os dados da Tabela 8, pode-se verificar que houve pouca diferença no valor do SPQ médio para as partículas de alumina I em relação ao carbeto de boro para as partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$, porém não para as partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$. Os valores de SPQ para o carbeto de boro se mostraram semelhantes aos obtidos por Coseglio (2013) apenas para as partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$. Tanto na comparação entre alumina e carbeto de boro quanto com os resultados de Coseglio (2013), o tamanho da população pode ter efeito no resultado, como demonstrado por Yanez *et al.* (2014).

Entretanto, para os diâmetros classificados como $d_p > 7 \mu\text{m}$ e como $d_p < 7 \mu\text{m}$ de uma mesma amostra, os valores de SPQ não apresentaram diferença significativa para a alumina I e apresentaram diferença para o carbeto de boro.

4.2 Volume de desgaste das crateras

A Tabela 9 apresenta os valores de diâmetro (d), altura (h) e volume das crateras de desgaste (V) para as diferentes condições de ensaio com alumina I e a Tabela 10 com carbeto

de boro como abrasivo. É importante destacar que as condições de ensaio denominadas de 1 a 9 estão descritas na Tabela 5.

Tabela 9 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para a alumina I como abrasivo.

| Grandeza | d [mm] | h [μm] | V [10^{-3}mm^3] |
|-------------------|-----------------|-------------------------------------|---|
| Condição 1 | 0,92 \pm 0,07 | 8,33 \pm 1,27 | 2,77 \pm 0,84 |
| Condição 2 | 0,98 \pm 0,06 | 9,46 \pm 1,16 | 3,57 \pm 0,87 |
| Condição 3 | 1,02 \pm 0,04 | 10,24 \pm 0,80 | 4,18 \pm 0,65 |
| Condição 4 | 0,96 \pm 0,03 | 9,07 \pm 0,56 | 3,28 \pm 0,41 |
| Condição 5 | 1,00 \pm 0,05 | 9,85 \pm 0,98 | 3,87 \pm 0,77 |
| Condição 6 | 1,04 \pm 0,06 | 10,65 \pm 1,23 | 4,52 \pm 1,04 |
| Condição 7 | 1,06 \pm 0,04 | 11,06 \pm 0,84 | 4,88 \pm 0,74 |
| Condição 8 | 1,10 \pm 0,05 | 11,92 \pm 1,08 | 5,66 \pm 1,03 |
| Condição 9 | 1,24 \pm 0,05 | 15,14 \pm 1,22 | 9,14 \pm 1,48 |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para o carbetto de boro como abrasivo.

| Grandeza | d [mm] | h [μm] | V [10^{-3}mm^3] |
|-------------------|-----------------|-------------------------------------|---|
| Condição 1 | 1,00 \pm 0,06 | 9,85 \pm 1,18 | 3,87 \pm 0,93 |
| Condição 2 | 1,12 \pm 0,08 | 12,35 \pm 1,76 | 6,08 \pm 1,75 |
| Condição 3 | 1,18 \pm 0,05 | 13,71 \pm 1,16 | 7,50 \pm 1,27 |
| Condição 4 | 1,05 \pm 0,05 | 10,86 \pm 1,03 | 4,70 \pm 0,89 |
| Condição 5 | 1,16 \pm 0,04 | 13,25 \pm 0,91 | 7,00 \pm 0,97 |
| Condição 6 | 1,20 \pm 0,04 | 14,18 \pm 0,94 | 8,02 \pm 1,07 |
| Condição 7 | 1,20 \pm 0,05 | 14,18 \pm 1,18 | 8,02 \pm 1,34 |
| Condição 8 | 1,24 \pm 0,06 | 15,14 \pm 1,46 | 9,14 \pm 1,77 |
| Condição 9 | 1,38 \pm 0,04 | 17,69 \pm 1,06 | 12,47 \pm 1,49 |

Fonte: Autoria própria.

Nas Tabelas 9 e 10 os desvios-padrão foram calculados somente na dimensão que foi medida no microscópio (diâmetro da cratera de desgaste). Já para os cálculos dos desvios-padrão da altura e do volume da cratera esférica utilizou-se o conceito de propagação de erros. As dimensões de altura e de volume foram obtidas através da Equação 2 e da Equação 3.

Os valores médios do volume das crateras de desgaste para todas as condições de ensaio são apresentados na Figura 28 para uma melhor visualização dos resultados.

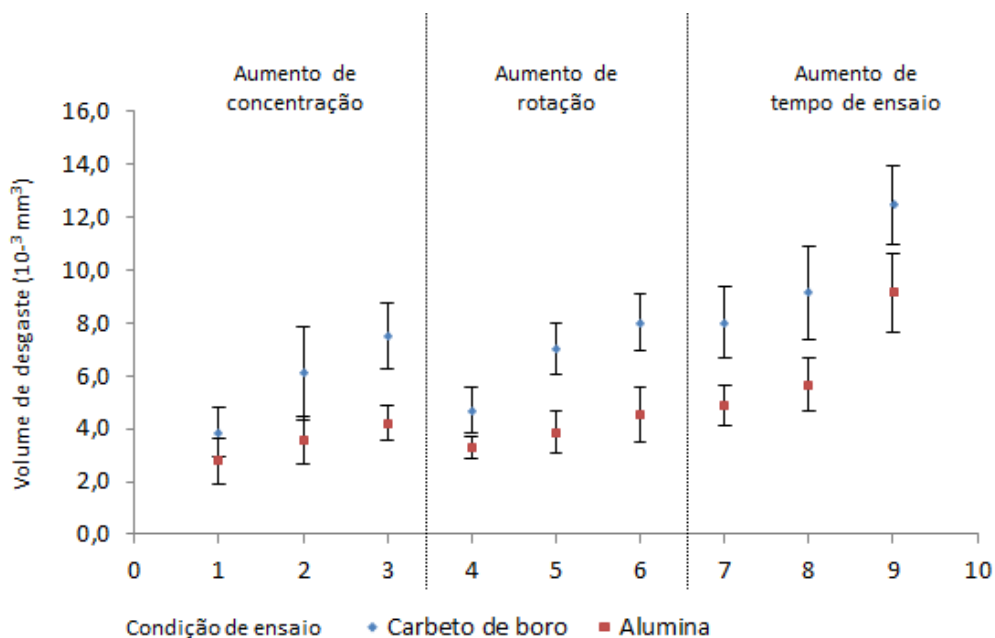


Figura 28 - Volume das crateras de desgaste para os ensaios de desgaste abrasivo.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 28 pode ser verificado que as partículas abrasivas de Al_2O_3 apresentam menor abrasividade média quando comparadas às partículas de B_4C , pois o volume de desgaste mostra-se maior com a utilização de carbetto de boro como abrasivo.

A diferença no comportamento entre a alumina e o carbetto de boro poderia ser pelas diferentes características/propriedades entre as partículas, em particular o tamanho, a dureza e a angulosidade (Pintaúde, 2011). No caso do tamanho, mostrou-se que a distribuição das partículas para a alumina e o carbetto de boro é semelhante, o que não pode ser usado como justificativa. A dureza de ambos os abrasivos é bem superior à dureza do aço AISI D2, o que também justifica pouco a diferença na taxa de desgaste. Finalmente as diferenças entre as angulosidades, embora pequenas para as partículas $d_p > 7 \mu\text{m}$, podem ser consideradas significativas para aquelas $d_p < 7 \mu\text{m}$. Para que esta diferença seja significativa, um maior número de partículas em contato com esta faixa de tamanho deve existir.

Adicionalmente, é possível observar que um aumento na concentração do abrasivo (ensaios de 1 a 3, 4 a 6 e 7 a 9) levou a um aumento médio no volume de desgaste do material para ambos os abrasivos, tanto para a rotação de 300 rpm quanto para a rotação de 450 rpm.

O aumento da concentração de abrasivo representa uma maior quantidade de partículas abrasivas, as quais podem levar ao maior volume de material removido. Trezona *et al.* (1999) mostraram um comportamento semelhante de aumento de concentração do abrasivo levando a um aumento de volume de desgaste para o SiC como abrasivo disperso em água destilada com corpos de prova de aço ferramenta, como ilustra a Figura 29.

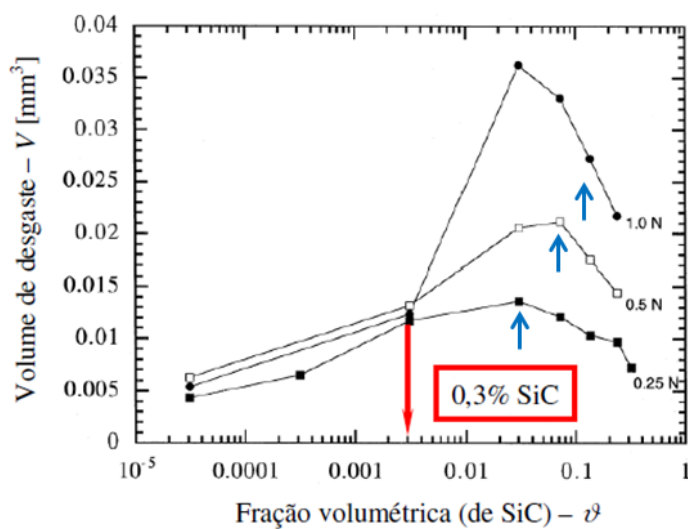


Figura 29 - Volume de desgaste em função da porcentagem em volume de SiC.

Fonte: Trezona *et al.* (1999).

Cozza (2006) sugere que para baixas concentrações de abrasivos (à esquerda das setas na Figura 29) o desgaste abrasivo se dá por riscamento. Já para altas concentrações (à direita das setas na Figura 29) pode ser observado o desgaste abrasivo por rolamento. Tal comportamento justifica a diminuição do volume de desgaste para altas concentrações de abrasivos.

Um acréscimo no tempo de ensaio proporcionou um aumento no volume de desgaste do material para ambos os abrasivos. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que um acréscimo no tempo de ensaio leva a uma maior distância de deslizamento e, conseqüentemente, um maior volume de desgaste. Para o carbetto de boro e para a alumina I, esse aumento do volume de desgaste foi significativo, sendo que a influência do tempo de ensaio será abordada no capítulo a seguir. Ainda, foi possível observar que o aumento do tempo apresentou maior influência na remoção de material, comparado com as outras variáveis de ensaio.

Já um aumento na rotação da esfera de ensaio de 300 rpm para 450 rpm (ensaios de 1 a 3 e 4 a 6) não proporcionou um aumento significativo no volume de material removido. Tanto para o B_4C quanto para a Al_2O_3 , o volume de desgaste nas diferentes concentrações não se mostrou diferente.

As rotações do eixo de transmissão utilizadas foram selecionados devido a limitações do equipamento de teste. Os ensaios realizados não atingiram o regime permanente de desgaste, por isso conclusões não podem ser retiradas a partir dos ensaios preliminares.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta segunda etapa do trabalho, serão apresentados os resultados obtidos em função do tempo de ensaio, tendo em vista que esta variável proporcionou maior influência na remoção de material, conforme apresentado no Capítulo 4. Dessa forma, a variável do tempo será melhor abordada neste capítulo. Ainda, foi utilizada uma alumina com valores de frequência de tamanho de partículas em volume mais próxima à do carbetto de boro. Este padrão das partículas abrasivas permite ter uma análise com tamanho médio de partícula como uma constante. Na sequência encontra-se a caracterização para essa alumina, denominada como alumina II.

5.1 Caracterização das partículas

As caracterizações da distribuição de tamanho e geometria das partículas de alumina II são apresentadas a seguir.

5.1.1 Distribuição granulométrica dos abrasivos

A Tabela 11 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos d_{10} , d_{50} e d_{90} e d_{90}/d_{10} após a análise de difração a laser.

Tabela 11 - Parâmetros de tamanho para partículas de carbetto de boro e alumina II.

| % | Carbetto de boro | Alumina II |
|-----------------|------------------|----------------|
| d_{10} | $4,0 \pm 0,3$ | $3,9 \pm 0,3$ |
| d_{50} | $6,5 \pm 0,1$ | $6,7 \pm 0,3$ |
| d_{90} | $10,1 \pm 0,3$ | $10,5 \pm 1,2$ |
| d_{90}/d_{10} | $2,6 \pm 0,2$ | $2,8 \pm 0,5$ |

Fonte: Autoria própria.

As distribuições de tamanhos das partículas para as amostras de carbetto de boro e de alumina II estão apresentadas na Figura 30 na forma de distribuição de frequência em volume e na Figura 31 na forma de frequência acumulada.

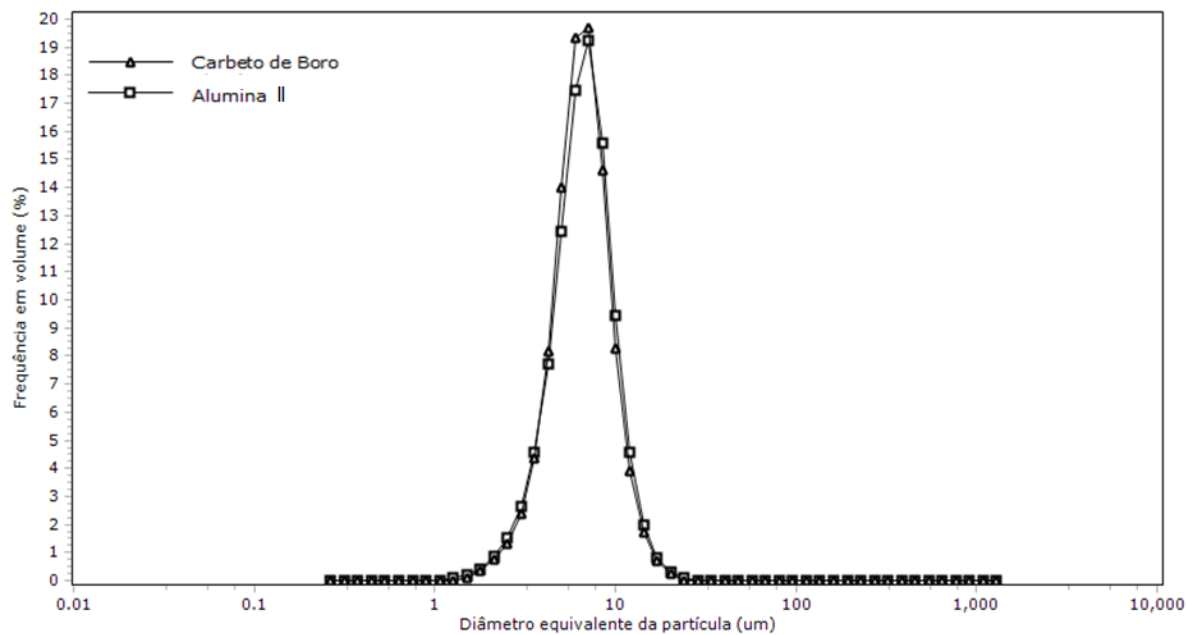


Figura 30 - Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para carbeto de boro e alumina II.

Fonte: Autoria própria.

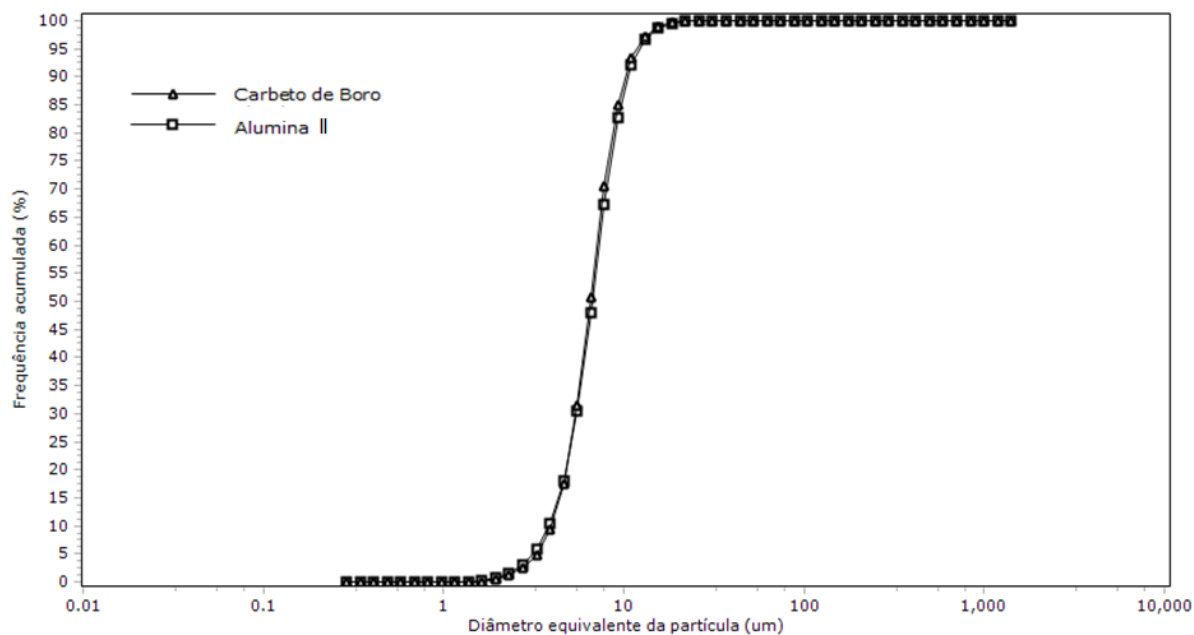


Figura 31 - Frequência acumulada de tamanho de partículas em volume para carbeto de boro e alumina II.

Fonte: Autoria própria.

Uma comparação entre as amostras de alumina II e carbeto de boro mostra que a percentagem de volume de partículas finas e grossas é semelhante para os dois abrasivos.

5.1.2 Caracterização geométrica dos abrasivos

A Figura 32 apresenta um conjunto de 20 partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ e 20 partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ para a alumina II.

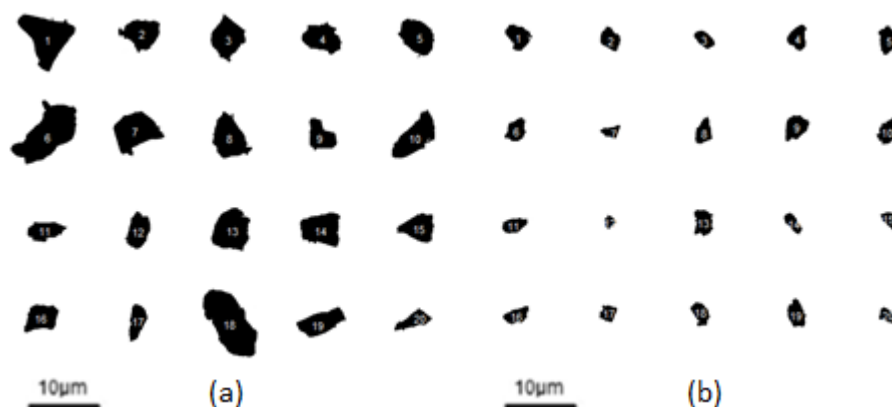


Figura 32 - Representação da geometria das partículas de alumina II para partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ (a) e partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$ (b).

Fonte: Autoria própria.

Para a alumina II, formatos mais arredondados como o da partícula 13 (Figura 32a) possuem valores de SPQ próximos a 0,3, o que indica baixa angulosidade e, conseqüentemente, menor capacidade de remoção de material. As partículas com alta angulosidade, como a partícula 15 (Figura 32b), cujo valor de SPQ, conforme Tabela 12, é de aproximadamente 0,7, possuem maior angulosidade e uma geometria favorável para remoção de material.

Os valores obtidos para o parâmetro SPQ estão apresentados na Tabela 12 para a alumina II. São mostrados valores de ponta s_v para cada ponta detectada, diâmetro d_p e SPQ de cada partícula para cada uma das 20 partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$ e das 20 partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$. Os valores de SPQ máximo, mínimo e médio também são apresentados, juntamente com o desvio padrão.

Tabela 12 - Resultado do parâmetro SPQ para partículas de alumina II.

| Partícula | Partículas $d_p > 7 \mu\text{m}$ | | | | | Partículas $d_p < 7 \mu\text{m}$ | | | | | SPQ | d_p (μm) | | |
|-----------|----------------------------------|--------|--------|--------|------------------|----------------------------------|-------------|--------|--------|------------------|--------|-------------------------|-------------|-----|
| | valor de ponta (spyke value) svi | | | | Número de pontas | valor de ponta (spyke value) svi | | | | Número de pontas | | | | |
| | sv1 | sv2 | sv3 | sv4 | | sv1 | sv2 | sv3 | sv4 | | | | | |
| 1 | 0,3974 | 0,5018 | 0,2215 | | 3 | 0,3736 | 11,1 | 0,3184 | 0,3464 | 0,3634 | 3 | 0,3428 | 5,5 | |
| 2 | 0,2764 | 0,3620 | 0,7275 | 0,1375 | 4 | 0,3759 | 8,5 | 0,4662 | 0,4440 | | 2 | 0,4551 | 5,4 | |
| 3 | 0,7238 | 0,4566 | 0,6595 | | 3 | 0,6133 | 9,6 | 0,3968 | 0,2572 | | 2 | 0,3270 | 4,7 | |
| 4 | 0,3880 | 0,3659 | | | 2 | 0,3770 | 8,4 | 0,4543 | 0,5460 | 0,0481 | 3 | 0,3495 | 5,1 | |
| 5 | 0,9194 | 0,1743 | 0,2988 | | 3 | 0,4641 | 8,7 | 0,6659 | 0,3972 | 0,1195 | 3 | 0,3942 | 5,6 | |
| 6 | 0,4602 | 0,5012 | 0,3167 | | 3 | 0,4260 | 15,6 | 0,4341 | 0,4522 | | 2 | 0,4431 | 5,4 | |
| 7 | 0,2689 | 0,1860 | 0,6963 | 0,4223 | 4 | 0,3934 | 11,0 | 0,5461 | 0,5227 | 0,7695 | 3 | 0,6128 | 3,8 | |
| 8 | 0,5918 | 0,1022 | 0,3646 | | 3 | 0,3529 | 9,6 | 0,7034 | 0,1335 | 0,3607 | 3 | 0,3999 | 5,9 | |
| 9 | 0,3000 | 0,6966 | 0,4782 | | 3 | 0,4916 | 7,2 | 0,2563 | 0,2811 | 0,5629 | 3 | 0,3668 | 5,9 | |
| 10 | 0,4901 | 0,5725 | | | 2 | 0,5313 | 11,5 | 0,7612 | 0,3862 | | 2 | 0,5737 | 6,5 | |
| 11 | 0,8084 | 0,3918 | | | 2 | 0,6001 | 8,4 | 0,5310 | 0,1827 | | 2 | 0,3568 | 5,4 | |
| 12 | 0,5493 | 0,4027 | 0,2859 | | 3 | 0,4127 | 7,7 | 0,2852 | 0,4346 | 0,3092 | 3 | 0,3430 | 2,7 | |
| 13 | 0,3485 | 0,2567 | 0,5389 | 0,2341 | 4 | 0,3445 | 9,3 | 0,4617 | 0,7669 | 0,2321 | 3 | 0,4869 | 5,6 | |
| 14 | 0,4445 | 0,5475 | 0,2297 | | 3 | 0,4072 | 8,9 | 0,4466 | 0,2414 | | 2 | 0,3442 | 5,0 | |
| 15 | 0,6441 | 0,3897 | 0,5602 | | 3 | 0,5313 | 7,8 | 0,8076 | 0,6994 | | 2 | 0,7535 | 3,6 | |
| 16 | 0,3862 | 0,5392 | | | 2 | 0,4627 | 8,2 | 0,5005 | 0,3446 | | 2 | 0,4225 | 5,4 | |
| 17 | 0,2734 | 0,6933 | | | 2 | 0,4834 | 7,7 | 0,3623 | 0,5228 | 0,4961 | 0,3222 | 4 | 0,4258 | 4,1 |
| 18 | 0,6017 | 0,3532 | | | 2 | 0,4774 | 16,5 | 0,4823 | 0,3188 | | 2 | 0,4005 | 5,2 | |
| 19 | 0,2681 | 0,5195 | | | 2 | 0,3938 | 10,3 | 0,5227 | 0,3502 | 0,4307 | 3 | 0,4346 | 5,8 | |
| 20 | 0,6866 | 0,6015 | | | 2 | 0,6441 | 9,8 | 0,3973 | 0,3317 | | 2 | 0,3645 | 4,3 | |
| | | | | | | SPQ médio | 0,44 | | | | | SPQ médio | 0,40 | |
| | | | | | | Desvio Padrão | 0,09 | | | | | Desvio Padrão | 0,11 | |
| | | | | | | SPQ máx | 0,64 | | | | | SPQ máx | 0,75 | |
| | | | | | | SPQ mín | 0,34 | | | | | SPQ mín | 0,33 | |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 13 apresenta os valores de SPQ médio para o carbetto de boro, para a alumina I e para a alumina II, juntamente com seus respectivos desvios-padrão.

Tabela 13 - Resumo do parâmetro SPQ.

| | Carbetto de boro | Alumina I | Alumina II |
|----------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Partículas $d_p > 7 \mu\text{m}$ | $0,34 \pm 0,11$ | $0,29 \pm 0,12$ | $0,44 \pm 0,09$ |
| Partículas $d_p < 7 \mu\text{m}$ | $0,44 \pm 0,14$ | $0,28 \pm 0,14$ | $0,40 \pm 0,11$ |

Pode ser verificado comparando os dados da Tabela 13 que houve diferença significativa no SPQ médio dos diferentes abrasivos para as partículas com $d_p > 7 \mu\text{m}$, onde as partículas de alumina II apresentaram um valor de SPQ maior, sugerindo uma maior capacidade de remoção de material. Para as partículas com $d_p < 7 \mu\text{m}$, esta diferença não foi estatisticamente significativa comparando-se o carbetto de boro com a alumina II, porém foi relevante para a alumina I. Segundo Stachowiak & Stachowiak (2001), o parâmetro de SPQ (angularidade) é um fator que afeta a abrasividade partícula e, geralmente, quanto mais elevado o SPQ maior a abrasividade.

5.2 Influência do desgaste na esfera

Para verificar a influência do desgaste na esfera foram realizados ensaios com ambos os abrasivos, Al_2O_3 e B_4C , conforme as condições indicadas na Tabela 14. Para essa análise, a concentração da pasta abrasiva foi definida com 10% de volume de partículas abrasivas.

Tabela 14 - Valores dos parâmetros estabelecidos para verificação do desgaste da esfera.

| Condição de ensaio | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Rotação da esfera – n [rpm] | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Tempo de ensaio – t [min] | 2 | 4 | 8 | 16 |

Fonte: Autoria própria.

O parâmetro de rugosidade S_q da superfície da esfera no estado de fornecimento e após os ensaios foram medidas e os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Rugosidade superficial S_q para as esferas em estado de fornecimento e após ensaios em diferentes condições com alumina II e carbetto de boro como abrasivos.

| Rugosidade S_q [μm] | Alumina II | Carbetto de boro |
|------------------------------------|-----------------|------------------|
| Fornecimento | $0,05 \pm 0,01$ | $0,05 \pm 0,01$ |
| Condição 1 | $0,06 \pm 0,02$ | $0,09 \pm 0,02$ |
| Condição 2 | $0,06 \pm 0,02$ | $0,09 \pm 0,02$ |
| Condição 3 | $0,07 \pm 0,02$ | $0,10 \pm 0,01$ |
| Condição 4 | $0,07 \pm 0,02$ | $0,10 \pm 0,01$ |

Fonte: Autoria própria.

Pode ser verificado a partir de Tabela 15 que o tempo de ensaio não foi significativo para um aumento da rugosidade da superfície da esfera quando a alumina II foi utilizada como abrasivo.

Já para o carbetto de boro, o tempo de ensaio teve influência em um aumento da rugosidade da superfície da esfera. Esse aumento, entretanto, é verificado a partir do ensaio de 2 minutos e apresenta-se estável para os ensaios de 4 minutos, 8 minutos e 16 minutos de ensaio.

O desgaste depende da forma das partículas abrasivas e também da dureza e microestrutura do material de desgaste (STACHOWIAK & STACHOWIAK, 2004). A rugosidade das esferas teve um aumento de acordo com a angularidade das partículas e com o tempo de ensaio em ensaios realizados por Stachowiak & Stachowiak (2004).

5.3 Influência do tempo de ensaio

Para avaliar a influência do tempo de ensaio no desgaste abrasivo foram realizados ensaios com as condições indicadas na Tabela 16. Em todos os ensaios o abrasivo continha 10% de volume de partículas abrasivas.

Tabela 16 - Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios com diferentes tempos de ensaio.

| Condição de ensaio | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Rotação da esfera – n [rpm] | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Tempo de ensaio – t [min] | 1 | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 | 24 | 32 |
| Distância de deslizamento – s [m] | 24 | 48 | 96 | 192 | 288 | 384 | 576 | 768 |

Fonte: Autoria própria.

Para tempos de ensaio de 1 minuto e 2 minutos (condição de ensaio 1 e 2, respectivamente) para o carbeto de boro e a alumina II, pode-se observar o comportamento inicial dos ensaios, como mostram as Figuras 33 e 34. Observa-se que a forma da calota não está bem definida, tomando-se como forma um oblongo.

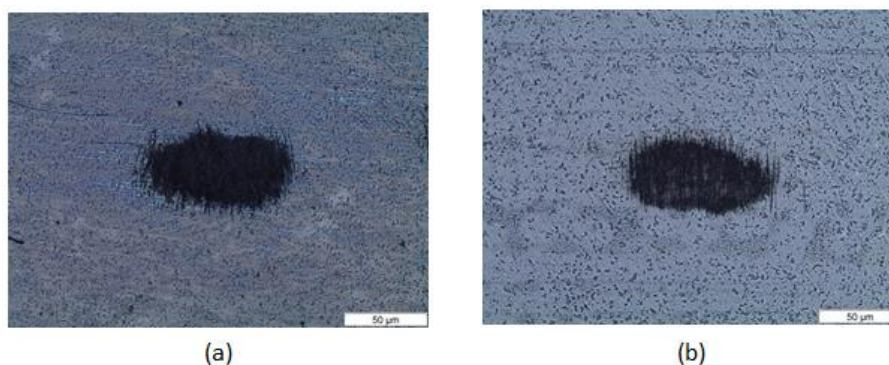


Figura 33 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de carbeto de boro para ensaio com tempo de 1 minuto (a) e 2 minutos (b).

Fonte: Autoria própria.

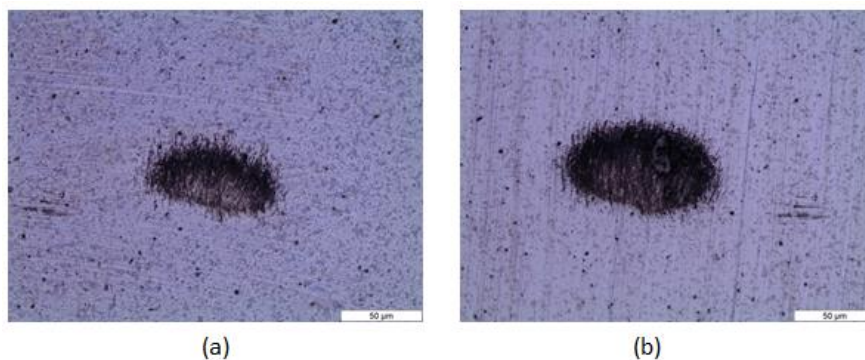


Figura 34 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de alumina II para ensaio com tempo de 1 minuto (a) e 2 minutos (b).

Fonte: Autoria própria.

Comportamento semelhante foi verificado por Cozza (2015) após ensaios realizados em corpo-de-prova de WC-Co P20 com carbetto de silício como abrasivo, como ilustrado na Figura 35. De acordo com Cozza (2015), o contorno de formato não esférico é atribuído ao grau de desgaste da esfera.

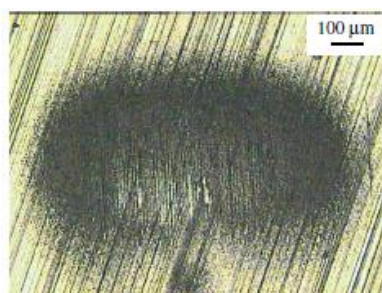


Figura 35 - Marcas de desgaste abrasivo em um corpo-de-prova de WC-Co P20 em ensaio com distância de deslizamento de 15 metros com partículas abrasivas carbetto de silício.

Fonte: Cozza (2015).

No presente trabalho não há influência pelo desgaste da esfera, porém tem-se pouco abrasivo no contato, devido à alta rotação do eixo de transmissão e à baixa taxa de gotejamento do fluido abrasivo.

Dessa forma, a discussão dos resultados e comportamento do desgaste se concentrará nos ensaios com tempos maiores que 4 minutos, nos quais as crateras de desgaste apresentaram comportamento padrão.

A Tabela 17 apresenta os valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para as diferentes condições de ensaio com carbetto de boro e a Tabela 18 com Oalumina II como abrasivo.

Tabela 17 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para o carbetto de boro como abrasivo.

| Grandeza | d [mm] | h [μm] | V [10^{-3} mm³] |
|-------------------|-----------------|------------------------------|--|
| Condição 3 | 1,00 \pm 0,06 | 9,85 \pm 1,18 | 3,87 \pm 0,91 |
| Condição 4 | 1,30 \pm 0,08 | 16,64 \pm 2,05 | 11,04 \pm 2,73 |
| Condição 5 | 1,50 \pm 0,06 | 22,17 \pm 1,77 | 19,58 \pm 3,14 |
| Condição 6 | 1,78 \pm 0,03 | 31,22 \pm 1,05 | 38,85 \pm 2,62 |
| Condição 7 | 1,98 \pm 0,04 | 38,65 \pm 1,56 | 59,50 \pm 4,81 |
| Condição 8 | 2,13 \pm 0,04 | 44,73 \pm 1,19 | 79,70 \pm 4,20 |

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 - Valores de diâmetro, altura e volume das crateras de desgaste para os diferentes ensaios para a alumina II como abrasivo.

| Grandeza | d [mm] | h [μm] | V [10^{-3} mm³] |
|-------------------|-----------------|------------------------------|--|
| Condição 3 | 0,84 \pm 0,08 | 6,95 \pm 1,32 | 1,92 \pm 0,74 |
| Condição 4 | 1,42 \pm 0,04 | 19,86 \pm 1,12 | 15,72 \pm 1,77 |
| Condição 5 | 1,58 \pm 0,04 | 24,59 \pm 1,25 | 24,11 \pm 2,44 |
| Condição 6 | 1,70 \pm 0,04 | 28,48 \pm 3,34 | 32,31 \pm 3,04 |
| Condição 7 | 1,88 \pm 0,04 | 34,84 \pm 1,48 | 48,35 \pm 4,12 |
| Condição 8 | 2,02 \pm 0,04 | 40,23 \pm 1,59 | 64,46 \pm 5,11 |

Fonte: Autoria própria.

Os valores dos diâmetros das crateras de desgaste mostrados nas Tabelas 17 e 18 foram calculados com seus respectivos desvios-padrão somente da dimensão que foi medida no microscópio ótico. Para os valores dos desvios-padrão da altura e do volume da cratera esférica, utilizou-se o conceito de propagação de erros. As dimensões de altura e de volume foram obtidas através da Equação 2 e da Equação 3.

Um aumento do tempo de ensaio proporcionou um aumento no volume de desgaste de material para ambos os abrasivos. Este comportamento pode ser relacionado ao fato de que um acréscimo no tempo de ensaio leva a uma maior a distância de deslizamento e, conseqüentemente, um maior volume de desgaste (KELLY & HUTCHINGS, 2001).

Os valores de coeficiente de desgaste (k) foram calculados a partir da Equação 4. A Figura 36 ilustra valores de coeficiente de desgaste para os ensaios de desgaste abrasivo para a carbetto de boro e para a alumina II.

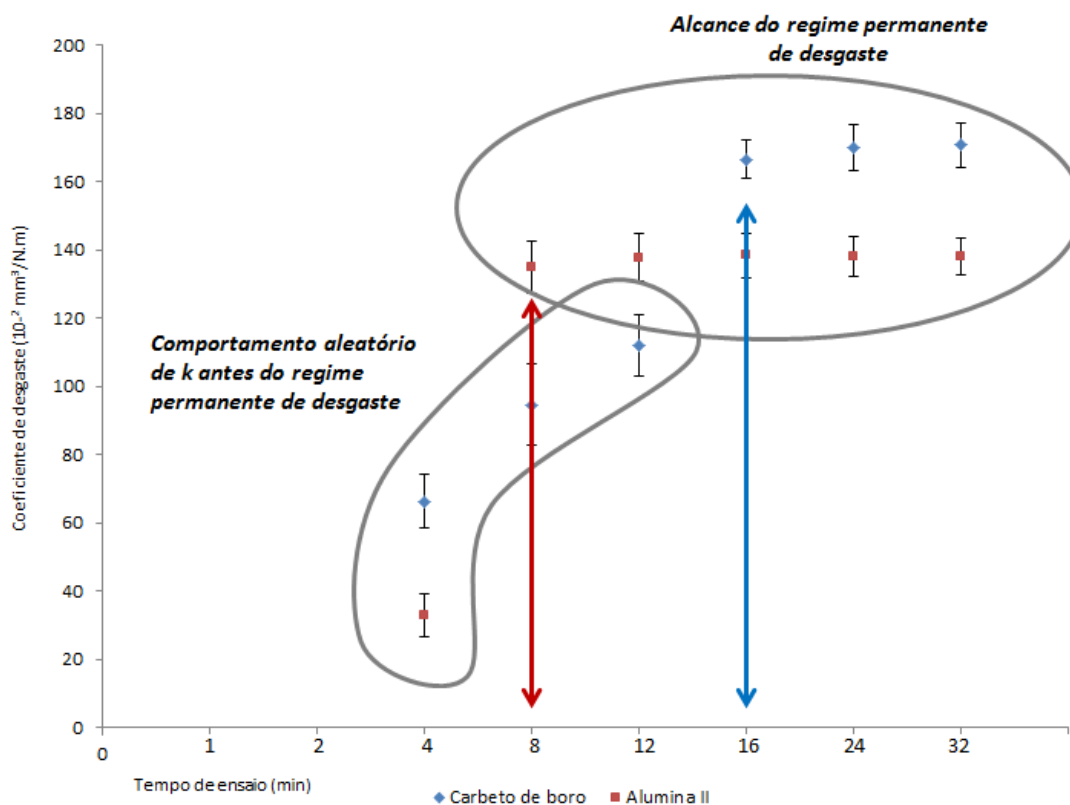


Figura 36 - Gráfico do coeficiente de desgaste em função do tempo de ensaio.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 36 observa-se um aumento do coeficiente de desgaste com o aumento do tempo até atingir o regime permanente de desgaste. Para a alumina II, o regime permanente de desgaste foi obtido após 8 minutos de ensaio e para o carbeto de boro após 16 minutos de ensaio.

De modo a verificar as mudanças ocorridas na superfície de desgaste antes da obtenção e durante o regime permanente de desgaste, uma análise da superfície de desgaste foi realizada, sendo considerados para análise os seguintes ensaios: 4 minutos, 8 minutos, 12 minutos e 16 minutos. A partir dos 16 minutos, ambos os abrasivos atingiram o regime permanente de desgaste, e até os 4 minutos nenhum dos abrasivos tinha atingido tal estado.

A Figura 37 apresenta as crateras de desgaste formadas para ensaios utilizando carbeto de boro como abrasivo, para as condições de 4 minutos (Figura 37(a)), 8 minutos (Figura 37(b)), 12 minutos (Figura 37(c)) e 16 minutos (Figura 37(d)).

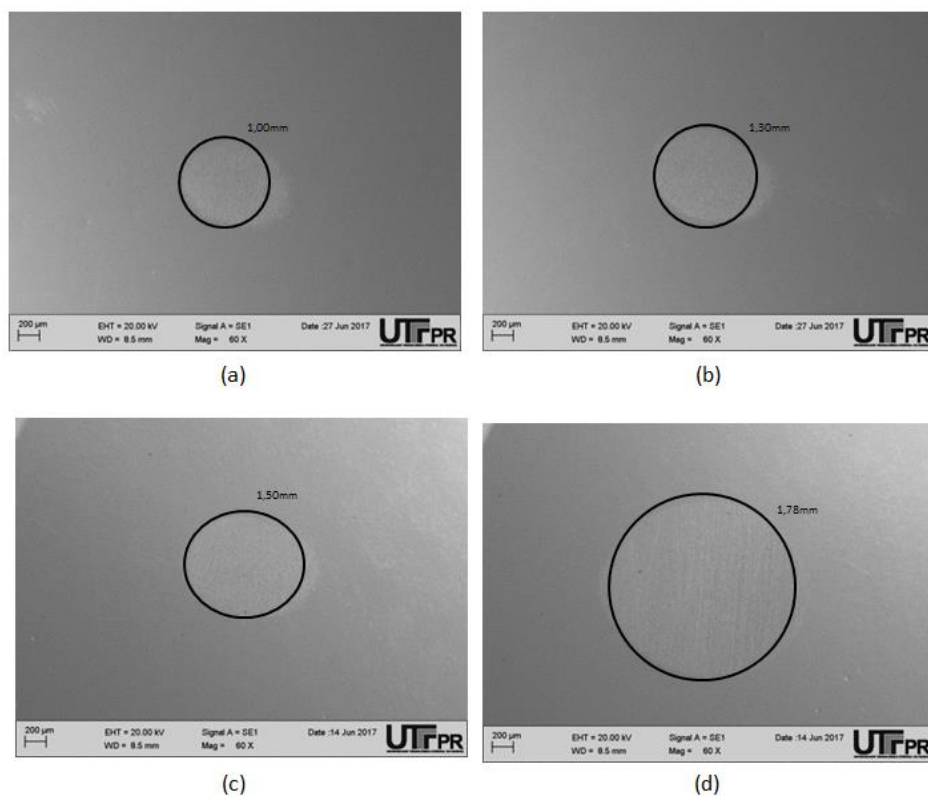


Figura 37 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de carbeto de boro para ensaio com tempo de 4 minutos (a) e 8 minutos (b), 12 minutos (c) e 16 minutos (d).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 38 apresenta as crateras de desgaste para ensaios utilizando alumina II como abrasivo, para as condições de 4 minutos (Figura 38(a)), 8 minutos (Figura 38(b)), 12 minutos (Figura 38(c)) e 16 minutos (Figura 38(d)).

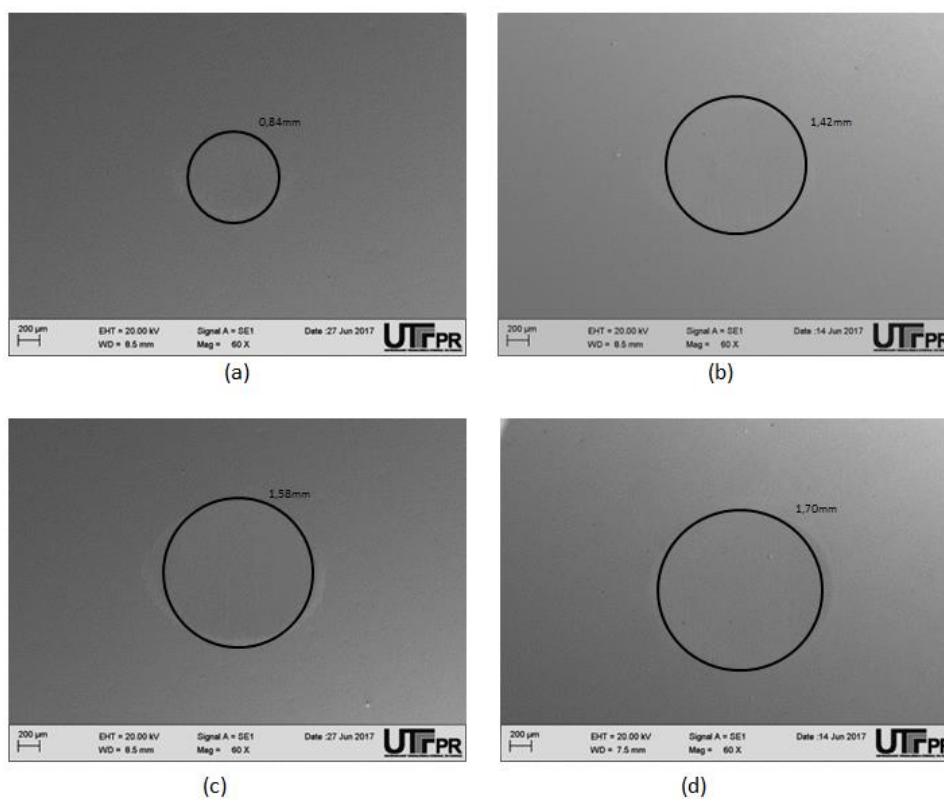


Figura 38 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de alumina II para ensaio com tempo de 4 minutos (a) e 8 minutos (b), 12 minutos (c) e 16 minutos (d).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 apresenta a superfície de desgaste utilizando o carbeto de boro como abrasivo, para as condições de 4 minutos (Figura 39(a)), 8 minutos (Figura 39(b)), 12 minutos (Figura 39(c)) e 16 minutos (Figura 39(d)).

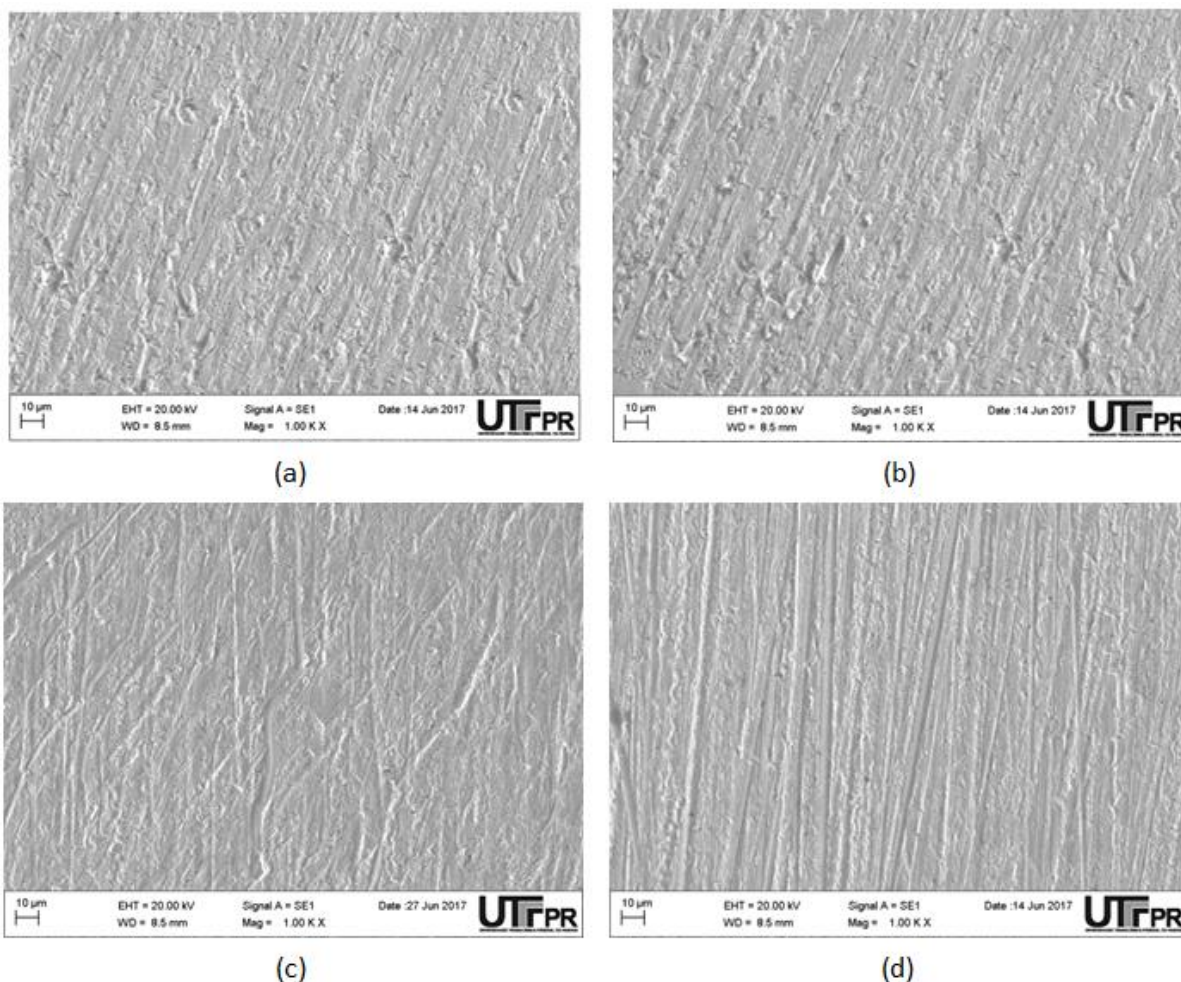


Figura 39 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de carbeto de boro para ensaio durante 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d).

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a amostra de carbeto de boro apresenta desgaste por rolamento para os tempos de ensaio de 4 e 8 minutos e uma transição entre rolamento e riscamento para o tempo de ensaio de 12 minutos. Pode ser verificado para o ensaio de 16 minutos na Figura 39(d) que o modo de desgaste apresentado é o de riscamento, onde foi observado o início do regime permanente.

A Figura 40 apresenta a superfície de desgaste utilizando a alumina II como abrasivo, para as condições de 4 minutos (Figura 40(a)), 8 minutos (Figura 40(b)), 12 minutos (Figura 40(c)) e 16 minutos (Figura 40(d)).

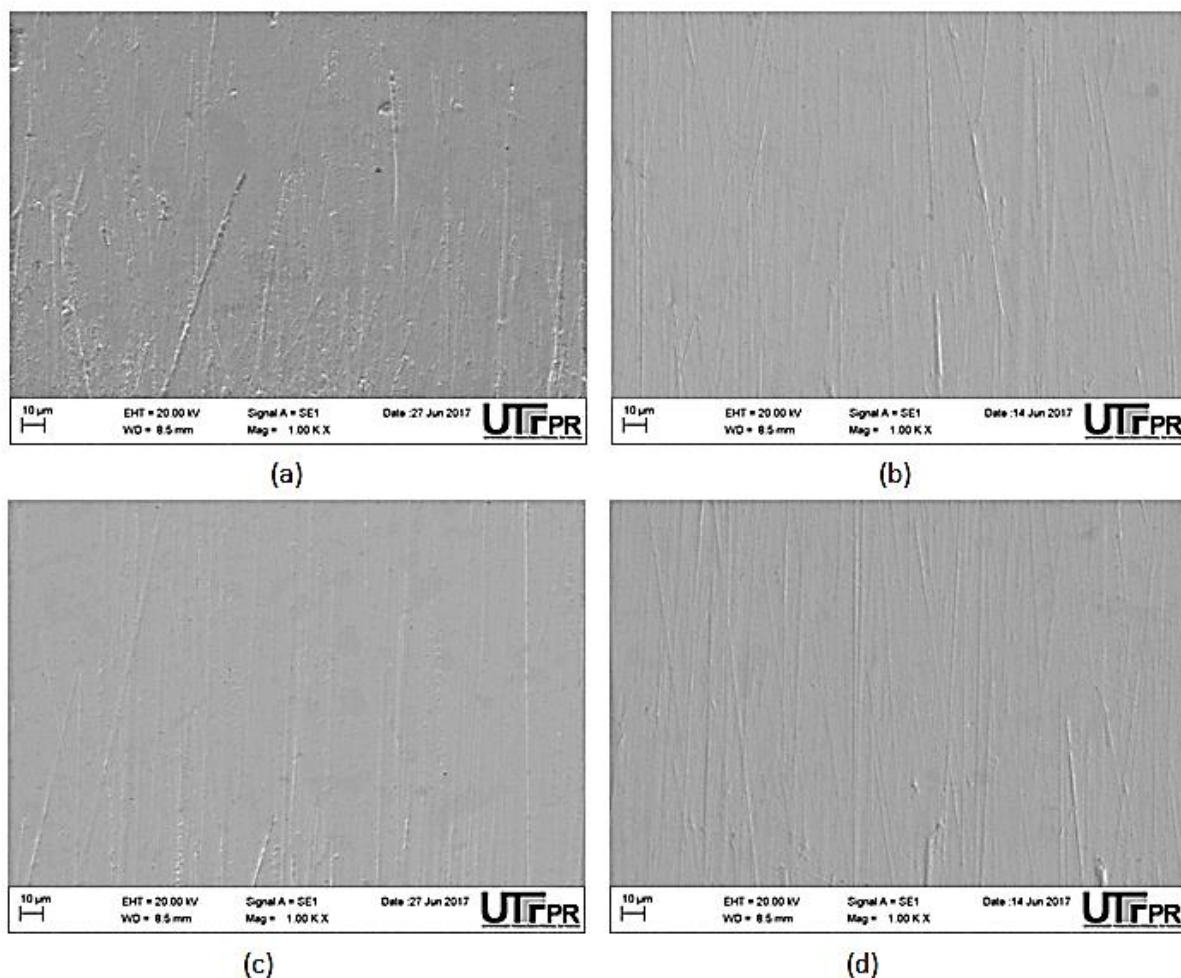


Figura 40 - Marcas de desgaste abrasivo com partículas abrasivas de alumina II para ensaio durante 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d).

Fonte: Autoria própria.

Para 4 minutos de ensaio, a amostra desgastada por alumina II apresenta modo de desgaste por rolamento, enquanto que para os outros tempos de ensaio o modo de desgaste observado foi o de riscamento. Para as amostras desgastadas com alumina II, assim como a amostra desgastada pelo carbetto de boro, o modo de desgaste dominante após alcançar o regime permanente de desgaste foi o desgaste por riscamento.

As marcas de desgaste para o carbetto de boro se mostram mais acentuadas devido ao maior valor do coeficiente de desgaste.

Para uma avaliação mais detalhada da calota de desgaste, uma análise do perfil das crateras de desgaste foi realizada para os ensaios discutidos anteriormente. Para o carbetto de boro, pretende-se verificar se o regime permanente iniciou-se para 16 minutos e para a alumina II se a partir de 4 minutos o regime permanente de desgaste é atingido.

5.4 Perfilometria da cratera de desgaste e parâmetros de rugosidade

A Figura 41 apresenta um perfil da cratera formada para a amostra desgastada com carbeto de boro para os tempos de ensaio de 4 minutos, 8 minutos, 12 minutos e 16 minutos.

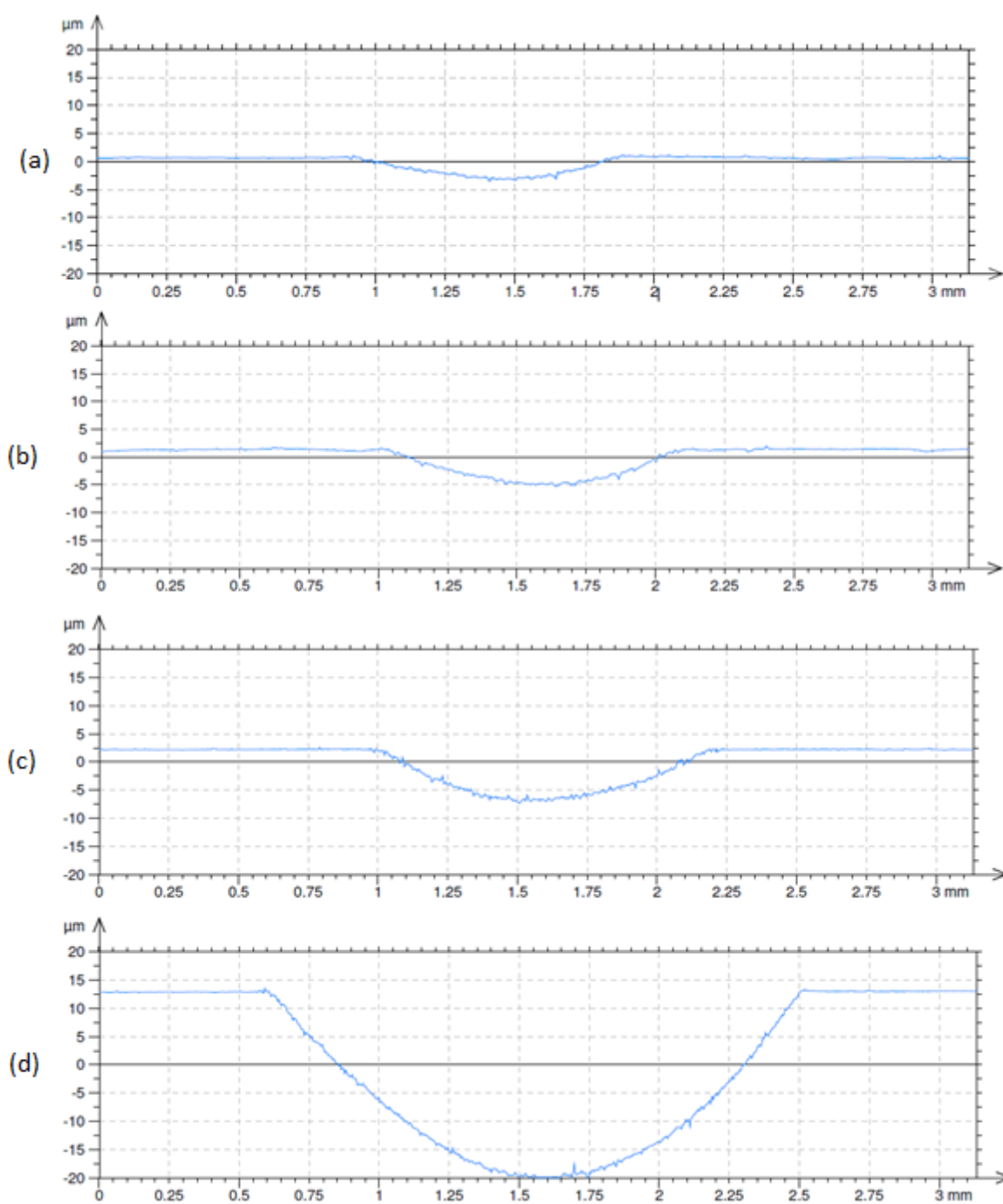


Figura 41 - Perfil da cratera da amostra desgastada por carbeto de boro para ensaio com tempo de 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 42 apresenta um perfil da cratera formada para a amostra desgastada com alumina II para os tempos de ensaio de 4 minutos, 8 minutos, 12 minutos e 16 minutos.

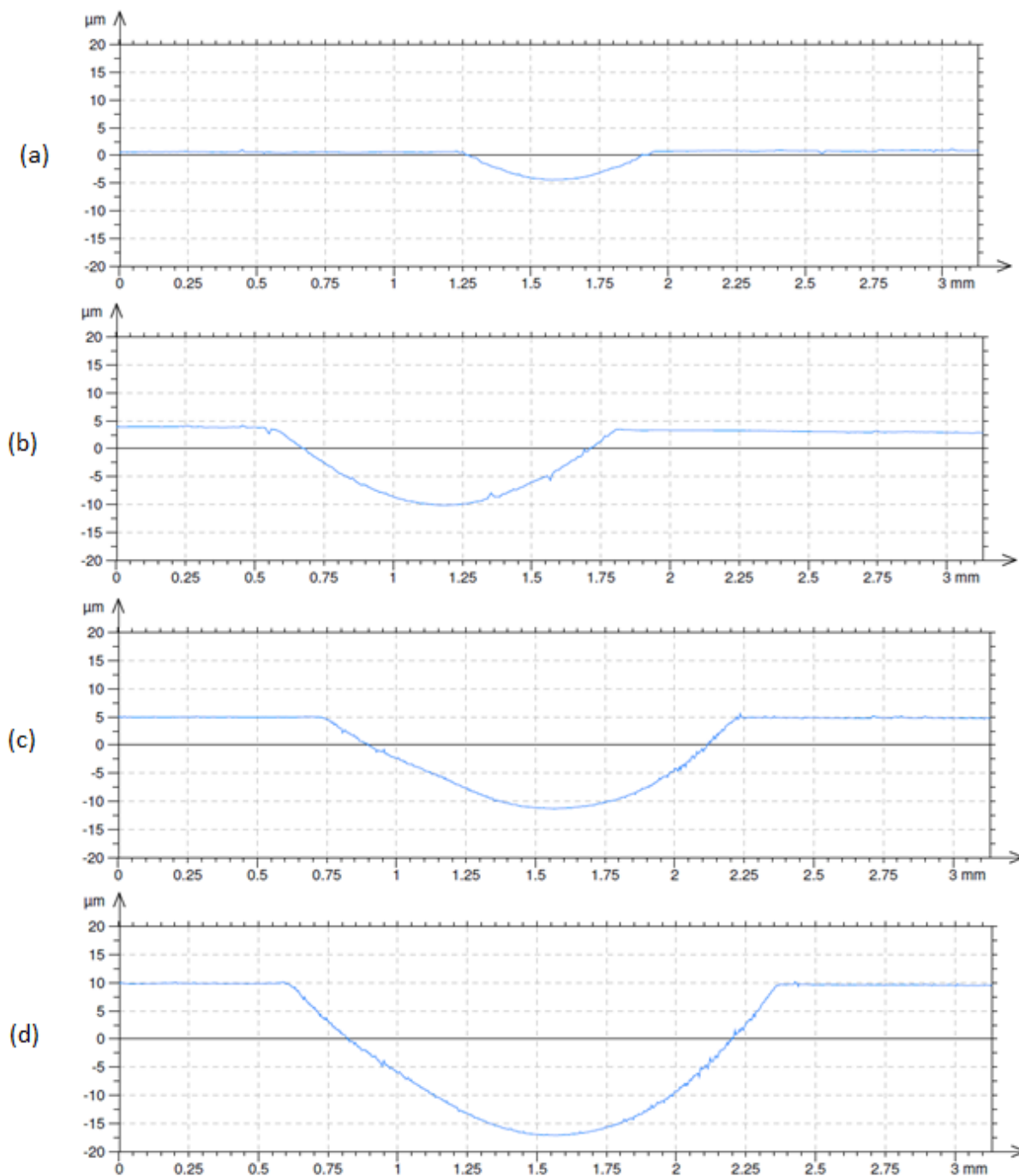


Figura 42 - Perfil da cratera da amostra desgastada por por alumina II para ensaio com tempo de 4 minutos (a), 8 minutos (b), 12 minutos (c) e durante 16 minutos (d).

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se, pela Figura 41, que a amostra desgastada pelo carbeto de boro para o tempo de 16 minutos apresentou comportamento diferente do que as amostras desgastadas pelos outros tempos de ensaio, como pode ser confirmado pelas micrografias apresentadas na Figura 37 e, também, pelas marcas de desgaste abrasivo apresentadas pela Figura 39. Além disso, como os valores de coeficiente de desgaste se mantêm constante a partir de 16 minutos de ensaio, sugere-se que o regime permanente de desgaste foi alcançado nesse tempo de ensaio.

Diferentemente das amostras desgastadas pelo carbeto de boro, as amostras desgastadas pela alumina II, ilustradas na Figura 42, apresentam um perfil de desgaste semelhante a partir do ensaio de 8 minutos. As marcas de desgaste para amostras a partir de 8 minutos, como apresentado na Figura 40, apresentam comportamento semelhante, entretanto uma verificação de valores de rugosidade pode apresentar uma análise mais aprofundada.

A Tabela 19 apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade de amplitude S_a e S_q para as amostras desgastadas por carbeto de boro e alumina II.

Tabela 19 – Parâmetros de rugosidade S_a e S_q para as amostras desgastadas.

| Tempo de ensaio [min] | Carbeto de boro | | Alumina II | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | S_a [μm] | S_q [μm] | S_a [μm] | S_q [μm] |
| 4 | $0,09 \pm 0,01$ | $0,12 \pm 0,01$ | $0,03 \pm 0,01$ | $0,06 \pm 0,01$ |
| 8 | $0,09 \pm 0,01$ | $0,13 \pm 0,01$ | $0,04 \pm 0,01$ | $0,06 \pm 0,01$ |
| 12 | $0,13 \pm 0,02$ | $0,18 \pm 0,02$ | $0,02 \pm 0,01$ | $0,05 \pm 0,01$ |
| 16 | $0,16 \pm 0,02$ | $0,24 \pm 0,03$ | $0,03 \pm 0,01$ | $0,11 \pm 0,01$ |

Fonte: Autoria própria.

Os valores dos parâmetros de rugosidade S_a e S_q para as amostras desgastadas por carbeto de boro apresentam valores maiores comparados com os da alumina II para todos os tempos de ensaio. Segundo Stachowiak & Stachowiak (2004) a morfologia das superfícies desgastadas depende da forma das partículas abrasivas.

Para o carbeto de boro, os valores de rugosidade confirmam o comportamento apresentado pelas marcas de desgaste abrasivo mostradas na Figura 40. Os ensaios de 4 e 8 minutos apresentam o modo de desgaste de rolamento (valores dos parâmetros mais baixos), enquanto o ensaio de 12 minutos apresentou um modo de transição (valor intermediário) e o ensaio de 16 minutos apresentou o modo de deslizamento (valor mais alto).

Já para a alumina II os valores desses parâmetros não apresentaram um padrão bem definido.

A Tabela 20 apresenta os valores dos parâmetros híbridos de rugosidade S_{ds} para as amostras desgastadas por carbeto de boro e alumina II, além do valor calculado de λ_q .

Tabela 20 - Parâmetros de rugosidade S_{ds} e λ_q para as amostras desgastadas por carbeto de boro e alumina II.

| Tempo de ensaio [min] | Carbeto de boro | | Alumina II | |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | λ_q [μm] | S_{ds} [$1/\text{mm}^2$] | λ_q [μm] | S_{ds} [$1/\text{mm}^2$] |
| 4 | $27,1 \pm 0,2$ | 1633 ± 35 | $32,9 \pm 0,5$ | 1422 ± 30 |
| 8 | $27,7 \pm 0,3$ | 1643 ± 42 | $24,7 \pm 0,5$ | 1525 ± 37 |
| 12 | $17,9 \pm 0,3$ | 2349 ± 53 | $25,0 \pm 0,5$ | 3549 ± 49 |
| 16 | $15,1 \pm 0,3$ | 5587 ± 58 | $24,5 \pm 0,5$ | 5502 ± 55 |
| 32 | $15,5 \pm 0,4$ | 5832 ± 49 | x | x |

Fonte: Autoria própria.

Para o carbeto de boro, o valor do parâmetro λ_q apresentou um valor menor para os ensaios de 12 e 16 minutos, quando uma transição de modos de desgaste e o riscamento apresentou-se como modo de desgaste. Já para a alumina II, o valor desse parâmetro apresentou um valor menor para os ensaios a partir de 8 minutos. Como esse parâmetro representa aproximadamente a largura do sulco de desgaste causado por uma partícula, pode-se inferir que quando o regime permanente é atingido temos um valor provável da largura do desgaste para tais condições, e uma provável estabilização do mesmo.

Williams & Xie (1992) mostraram que reduzindo a distância entre sulcos paralelos, o modo de desgaste se alterava de rolamento para riscamento. Tal comportamento foi atribuído à interação entre sulcos vizinhos.

Silva *et al.* (2011) verificaram que ensaios de riscamento com riscos paralelos também mostraram uma transição no modo de desgaste de acordo com o grau de sobreposição destes riscos. Para ensaios em amostras de aço ferramenta, graus de sobreposição superiores a 80% causaram remoção significativa de material. Para baixos graus de sobreposição, rolamento foi o modo de desgaste predominante.

Logo, os menores valores do parâmetro λ_q representam uma menor distância entre sulcos paralelos e/ou um maior grau de sobreposição dos sulcos, que levam a uma transição para o modo de desgaste por riscamento.

Tal comportamento corrobora os valores obtidos para o parâmetro λ_q , que reduziu seu valor para a alumina II para o ensaio de 8 minutos. Já para o carbeto de boro, o valor parâmetro λ_q diminuiu para o ensaio de 12 minutos (modo de desgaste entre rolamento e riscamento) e para 16 minutos (riscamento).

O parâmetro de rugosidade S_{ds} aumenta de acordo como aumento do tempo de ensaio para ambos os abrasivos, indicando conseqüentemente uma densidade de picos maior por unidade de área.

Uma análise das partículas abrasivas após os ensaios de desgaste por esfera rotativa foi realizada para avaliar a ocorrência de mudanças ou não em suas morfologias e sua relação com o comportamento de desgaste do material.

5.5 Caracterização das partículas após ensaio de desgaste

Arbitrou-se realizar uma verificação da morfologia das partículas após os ensaios de 8 minutos e de 16 minutos para o carbeto de boro e alumina II.

A Tabela 21 apresenta os valores de d_{50} e do parâmetro SPQ para o carbeto de boro após os ensaios.

Tabela 21 - Resultado do parâmetro SPQ e $d_{50}(\%)$ para partículas de carbeto de boro.

| | SPQ | | $d_{50}(\%)$ |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| | $d_p > 7 \mu\text{m}$ | $d_p < 7 \mu\text{m}$ | |
| Carbeto de boro (fornecimento) | $0,34 \pm 0,11$ | $0,44 \pm 0,14$ | $6,5 \pm 0,1$ |
| Carbeto de boro (8 minutos) | $0,34 \pm 0,06$ | $0,57 \pm 0,11$ | $6,4 \pm 0,3$ |
| Carbeto de boro (16 minutos) | $0,43 \pm 0,18$ | $0,52 \pm 0,14$ | $6,5 \pm 0,4$ |

Fonte: Autoria própria.

Comparando os valores de SPQ e d_{50} para as partículas de carbeto de boro, pode ser verificado que estatisticamente não houve mudanças significativas para os parâmetros após os ensaios de 8 e 16 minutos. Conseqüentemente, a angulosidade e o tamanho médio mantêm-se com valores próximos aos do estado de fornecimento.

A Tabela 22 apresenta os valores de d_{50} e do parâmetro SPQ para a alumina II após os ensaios.

Tabela 22 - Resultado do parâmetro SPQ e $d_{50}(\%)$ para partículas de alumina II.

| | SPQ | | $d_{50}(\%)$ |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| | $d_p > 7 \mu\text{m}$ | $d_p < 7 \mu\text{m}$ | |
| Alumina II (fornecimento) | $0,42 \pm 0,08$ | $0,40 \pm 0,11$ | $6,7 \pm 0,3$ |
| Alumina II (8 minutos) | $0,47 \pm 0,12$ | $0,37 \pm 0,14$ | $6,6 \pm 0,4$ |
| Alumina II (16 minutos) | $0,49 \pm 0,11$ | $0,39 \pm 0,10$ | $6,6 \pm 0,4$ |

Fonte: Autoria própria.

A alumina II também não apresentou mudança significativa valores de SPQ e d_{50} para ambos os ensaios.

Como não houve variação no diâmetro d_{50} pode-se inferir que a distribuição de partículas finas também não aumentou, o que seria um fato que poderia alterar a angulosidade das mesmas. Portanto, conclui-se que a fragmentação não deve ter ocorrido durante o processo.

6 CONCLUSÕES

Baseado nos ensaios de micro abrasão conduzidos em esfera rotativa chega-se às seguintes conclusões.

- A forma da calota não se apresentou bem definida para tempos de ensaio de 1 e 2 minutos;
- O regime permanente de desgaste em função do tempo de ensaio foi observado primeiramente para a alumina II, após 8 minutos de ensaio, e posteriormente para o carbeto de boro, com 16 minutos de ensaio;
- A transição dos modos de desgaste de rolamento para riscamento foi observada tanto para a alumina II como para o carbeto de boro. Esta transição dos modos de desgaste ocorreu juntamente com a transição para o regime permanente de desgaste;
- O valor do coeficiente de desgaste encontrado para o carbeto de boro foi maior que o valor para a alumina II, indicando maior desgaste para aquele;
- Após a estabilização do regime permanente de desgaste, os valores dos parâmetros de rugosidade S_a e S_q para as amostras desgastadas por carbeto de boro apresentam valores maiores que os para a alumina II, indicando maior remoção para aquele;
- Não houve aumento significativo da rugosidade da superfície da esfera de desgaste tanto para a alumina II quanto para o carbeto de boro;
- O valor do parâmetro λ_q apresentou um valor menor para os ensaios em que o regime permanente foi atingido, quando houve uma mudança do modo de desgaste de rolamento para riscamento;
- Apesar de o carbeto de boro apresentar um custo aproximadamente 30% maior que a alumina, o coeficiente de desgaste para este justifica sua utilização.

Logo, pode ser verificado que abrasivos de Al_2O_3 apresentam menor abrasividade quando comparados aos abrasivos de B_4C em ensaios de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa. Este tipo de ensaio de desgaste mostrou ser bastante eficiente para verificar a abrasividade de diferentes partículas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a análise dos resultados obtidos para as diferentes condições de ensaio para as partículas de alumina e carbetto de boro, as seguintes sugestões são apresentadas para dar continuidade ao trabalho:

- Avaliar comparativamente a diferença entre os tamanhos médios da alumina para verificar se há diferença de abrasividade entre elas;
- Avaliar a influência do tamanho médio e da angulosidade das partículas na mudança para o regime permanente de desgaste;
- Verificar os resultados obtidos para outras partículas abrasivas;
- Verificar os resultados obtidos para partículas abrasivas com diferentes durezas;
- Verificar os resultados obtidos para partículas abrasivas com diferentes morfologias;
- Verificar os resultados obtidos para partículas abrasivas com diferentes tamanhos;
- Comparar os resultados obtidos através de diferentes processos de desgaste para avaliar a abrasividade de partículas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADACHI, K., HUTCHINGS, I. M. **Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness.** Wear, Volume 258, 2005. p.318-321.

ADACHI, K., HUTCHINGS, I. M. **Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test.** Wear, Volume 255, 2003. p.23-29.

ADACHI, K., KATO, K., CHEN, N. **Wear map of ceramics.** Wear, Volumes 203-204, 1997. p. 291-301.

ADDISON, O., MARQUIS, P. M., FLEMING, G. J. P. **The impact of modifying alumina air abrasion parameters on the fracture strength of a porcelain laminate restorative material.** Dental Materials, Volume 23, 2007. p. 1332-1341.

ALLSOPP, D. N., TREZONA, R. I., HUTCHINGS, I. M. **The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test.** Tribology Letters, Volume 5, 1998. p. 259-264.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Jaw Crusher Gouging Abrasion Test.** G81 Annual Book of ASTM Standards, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number).** G75-15 Annual Book of ASTM Standards, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method.** D7625-10 Annual Book of ASTM Standards, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.** G65-16 Annual Book of ASTM Standards, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard terminology relating to wear and erosion.** G40-15 Annual Book of ASTM Standards, 2015.

BARTALINI, M. M. **Desgaste abrasivo em britadores de mandíbulas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CARDOSO, M. J. **Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

COSEGLIO, M. S. D. R. **Análise da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão sem renovação de partículas abrasivas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa

de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CORONADO, J. J., SINATORA, A. **Particle size effect on abrasion resistance of mottled cast iron with different retained austenite contents.** *Wear*, Volume 267, 2009. p. 2077-2082.

COZZA, R. C. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COZZA, R. C. **Influência do desgaste da esfera na formação das crateras de desgaste em ensaios ball-cratering.** *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2015. p. 202-210.

COZZA, R.C., MELLO, J. D. B. de, TANAKA, D. K., SOUZA, R. M. **Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests.** *Wear*, Volume 263, 2007. p. 111-116.

COZZA, R. C., TANAKA, D. K., SOUZA, R. M. **Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – preliminary results.** *Wear*, Volume 267, 2009. p. 61-70.

COZZA, R. C. **Third abrasive wear mode: is it possible?** *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 3, 2014. p. 191-193.

DESALE, G. R., BHUPENDRA, K. G., JAIN, S. C. **Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials.** *Wear*, Volume 261, 2006. p. 914-921.

FIELD, E., FARHAT, M., WALLEY, S. M. **Comminution Limit (CL) of Particles and Possible Implications for Pumped Storage Reservoirs.** *Journal of Materials Science*, Volume 49, 2014. p. 3780–3784.

FULCHER, J. K., KOSEL, T. H., FIORE, N. F. **The effect of carbide volume fraction on the low stress abrasion resistance of high Cr-Mo white cast irons.** *Wear*, Volume 84, 1983. p. 313–325.

GANT, A. J., GEE, M. G. **A review of micro-scale abrasion testing.** *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 44, Numer 7, 2011.

GEE, M. G., GANT, A. J., HUTCHINGS, I. M, KUSANO, Y., SCHIFFMAN, K., ACKER, K.V., POULAT, S., GACHON, Y., STEBUT, J. V., HATTO, P., PLINT, G. **Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test.** *Wear*, Volume 259, 2005. p. 27-35.

GOMEZ, V. A. O., MACEDO, 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*, Volume 328-329, 2015. p. 563-568.

GOV, K., EYERCIOGLU, O. **Effects of abrasive types on the surface integrity of abrasive-flow-machined surfaces.** Journal of Engineering Manufacture, 2016.

HAMBLIN, M. G., STACHOWIAK, G. W. **Description of Abrasive Particle Shape and Its Relation to Two-Body Abrasive Wear.** Tribology Transactions, Volume 39, 1996. p. 803-810.

HEIMANN, R. B. **Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications.** Wiley-VCH, Weinheim, 2010. p. 576.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** Butterworth-Heinemann, 1992.

KÄSLING, H., THURO, K. **Determining rock abrasivity in the laboratory.** Rock mechanics in civil and environmental engineering, 2010. p. 425-428.

KELLY, D.A., HUTCHINGS, I. M. **A new method for measurement of particle abrasivity.** Wear, Volume 250, 2001. p. 76-80.

KRELLING, A. P., COSTA, C. E. da, MILAN, J. C. G., ALMEIDA, E. A. S. **Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel.** Tribology International, Volume 111, 2017. p. 234-242.

KUSANO, Y., HUTCHINGS, I. M. **Sources of variability in the free-ball micro-scale abrasion test.** Wear, Volume 258, 2005. p. 313-317.

MELO, F. C. L. **Efeitos de aditivos na sinterização de carbetos de boro.** Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MENDANHA, A., JUNIOR, A. R. F., GOLDENSTEIN, H., TSCHIPTSCHIN, A. P., PINEDO, C. A. **Principais parâmetros metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2.** 6º Seminário da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes - ABM, São Paulo, 2008.

MOREIRA, P. P. **Ajuste da viscosidade do fluido erosivo para manutenção da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

OLIVEIRA, E. E. M. **Estudo de sinterização e análise microestrutural de alumina - carbetos de boro (Al₂O₃-B₄C).** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1995.

PHANEENDRA, K. A. L.; CHIKKANNA, N. **Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Titanium Carbide/Aluminium Composites.** International Journal of Current Engineering and Technology, Volume 7, 2017.

PETRICA, M., BADISCH, E., PEINSITT, T. **Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties.** Wear, Volume 308, 2013. p. 86-94.

PINTAUDE, G. **Characteristics of Abrasive Particles and Their Implications on Wear.** New Tribological Ways, InTech, 2011.

PLINNINGER, R.J., KÄSLING, H., THURO, K. **Wear prediction in hard rock excavation using the CERCHAR abrasiveness index (CAI).** Rock Engineering: theory and practice. Gluckauf, 2004, p. 599–604.

POTZ, D., CHRIST, W., DITTUS, B. **Diesel Nozzle - The determining interface between injection system and combustion chamber.** Proceedings of Thiesel Conference, Valência, Espanha, 2000. p. 133-138.

RADZISZEWSKI, P. **The steel wheel abrasion test (SWAT): A tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry.** Wear, Volume 267, 2009. p. 92-98.

RUTHERFORD, K. L., HUTCHINGS, I. M. **A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems.** Surface and Coatings Technology, Volume 79, 1996. p. 231-239.

RUTHERFORD, K. L., HUTCHINGS, I. M. **Theory and application of a micro-scale abrasive wear test.** Journal of Testing and Evaluation, Volume 25, 1997. p. 250-260

SANTOS, N. D. A. **Estudo do processo de sinterização do carvão de boro com adição de carbono.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, São Paulo, 1995.

SCHIFFMANN, K. I.; BETHKE, R.; KRISTEN, N. **Analysis of perforating and non-perforating micro-scale abrasion tests on coated substrates.** Surface and Coatings Technology, Volume 200, 2005. p. 2348-2357.

SILVA, M. V. da, STAINER, D., AL-QURESHI, H. A., HOTZA, D. **Blindagens cerâmicas para aplicações balísticas: uma revisão.** Cerâmica, Volume 60, 2014. p. 323-331.

SILVA, W. M., COSTA, H. L., MELLO, J. D. B. de. **Transitions in abrasive wear mechanisms: Effect of the superimposition of interactions.** Wear, Volume 271, 2011. p. 977-986.

SIN, H., SAKA, N., SUH, N. P. **Abrasive wear mechanisms and the grit size effect.** Wear, Volume 55, 1979. p. 163-190.

STACHOWIAK, G. B., STACHOWIAK, G. W. **The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear.** Wear, Volume 249, 2001. p. 201-207.

STACHOWIAK, G. B., STACHOWIAK, G. W. **Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles.** Wear, Volume 256, 2004. p. 600-60.

STACHOWIAK, G. B., STACHOWIAK, G. W., BRANDT, J. M. **Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles.** Tribology International, Volume 39, 2006. p. 1-11.

TREZONA, R. I., ALLSOPP, D. N., HUTCHINGS, I. M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test.** *Wear*, Volumes 225-229, 1999. p. 205-214.

TURATTI, A. M., PEREIRA, A. S. **Wear resistant boron carbide compacts produced by pressureless sintering.** *Ceramics International*, Volume 43, 2017. p. 7970-7977.

UREEL, S. D., MOMAYEZ, M. **An Investigation of the Present and Future Testing Methods of Rock Abrasion Resistance.** *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, Volume 3, 2014. p. 10-19.

WILLIAMS, J. A., HYNICICA, A. M. **Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts.** *Wear*, Volume 152, 1992. p. 57-74.

WILLIAMS, J. A., XIE, Y. **The generation of wear surfaces by the interaction of parallel grooves.** *Wear*, Volume 155, 1992. p. 363-379.

WOLDMAN, M., HEIDE, E. V. D., SCHIPPER, D. J., TINGA, T., MASEN, M. A. **Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behavior.** *Wear*, Volumes 294-295, 2012. p. 419-426.

WOOD, R. J. K., SUN, D., THAKARE, M. R., ROZAS, A. de F., WHARTON, J. A. **Interpretation of electrochemical measurements made during micro-scale abrasion-corrosion.** *Tribology International*, Volume 43, 2010. p. 1218-1227.

XUAN, J. L., HONG, I. T., FITCH, E. C. **Hardness effect on three-body abrasive wear under fluid film lubrication.** *Journal of Tribology*, Volume 111, 1989.

WANG, A. G., HUTCHINGS, I. M. **The number of particle contacts in two-body abrasive wear of metals by coated abrasive papers.** *Wear*, Volume 129, 1989. p. 23-25.

YÁNEZ, M. J., HEGEL, C., JONES, C., CABRERA, F., BUCALA, V. Particle size characterization: Comparison of laser diffraction (LD) and scanning electron microscopy (SEM). *Acta Microscopica*, Volume 23, 2014. p. 11 – 17.

ZUM-GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials.** Institute of Materials Technology, University of Siegen, Federal Republic of Germany, Volume 10, 1987. p. 358.

APÊNDICE A – EQUAÇÕES PARA ENSAIO DE MICRO-ABRASÃO

As equações para a profundidade da esfera de ensaio e para o volume de desgaste serão deduzidas para o desgaste micro abrasivo de um corpo de prova por uma esfera de ensaio.

1) Profundidade da esfera de ensaio (h):

Aplicando o Teorema de Pitágoras para a Figura I:

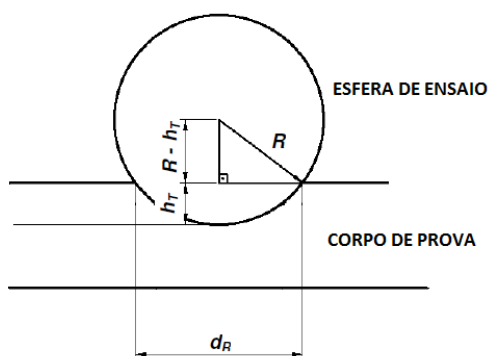


Figura I – Corpo de prova desgastado por uma esfera de ensaio.

$$R^2 = \left(\frac{d_R^2}{4}\right) + (R - h_T)^2 \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{d_R^2}{4} + R^2 + h_T^2 - 2Rh_T \quad (2)$$

$$h_T^2 - 2Rh_T + \frac{d_R^2}{4} = 0 \quad (3)$$

Os coeficientes da Equação 3 são $A=1$, $B=-2R$ e $C=\frac{d^2}{4}$. Logo:

$$\Delta = B^2 - 4AC \rightarrow \Delta = (-2R)^2 - 4 * 1 * \frac{d_R^2}{4} \rightarrow \Delta = 4R^2 - d_R^2$$

Então:

$$h_T = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2a} \rightarrow h_T = \frac{2R \pm \sqrt{4R^2 - d_R^2}}{2}$$

Pode-se perceber que:

$$\text{Quando } d_R = 0 \rightarrow h_T = 0$$

$$d_R = 25,4\text{mm} \rightarrow h_T = 12,7\text{mm}$$

$$h_T = \frac{2R \pm \sqrt{4R^2 - d_R^2}}{2}$$

$$h_T = \frac{2 * 12,7 \pm \sqrt{4(12,7)^2 - d_R^2}}{2}$$

$$h_T = 12,7 - \sqrt{161,29 - 0,25d_R^2} \quad (3)$$

Unidades: h_T [mm] e d_R [mm].

2) Profundidade da esfera de ensaio (V):

Aplicando a fórmula $V = \pi \int_0^h [f(x)]^2 dx$ de acordo com a Figura II:

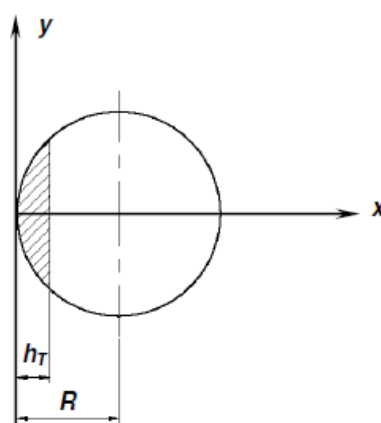


Figura II – Cálculo de volume desgastado por uma esfera de ensaio.

$$V = \pi \int_0^{h_T} [R^2 - (x - R)^2] dx \quad (4)$$

$$V = \pi \int_0^{h_T} [R^2 - (x - R)^2] dx$$

$$V = \pi \int_0^{h_T} [R^2 - x^2 + 2Rx - R^2] dx$$

$$V = \pi \int_0^{h_T} (-x^2 + 2Rx) dx$$

$$V = \pi \left[2R \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right]_0^{h_T}$$

$$V = \pi \left[\left(Rh_T^2 - \frac{h_T^3}{3} \right) - 0 \right]$$

$$V = \pi \left[12,7h_T^2 - \frac{h_T^3}{3} \right] \quad (5)$$

Unidades: V [mm^3] e d_R [h_T].

APÊNDICE B – TRABALHO PUBLICADO – COBEF 2017



9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
Joinville, Santa Catarina, Brasil
Copyright © 2017 ABCM

UMA REVISÃO SOBRE ENSAIOS TRIBOLÓGICOS PARA MEDIR ABRASIVIDADE DE PARTÍCULAS DURAS

Tiago Alexandre Rosso, tiagoarosso@hotmail.com¹

Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br¹

Ane Cheila Rovani, acrovani@gmail.com¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Avenida Sete de Setembro, 3165, Rebouças – CEP 80230-901, Curitiba - PR

Resumo: *A abrasão de materiais pode ser usada como meio de remoção de material por usinagem, ou ainda, ser mecanismo de remoção de materiais indesejado associado a processos produtivos, como cominuição de minérios. A capacidade de remoção pode ser atribuída a variações da concentração, geometria, dureza e distribuição de tamanho das partículas no fluido abrasivo. Logo, um melhor entendimento acerca da abrasividade das partículas faz-se necessário para uma melhor caracterização dos modos e mecanismos atuantes no processo. No presente trabalho, uma revisão dos seguintes ensaios para medir abrasividade é apresentada: ensaio de roda de borracha (ASTM G65), ensaio para determinação do índice de Miller (ASTM G75) e microabrasão, nas escalas micrométricas, e ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81), ensaio de abrasão por impacto cíclico e ensaio de abrasividade Cerchar, na escala milimétrica de tamanho de partículas. Em particular, futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de microabrasão são apresentadas com maior detalhamento.*

Palavras-chave: abrasividade, desgaste abrasivo, remoção de material, partículas duras.

1. INTRODUÇÃO

A abrasividade de partículas é uma propriedade importante em diferentes áreas. Pode-se citar por exemplo diferentes processos de usinagem (Komanduri et al, 1997), processos de extração mineral (Plinninger et al, 2008) e odontologia (Philpotts, 2005).

A capacidade de remoção de material por uma partícula abrasiva não é uma propriedade intrínseca, e como a resistência ao desgaste abrasivo é resultado da interação entre o material e o abrasivo, logo não se caracteriza uma propriedade de um material, mas de um sistema de materiais. O comportamento do material não depende somente de suas propriedades, mas também das propriedades do abrasivo, do projeto, da geometria das peças e das condições operacionais (Hutchings, 1992).

Um exemplo da utilização de abrasivos para a melhoria da qualidade superficial na indústria automotiva é o processo de usinagem por hidroerosão, o qual promove um arredondamento da região de entrada de componentes do sistema de injeção de motores a diesel (Coseglio et al, 2016). Um dos fatores mais importantes no processo de hidroerosão é o fluido, composto por partículas abrasivas dispersas neste fluido. O resultado e a eficiência do processo de hidroerosão estão intimamente ligados à combinação e interação entre o fluido, as partículas abrasivas e o material do componente.

O custo despendido com determinadas partículas abrasivas utilizadas no processo de hidroerosão figuram entre os mais altos entre os materiais de consumo para tal processo (Coseglio et al, 2016). Logo, tal fato torna-se um motivador para que abrasivos alternativos sejam encontradas de forma a reduzir o impacto econômico no processo de hidroerosão.

Efeitos de diferentes tipos de abrasivos sobre a integridade superficial de superfícies usinadas com fluxo abrasivo foram estudados por Gov et al. (2016). Quatro grupos de meios abrasivos foram preparados com diferentes tipos de abrasivos: SiC, Al₂O₃, B₄C e Garnet. A remoção do material e a dureza do abrasivo estão na mesma ordem: B₄C, SiC, Al₂O₃ e Garnet (do menor ao maior), logo a remoção do material está diretamente relacionada à dureza do abrasivo.

Diante do exposto, fica evidente que a análise da abrasividade das partículas abrasivas mostra-se importante para o estudo da eficiência da remoção de material. Como a quantificação do efeito da abrasividade ainda é deficiente, o estudo se propõe apresentar uma revisão de ensaios nas escalas micrométrica e milimétrica de tamanho de partículas e futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de micro abrasão.

2. ABORDAGEM DE TIPOS DE ENSAIO PARA ANALISAR A ABRASIVIDADE

Uma revisão dos seguintes ensaios para medir abrasividade é apresentada: ensaio para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75), ensaio de roda de borracha (ASTM G65) e micro abrasão, nas escalas micrométricas, e ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81), ensaio de abrasão por impacto cíclico e ensaio de abrasividade Cerchar, na escala milimétrica de tamanho de partículas. Em particular, futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de micro abrasão são apresentadas com maior detalhamento.

2.1. Ensaios para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75)

O ensaio que permite determinar um índice denominado número de Miller tem sido amplamente utilizado para medir a abrasividade relativa de muitas suspensões (Ureel et al, 2014). Em 2001 foi adotado pela ASTM que estabeleceu a norma G75 “Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)”.

Esta norma apresenta um método de ensaio que descreve um procedimento laboratorial que pode ser usado para desenvolver dados relativos à abrasividade de qualquer lama (número de Miller) ou a resposta de diferentes materiais para a abrasividade de diferentes lamas (número SAR).

Conceitualmente, o número de Miller é uma medida de abrasividade relacionada à taxa de perda de massa de um bloco de metal padrão (liga Ferro-27%Cromo). O número é calculado a partir da curva de perda de massa acumulada em função do tempo, obtida com a realização de vários ensaios sucessivos e cumulativos (ASTM G75, 2015). A Figura (1) exibe um típico equipamento para o ensaio para determinação do número de Miller.



Figura 1. Equipamento típico para ensaio de abrasão para identificação do número de Miller. Ureel et al, 2014.

O Número SAR é uma medida da resposta à abrasão relativa de qualquer material em qualquer lama, onde se relacionam taxa de perda de massa de uma amostra, a partir da curva de perda de massa acumulada com o tempo obtida segundo o mesmo procedimento para determinação do número de Miller. A evolução do desgaste é registrada acumulando-se a perda de massa em intervalos regulares durante o ensaio (ASTM G75, 2015).

O ensaio para determinação do número SAR é mais abrangente que o ensaio para o número de Miller, pois ao invés de adotar um material padrão a ser desgastado, ele permite avaliar a resposta de vários materiais. Constitui-se, portanto, em um teste recomendado para a seleção adequada de materiais.

Embora os testes de lama usem principalmente condições de baixa abrasão, cenários de alta abrasão podem ser simulados. Testes de esforço elevado são apropriados para uso se forem necessários esforços para fraturar a rocha sendo testada (Ureel et al, 2014).

A abrasividade é uma função da concentração dos sólidos na lama e das seguintes características das partículas sólidas: dureza, tamanho, forma, distribuição de tamanho e friabilidade (ASTM G75, 2015).

2.2. Ensaios de roda de borracha (ASTM G65)

O equipamento para teste abrasivo roda de borracha é o mais utilizado para ensaios de abrasão a baixa tensão, cujo procedimento é estabelecido pela norma ASTM G65, 2016.

O seu princípio de funcionamento consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado com areia, cujo tamanho de grão e composição são controlados. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando o riscamento.

Nesse equipamento, um motor de corrente contínua aciona o contra-corpo, que consiste de um disco metálico recoberto por um anel de borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore A (ASTM G65, 2016). Como ilustra a Fig. (2), a amostra é fixada a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força normal à amostra via peso morto, enquanto o fluxo de abrasivo escoar por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a presença de abrasivo novo durante a realização do ensaio de desgaste.

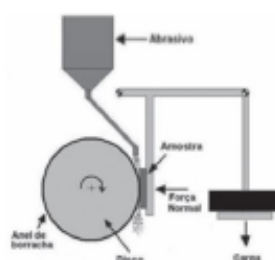


Figura 2. Diagrama esquemático do aparato de teste de roda de borracha. Adaptado de ASTM G65, 2016.

A configuração deste sistema permite a aplicação de alta carga e utilização de um contra-corpo com baixa dureza e promove o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. Os eventos resultantes da movimentação das partículas abrasivas apresentam um forte direcionamento de acordo com o movimento do contra-corpo.

Woldman et al (2012) estudaram a influência das propriedades das partículas de areia sobre o desgaste abrasivo utilizando um equipamento para teste abrasivo de roda de borracha com areia seca. Mostrou-se que diferentes variedades de areia apresentam diferentes taxas de desgaste específico. O tamanho da partícula, a taxa de alimentação de abrasivo e sua forma não podem explicar essas diferenças separadamente. Contudo, quando se utiliza uma combinação destas propriedades de partícula, pode-se derivar uma relação entre as propriedades da areia e a abrasão que é causada.

Alguns resultados mostram que a abrasividade de partículas pode ser determinada usando o ensaio roda de borracha. Por exemplo, Fulcher et al (1983) investigaram o papel da fração volumétrica de carboneto no desenvolvimento da resistência à abrasão. A resistência à abrasão por esforço das ligas foi medida contra areia de quartzo (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) com um ensaio de abrasão de roda de borracha abrasiva seca (Rubber Wheel Abrasion Test - RWAT).

Resultados ilustrados na Fig. (3) mostram que a resistência à abrasão chegou a um valor máximo para uma fração volumétrica de carboneto intermediária próximo da composição eutética para o quartzo, enquanto que a perda de massa diminuiu monotonicamente com a fração volumétrica de carboneto para testes com o Al_2O_3 mais duro (Fulcher et al, 1983).

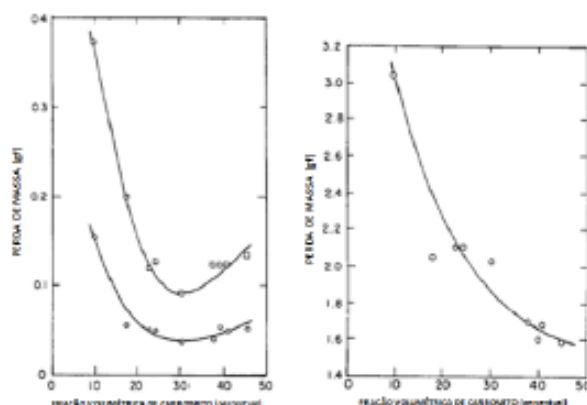


Figura 3. Perda de massa de ferro branco como função da fração volumétrica de carboneto para testes RWAT com SiO_2 e Al_2O_3 . Fulcher et al, 1983.

A dureza do abrasivo em relação à superfície desgastada é um fator importante na determinação da resistência ao desgaste, e esse fator é pelo menos parcialmente responsável pelas diferenças de comportamento do SiO_2 e do Al_2O_3 (Fulcher et al, 1983).

2.2.1 Teste de abrasão com roda de aço

O teste de abrasão com roda de aço (Steel Wheel Abrasion Test - SSWAT) apresenta um bom potencial para o controle e medição de todas as variáveis que afetam o desgaste abrasivo (Radziszewski, 2009).

Radziszewski (2009) mostrou com seus resultados que o desgaste abrasivo com roda de aço em condições secas (Steel Wheel Abrasion Test - SWAT) depende da interação entre o material da amostra, do abrasivo, da carga aplicada e da energia consumida no desgaste e ruptura do abrasivo.

Petrica et al (2013) realizaram testes de desgaste abrasivo a três corpos a partir de um método de ensaio de abrasão contínuo modificado a partir do ensaio de roda de borracha com areia seca de acordo com ASTM G65. Um dispositivo, exemplificado na Fig. (4), equipado com uma roda de aço em vez da roda de borracha foi usado para o teste de abrasão (Slurry Steel Wheel Abrasion Test - SSWAT).

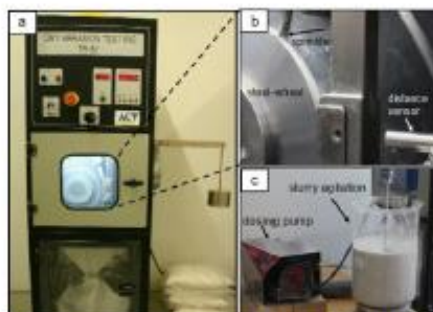


Figura 4. Equipamento para ensaio abrasivo SSWAT: (a) dispositivo; (b) câmara de testes; (c) dispositivo para adição de abrasivo. Petrica et al, 2013.

As maiores taxas de desgaste foram observadas em testes com o quartzo como abrasivo. O quartzo resultou em uma taxa de desgaste 7,5 vezes superior a do granito, que conduziu ao menor desgaste de todos os abrasivos testados, como ilustrado na Fig. (5).

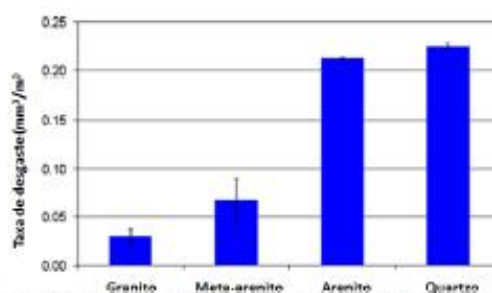


Figura 5. Taxa de desgaste para abrasão a três corpos com diferentes abrasivos. Petrica et al, 2013.

Observou-se que uma superfície fortemente deformada é formada na abrasão a três corpos com os diferentes abrasivos. Os mecanismos de desgaste, no caso do granito, onde a menor taxa de desgaste foi detectada, podem ser descritos como arranhões e ranhuras combinados com múltiplas identações devido a partículas de granito rolantes / deslizantes. Já as ranhuras pronunciadas são causadas por partículas de quartzo duro.

A Figura (6) mostra a correlação entre o teor de quartzo equivalente e a taxa de desgaste em condições de abrasão a três corpos. O granito tem o menor valor de quartzo equivalente levando a uma menor taxa de desgaste e, além disso, a energia de desgaste específica necessária para o granito produzir desgaste é alta. Por outro lado, o arenite tem o maior valor de quartzo equivalente e produz a maior taxa de desgaste de todos os abrasivos testados. A energia de desgaste mostra um valor baixo, e isso faz o arenite altamente abrasivo no caso de condições a três corpos (Petrica et al, 2013).

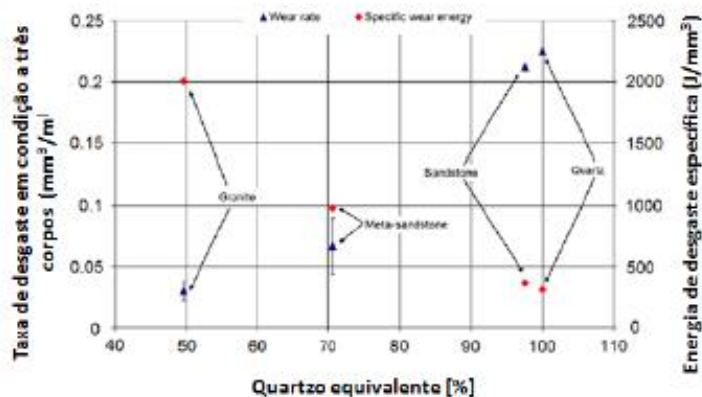


Figura 6. Relações entre taxa de desgaste, conteúdo de quartzo e energia de desgaste específica para condições de desgaste a três corpos. Petrica et al, 2013.

2.3. Ensaios de britador de mandíbulas (ASTM G81)

O ensaio em britadores de mandíbulas, normalizado pela Norma ASTM G81 (2013), determina a resistência à abrasão de materiais e simula abrasão de alta tensão sob condições de impacto de alta energia (Petrica et al, 2013).

Diferentes tipos de trituradores de mandíbula têm sido usados para testes de abrasão, e uma quantidade limitada de dados tem sido publicada. Este método de ensaio classifica os materiais e também indica diferenças na vida de desgaste para esse tipo de abrasão definido como abrasão de goivagem, como é encontrado em equipamentos de britagem e em muitas aplicações de mineração (ASTM G81, 2013).

Materiais homogêneos em sua estrutura e propriedades são os materiais de teste mais apropriados para esse teste (ASTM G81, 2013). Esta prática permite fazer uma escala de materiais em equipamentos de britagem e em algumas aplicações na mineração e movimentação de solo, pois o desgaste pode variar dramaticamente com a mudança das características (geológica, química, geométrica, mecânica) do material britado e do tipo de equipamento (Bartalini, 1999).

Resultados de Bartalini (1999) em ensaios de britador de mandíbulas mostram que a ordem crescente de “abrasividade” das rochas ensaiadas para mandíbulas fixa e móvel é: calcário → carbonatito → basalto → diabásio → granito → quartzito. Esta ordem mostra que o principal fator no desgaste das mandíbulas é o conteúdo de quartzo nas rochas britadas.

Pode-se também dividir as rochas com relação ao desgaste nos seguintes grupos:

- desgaste pequeno: ausência ou pequena presença do mineral quartzo;
- desgaste médio: teores de quartzo de 20 a 40%;
- desgaste alto: teores de quartzo elevados.

2.4. Ensaios de abrasão por impacto cíclico

Petrica et al (2013) realizaram testes de desgaste abrasivo utilizando um método de ensaio denominado teste de abrasão por impacto cíclico (Cyclic Impact Abrasion Test - CIAT) a dois corpos onde as amostras de teste são montadas em um tambor externo que gira lentamente, como representado na Fig. (7).

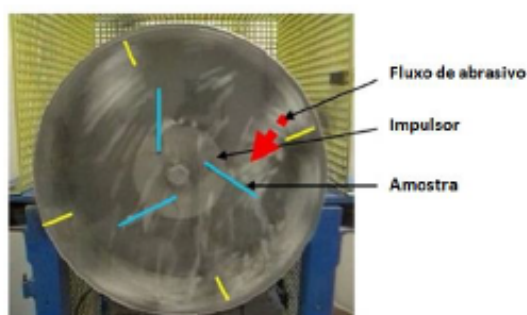


Figura 7. Equipamento utilizado para ensaio abrasivo CIAT. Petrica et al, 2013.

Resultados mostraram que alta resistência à compressão uniaxial, como no caso do granito, produz mecanismos tais como *cutting* ou *ploughing*, valores intermediários de resistência à compressão uniaxial produz mecanismos tais como a deformação plástica e sulcos de abrasão, enquanto que baixos valores de resistência à compressão uniaxial resultam na incrustação abrasiva pronunciada na superfície metálica (Petrica et al, 2013).

2.5. Ensaio de abrasividade Cerchar

O teste de abrasividade Cerchar tem se destacado como um teste amplamente utilizado e seu procedimento é estabelecido pela norma ASTM D7625, 2010. O princípio de ensaio baseia-se em um risco contra a superfície de uma amostra de rocha rugosa em uma distância de 10mm com um pino de aço, com geometria e dureza definidas sob carga estática de 70N. O índice de abrasividade Cerchar (CAI - Cerchar-Abrasivity-Index) é calculado a partir do diâmetro do desgaste resultante medido em plano sobre o pino pela Eq. (1) (Käsling, 2010).

$$CAI = 10 * \frac{d}{c} \quad (1)$$

Onde CAI: índice de abrasividade Cerchar (-); d: diâmetro da superfície desgastada (mm), ilustrado na Fig. (8) e c: fator de correção (c=1mm).

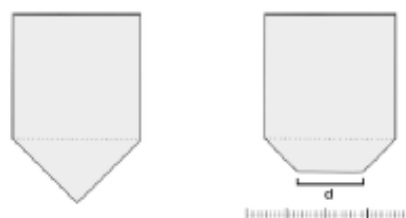


Figura 8. Esboço do pino de aço com forma retangular antes do ensaio (esquerda) e após o ensaio (direita) com o plano de desgaste d . Käsling, 2010.

2.6. Ensaio de micro abrasão

Em testes de desgaste por micro abrasão, uma carga normal força a amostra contra uma esfera na presença de uma pasta abrasiva e o desgaste é analisado com base na evolução do diâmetro da cratera em função do tempo (Gomez, 2015). Uma das principais características deste teste é a identificação dos modos de desgaste na amostra, que são normalmente classificados em abrasão por riscamento e abrasão por rolamento (Adachi et al, 2005; Trezona et al, 1999).

Vários estudos de modo de desgaste são baseados na mecânica do movimento de partículas. Mais especificamente, as cargas e restrições em uma partícula abrasiva são avaliadas a fim de compreender as condições que resultariam na sua rotação no interstício entre os dois corpos em contato (Adachi et al, 2005; Trezona et al, 1999; Williams et al, 1992).

2.6.1 Determinação da espessura de revestimentos

O ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa foi desenvolvido por Rutherford e Hutchings em 1996. Tal teste é usado principalmente para medir a espessura e a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos finos ou camadas superficiais (Stachowiak et al, 2004) e tribômetros comerciais baseados neste método estão disponíveis (CSEM Calotest e Calowear e Plint TE-66 para micro abrasão).

Inicialmente, a finalidade desse ensaio era somente determinar a espessura de revestimentos. Atualmente, devido ao grande potencial do ensaio, o mesmo é aplicado em diversas pesquisas que envolvem o desgaste abrasivo de materiais metálicos e não metálicos recobertos ou não (Gee et al, 2005).

O teste de desgaste micro abrasivo é uma técnica promissora que tem o potencial de avaliar a resistência ao desgaste de superfícies revestidas de engenharia (Gee et al, 2005). Na indústria o mesmo é aplicado no controle de qualidade e para avaliar a espessura de revestimentos (Schiffmann et al, 2005).

O teste de abrasão em microescala tem sido cada vez mais usado para testar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais como metais não ferrosos e suas ligas (ASTM G65, 2016; Trezona et al, 1999), aços para ferramentas (Stachowiak et al, 2004), aço carbono simples (Rutherford et al, 1997), cerâmica (Stachowiak et al, 2004), vidro (ASTM G65, 2016), polímeros (Stachowiak et al, 2004) e até mesmo compósitos restauradores dentários (Rutherford et al, 1997). Pesquisas recentes mostraram que o teste de desgaste abrasivo com esfera rotativa também é adequado para caracterizar o poder abrasivo de grãos com diferentes angularidades (Trezona et al, 1999).

Segundo Rutherford e Hutchings (1997), este método pode ser estendido para materiais recobertos, podendo os coeficientes de desgaste do substrato e do recobrimento serem calculados a partir de um único teste. Neste caso podem ser aplicados testes perfurantes ou não perfurantes, sendo que, no primeiro, o processo de desgaste é realizado até que o substrato seja exposto, possibilitando a determinação do coeficiente de desgaste do recobrimento e do substrato. Já para os testes não perfurantes a cratera de desgaste não ultrapassa o limite de espessura do filme, permitindo a avaliação da resistência ao desgaste do recobrimento sem a interferência do substrato (Schiffmann et al, 2005).

Gee et al (2005) encontraram em seus experimentos uma boa concordância entre a taxa de desgaste do revestimento para os testes perfurantes e os testes não perfurantes. Porém, para a taxa de desgaste do substrato uma ligeira diferença.

2.6.2 Determinação de taxas de desgaste por esfera rotativa

O ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa vem sendo amplamente adotado em estudos envolvendo desgaste abrasivo de materiais (Cozza, 2011). A Figura (9) ilustra, de forma esquemática, o princípio do desgaste.

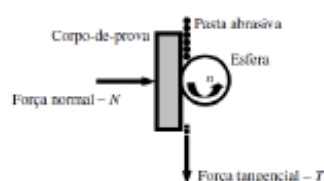


Figura 9. Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa. Cozza, 2011.

De acordo com a Fig. (9) a esfera, sob movimento de rotação, encontra-se em contato com o corpo-de-prova. Uma pasta abrasiva, geralmente composta por algum pó abrasivo e água destilada é utilizada durante a realização dos ensaios. A aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova, o contato e o movimento relativo entre os componentes do sistema tribológico gera uma força tangencial e consequentemente uma calota esférica forma-se no corpo de prova (Cozza et al, 2009).

A partir do ensaio de desgaste por esfera rotativa são geradas calotas esféricas, também chamadas de crateras de desgaste. Em uma cratera esférica de desgaste três grandezas geométricas são geralmente analisadas: o diâmetro (d), a profundidade (h) e o volume de material removido (V). A Figura (10) exemplifica tais grandezas.

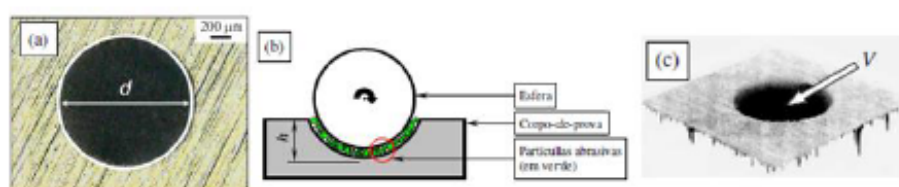


Figura 10. (a) diâmetro d ; (b) profundidade h ; (c) volume V . Cozza et al, 2009.

Um dos métodos para se medir o diâmetro d da calota é por meio da técnica chamada de microscopia ótica (MO). Já a profundidade (h) e o volume de material removido (V) podem ser calculados pelas Eq. (2) e (3) (Cozza, 2006).

$$h = 12,70 - \sqrt{161,29 - 0,25d^2} \quad (2)$$

$$V = \pi(12,7h^2 - \frac{h^3}{3}) \quad (3)$$

Unidades: h [mm], d [mm], e V [mm³].

Os ensaios podem ser conduzidos sobre força normal constante ou não-constante sobre o corpo-de-prova. Além da força normal, diversos outros parâmetros podem ser variados para análise da variação das condições de testes por esfera rotativa.

A resistência ao desgaste abrasivo depende das condições de ensaio. A taxa e os mecanismos de desgaste podem diferir significativamente com diferentes condições de teste, como velocidade de deslizamento ou carga normal aplicada (Adachi et al, 1997). O modo de desgaste pode ser alterado ajustando a carga, com a modificação das partículas abrasivas, com a quantidade de abrasivo na mistura, com a condição da superfície da esfera e com a forma e material da partícula abrasiva (Stachowiak et al, 2006).

Trezona et al (1999) estudaram o efeito da carga, da concentração de lama e do material abrasivo. Observou-se um comportamento não linear quando o volume de desgaste foi traçado como uma função da fração de volume de partículas abrasivas. Máximos no volume de desgaste foram observados em curvas obtidas para diferentes cargas normais. Além disso, com baixas concentrações de lama, foram obtidos volumes de desgaste semelhantes para três cargas normais aplicadas e uma diminuição contínua no volume de desgaste com a diminuição da fração de volume de partículas abrasivas foi observada.

2.6.3. Determinação da abrasividade usando micro-abrasão

A morfologia da superfície de desgaste é também afetada pela angularidade das partículas e pelas propriedades dos materiais das amostras de desgaste.

Stachowiak et al (2001) mostraram com testes de esfera sobre placa uma correlação entre as taxas de desgaste e a angularidade das partículas. Partículas arredondadas geraram crateras redondas e ranhuras lisas, enquanto partículas angulares produziram recortes afiados e ranhuras de corte estreitas.

Resultados de Stachowiak et al (2004) com quatro tipos diferentes de partículas abrasivas grandes para ensaios de desgaste por esfera rotativa (vidro, areia de sílica, quartzo e alumina) sugeriram que o desgaste depende da forma das partículas abrasivas, da dureza e da microestrutura do material de desgaste.

Stachowiak et al (2006) verificaram através de testes com as mesmas partículas abrasivas que a rugosidade da superfície da esfera afeta significativamente as taxas e os mecanismos de desgaste das amostras metálicas. A rugosidade superficial da esfera aumentou de forma constante com o tempo de ensaio e foi principalmente afetada pela angularidade das partículas abrasivas, onde partículas mais angulares geraram maior rugosidade da superfície da esfera. Além disso, as partículas de dureza e tamanho semelhantes, mas de angularidade diferente (areia de sílica e quartzo) podem gerar diferentes morfologias de superfície de desgaste nos materiais.

Em testes de micro-abrasão partículas finas abrasivas também causam alguns danos às esferas rotativas, entretanto este dano é geralmente negligenciado, uma vez que parece não afetar o comportamento de desgaste esperado (Rutherford et al, 1997).

Logo, pode-se avaliar a abrasividade de diferentes partículas abrasivas através de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa a fim de encontrar possíveis alternativas de abrasivos com resultados de remoção de material semelhantes, a partir da utilização de partículas de abrasivos com comportamento semelhante e com um melhor custo-benefício. Tal ensaio permite identificar os modos de desgaste, além da possibilidade de combinação de diversas variáveis de ensaio para avaliação da abrasividade.

Após a investigação dos métodos de teste de abrasão anteriores, uma tabela de resumo foi criada para comparar as vantagens, limitações e parâmetros que podem ser correlacionados com os dados obtidos por cada teste. A Tabela (1) apresenta um resumo dos ensaios investigados.

Tabela 1. Resumo dos ensaios para medir abrasividade.

| Método | Dimensão das partículas | Vantagens | Limitações |
|---|-------------------------|---|---|
| Teste de Miller | Micrométrica | Utiliza material de desgaste standard. Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Diferentes condições de abrasão em altas tensões podem ser simuladas. | Variabilidade da força de contato. |
| Teste SAN | Micrométrica | permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Diferentes condições de abrasão em altas tensões podem ser simuladas. | Não há apenas um material standard para abrasividade. Variabilidade da força de contato. |
| Ensaio de roda de borracha e de roda de aço | Micrométrica | Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Roda de borracha pode apresentar valores de energia específica. Roda de aço apresenta potencial para o controle e medição de diversas variáveis que afetam a abrasividade. | Não há indicação de material standard para abrasividade. Não avalia o efeito de mineralogia das partículas. |
| Ensaio de britador de mandíbulas | Millimétrica | Permite variação de morfologia e mineralogia das partículas. Simula abrasão de alta tensão sob condições de impacto de alta energia. Mostra a abrasividade de rochas para mandíbulas fixa e móvel. | Não há indicação de material standard para abrasividade. Mecanismos de desgaste não são os mesmos para as mandíbulas fixas e móveis. |
| Ensaio de abrasão por impacto cíclico | Millimétrica | Utiliza material de desgaste standard. Permite variação na velocidade de alimentação das partículas. Permite variação de morfologia e mineralogia das partículas. O abrasivo entra em contato direto com as superfícies de desgaste com uma energia de impacto definida. | Abrasivo pequeno não é ideal para simulação da situação real. |
| Ensaio de abrasividade cerchar | Millimétrica | Utiliza material de desgaste standard. Permite variação de morfologia e mineralogia das partículas. | Indicador qualitativo de abrasividade. |
| Ensaio de micro abrasão | Micrométrica | Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Permite variação de velocidade de alimentação das partículas. | Não há indicação de material standard para abrasividade. Há possibilidade de diversos mecanismos de desgaste atuarem. |

Percebe-se que cada ensaio de desgaste apresentado apresenta suas vantagens e limitações. O ensaio de micro abrasão pode ser considerado o ensaio com maior possibilidade de variações nas principais variáveis de controle, quais sejam: material de referência para o corpo de ensaio, morfologia e mineralogia das partículas abrasivas e variação de concentração da lama. Entretanto, deve ser destacado que um trabalho adicional para se definir um material de referência seria ideal quando tratamos especificamente da abrasividade das partículas, pois quando se mede o que a partícula promove de remoção de material ter um material de referência seria uma vantagem.

Ensaio na faixa micrométrica de tamanhos não permitiriam estudos com variação mineralógica. Quando a partícula está na faixa micrométrica, há possibilidade que os minerais tenham sido liberados pelo processo de redução do tamanho, o que faz com não seja mais possível o controle da fração de constituintes. Entretanto, Stachowiak et al (2004) mostrou em ensaios de micro abrasão por esfera rotativa com partículas na escala milimétrica, que apesar do

tamanho das partículas abrasivas, o desgaste também é afetado pela forma da partícula e pelas propriedades dos materiais de amostras de desgaste.

3. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi informar a comunidade de engenharia futuras pesquisas potenciais para a abrasão de partículas e sugerir possíveis métodos para obter dados. As seguintes conclusões podem ser feitas a partir da pesquisa e revisão da literatura realizada neste artigo:

- Abrasividade pode ser estudada utilizando equipamentos construídos para diferentes materiais de abrasivos;
- Correlações entre métodos para verificar a abrasividade estão disponíveis;
- Diferentes técnicas de abrasão podem ser aplicadas à diferentes abrasivos;
- Diferentes variáveis que afetam a resistência à abrasão devem ser verificadas para diferentes métodos de medir abrasividade. Como exemplo, para os ensaios de micro abrasão a angularidade das partículas e o material de desgaste são os fatores primordiais;
- Ensaios de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa podem ser muito úteis para verificar a abrasividade de diferentes partículas.

À medida que a tecnologia avança e novas idéias são introduzidas para a comunidade de engenharia, a resistência à abrasão de diferentes abrasivos será mais fácil e precisamente medida. As propriedades abrasivas podem fornecer informações valiosas que podem ser usadas com para futuras correlações em diferentes estudos.

4. REFERÊNCIAS

- Adachi, K., Hutchings, I.M. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness, *Wear* 258 (2005) 318–321.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method D7625-10 Annual Book of ASTM Standards, 2010.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number) G75-15 Annual Book of ASTM Standards, 2015.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Jaw Crusher Gouging Abrasion Test. G81 Annual Book of ASTM Standards, 2013.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. G65-16 Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- Bartalini, M.M. Desgaste abrasivo em britadores de mandíbulas. Monografia. Universidade de São Paulo - Engenharia Industrial Mecânica. São Paulo, 1999.
- Coseglio, M. S. D. R., Moreira, P. P., Procópio, H. L., Pintaude, G. Analysis of the efficiency of hydroerosive grinding without renewal of abrasive particles. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(3), 031007, 2016.
- Cozza, R.C. 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, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>.
- Cozza, R.C. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>.
- Cozza, R.C., Tanaka, D.K., Souza, R.M. Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – preliminary results. *Wear* 267 (2009) 61-70.
- Fulcher, J.K., Kosel, T.H., Fiore, N.F. The effect of carbide volume fraction on the low stress abrasion resistance of high Cr-Mo white cast irons, *Wear* 84 (1983) 313–325.
- Gee, M.G., Gant, A.J., Hutchings, I.M., Kusano, Y., Schiffmann, K., Acker, K.V., Poulat, S., Gachon, Y., Stebut, J.V., Hatto, P., Plint, G. Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test, *Wear* 259 (2005) 27-35
- Gomez, V.A.O., Macedo, 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* 328-329 (2015) 563–568.
- Gov, K., Eyercioglu, O. Effects of abrasive types on the surface integrity of abrasive-flow-machined surfaces, *Journal of Engineering Manufacture* (2016) 1-10.
- Hutchings, I.M. Tribology – friction and wear of engineering materials. Edward Arnold, A Division of Hodder Headline PLC; Londres, 1992.
- Käsling, H., Thuro, K. Determining rock abrasivity in the laboratory. Conference Paper. June 2010.
- Komanduri, R., Lucca, D.A., Tani, Y. Technological advances in fine abrasive processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 46, n. 2, p. 545-596, 1997.

- Petrica, M., Badisch, E., Peinsitt, T. Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties, *Wear* 308 (2013) 86–94.
- Philpotts, C.J., Weader, E., Joiner, A. The measurement in vitro of enamel and dentine wear by toothpastes of different abrasivity. *International dental journal*, v. 55, n. S3, p. 183-187, 2005.
- Plinninger, R.J., Restner, U. Abrasiveness testing, quo vadis?—a commented overview of abrasiveness testing methods. *Geomechanics and Tunneling*, v. 1, n. 1, p. 61-70, 2008.
- Radziszewski, P. The steel wheel abrasion test (SWAT): A tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry, *Wear* 267 (2009) 92–98.
- Rutherford, K.L., Hutchings, I.M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test, *Elsevier Science S.A.* 25, n. 2 (1997) 250-260.
- Schiffmann, K.I.; Bethke, R.; Kristen, N. Analysis of perforating and non-perforating micro-scale abrasion tests on coated substrates. *Surface and Coatings Technology* 200 (2005) 2348-2357.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W., Brandt, J.M. Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles, *Tribology International* 39 (2006) 1-11.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W. The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear, *Wear* 249 (2001) 201-207.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W. Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles, *Wear* 256 (2004) 600–607.
- Trezona, R. I., Allsopp, D. N., Hutchings, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test, *Wear* 229 (1999) 205-214.
- Ureel, S.D., Momayez, M. An Investigation of the Present and Future Testing Methods of Rock Abrasion Resistance. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, (2014) 10-19.
- Williams, J. A. and Hyncica, A. M. Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts, *Wear* 152 (1992) 57-74.
- Woldman, M., Heide, E.V.D., Schipper, D.J., Tinga, T., Masen, M.A. Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behavior, *Wear* 294–295 (2012) 419–426.

A REVISION OF TESTING METHODS TO MEASURE ABRASIVITY OF HARD PARTICLES

Tiago Alexandre Rosso, tiagoarosso@hotmail.com¹

Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br¹

Ane Cheila Rovani, acrovani@gmail.com¹

¹Federal Technological University of Paraná, UTFPR, Sete de Setembro Avenue, 3165, Rebouças – CEP 80230-901, Curitiba - PR

Abstract: Material abrasion can be used as a means of material removal by machining, or it may be an unwanted material removal mechanism associated with productive processes, such as ore comminution. The removal capacity may be associated with variations of abrasive concentration, geometry, hardness and particle size distribution in the abrasive fluid. Therefore, a better understanding of particle abrasivity is necessary for a better characterization of the modes and mechanisms in the process. In the present article, a review of the following tests to measure abrasivity is presented: rubber wheel abrasion test (ASTM G65), test method for determination of slurry abrasivity - Miller Number (ASTM G75) and micro abrasion, in the micrometric scales, and jaw crusher abrasion test (ASTM G81), cyclic impact abrasion test and Cerchar abrasivity test, in the millimetric particle size scale. In particular, future applications of abrasivity determination using the micro abrasion test are presented in greater detail.

Keywords: *abrasivity, abrasive wear, material removal, hard particles.*