

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAMPUS CURITIBA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

PROJETO FINAL DE CURSO II

CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS SEGUNDO DIFERENTES MODELOS DE MEDIÇÃO DE FATOR DE FORMA

CURITIBA

JULHO - 2009

CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS SEGUNDO DIFERENTES MODELOS DE MEDIÇÃO DE FATOR DE FORMA

Monografia apresentada à disciplina de Projeto de Final de Curso II, como requisito parcial para aprovação.

Orientador: Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.

CURITIBA

JULHO - 2009

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia de Projeto Final intitulada "CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS ABRASIVAS SEGUNDO DIFERENTES MODELOS DE MEDIÇÃO DE FATOR DE FORMA", realizada pelo aluno Mário Sérgio Della Roverys Coseglio, como requisito parcial para aprovação na disciplina Projeto Final II.

Orientador: Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr. DAMEC, UTFPR

Banca: Prof. Carlos Henrique da Silva, Dr. DAMEC, UTFPR

Prof. Júlio Cesar Klein das Neves, Dr. DAMEC, UTFPR

Curitiba, 03 de Julho de 2009.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Giuseppe Pintaúde pela sua dedicação, incentivo e conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

Aos Professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este trabalho.

A todos os professores do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR pela contribuição durante o curso;

Por fim, agradeço o apoio de todos os amigos e familiares, em especial para minha noiva, pelo carinho, incentivo e compreensão.

RESUMO

O desgaste de componentes de máquinas e equipamentos é um significativo problema industrial. Os efeitos de variáveis relacionadas com as partículas abrasivas presentes em sistemas tribológicos, como o tamanho, dureza, pressões de contato e velocidades têm sido extensivamente investigados. A forma destas partículas, que intuitivamente está fortemente relacionada com a severidade dos danos provocados em uma superfície, tem sido objeto de estudos na tentativa de determinar uma relação com as taxas de desgaste. Além de descritores qualitativos obtidos através de técnicas de inspeção visual de imagens bidimensionais, estas partículas podem ser caracterizadas por parâmetros quantitativos que têm como objetivo extrair informações geométricas apropriadas que podem ser associadas com os níveis de remoção de material. Neste trabalho estão apresentados alguns parâmetros de forma existentes, como o fator de circularidade e a razão de aspecto, bem como parâmetros de ponta desenvolvidos recentemente que objetivam detectar a angulosidade de partículas. Este trabalho propõe um parâmetro de ponta modificado cujos cálculos serão realizados utilizando uma ferramenta computacional desenvolvida no software Matlab.

Palavras-chave: morfologia de partículas, parâmetros de ponta, caracterização numérica, desgaste abrasivo, fator de forma

ABSTRACT

The abrasion of equipments and components is a significant problem for earth moving operations. The wear rate is affected by the characteristics of abrasive particles. The effects of particle size and hardness of abrasives have been extensively studied. However, the shape of particles is the parameter most difficult to incorporate in the wear models. Besides the qualitative descriptors, obtained from a visual inspection of bi-dimensional images, these particles can be characterized by quantitative parameters that are able to give information on the geometry. It can be more adequate to describe the removal material rates. In this work many shape parameters are investigated, such as the roundness factor, the aspect ratio, as well as the spike parameters early developed. A modified spike parameter is presented and the results were obtained by a computational routine developed in Matlab.

Keywords: morfology of particles, Spike parameter, numerical characterization, abrasive wear, shape factor

SUMÁRIO

RESUMO

SUMÁRIO

1	INTF	RODUÇÃO	
	1.1	Солтехто	9
	1.2	OBJETIVOS	9
	1.3	JUSTIFICATIVA1	10
	1.4	CONTEÚDO DO TRABALHO1	10
2	FUN	DAMENTAÇÃO TEÓRICA1	12
	2.1	DESGASTE ABRASIVO	12
	2.1.1	CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO	12
	2.1.2	MODELOS ANALÍTICOS PARA O DESGASTE ABRASIVO	16
	2.2	CARACTERIZAÇÃO DA FORMA DE PARTÍCULAS ABRASIVAS	20
	2.2.1	FATOR DE CIRCULARIDADE	21
	2.2.2	RAZÃO DE ASPECTO	23
	2.2.3	FATOR DE FORMA	23
	2.2.4	FATOR DE ELONGAÇÃO	23
	2.2.5	MÉTODO DE FRACTAIS	24
	2.2.6	PARÂMETROS DE PONTA	26
	2.2.7	ANÁLISE DE FOURIER	29
	2.3	EFEITO DA FORMA DA PARTÍCULA NO DESGASTE ABRASIVO	33
	2.3.1	RELAÇÃO ENTRE A ANGULOSIDADE DA PARTÍCULA E O DESGASTE ABRASIVO	33
	2.3.2	MEDIDA DA ABRASIVIDADE COMO FUNÇÃO DA FORMA DE PARTÍCULAS	10
3	MET	ODOLOGIA	1 5
	3.1	DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA	45
	3.2	SELEÇÃO DAS PARTÍCULAS	15
	3.3	MÉTODO PARA O CÁLCULO DO FATOR DE CIRCULARIDADE, RAZÃO DE ASPECTO E DIMENSÃO	
	FRACTA	۷۲	17
	3.4	MÉTODO PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE PONTA SP, SPQ E SPL	51
4	RES	ULTADOS	53
	4.1	RESULTADOS DOS FATORES DE FORMA PARA AREIA DE SÍLICA, GRANADA, CARBONETO DE SILÍCIO,	,
	QUARTZO E ALUMINA		53

4.2	RESULTADOS DOS FATORES DE FORMA PARA PARTÍCULAS DE ALUMINA E LIXA DE VIDRO
5	CONCLUSÕES62
REFE	ERÊNCIAS63
APÊ	NDICE A – CRONOGRAMA65
APÊ	NDICE B – RESUMO DA PROPOSTA66
APÊ	NDICE C – PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS USANDO O MATLAB67
Re Fil	LAÇÕES BÁSICAS ENTRE <i>PIXELS</i>
APÊ	NDICE D – ARQUIVO-M PARA DETECÇÃO DE BORDAS NO MATLAB74
APÊI	NDICE E – ARQUIVO-M PARA O CÁLCULO DO PARÂMETRO DE PONTA MODIFICADO SPL
APÊ	NDICE F – PASSO A PASSO DO ARQUIVO-M PARA O CÁLCULO DO SPL82
APÊN	NDICE G – ARTIGO - COBEM129

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O desgaste de componentes de máquinas e equipamentos de vários processos industriais, como a mineração, o movimento de terra, o processamento de materiais, o transporte de pós e lamas, a contaminação por partículas abrasivas em sistemas mecânicos, entre outros, gera elevados custos para a indústria mundial. Nos Estados Unidos, estima-se que os custos devido à substituição de componentes mecânicos desgastados estejam entre 6% e 7% do produto nacional (SEIREG, 1998). A abrasão, dentre os tipos de desgaste, pode ser considerada a mais importante porque corresponde a cerca de 50% das falhas por perda de material. Uma classificação bastante difundida do desgaste abrasivo divide o desgaste em dois modos: abrasão a dois corpos e a três corpos. O desgaste abrasivo a dois corpos é causado por protuberâncias duras na superfície oposta enquanto no desgaste abrasivo a três corpos as partículas duras estão livres para rolar e deslizar entre duas superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992).

A forma das partículas abrasivas pode exercer influência significativa no mecanismo de remoção de material (VERSPUI et al., 1996). Este fato pode ser constatado experimentalmente, porém teorias que avaliem este efeito permanecem em desenvolvimento.

Dada a importância do desgaste abrasivo e do conhecimento de que a forma das partículas influencia o desgaste, será desenvolvida uma ferramenta computacional para o cálculo de um fator de forma modificado, cujos resultados serão comparados com fatores já existentes.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto consiste em desenvolver uma ferramenta computacional para caracterização numérica da forma de partículas abrasivas. Os objetivos específicos estão relacionados a seguir:

a) Levantamento dos parâmetros existentes para caracterização quantitativa da forma das partículas abrasivas;

b) Levantamento de dados obtidos em ensaios realizados para relacionar as formas das partículas com as taxas de desgaste abrasivo;

c) Cálculo de fatores de forma para partículas abrasivas utilizando parâmetros disponíveis no software Image-Pro Plus.

d) Proposição de um novo parâmetro para o cálculo do fator de forma.

1.3 Justificativa

Três características influenciam as taxas de desgaste por partículas duras: a dureza, o tamanho e a forma.

A razão entre a dureza do abrasivo e a dureza da superfície é determinante para o mecanismo de desgaste operante e, conseqüentemente, para a taxa de remoção de material. Observa-se experimentalmente que um valor crítico de 1,2 para esta relação de durezas é necessário para que o abrasivo seja capaz de remover efetivamente material de uma superfície.

Por sua vez, a influência do tamanho da partícula também pode ser facilmente determinada em ensaios em laboratório. No entanto, um dos problemas que permanece não totalmente resolvido na tribologia é a caracterização morfológica de partículas abrasivas (STACHOWIAK, PODSIADLO, 1999). Por esta razão, vários estudos têm sido realizados para caracterizá-las e relacionar sua geometria com a habilidade de promover a abrasão. Muitos parâmetros para medição de sua angulosidade têm sido propostos e há um considerável potencial para pesquisas futuras relacionadas com sua aplicabilidade (HUTCHINGS, 1992).

1.4 Conteúdo do trabalho

O Capítulo 2 consiste nos fundamentos teóricos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente o desgaste abrasivo será definido e classificado. Modelos analíticos e mecanismos de desgaste serão apresentados a seguir, bem como os parâmetros de forma utilizados para caracterização de partículas abrasivas e os resultados de ensaios para avaliação da relação da forma com a abrasividade.

No terceiro capítulo será apresentada a metodologia utilizada para calcular os fatores de forma, selecionar os abrasivos e analisar os resultados. Nos dois últimos

capítulos os resultados obtidos são apresentados e discutidos, finalizando com as conclusões.

Os detalhes da ferramenta computacional para o cálculo do parâmetro proposto estão apresentados nos apêndices D, E e F.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo pode ser definido como o deslocamento de material causado por partículas duras presentes entre duas superfícies que possuem movimento relativo. Estas partículas podem estar entre as superfícies ou incrustadas em uma delas. O desgaste pode também ser ocasionado pela presença de protuberâncias duras em uma ou em ambas as superfícies (ZUM GAHR, 1987).

2.1.1 Classificação do desgaste abrasivo

O principal objetivo de classificar o desgaste abrasivo é agrupar situações práticas que tenham características comuns e que possam ser tratadas de maneira similar. Estes aspectos característicos podem ser divididos em três grupos (GATES, 1998):

 a) Situação: descrição das condições macroscópicas que produzem o desgaste, como a geometria do contato, tensões e velocidade de deslizamento;

 b) Mecanismos: processo microscópico pelos quais os fragmentos de desgaste são gerados;

c) Manifestações: fenômenos observáveis, como as taxas de desgaste, transições de taxas de desgaste e características da superfície desgastada e dos fragmentos gerados.

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver tanto deformação plástica como fratura frágil (HUTCHINGS, 1992). Basicamente existem três modos distintos de abrasão por deformação plástica: microsulcamento (Figura 1a), micro-corte (Figura 1b) e um comportamento intermediário. No desgaste abrasivo por fratura frágil, pode ocorrer o microtrincamento (Figura 1c).

No microsulcamento ocorre deformação plástica do material da superfície e deslocamento de parte do material para as laterais do sulco formado. O microcorte, como pode ser observado na Figura 1b, é caracterizado pela remoção através do corte do material e conseqüente formação de um fragmento de corte. Um dos fatores determinantes do tipo de mecanismo é o ângulo de corte α . Na Figura 2 é

apresentado um diagrama que avalia as proporções de ocorrência de microcorte e microsulcamento de acordo com a variação do ângulo de corte. Observa-se que, para ângulos maiores do que o ângulo de corte crítico α_c , há predominância do mecanismo de microcorte. Sobre estas condições, o volume de material removido em relação ao volume do sulco será maior do que para ângulos inferiores ao crítico.



Figura 1 – Representação esquemática dos mecanismos de remoção de material no desgaste abrasivo: (a) microsulcamento; (b) microcorte e (c) microtrincamento (Adaptado de ZUM GAHR, 1987).



Figura 2 – Relação entre as parcelas de microcorte e microsulcamento e a razão entre o ângulo de corte e o ângulo de corte crítico (Adaptado de ZUM GAHR, 1987).

Uma classificação habitualmente utilizada divide o desgaste abrasivo em dois grupos: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos. Na abrasão a dois corpos, ilustrada esquematicamente na figura 3a, partículas ou protuberâncias duras estão rigidamente fixadas em uma das superfícies. Um exemplo comum deste modo é a atuação de uma lixa em uma superfície. No sistema a três corpos, esquematizado na Figura 3b, as partículas estão livres para rolar entre as superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992). Partículas penetrando entre superfícies deslizantes ilustram este caso.

Os principais elementos em uma situação de desgaste são (GATES, 1998):

- a) Primeiro corpo: é o corpo principal, na qual há maior preocupação com o desgaste;
- b) Segundo corpo: qualquer corpo, na qual a preocupação com o desgaste é secundária. Há movimento relativo entre este e o primeiro corpo e contato direto ou indireto tal que haja transmissão de forças. Alguns autores não utilizam este termo, considerando que todos os elementos envolvidos no desgaste são de importância primária;
- c) Terceiro corpo (elementos interfaciais): quaisquer materiais e outras condições especiais que possam estar presentes na interface dos corpos. Exemplos são os fragmentos de desgaste, lubrificantes, partículas sólidas e reações químicas;

Outro esquema de divisão é algumas vezes utilizado para descrever o desgaste abrasivo: abrasão a altas tensões ou trituração, abrasão a baixas tensões ou riscamento e goivadura. O que diferencia as duas primeiras é o fato de as partículas serem fraturadas ou não durante o desgaste (HUTCHINGS, 1992). Este fato pode ser significativo, uma vez que a quebra da partícula pode gerar ou eliminar bordas cortantes que usualmente modificam as condições de remoção de material. A goivadura denota situações em que grãos grosseiros, sob altas tensões, provocam sulcos visíveis macroscopicamente (GATES, 1998). Gates, 1998, propõe uma classificação baseada na severidade: desgaste suave, severo ou extremo.





(b)

Figura 3 – Desgaste abrasivo: (a) dois corpos e (b) três corpos (b) (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

Um comparativo dos termos utilizados para classificação do desgaste abrasivo é mostrado no Quadro 1. Neste esquema, não há preocupação com o estabelecimento de transições bem definidas, como tamanho de partículas e tensões de contato, uma vez que os valores críticos são também dependentes de inúmeras outras variáveis, como por exemplo, as propriedades do material desgastado.

Situaçãos típicos	Modo de desgaste abrasivo			
Siluações lípicas	Brando	Severo	Extremo	
Tamanho da partícula	pequena	moderada	grande	
Restrição ao movimento da partícula	sem restrição	parcialmente restrita	fortemente restrita	
Forma da partícula	arredondada	angulosa	angulosa	
Tensões de contato	baixas - insuficiente para fraturar partículas	moderadas - suficiente para fraturar as partículas	severas - pode causar deformação macroscópica ou fratura frágil do material desgastado	
Mecanismo dominante	microsulcamento	microccorte	microcorte e/ou microtrincamento	
Termos equivalentes	 Abrasão a baixas tensões Riscamento Três corpos a baixas tensões 	 Abrasão a altas tensões Trituração Três corpos a altas tensões Dois corpos a baixas tensões 	 Goivadura Dois corpos a altas tensões 	

Quadro 1 – Esquema comparativo dos termos utilizados para classificação do desgaste abrasivo (Adaptado de GATES, 1998).

2.1.2 Modelos analíticos para o desgaste abrasivo

No modelo simples, que considera isoladamente o desgaste por deformação plástica, uma partícula é idealizada como um cone formando um ângulo de corte α com a superfície desgastada de um material dúctil, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4 - Modelo esquemático do desgaste abrasivo por uma partícula cônica (Adaptado de STACHOWIAK, 2001).

A partícula move-se formando um microssulco de profundidade t. Uma força normal w aplicada provoca uma pressão p. Estas grandezas podem ser relacionadas resultando na Equação 1.

$$w = \frac{p\pi^2 a}{2} = \frac{1}{2} p\pi t^2 t g^2 \alpha$$
 Eq. 1

O volume deslocado pelo cone após percorrer uma distância de deslizamento ℓ pode ser obtido pela Equação 2:

$$V = \ell a x = \ell t^2 t g \alpha$$
 Eq. 2

Considerando que uma fração η do material é removida como fragmentos de desgaste, então o volume de fragmentos produzido pelo cone, q, por unidade de comprimento, é dado pela Equação 3.

$$q = \eta t^2 t g \alpha = \frac{2\eta w}{\pi p t g \alpha}$$
 Eq. 3

O volume total de material removido por unidade de comprimento de um conjunto de partículas pode ser dado pela Equação 4, sendo W a força normal total aplicada e H a dureza do material da superfície, assumindo que esta seja aproximadamente igual à pressão aplicada ($P \approx H$). A constante K depende da fração de material removido η e do ângulo de corte α . A equação sugere que o volume removido é diretamente proporcional à distância percorrida pelo abrasivo e também à carga normal. De fato, este modelo é observado na prática para materiais dúcteis. A equação também indica que o volume removido é inversamente proporcional à dureza da superfície, fato que nem sempre pode ser notado na prática.

$$Q = \frac{KW}{H}$$
 Eq. 4

Neste modelo simplificado, é assumido que todas as partículas abrasivas possuem exatamente a mesma geometria e removem material na mesma direção. Na prática isto não ocorre. As partículas normalmente são irregulares e atuam em diversas direções e não necessariamente nas mesmas proporções.

No modelo analítico de Moore (1981), o volume de material removido, por unidade de área, pode ser dado pela Equação 5, em que k_1 é a soma das probabilidades de formação de fragmentos de desgaste, k_2 é a proporção do micro sulco removido quando o fragmento de desgaste é formado, k_3 está relacionado com a geometria da partícula, p é a carga aplicada por unidade de área, H é a dureza da superfície desgastada e ℓ é a distância percorrida pelo abrasivo durante o processo de remoção de material.

$$V = \frac{k_1 k_2 k_3 p \ell}{H}$$
 Eq. 5

A probabilidade de formação de fragmentos de desgaste pode ser obtida se a distribuição de ângulos de corte dos abrasivos for conhecida. Para abrasivos angulosos, a distribuição é similar à mostrada na Figura 5. No eixo das abscissas estão representados os ângulos de corte e as ordenadas indicam suas freqüências de ocorrência. A região destacada, correspondente a ângulos maiores do que o assumido como crítico representa remoção de material da superfície pelo mecanismo de microcorte.



Figura 5 – Distribuição de freqüência de ângulos de corte para sílica com ângulo crítico de 90º. (Adaptado de MOORE e SWANSON, 1983)

O fator k_1 depende do quanto cada mecanismo de remoção contribui para o processo global de desgaste. Quando um microssulco deformado plasticamente é formado durante o desgaste abrasivo, material pode ser removido com fragmento primário – quando ângulo de corte é maior do que o crítico - ou secundário, em que ocorre a fratura do material extrudado para os lados ou para frente do micro sulco. A probabilidade de formação de fragmentos primários, p_m , é a proporção de partículas em contato com a superfície desgastada que possuem ângulos de corte maiores do

que o crítico. Este ângulo crítico depende, primariamente, do coeficiente de atrito entre as faces de contato. Moore et al (1983) propõe a correlação indicada na Equação 6, que permite uma estimativa razoável do ângulo de corte crítico diretamente a partir de propriedades dos materiais, em que E é o módulo de resistência, σ é a tensão de escoamento média da região deformada e c é uma constante.

$$\mu \propto \frac{(E/\sigma)^{1/3}}{1 + \ln(cE/\sigma)}$$
 Eq. 6

A probabilidade de formação de fragmentos secundários à frente da superfície de contato, p_{sf} , é, de maneira simplificada, a proporção de todo o abrasivo em contato que apresenta ângulo de corte menor do que o crítico. Finalmente, a probabilidade de formação de fragmentos secundários a partir do material extrudado para os lados do sulco, p_{sg} , envolve a probabilidade de o material ser destacado das laterais extrudadas.

O produto das probabilidades de formação de fragmentos e proporção do volume do sulco removido pode ser estimado pela Equação 7, em que g_{gs} é a proporção do volume do micro sulco que escoa para as laterais.

$$k_1 k_2 = (p_m + p_{sf})(1 - 0.7 g_{gs})$$
 Eq. 7

O fator k_3 da Equação 5 é a razão entre a área da seção transversal do sulco e a área projetada do contato entre o abrasivo e a superfície. Este valor depende da forma da partícula. Para um cone, a área projetada é dada pela Equação 8, em que c é a largura do micro sulco.

$$A_p = \frac{\pi c^2}{8}$$
 Eq. 8

2.2 Caracterização da forma de partículas abrasivas

A abordagem mais comum utilizada para descrever e diferenciar formas de partículas é o uso de inspeção visual de sua imagem microscópica. As partículas de pós podem ser agrupadas em unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais (ASM HANDBOOK, 1998). Partículas aciculares (Figura 6a) e fibrosas (Figura 6e) podem ser consideradas unidimensionais. Já as partículas dendríticas (Figura 6b), geralmente associadas com pós eletrolíticos e partículas laminares (Figura 6f) são geralmente consideradas bidimensionais. A maioria das partículas presentes na natureza são tridimensionais, sendo a forma esférica (Figura 6c) a mais comum, podendo também ser irregular (Figura 6d) ou nodular (Figura 6g). A partícula pode também ser porosa (Figura 6h).





A forma é um atributo muito complexo, o que torna praticamente impossível expressá-la de maneira adequada com um único número. Porém, dada a subjetividade e pouca repitibilidade da inspeção visual, parâmetros numéricos passaram a ser utilizados para caracterizar a forma de partículas. Trabalhos pioneiros foram desenvolvidos a partir de 1937 por Heywood e posteriormente por Hausner (ASM HANDBOOK, 1998).

Fatores de forma constituem um grupo de medidas de uma única partícula que tem como objetivo fornecer uma informação quantitativa a respeito do formato da

partícula (WOJNAR, 1999). Estes fatores são geralmente adimensionais e independentes da rotação, reflexão ou escala da partícula.

Uma aplicação usual dos fatores de forma é avaliar o quanto a projeção bidimensional da partícula difere de um círculo. Segundo Wojnar, 1999, as partículas podem ser agrupadas em três famílias de forma originadas de um círculo (Figura 7). O primeiro caso corresponde a elipses com variadas elongações (Figura 7a), o segundo representa situações em que a forma permanece arredondada, porém há um aumento na irregularidade da borda (Figura 7b) e o último é uma combinação dos dois anteriores, ou seja, há um alongamento da forma e aumento da complexidade da borda (Figura 7c). Para cada um destes casos existe um fator de forma mais adequado, conforme será visto a seguir.



Figura 7 – Três famílias de formas originadas de um círculo. (a) Elipses com variadas elongações; (b) formas arredondadas com diferentes irregularidades; (c) combinação das duas anteriores (Adaptado de WOJNAR, 1999).

2.2.1 Fator de circularidade

O fator de circularidade é um dos parâmetros numéricos mais utilizados para caracterizar a forma de partículas. É baseado na relação entre a área da projeção

bidimensional da partícula A e a área correspondente do círculo que possui o mesmo perímetro P da partícula (Figura 8). Em termos destas quantidades, o fator de circularidade pode ser escrito como:

$$f_1 = \frac{4\pi A}{P^2}$$
 Eq. 9

Sasov (1984) propôs o fator f_2 (Equação 10), definido como a razão entre o perímetro da partícula, P_p , e o diâmetro, d_A , do círculo com a mesma área da projeção da partícula (Figura 9). Se a partícula for um círculo, $f_2 = \pi$, e conforme a complexidade da forma aumenta, maiores serão os valores de f_2 . A interpretação é similar à do anterior.

$$f_2 = \frac{P_P}{d_A}$$
 Eq. 10



Figura 8 – Partícula para cálculo de parâmetros de forma (Adaptado de WOJNAR, 1999).



Figura 9 – Fator de forma (Adaptado de MIKLI, 2001).

Este fator é uma boa solução para definir o caso ilustrado na Figura 7b. Nestes casos, para o qual a partícula é aproximadamente arredondada, o fator é sensível a irregularidades na borda. Para um círculo, $f_1 = 1$, e à medida que a partícula se torna irregular, o fator diminui. Alguns autores utilizam $1/f_1$.

2.2.2 Razão de aspecto

A elongação, ilustrada na Figura 7a, é bastante comum em partículas nodulares deformadas plasticamente, devido à ação de tensões axiais, por exemplo. Uma maneira eficiente de medir a elongação é utilizando o fator proposto por Heywood, 1937, conhecido como razão de aspecto, f_3 , definido como a razão entre a maior e a menor dimensões ($a \in b$, respectivamente) do retângulo com área mínima que contém a projeção bidimensional da partícula (Figura 8). Este fator também é conhecido como razão de elongação.

$$f_3 = \frac{a}{b}$$
 Eq. 11

A razão de aspecto também pode ser calculada considerando que a e b são o maior e o menor eixo, respectivamente, da elipse que melhor se adapta ao formato da partícula.

2.2.3 Fator de forma

Para o caso ilustrado na Fig. 7c, na qual a partícula é alongada e irregular, o parâmetro denominado fator de forma, f_4 , definido como a razão entre os mínimos diâmetros inscrito e circunscrito (WOJNAR, 1999) é mais apropriado do que os anteriores (Figura 8).

$$f_4 = \frac{d_i}{d_e}$$
 Eq. 12

2.2.4 Fator de Elongação

A elongação pode ser definida como (MIKLI et al., 2001):

$$f_5 = \log_2(d_2 / d_1)$$
 Eq. 13

em que d_2 e d_1 são os eixos da elipse de Legendre (Figura 10). A elipse de Legendre é aquela cujo centro está localizado no centróide da área projetada da partícula e com o mesmo momento de inércia da projeção bidimensional da partícula.



Figura 10 – Elongação baseada na elipse de Legendre.

2.2.5 Método de Fractais

Fractais (do latim *fractus*) são formas geométricas que podem ser divididas indefinidamente em partes similares ao objeto original. A geometria de fractais é uma extensão da geometria clássica e pode ser usada para construir modelos capazes de representar os aspectos mais complexos das formas da natureza (BARNSLEY, 1988). Na tribologia, este conceito foi introduzido para descrever características das bordas das partículas abrasivas, resultando em parâmetros indicadores de complexidade.

Uma técnica geralmente empregada é conhecida como caminho estruturado e também como Método de Richardson, na qual a borda da partícula é percorrida para um dado comprimento de passo \mathcal{E} , formando um polígono (Figura 12). O processo é repetido para vários tamanhos de passos, gerando a curva de Richardson em escala logarítmica, ilustrada esquematicamente na Figura 11.



Figura 11 – Curva de Richardson (Adaptado de PODSIADLO e STACHOWIAK, 1998).

Pela inclinação *m* da reta que melhor se ajusta à curva gerada, a dimensão fractal δ é calculada (Equação 14).

$$\delta = 1 - m$$
 Eq. 14

O processo para encontrar a reta que melhor se ajusta à curva de Richardson pode ser automatizado utilizando o método dos mínimos quadrados.

A dimensão fractal varia teoricamente no intervalo de $\delta = 1$ para um círculo (m = 0) a 2. Maiores valores estão associados a bordas mais complexas. Para pequenos tamanhos de passo (*i.e.* alta resolução), a dimensão é associada com características de textura, enquanto os tamanhos de passo maiores relacionam a forma grosseira da partícula.

Segundo Podsiadlo e Stachowiak (1998), na caracterização da borda de partículas abrasivas, os resultados mais precisos para dimensões fractais provêm do método FAENA (análise de fractais através da abordagem da estimativa normalizada) desenvolvido por Kennedy e Lin, 1986. Neste método, para um dado comprimento de passo, a borda da partícula é percorrida até encontrar um *pixel* que esteja a uma distância maior ou igual ao passo (Figura 12). Este ponto passa a ser o novo pivô e a partir dele o processo é repetido até contornar toda a borda da partícula. O perímetro é estimado pela soma dos comprimentos dos passos, inclusive o passo de fechamento do polígono. O comprimento de passo médio é então calculado pela razão entre a soma dos passos e o número de passos, desconsiderando o passo de fechamento.



Figura 12 – Parâmetro de irregularidade (Adaptado de PODSIADLO e STACHOWIAK, 1998).

Há inúmeros possíveis pontos de partida para contornar a partícula, que resultam em diferentes perímetros. Se apenas um ponto de partida for utilizado, para cada ponto escolhido serão obtidos diferentes valores para a dimensão fractal para uma mesma partícula. Este problema pode ser resolvido adotando-se vários pontos de partida e utilizando a média dos valores obtidos no cálculo do parâmetro. Garante-se também, desta forma, que o valor calculado será insensível à rotação e translação (HAMBLIN, 1993).

2.2.6 Parâmetros de ponta

Recentemente, dois novos parâmetros descrevendo a angulosidade de partículas foram introduzidos (HAMBLIN, STACHOWIAK, 1995). Um dos parâmetros, chamado de parâmetro de ponta – ajuste linear (SP) é baseado na representação da borda da partícula por uma série de triângulos, em processo similar ao método para o cálculo da dimensão fractal. É assumido que quanto mais agudo for o ângulo do vértice e maior for a altura do triângulo, maior será sua abrasividade. Para caracterizar tanto a agudez quanto o tamanho, utiliza-se o valor de ponta, *sv*,

definido na Equação 15, onde θ é o ângulo do vértice e *h* é a altura do triângulo (Figura 13).



Figura 13 – Construção de triângulos ao redor da partícula (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 2001).

A base de cada triângulo ao redor da partícula é formada pelo segmento de reta que une o ponto inicial e o ponto final, determinados pelo tamanho do passo. Para cada um destes triângulos, determina-se o máximo valor de ponta. Conforme ilustrado na Figura 14, o triângulo A possui um ângulo de vértice menor do que o do triângulo B. Se apenas este aspecto fosse considerado, A seria mais abrasivo. Porém, o triângulo B possui a altura maior, e a sobreposição das influências do ângulo e do tamanho resulta, para este caso, em um maior valor de ponta. Portanto, B deve ser mais abrasivo e seu valor de ponta deve ser selecionado para este intervalo.

O processo para o cálculo do valor de ponta é repetido para todos os passos ao longo do perímetro. Após completar o ciclo, determina-se o valor máximo. O procedimento deve ser repetido para todos os possíveis pontos de partida, resultando em um valor de ponta médio.



Figura 14 – Detalhe da construção de triângulos a partir de uma imagem digital da partícula (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995).

O parâmetro de ponta – ajuste linear, SP, é então calculado de acordo com a seguinte fórmula (HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995):

$$SP = \frac{1}{n} \Sigma \left[\frac{1}{m} \Sigma \left(\frac{sv_{\text{max}}}{h_{\text{max}}} \right) \right]$$
 Eq. 16

onde:

$$sv_{\rm max} = \max\left[\cos\frac{\theta}{2}\right]$$
 para um dado passo;

 h_{max} é a altura correspondente para sv_{max} ;

m é o número de *sv* válidos para um dado tamanho de passo;

n é o número de diferentes tamanhos de passo utilizados.

O outro parâmetro (HAMBLIN e STACHOWIAK, 1996), denominado parâmetro de ponta – ajuste quadrático (SPQ) é baseado na localização do centróide e do raio médio do círculo, conforme ilustrado na Figura 15. As áreas fora do círculo são consideradas como regiões de interesse, enquanto o que está no interior é omitido. O raio médio local é determinado para cada região fora do círculo e este ponto é tratado como vértice de ponta. As laterais da ponta, que estão entre os segmentos SM e ME são representados por funções polinomiais quadráticas. Diferenciando os polinômios no ponto M, resulta no ângulo de vértice θ , e conseqüentemente no valor de ponta *sv*.

O parâmetro de ponta – ajuste quadrático (SPQ) é obtido através da média dos n valores de ponta válidos:



$$SPQ = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{n} SV_n$$
 Eq. 17

Figura 15 – Método para o cálculo do parâmetro SPQ (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1996).

2.2.7 Análise de Fourier

Um método utilizado para caracterizar a forma e a textura de partículas consiste no uso de séries de Fourier (ASM Handbook, 1998). A idéia básica é que uma curva fechada pode ser representada por uma função periódica de um parâmetro contínuo ou discreto.

Uma função f(x) periódica de período 2π pode ser representada por uma série trigonométrica (Equação 18).

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nx) + b_n sen(nx)]$$
 Eq. 18

Os valores de a_0 , a_n e b_n são determinados utilizando a fórmula de Euler (Equações 19 a 21). A variável *n* representa a ordem harmônica.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$
 Eq. 19

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx$$
 Eq. 20

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{2\pi} f(x) sen(nx) dx$$
 Eq. 21

Na forma polar, a expansão torna-se:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(nx - \phi_n)$$
 Eq. 22

Onde A_n representa a amplitude harmônica e ϕ_n é o ângulo de fase.

$$A_n = (a_n^2 + b_n^2)^{1/2}$$
 Eq. 23

$$\phi_n = arctg\left(rac{b_n}{a_n}
ight)$$
 Eq. 24

Há três maneiras mais comumente utilizadas para descrever o contorno de objetos utilizando expansão em séries de Fourier (HUNDAL et. al, 1997):

- a) Expansão em séries de Fourier do comprimento radial do vetor com origem no centróide da seção bidimensional da partícula como uma função do ângulo. Determinam os descritores radiais de Fourier;
- b) Expansão em séries de Fourier das coordenadas do contorno em um plano complexo, resultando nos descritores de Granlund;
- c) Expansão em séries de Fourier das direções angulares como uma função do comprimento de arco, que representam os descritores de Zahn e Roskies (ZR).

O primeiro método consiste em representar cada ponto da borda da projeção bidimensional da partícula por um vetor $R(\theta)$ em coordenadas polares (Equação 25), cuja origem está no centróide da partícula (Figura 16a). Este raio vetor é, então, uma função periódica do ângulo θ .

$$R(\theta) = R_0 + \sum_{n=1}^{N} [a_n \cos(n\theta) + b_n sen(n\theta)]$$
 Eq. 25

Na forma polar, a amplitude harmônica R_n pode ser obtida através da Equação 23 e ϕ_n conforme definido na Equação 24.

$$R(\theta) = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cos(n\theta - \phi_n)$$
 Eq. 26

As amplitudes harmônicas são normalizadas através da divisão pelo raio médio do objeto, satisfazendo a condição de independência da translação, rotação, escala e ponto de partida. Estes valores são plotados formando a curva representada na Figura 16b.



Figura 16 – Ilustração (Adaptado de ASM Handbook, 1998).

A expansão radial não é adequada para formas côncavas, condição em que pode ser gerado mais de um vetor para um mesmo ângulo θ .

Para pequenos harmônicos a análise de descreve grosseiramente a forma da partícula e para harmônicos maiores, expõe a textura da borda.

O segundo método, os pontos no contorno da seção bidimensional da partícula são representados no plano complexo. A abscissa é o eixo real e a coordenada o eixo imaginário. Considerando um ponto contornando a partícula com velocidade constante determina-se a função complexa u(l) (Equação 27), em que l é o comprimento do arco ao longo do contorno.



Figura 17 – Ponto contornando a partícula com velocidade constante no plano complexo (Adaptado de HUNDAL et. al, 1996).

$$u(l) = x(l) + jy(l)$$
 Eq. 27

A expansão em série de Fourier desta função cujo período é L (comprimento total da borda), é dada pela Equação 28.

$$u(l) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} a_n \exp\left(j\frac{2\pi n}{L}l\right)$$
 Eq. 28

O coeficiente a_n é determinado por:

$$a_n = \frac{1}{L} \int_0^L u(l) \exp\left(-j\frac{2\pi n}{L}l\right)$$
 Eq. 29

No terceiro método, a partícula é contornada por um polígono de *s* vértices V_0 , V_1 ,..., V_s , com direções angulares $\Delta \phi_1$, $\Delta \phi_2$,..., $\Delta \phi_s$, e comprimentos de arco Δl_1 , Δl_2 ,..., Δl_s , de forma que o comprimento total do polígono e dado por:

$$L = \sum_{k=1}^{s} \Delta l_k$$
 Eq. 30

Os coeficientes de Fourier resultam em:

$$a_n = -\frac{1}{n\pi} \sum_{k=1}^{s} \Delta \psi_k \cos\left(\frac{2\pi n l_k}{L}\right)$$
 Eq. 31

$$b_n = -\frac{1}{n\pi} \sum_{k=1}^{s} \Delta \psi_k sen\left(\frac{2\pi n l_k}{L}\right)$$
 Eq. 32



Figura 18 – Direções angulares em um polígono de contorno de uma partícula (HUNDAL et. al, 1996).

2.3 Efeito da forma da partícula no desgaste abrasivo

2.3.1 Relação entre a angulosidade da partícula e o desgaste abrasivo

Moore e Swanson, 1983, examinaram experimentalmente o modelo analítico de Moore apresentado no item 2.1.2, que explicita teoricamente a influência da forma da partícula no desgaste abrasivo. Foram conduzidos ensaios normalizados de desgaste a dois corpos (pino sobre disco) e a três corpos (roda de borracha) com partículas angulosas (quartzo) e arredondadas (areia Ottawa).

Dados experimentais dos ensaios a dois corpos mostraram que o desgaste provocado por partículas angulosas pode ser relacionado de maneira razoável com as taxas previstas teoricamente, tanto para baixas como para altas cargas aplicadas. Porém, se a partícula for arredondada, a correlação fica prejudicada para altos carregamentos.

O gráfico da Figura 19 apresenta as resistências relativas ao desgaste a dois e a três corpos. A resistência relativa ao desgaste é a razão entre o volume de desgaste de um material de referência e o volume de desgaste de um material qualquer, o qual se deseja analisar a resistência à abrasão. Os dados se relacionam razoavelmente bem para as partículas arredondadas de areia Ottawa, porém para as partículas angulosas de quartzo, a resistência relativa é significativamente maior para o teste a três corpos do que para dois corpos.





Os resultados dos ensaios pino sobre disco condizem de forma satisfatória com as previsões da teoria para um cone de ângulo 120 graus, enquanto os testes de roda de borracha mostram que as resistências ao desgaste para abrasivos angulosos são muito maiores do que o previsto teoricamente (i.e. desgastes abrasivos menores do que os previstos). Isto pode ocorrer porque devido ao fato de o abrasivo estar solto, ele pode se reorientar durante o processo de desgaste e assumir pequenos ângulos de corte. A partícula pode também se deteriorar durante o processo, causando efeito similar. Finalmente, como o abrasivo está livre para rolar, fica menos tempo efetivamente desgastando a superfície.

Através do experimento conduzido por Stachowiak, 2000, foi demonstrado que os parâmetros de ponta – ajuste linear (SP) e ajuste quadrático (SPQ), que descrevem numericamente a angulosidade de partículas abrasivas conforme visto no item 2.3.6, correlacionam-se bem as taxas de desgaste abrasivo.

Neste experimento, 20 partículas de tamanhos uniformes de sete tipos de grãos abrasivos (microesferas de vidro, areia de sílica, granada, diamante, carboneto de silício, quartzo e alumina) foram selecionadas aleatoriamente. As imagens de cada partícula foram coletadas e os valores de SP e SPQ formam determinados pelas Equações 16 e 17, respectivamente. Na tabela 1 estão apresentados os valores médios dos parâmetros calculados.

Abrasivo	Parâmetro de ponta - ajuste linear - SP	Parâmetro de ponta - ajuste quadrático - SPQ			
Microesferas de vidro	0,1369	0,0231			
Areia de sílica	0,2077	0,1919			
Granada	0,2168	0,2515			
Diamante	0,2971	0,3958			
Carboneto de silício	0,2942	0,4247			
Quartzo	0,3239	0,5336			
Alumina	0,3591	0,6008			

Tabela 1 – Valores de parâmetros de ponta médios calculados para partículas abrasivas (Adaptado de STACHOWIAK, 2000).

Para determinar a ralação entre a angulosidade da partícula e as taxas de abrasão a dois corpos, Stachowiak conduziu o ensaio com um abrasômetro pinosobre-disco. As partículas com tamanho médio de 150 a $300 \,\mu$ m foram coladas na superfície rebaixada do disco, deixando a região superior sem resina e em contato direto com a amostra de giz (Figura 20).



Figura 20 – Esquema do ensaio abrasivo a dois corpos (Adaptado de STACHOWIAK, 2000).

A amostra de giz, que possui dureza bem inferior do que as partículas foi selecionada para garantir que a abrasão fosse o processo de desgaste dominante durante o ensaio. As condições de operação, como a carga, velocidade, temperatura, umidade, etc. foram mantidas durante os ensaios, para assegurar que houvesse diferença apenas na forma dos diferentes abrasivos.

Os resultados (Figura 21) confirmam que há uma forte relação entre a angulosidade descrita pelos parâmetros de ponta e o desgaste abrasivo a dois corpos.



(a)


(b)

Figura 21 – Relação entre a angulosidade da partícula descritas pelos parâmetros de ponta: (a) ajuste linear (SP) e (b) ajuste quadrático (SPQ) e as taxas de desgaste abrasivo para diferentes tipos de grãos abrasivos no ensaio a dois corpos (Adaptado de STACHOWIAK, 2000).

Outro experimento foi conduzido com o objetivo de investigar a relação entre a angulosidade de partículas e o desgaste abrasivo a três corpos. Stachowiak utilizou o ensaio esfera sobre chapa (Figura 22), no qual foram utilizadas esferas de 41 mm e uma amostra de aço 1020. O tamanho médio das partículas selecionadas variou de 250 a $355 \,\mu$ m. As partículas foram misturadas à lama, escoando a uma vazão constante de 0,5 litros por minuto.



Figura 22 – Esquema do ensaio abrasivo a três corpos (Adaptado de STACHOWIAK, 2000).

Similarmente ao teste a dois corpos, pode-se observar pela análise da Figura 23 que há uma forte correspondência entre a angulosidade e a taxa de desgaste. Nota-se que as partículas de sílica, apesar de terem valores de SP e SPQ menores do que os da alumina, pelo fato de apresentarem um maior número de pontas afiadas, causaram maior dano na superfície. Isto ocorreu porque as partículas estão livres para rolar no desgaste a três corpos.

Após finalizar os ensaios, Stachowiak chegou às seguintes principais conclusões:

- a) A angulosidade de partículas pode ser descrita com sucesso pelos parâmetros SP e SPQ;
- b) Ambos os parâmetros apresentam alguma variação dentro da população de partículas e se correlacionam bem com as taxas de desgaste abrasivo.
- c) SPQ apresenta resultados sensivelmente melhores do que SP.



Figura 23 – Relação entre a angulosidade da partícula descritas pelos parâmetros de ponta (a) ajuste linear (SP) e (b) ajuste quadrático (SPQ) e as taxas de desgaste abrasivo para diferentes tipos de grãos abrasivos no ensaio a três corpos (Adaptado de STACHOWIAK, 2000).

2.3.2 Medida da abrasividade como função da forma de partículas

Hamblin e Stachowiak, 1995, conduziram testes de desgaste abrasivo a dois e a três corpos com o objetivo de verificar a relação entre a forma e a abrasividade de quatro tipos de minerais (Figura 24): quartzo, granada, areia de sílica e micro esferas de vidro. Estes foram caracterizados pelos seguintes parâmetros: fator de circularidade, razão de aspecto, dimensão fractal e parâmetros de ponta.



Figura 24 – Imagens de partículas minerais utilizadas nos testes: (a) quartzo; (b) granada; (c) areia de sílica e (d) micro esferas de vidro (HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995)

O ensaio a dois corpos foi do tipo pino sobre disco, conforme mostrado na Figura 25. As partículas foram coladas na superfície de um disco de raio 30 mm com uma velocidade angular de 60 rpm e submetidas a uma carga normal de 0,78N. As taxas de desgaste foram obtidas através de leituras periódicas da perda de massa do pino.



Figura 25 – Ilustração do ensaio de desgaste abrasivo a dois corpos pino sobre disco (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995).

Os ensaios a três corpos foram conduzidos com a utilização de um misturador industrial, Figura 26. Uma haste de alumínio submersa 90 mm em um recipiente contendo os grãos abrasivos executa movimento combinado de rotação a 210 rpm e orbita a 60 rpm em um raio de 30 mm. A perda de massa da haste foi medida a cada hora em um período de cinco horas de teste para cada tipo de abrasivo.



Figura 26 – Ilustração do ensaio de desgaste abrasivo a três corpos – misturador industrial (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995).

Em ambos os ensaios, para garantir que a abrasividade fosse função apenas da forma das partículas, todas as outras variáveis foram mantidas constantes e a dureza de todos abrasivos maior do que três vezes a dureza da amostra. As perdas de massa provocadas por cada um dos abrasivos estão apresentadas na Figura 27.



Figura 27 – Resultados dos ensaios de desgaste abrasivo: (a) a dois corpos e (b) a três corpos (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995).

Observou-se que no ensaio a dois corpos, os desgastes mais severos do pino de alumínio ocorrem nos primeiros dez minutos de teste. Nos próximos 20 minutos ocorre um declínio gradual na perda de massa, até atingir uma região praticamente estável nos últimos 20 minutos. As maiores reduções para as partículas de quartzo podem ser explicadas pelo microcorte de pontas afiadas destes minerais, revelados pela presença de microfragmentos depositados no disco ao longo do ensaio.

No ensaio a três corpos o quartzo também proporcionou maiores desgastes, seguido pela granada, areia de sílica e micro esferas de vidro. A maior diferença entre os dois testes pode ser notada na Figura 27b. Percebe-se uma separação entre dois grupos, um deles formado pelo quartzo e pela granada e o outro pela areia de sílica e microesferas de vidro.

De 13 a 15 partículas de cada tipo de mineral foram selecionadas aleatoriamente para o cálculo dos seguintes fatores de forma: dimensão fractal, razão de aspecto, fator de circularidade e parâmetro de ponta. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Partículas abrasivas	Quartzo	Granada	Areia de sílica	Micro esferas de vidro
Número de partículas	14	14	13	15
Dimensão fractal média	1,02925	1,00884	1,01029	1,00539
Razão de aspecto média	1,69186	1,46619	1,3835	1,05825
Fator de circularidade média	1,70486	1,33224	1,25282	1,13292
Parâmetro de ponta médio	0,32079	0,21254	0,20108	0,14917

Tabela 2 – (Adaptado de STACHOWIAK, 2000).

Os fatores de forma foram então correlacionados com as taxas de desgaste. Os resultados dos testes foram normalizados (atribuído 1 para o maior valor de cada parâmetro) para os primeiros dez minutos para o ensaio a dois corpos e primeira hora para o ensaio a três corpos, diminuindo o efeito da mudança de forma durante o experimento, principalmente o quartzo. Os resultados podem ser observados na Figura 28.



Figura 28 – (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1995).

Pode ser notada uma fraca correlação entre a dimensão fractal e as taxas de desgaste a dois e a três corpos. A razão de aspecto também não apresentou uma boa correlação. O parâmetro de ponta e o fator de circularidade correlacionam-se

razoavelmente bem com o desgaste a dois corpos para os quatro tipos de minerais. Mas, segundo os autores, isto não significa que o fator de circularidade seja tão adequado quanto o parâmetro de ponta, principalmente pelo fato de as partículas com valores similares de fator de circularidade poderem ser insensíveis a diferentes aspectos da forma fortemente relacionados com a remoção de material (i.e. faces cortantes).

A principal conclusão é que o parâmetro de ponta calculado para os quatro grupos de minerais abrasivos correlaciona-se bem com os resultados dos testes de desgaste abrasivo a dois e a três corpos.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da metodologia

A metodologia consiste em determinar parâmetros de forma para um conjunto de partículas para posterior análise dos resultados. A partir das imagens binárias bidimensionais, serão aplicadas técnicas de processamento digital para a determinação dos parâmetros.

As razões de aspecto, as dimensões fractais e os fatores de circularidade serão calculados utilizando o software *Image Pro Plus* 4.5. Serão também analisados os resultados para um parâmetro de ponta modificado, denominado SPL – parâmetro de ponta linear. Este parâmetro é baseado no método para o cálculo do SPQ, porém considerando ajuste linear para os segmentos gerados em cada ponta, conforme será visto a seguir. O cálculo do SPL será realizado através de uma ferramenta computacional desenvolvida no software *Matlab* 7.1, cujos detalhes estão apresentados nos apêndices D, E, F.

Inicialmente os cálculos serão realizados para partículas individuais de cinco minerais abrasivos cujos valores de SPL podem ser comparados com os resultados de SP e SPQ determinados por Hamblin, Stachowiak (1996). A seguir os cálculos serão repetidos para um conjunto de partículas de alumina e grãos abrasivos de lixa de vidro grana #80.

3.2 Seleção das partículas

Na primeira análise serão utilizados cinco minerais abrasivos típicos – areia de sílica (Figura 29a), granada (Figura 29b), carboneto de silício (Figura 29c), quartzo (Figura 29d) e alumina sinterizada triturada (Figura 29e), com tamanho médio entre 250-300 μ m. As imagens binárias bidimensionais (550 x 550 pixels) das partículas foram geradas a partir de imagens de partículas utilizadas nos ensaios realizados por Hamblim e Stachowiak (1996).



Figura 29 – Grãos abrasivos. (a) areia de sílica (b) granada (c) carboneto de silício (d) quartzo (e) alumina sinterizada triturada. (Adaptado de HAMBLIN e STACHOWIAK, 1996).

Para a segunda análise foram selecionados dois pós abrasivos, a alumina e grãos de lixa de vidro grana #80. As imagens foram obtidas com microscópio ótico e estão apresentadas nas figuras 30 e 31. Os grãos foram dispostos aleatoriamente sobre uma base de vidro com uma folha branca na superfície inferior.



Figura 30 – Imagens das partículas de alumina



Figura 31 – Imagem das partículas da lixa de vidro

3.3 Método para o cálculo do fator de circularidade, razão de aspecto e dimensão fractal

O fator de circularidade, a razão de aspecto e a dimensão fractal de cada partícula da Figura 29 são calculados utilizando o software de processamento de imagens *Image-Pro Plus.*

Para cada arquivo correspondente aos abrasivos, é selecionada a opção que detecta automaticamente a região clara da figura, que corresponde à projeção da partícula analisada (Figura 32). A seguir são selecionados os itens a serem mensurados (Figura 33). Os resultados são apresentados conforme mostrado na Figura 34.



Figura 32 – Captura da tela do *Image-Pro Plus* durante o cálculo dos parâmetros de forma para a partícula de alumina sinterizada triturada.

Select Measureme	its	
Measurements:	Filter Ranges:	Fractal Dim.
End points Feret (max) Feret (mean) Feret (min) Fractal Dim. Heterogeneity Hole Area Hole Ratio Holes IOD Margination Per-Area Perim. (convex) Perim. (ellipse)	Aspect 1 1000000 Fractal Dim. 1 2 Roundness 0 1000000	Fractal dimension of the object's outline.
Select <u>A</u> ll	Start: 2.5593630	<u>M</u> easure
Select None	End: 2559363	<u>Filter Objects</u>
	Edit Range	OK

Figura 33 – Janela para seleção dos itens para medição.

ile			
No Sort	C Sort Up C Sort Down	On: Aspect	
Locate th	e object. 🛛 🗖 Scroll to the	object.	
Obj.#	Aspect	Roundness	Fractal Dim.
1	1.6534920	1.9374064	1.0424324

Figura 34 – Resultados da medição para a partícula de alumina sinterizada triturada.

Para os abrasivos das figuras 30 e 31, foram selecionados aleatoriamente 20 partículas, dispostas de forma ordenada nas figuras 35 e 36.



Figura 35 – Imagem das partículas selecionadas de alumina dispostas de forma ordenada.





As imagens das figuras 35 e 36 foram submetidas ao processo de limiarização, que consiste na extração de objetos de interesse através da seleção de um limiar que separa agrupamentos de cinza, obtendo como resultado imagens binárias conforme apresentado na Figura 37.

Dimage-Pro Plus - AL COMPLETA. JPG (1/1)	
Elle Edit Acquire Enhance Process Measure Magro Window Help	
ଛେ ▦ ☜ ♦ ଛା ଛା ଛା ସା ଓ େ ୧ ୬ ଏ ଏ ା ା ⊯ ⊯ ≇ ☷	難 🍄 📷 🔝 🛥 🎬 Λ1 🔚 🗠 🖾 🖉
Efe Ext Aguite Exhance Process Descure Mayor Window Heb C Ext Exhance Process Descure Mayor Window Heb AL COMPLETAL PPG (1/1)	Image: Construction - AL COMPLETA_IPG (1/1) Hittogram Baned Color Color Based Image: Color Col
RGB 24(2,205,174 bytes). Zoom:50%	810, 2 0 0 0 W.H: 934,787 μm (elerise) 1GB

Figura 37 – Método para obtenção de imagem binária das partículas de alumina utilizando o software *Image Pro Plus*.

Os cálculos foram realizados conforme descrito anteriormente. As imagens binárias obtidas para a alumina e grãos da lixa de vidro estão apresentadas na figura 38. A numeração das partículas é da esquerda para a direita e de cima para baixo.



Figura 38 – Imagens binárias: (a) partículas de alumina e (b) grãos da lixa de vidro.

3.4 Método para o cálculo dos parâmetros de ponta SP, SPQ e SPL

O parâmetro SPL será calculado utilizando uma ferramenta computacional desenvolvida no Matlab, cujos detalhes estão descritos nos Apêndices D e E. O método para o cálculo consiste nos seguintes passos, considerando que inicialmente tem-se a imagem binária bidimensional da partícula:

(a) determinação do centróide da partícula (\bar{x}, \bar{y}) . Para cada direção (x e y) é determinada a razão entre a soma das coordenadas de todos os elementos multiplicados por suas áreas e a soma destas áreas. Como todos os pixels possuem a mesma área, o cálculo é simplificado para a razão entre a soma das coordenadas de todos os pixels que constituem o objeto e o número total de pixels.

(b) cálculo do raio médio \bar{r} , definido como a média dos raios com origem no centróide que contornam a borda da partícula. O número de raios é igual ao número de pixels na borda da partícula;

(c) detecção das regiões externas ao círculo definido pelo raio médio ($r > \overline{r}$). Os pixels adjacentes que possuem raio maior do que o médio formam as pontas;

(d) para cada uma das pontas detectadas, determina-se o raio local máximo $r_{i_{\text{max}}}$, que formará o vértice M_i de cada ponta. Os pontos S_i e E_i representam o início e o fim da ponta. São determinados pelas intersecções do círculo com a borda da partícula;

(e) para cada ponta é calculado o valor se ponta sv, definido cosseno da metade do ângulo θ formado pelos segmentos EM e SM ;

$$sv = \cos(\theta/2)$$
 Eq. 33

(e) o parâmetro é então calculado como a média dos valores de ponta das pontas detectadas, sendo n o número de pontas.

$$SPL = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} sv_i$$
 Eq. 34



Figura 39 – Método para cálculo do parâmetro de ponta SPL.

A diferença entre o cálculo de SPL e SPQ é o ajuste da borda da partícula entre os segmentos EM e MS de cada ponta. Enquanto SPQ considera ajuste polinomial quadrático, SPL considera ajuste linear. Desta forma, o ângulo θ de cada ponta detectada no cálculo de SPL será menor do que o ângulo θ no cálculo do SPQ. Essa diferença pode ser observada pela comparação das Figuras 15 e 39.

Os valores dos parâmetros de ponta SP e SPQ reportados por Hamblin e Stachowiak (1996) para as partículas da Figura 29 serão apresentados para fins comparativos.

RESULTADOS 4

4.1 Resultados dos fatores de forma para areia de sílica, granada, carboneto de silício, quartzo e alumina

Os parâmetros de forma para os cinco minerais abrasivos da Figura 29 foram determinados conforme definido na metodologia. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Razão de aspecto, 1/fator de circularidade, dimensão fractal e parâmetro de ponta SPL calculados para os cinco minerais abrasivos da Figura 29 e resultados de SP e SPQ, reportados por Hamblin e Stachowiak (1996) para conjuntos de 20 partículas dos mesmos abrasivos.

Partícula	Taxa de desgaste (mm/min)	Razão de Aspecto	1/Fator de Circularidade	Dimensão Fractal	Parâmetro de ponta SP	Parâmetro de ponta SPQ	Parâmetro de ponta SPL
Areia de sílica	2,0551	1,2211	1,1902	1,0058	0,2077	0,1919	0,6312
Granada	2,2303	1,0624	1,2226	1,0116	0,2168	0,2515	0,3993
Carboneto de silício	2,9499	1,6563	1,5293	1,0145	0,2942	0,4247	0,7131
Quartzo	3,4341	1,6247	1,6781	1,0246	0,3239	0,5336	0,8626
Alumina sinterizada triturada	3,8993	1,6535	1,9374	1,0424	0,3591	0,6008	0,7114

Valores reportados por Hamblin e Hamblin e Parâmetros calculados para uma partícula de cada Obtenção do parâmetro Stachowiak abrasivo (Figura 29) utilizando o Image-Pro Plus (1996)

Stachowiak (1996), Valores médios de um conjunto de 20 partículas de cada abrasivo

Matlab

Através de uma inspeção visual subjetiva das partículas analisadas, é possível separá-las em dois grupos – angulosas (alumina sinterizada triturada, quartzo e carboneto de silício) e arredondadas (areia de sílica e granada). No primeiro grupo, ao contrário do segundo, são evidentes as pontas que supostamente terão maior capacidade de remoção de material de uma superfície.

Na Figura 40 as partículas estão dispostas segundo ordem crescente das taxas de desgaste reportadas por Hamblin e Stachowiak (1996). Os valores das taxas e dos fatores de forma estão normalizados para que a comparação entre eles não seja prejudicada devido às diferenças de escala. Foi atribuído valor unitário para a maior taxa, bem como aos maiores fatores de forma. Da mesma forma, os menores valores assumiram valores nulos e os resultados intermediários foram determinados proporcionalmente, sendo que todos os valores estão contidos no intervalo [0,1]. Para a maioria dos parâmetros (dimensão fractal, fator de circularidade, SP e SPQ) a següência resultante, do menor para o maior, foi: areia de sílica, granada, carboneto de silício, quartzo e alumina sinterizada triturada. A razão de aspecto apresentou menores resultados para a granada, seguida da areia de sílica, quartzo, alumina sinterizada triturada e carboneto de silício. Classificando também em ordem crescente segundo o SPL, resultou em: granada, areia de sílica, alumina sinterizada triturada triturada.

Observa-se que as partículas agrupadas através da inspeção visual como arredondadas (areia de sílica e granada) obtiveram os menores valores para todos os parâmetros numéricos. Diferentemente dos demais, a razão de aspecto e o SPL apresentaram os menores valores para a partícula de granada ao invés da areia de sílica. De fato a areia de sílica apresenta uma forma mais alongada, o que justifica o valor mais alto da razão de aspecto para este abrasivo. Analisando as duas pontas geradas no cálculo do SPL para a areia de sílica (Figura 41b), observa-se que estas são formadas por duas extremidades pouco angulosas, mas que geraram segmentos de reta que resultaram em ângulos de vértice relativamente pequenos e, conseqüentemente, um alto valor para SPL. Este fato explica a inversão no *ranking* para este parâmetro.



Figura 40 – Representação da razão de aspecto, fator de circularidade, dimensão fractal e parâmetro de ponta SPL calculados para os cinco minerais abrasivos da Figura 29 e resultados de SP, SPQ e taxas de desgaste abrasivo reportados por Hamblin e Stachowiak (1996).

As demais partículas, classificadas visualmente como angulosas (carboneto de silício, quartzo e alumina sinterizada triturada), também sofreram variações na ordem para a razão de aspecto e SPL. Considerando o SPL, o maior valor foi obtido para o grão abrasivo de quartzo, enquanto que no restante os maiores foram para a alumina, com exceção da razão de aspecto, que resultou no maior parâmetro para o carboneto de silício. Analisando a primeira ponta da partícula de quartzo (figura 41c), observa-se que em grande parte de sua extensão os raios locais estão bem próximos do raio médio e o raio local máximo ficou distante da região central da ponta, o que resultou em um ângulo de vértice relativamente pequeno, ou seja, um alto valor de ponta *sv* para o cálculo de SPL.



Figura 41 – Representação das pontas detectadas no cálculo do parâmetro de ponta SPL para os seguintes minerais abrasivos: (a) alumina sinterizada triturada (b) areia de sílica (c) quartzo (d) carboneto de silício (e) granada.

A dimensão fractal apresentou resultados semelhantes para todos os abrasivos, o que pode levar a concluir que este parâmetro é insensível à angulosidade. No entanto, analisando a Figura 40, cujos valores estão apresentados na forma normalizada, pode ser observado que este fator acompanhou o *ranking* da taxa de desgaste, o que pode significar que há uma sensibilidade à angulosidade. Porém, a razão incremental da dimensão fractal, ou seja, o quanto o parâmetro variou devido à variação da taxa de desgaste, foi inferior aos demais parâmetros para a transição granada – carboneto de silício.

Comparando os parâmetros de ponta SP, SPQ e SPL da Tabela 3, é observado que os valores de SPL foram maiores do que os parâmetros SP e SPQ e uma possível explicação para este fato é devido às aproximações das bordas entre os segmentos SM e ME serem lineares para o parâmetro modificado e não polinomiais quadráticas, conforme apresentado no item 3.4. Outro ponto que merece destaque são as alterações no *ranking* do SPL comparado com os outros dois - principalmente a areia de sílica, que apresentou um valor relativo alto de SPL. Este fato pode ser devido ao número de partículas utilizadas para os cálculos. Enquanto Hamblin e Stachowiak (1996) reportaram valores médios baseados em 20 medidas para determinar SP e SPQ, o cálculo de SPL considerou apenas uma única partícula.

As pontas detectadas para cada partícula a partir do cálculo de SPL estão detalhadas na Figura 41.

Outra análise importante é a verificação da correlação entre os fatores de forma e as resistências à abrasão. Trabalhos anteriores (Hamblin, Stachowiak, 1996) evidenciaram que a medida da abrasividade deve incluir a angulosidade porque, à medida que esta aumenta, a proporção de desgaste pelo mecanismo de microcorte aumenta, resultando em um acréscimo nas taxas de remoção. As relações entre os fatores de forma usuais, como razão de aspecto, dimensão fractal e fator de circularidade com as taxas de desgaste foram previamente investigadas por (Hamblin, Stachowiak, 1996) e foi contatado que apenas o fator de circularidade apresentou certa ligação com a abrasividade da partícula, resultando em uma correlação linear razoável (Figura 42a). As Figuras 42b e 42c apresentam resultados determinados por Hamblin e Stachowiak (1996) para os minerais apresentados na

Figura 29, em que pode ser observado que há um coeficiente de correlação próximo da unidade para os parâmetros SP e SPQ. A figura 42d mostra que o valor de SPL para a sílica está muito alto, enquanto que para a alumina está baixo. Esta distorção possivelmente é devido aos fatos discutidos anteriormente a respeito da forma de geração das pontas e da utilização de uma única partícula frente aos valores médios utilizados como referência.



Figura 42 – Relação entre a taxa de desgaste e os seguintes fatores de forma: (a) 1/Fator de circularidade (b) SP (c) SPQ (d) SPL. Os parâmetros SP, SPQ e taxas de desgaste abrasivo foram extraídos dos ensaios realizados por Hamblin e Stachowiak (1996). 1/Fator de circularidade determinado pelo Image-Pro Plus e SPL determinado no Matlab.

4.2 Resultados dos fatores de forma para partículas de alumina e lixa de vidro

Para as partículas de alumina e lixa de vidro das figuras 43a e b, respectivamente, os resultados estão apresentados nas tabelas 4 e 5.

Analisando os resultados para a razão de aspecto da alumina (Tabela 4), verifica-se que os cinco maiores valores, em ordem crescente são para as partículas 11, 6, 19, 15 e 4. Este parâmetro detectou apenas o alongamento, não levando em consideração a angulosidade. Da mesma forma, a dimensão fractal gerou a seguinte seqüência: 8, 4, 9, 13 e 5. Para este caso também não foi observada relação com a angulosidade. Finalmente, para os parâmetros SPL e fator de circularidade, as seqüências foram, respectivamente: 19, 18, 11, 15, 4 e 20, 6, 15, 19, 4. Estas cinco partículas supostamente possuem maior angulosidade. De fato, observando estes grãos através de uma inspeção visual, nota-se que apresentam ângulos favoráveis para remoção de material.



Figura 43 – Imagens binárias: (a) partículas de alumina e (b) grãos da lixa de vidro.

Comparando mais detalhadamente SPL e o fator de circularidade, algumas inversões no *ranking* merecem ser destacadas. A partícula 1, por exemplo, resultou no segundo menor valor para o fator de circularidade, enquanto obteve resultado próximo ao valor médio para SPL. Observa-se que, apesar de a partícula ter um

formato próximo de um círculo, o que determinou o baixo valor para o fator de circularidade, apresenta pontas angulosas, resultando em um SPL maior.

Partícula	Diâmetro médio [µm]	SPL	Razão de aspecto	1/Fator de circularidade	Dimensão fractal
1	312	0,65069	1,19862	1,24354	1,06878
2	338	0,50881	1,36544	1,35525	1,07948
3	383	0,57135	1,14031	1,45233	1,06561
4	381	0,91103	2,78559	2,26170	1,08411
5	406	0,67289	1,53433	1,32335	1,11792
6	400	0,77520	1,95923	1,69730	1,07498
7	263	0,51669	1,07859	1,32125	1,07229
8	403	0,62345	1,31469	1,46596	1,08393
9	352	0,65543	1,14882	1,40625	1,08425
10	281	0,61637	1,12695	1,26627	1,06653
11	393	0,85062	1,90540	1,60523	1,06160
12	358	0,48378	1,25627	1,21907	1,05916
13	409	0,69010	1,21479	1,40687	1,09354
14	368	0,53106	1,36573	1,41259	1,05077
15	414	0,85864	2,74615	1,77536	1,06640
16	339	0,56125	1,11530	1,46497	1,08242
17	295	0,72289	1,59659	1,39790	1,07896
18	305	0,82842	1,74603	1,52397	1,05362
19	385	0,83592	2,44259	1,81318	1,05557
20	371	0,67053	1,83634	1,66182	1,07708
Média	360 ± 50	0,7 ± 0,1	1,6 ± 0,5	1,5 ± 0,2	1,07 ± 0,015
Desvio padrão	46	0,1	0,5	0,2	0,015

Tabela 4 – Resultados para as partículas de alumina.

Repetindo a análise para as partículas de lixa de vidro apresentados na Tabela 5, o maior resultado para a razão de aspecto foi para a primeira partícula, seguida das partículas 3, 6, 8 e 5, respectivamente. Novamente é constatado que este parâmetro é sensível ao alongamento, observado através de uma verificação visual da figura 43b

Partícula	Diâmetro	SPL	Razão de	1/Fator de	Dimensão
	médio [µm]		aspecto	circularidade	fractal
1	416	0,88231	2,35923	1,74801	1,05958
2	473	0,85738	1,69183	1,47280	1,06121
3	414	0,84025	2,07785	1,56328	1,03936
4	354	0,68700	1,22414	1,39204	1,07603
5	585	0,77170	1,82012	1,49337	1,05456
6	450	0,85510	1,85953	1,75733	1,07376
7	535	0,66418	1,36199	1,58566	1,07741
8	499	0,82857	1,85560	1,43339	1,05535
9	362	0,74002	1,56399	1,31946	1,06823
10	510	0,53551	1,19198	1,34324	1,06591
11	394	0,70264	1,51813	1,39185	1,07924
12	328	0,71298	1,33475	1,36841	1,08869
13	389	0,59446	1,46947	1,28229	1,08011
14	466	0,61600	1,25437	1,30160	1,06436
15	594	0,65155	1,38905	1,38318	1,06964
16	365	0,72817	1,45324	1,54782	1,07771
17	463	0,76850	1,41378	1,44892	1,07500
18	518	0,58114	1,19081	1,37543	1,06736
19	534	0,73582	1,73328	1,43623	1,05109
20	441	0,66250	1,22021	1,42021	1,07522
Média	460 ± 80	0,7 ± 0,1	1,5 ± 0,3	1,45 ± 0,13	1,07 ± 0,01
Desvio padrão	77	0,1	0,3	0,13	0,01

Tabela 5 – Resultados para as partículas de lixa de vidro

. Para a dimensão fractal, cujos resultados continuaram sendo muito semelhantes, os cinco maiores valores foram para as partículas 7, 16, 11, 13 e 12, sendo a última o maior valor. O fator de circularidade das partículas 16, 3, 7, 1 e 6 foram os maiores resultados, em ordem crescente. Os cinco maiores valores para o SPL foram para os abrasivos 8, 3, 6, 2, 1, do menor par o maior. SPL e fator de circularidade detectaram, novamente, de maneira eficiente a angulosidade.

Inspecionando visualmente a figura 43b, as partículas 1, 2 e 3 merecem destaque pelas suas angulosidades, ou seja, contêm pontas formadas por ângulos muito pequenos, tendo como conseqüência um valor alto para SPL e supostamente um maior potencial para remoção. Também resultaram em altos valores para o fator de circularidade. As dimensões fractais destas mesmas partículas estão entre as menores, evidenciando a baixa capacidade deste parâmetro para detecção de angulosidade.

Os resultados médios para a alumina e os grãos de lixa de vidro são semelhantes para todos os parâmetros, como pode ser observado nas tabelas 4 e 5.

A comparação dos valores médios das tabelas 4 e 5 com os resultados apresentados na Tabela 3 possibilita afirmar que as partículas de alumina e vidro removidas de lixas são angulosas. Os valores das razões de aspecto são comparáveis aos obtidos para o carboneto de silício, quartzo e alumina sinterizada triturada. As partículas de maiores valores de SPL e fator de circularidade, por sua vez, possuem valores comparáveis aos obtidos para o guartzo (SPL) e para a alumina (fator de circularidade).

Calculando o coeficiente de variação (razão entre o desvio-padrão e valor médio do parâmetro, em termos percentuais) para o parâmetro SPL (partículas de alumina e grãos de lixa de vidro) e comparando com os resultados para SPQ de partículas que obtiveram valores semelhantes para SPL (carboneto de silício e alumina sinterizada triturada – valores determinados por Hamblin e Stachowiak, 1996), nota-se que a maioria não apresenta variação significativa. Para o SPL da alumina e lixa de vidro, o coeficiente de variação foi de 14,3%, enquanto para o SPQ do carboneto de silício, resultou em 25%. Para a alumina sinterizada triturada o coeficiente de variação é 16,7% para o SPQ. O fato de o coeficiente de variação daquele parâmetro.

5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho, podem ser citadas as seguintes conclusões:

- Existem inúmeros métodos, qualitativos e quantitativos para caracterizar a forma de partículas. Os principais parâmetros foram apresentados e discutidos neste trabalho.

 O parâmetro de ponta linear, SPL, proposto a partir de uma modificação do parâmetro SPQ, apresentou resultados coerentes para caracterizar numericamente a geometria de minerais abrasivos a partir de suas imagens bidimensionais.
 Trabalhos futuros podem ser realizados para analisar a relação de SPL com as taxas de desgaste e validar o parâmetro.

- A ferramenta computacional desenvolvida para o cálculo de SPL apresentou resultado satisfatório. Devido à aproximação linear dos segmentos das pontas ao invés do ajuste polinomial quadrático utilizado no cálculo do SPQ, o tempo computacional é reduzido. Se comparado com o SP, que necessita efetuar os cálculos para muitas centenas de triângulos, este fato se torna relevante.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK. **Powder Metal Technologies and Applications.** ASM International. V. 7, 1998.

BARNSLEY, M.F. Fractals Everywhere. Academic Press, 1998.

GATES, J.D. **Two-body and three-body abrasion: a critical discussion**. Wear, V. 215, 1998, pp. 139–146.

GONZALEZ, C.R., WOODS, R.E. Digital Image Processing. Prentice Hall, 2008.

GONZALEZ, C.R. *et. al.* **Digital image Processing using Matlab**. Pearson Prentice Hall, 2004.

HAMBLIN, M.G.; STACHOWIAK, G.W. **A multi scale of particle abrasivity**. Wear, V183, p. 225-233, 1995.

HAMBLIN, M.G.; STACHOWIAK, G.W. **Description of Abrasive Particle Shape and Its Relation to Tw0-Body Abrasive Wear**. Tribology Transactions, V39, p. 803-810, 1996.

HUNDAL, H.S. et. al. **Particle shape characterization using image analysis and neural networks**. Powder Technology, V 91, p. 217-227, 1997.

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

MIKLI, Valdek et. al. **Characterization of powder particle morphology**. Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., V. 7, p. 22-34, 2001.

MOORE, M.A. and Swanson, P.A. **The effect of particle shape on abrasive wear: a comparison of theory and experiment**. Proceedings of Wear of Materials Conference – 1983, American Society of Mechanical Engineers, NY, 1-11.

PODSIADLO, P.;STACHOWIAK, G.W. Evaluation of boundary fractal methods for the characterization of wear particles. Wear, V. 217, p. 24-34, 1998.

SEIREG, A.A. Friction and lubrication in mechanical design. Marcel Dekker, Inc., 1998, ISBN: 0-8247-9974-7.

STACHOWIAK, G. W.; PODSIADLO, P. Surface characterization of wear particles. Wear, V. 225-229, p.1171-1185, 1999.

STACHOWIAK, G.W. Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear. Wear, V. 241, p. 214-219, 2000.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology**. Butterworth-Heinemann, 2001.

VERSPUI, MA; VELDEN, P van der;WITH, G de; SLIKKERVEER, P.J. Angularity determination of abrasive powders. Wear, V. 199, 1996, pp. 122-126.

WOJNAR, L. Image Analysis: Applications in Materials Engineering. CRC Press LLC, Boca Raton, 1999.

ZUM GAHR, K.L. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology Series, Volume 10, Elsevier Science Publishers B. V, 1987.

APÊNDICE A – CRONOGRAMA



APÊNDICE B – RESUMO DA PROPOSTA

O desgaste de componentes mecânicos gera elevados custos para a indústria mundial, sendo o maior impacto provocado pelo desgaste abrasivo.

A forma das partículas abrasivas exerce forte influência no grau de remoção de material.

Baseado neste cenário, e considerando que outros aspectos como tamanho e dureza já estão bem compreendidos, o objetivo do presente trabalho é elaborar um programa computacional para medição de parâmetros numéricos significativos que correlacionem de forma adequada o formato do abrasivo com as taxas de remoção de material.

ATIVIDADES		2008									2009													
		GO	S	ET	OUT		NOV DEZ		ΞZ	JAN		FEV		MAR		ABR		MAI		JUN		JL	JL	
	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
1 Projeto Final 1		ļ																						
1,1 Definicao do tema e orientador		1																						
1,2 Elaboracao da proposta																								
1,3 Entrega da proposta																								1
1,4 Pesquisa e desenvolvimento																								
1,5 Texto																								
1,6 Entrega da monografia parcial																								
1,7 Defesa da monografia parcial																								
1,8 Entrega da versao final da monografia parcial																								1
2 Projeto Final 2																								
2,1 Elaboracao do algoritmo																								
2,2 Desenvolvimento do software																								
2,3 Testes e ensaios																								
2,4 Texto																								
2,5 Entrega da monografia																							\square	
2,6 Defesa																								
2,7 Entrega da versao final da monografia																								\square

Abaixo estão apresentados o cronograma proposto e o orçamento previsto.

Item	Quantidade	Custo total (R\$)
Compra de artigos	01	50,00
Material de consumo para preparação de amostras	01	200,00
Impressões	900	135,00
Total		385,00

APÊNDICE C – PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS USANDO O MATLAB

Matlab

O MATLAB (*Matrix Laboratory*) é um software interativo de alto desempenho utilizado na resolução de problemas numéricos. Seu elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. (GONZALEZ *et. al*, 2004).

A ferramenta de processamento de imagens digitais (*Digital Image Processing Toolbox*), IPT, é um grupo de funções específicas que aumenta a capacidade computacional na solução de problemas relacionados com imagens.

Representação de imagens digitais

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional da intensidade da luz f(x, y), em que $x \in y$ são as coordenadas espaciais e o valor da função corresponde ao brilho ou intensidade em cada ponto. Para imagens monocromáticas, a amplitude é denominada nível de cinza (GONZALEZ e WOODS, 2008). Uma imagem geralmente é contínua, porém quando é convertida para a forma digital, requer que suas coordenadas e amplitudes sejam digitalizadas, ou seja, quando x, $y \in f(x, y)$ assumem valores discretos, a imagem é chamada de imagem digital. Normalmente utiliza-se o sistema de coordenadas espaciais, em que o ponto superior esquerdo é a origem, conforme ilustrado na Figura 44.



Figura 44 – Representação de imagens digitais por grade retangular discreta.

Uma imagem digital é representada numericamente por uma função discreta f(x, y) e pode ser considerada uma matriz de dimensões $M \ge N$ (Equação 35), em que cada elemento é denominado elemento de imagem, *pixel* - abreviação de *picture element* (GONZALEZ e WOODS, 2008).

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & & & & \\ \vdots & & & & \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$
Eq. 35

Leitura de imagens

No MATLAB a leitura de imagens é feita utilizando a função *imread*, que possui a seguinte sintaxe, em que f é a matriz da imagem:

>> f = imread ('filename');

As dimensões de uma imagem (número de linhas M e colunas N da matriz que a representa) podem ser obtidas através da função size:

>> [M, N] = size (f);

A função *imshow* mostra a imagem armazenada em f, sendo G o número de níveis de intensidade utilizado. Se G for omitido, considera-se como padrão 256 níveis:

>> imshow (f, G);

Imagem binária

Uma imagem binária é uma matriz lógica composta por zeros e uns. Uma matriz pode ser convertida para a forma binária utilizando a unção *logical*. Por exemplo, para tornar a matriz A (composta por 0s e 1s) uma matriz lógica B, utilizase a seguinte sintaxe:

>> B=logical (A);

Se A tiver valores diferentes de zeros e uns, a função irá converter todos os valores não nulos para 1. Para testar se a imagem está na forma binária utiliza-se a função *islogical*, que retorna 1 se for verdadeiro e 0 se falso.

>> islogical (A);

Indexação de vetores e matrizes

O Matlab possui esquemas de indexação que simplificam a manipulação de vetores e matrizes e aumentam a eficiência de programas. Por exemplo, o vetor u contendo cinco elementos pode ser representado da seguinte forma:

>> u=[1 2 5 7 9]

Para acessar, por exemplo, o terceiro elemento de u, usa-se a indexação unidimensional:

>> u(3)

ans=5

Para acessar blocos de elementos, usa-se a seguinte notação, supondo que o objetivo seja obter os três primeiros elementos de u:

>> u(1:3)

ans =

1 2 5

Para acessar todos os elementos de u, a partir do terceiro, utiliza-se a forma: >> u(3:end)

ans =

5 7 9

Matrizes podem ser representadas como uma sequencia de vetores linha separados por ponto e vírgula. Para gerar uma matriz 3 x 3, por exemplo, utiliza-se a forma:

>> A=[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]

Para acessar o elemento localizado, por exemplo, na segunda linha e terceira coluna, utiliza-se a indexação bidimensional da seguinte forma:

```
>> A(2,3)
```

ans =

6

Para obter o bloco composto por todos os elementos da terceira coluna, utilizase:

>> A(:,3) ans = 3 6 9

Programação utilizando arquivos-M

Arquivos-M são ferramentas que executam uma série de comandos. Podem ser também funções que aceitam argumentos de entrada e podem produzir um ou mais resultados como saída. Os arquivos-M são criados usando um editor de texto e são salvos na forma *nomedoarquivo.m.* Os componentes de uma função-M são:

- Linha de definição da função
- Linha H1
- Texto de ajuda
- Corpo da função
- Comentários

A linha de definição da função possui a sintaxe:

function [argumentos de entada] = nome (argumentos de saída)

A linha H1 é a primeira linha do texto, composta por um comentário sobre a função. O texto de ajuda deve estar na linha seguinte e deve conter informações sobre a função. Este bloco de texto será acessado externamente ao utilizar o comando *help function_name*. Finalmente, o corpo da função contém o código, em linguagem Matlab. Todas as linhas que contenham o símbolo "%" são interpretadas como comentários.

Os operadores relacionais e lógicos utilizados pelo Matlab estão listados no Quadro 2.

Operador	Nome
<	menor do que
<=	menor ou igual a
>	maior do que
>=	maior ou igual a
==	igual a
~=	não igual a
&	е
	ou
~	não

Quadro 2 – Operadores relacionais e lógicos do Matlab.

Para controlar o fluxo de operações baseado em um grupo de condições prédefinidas, são utilizados os principais operadores listados no Quadro 3.

Operador	Descrição
if	<i>if</i> , juntamente com <i>else</i> e <i>elseif</i> , executa um grupo de tarefas baseado em uma condição lógica específica.
for	executa um grupo de tarefas um número determinado de vezes
while	executa um grupo de tarefas um número indefinido de vezes, baseado em uma condição lógica especificada

Quadro 3 – Principais operadores de fluxo utilizados pelo Matlab.

Relações básicas entre pixels

A distância Euclidiana entre dois *pixels* p_1 e p_2 , de coordenadas (x, y) e (x', y'), respectivamente, é determinada pela expressão:

$$D_e(p_1, p_2) = [(x - x')^2 + (y - y')^2]^{1/2}$$
 Eq. 36

Um pixel p, de coordenadas (x, y), possui quatro vizinhos horizontais e verticais, cujas coordenadas são (x+1, y), (x-1, y), (x, y+1) e (x, y-1). Este grupo de *pixel* é denominado vizinhança de quatro e denotado por $N_4(p)$. Os quatro vizinhos diagonais, de coordenadas (x+1, y+1), (x+1, y-1), (x-1, y+1) e (x-1, y-1), denotados por $N_D(p)$, em conjunto com a vizinhança de quatro, forma a vizinhança de 8 do pixel, $N_8(p)$. Os dois casos estão ilustrados na Figura 45.



Figura 45 – Vizinhança de um pixel: (a) vizinhança de 4; (b) vizinhança de 8.

Filtros espaciais

Algumas operações baseadas na manipulação de *pixels* podem ser utilizadas. Estas técnicas de processamento são implementadas no domínio espacial da imagem e podem ser denotadas pela Equação 12, em que f(x, y) é a imagem de entrada e g(x, y) é a imagem após ser processada pela operação *T*.

$$g(x, y) = T[(f(x, y)]$$
Eq. 37

Uma imagem f(x, y) contendo diversos tons de cinza pode ser segmentada de forma que os *pixels* correspondentes ao fundo podem ser rotulados como zero
(0) e aqueles que representam o objeto são rotulados como um (1), formando uma imagem binária. Este resultado pode ser obtido através da operação de limiarização, no qual um tom de cinza λ é escolhido como a fronteira de separação entre dois grupos. Um dos grupos, cujos tons de cinza são maiores do que o limiar adotado passa a assumir o valor um (1) e o outro, representado pelos tons de cinza menores ou iguais ao limiar, assume valor zero (0). Em termos destas quantidades a imagem limiarizada g(x, y) é definida como:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, f(x, y) > \lambda \\ 0, f(x, y) \le \lambda \end{cases}$$
 Eq. 38

A transição entre as duas regiões geradas forma a borda da imagem, como ilustrado na Figura 46a. Esta borda pode ser detectada utilizando-se o operador de *Sobel*, que consiste na utilização de máscaras que percorrem todo o domínio espacial e analisam os gradientes de intensidade.



Figura 46 – (a) Imagem com quatro níveis de cinza; (b) imagem binária após a operação de limiarização; (c) bordas detectadas com o operador de Sobel.

APÊNDICE D – ARQUIVO-M PARA DETECÇÃO DE BORDAS NO

MATLAB

function B=boundaries(BW, conn, dir)

%boundaries Traça a borda de objetos.

%B=boundaries(BW) traça a borda exterior de objetos em uma imagem binária BW. B é uma matriz P x 1, em que P é o número de objetos na imagem. Cada célula contém uma matriz Q x 2, em que cada linha contém as coordenadas do pixel correspondente à borda. Q é o número de pixels da borda do objeto correspondente. A borda do objeto é traçada no sentido horário. %

%B=boundaries(BW,conn) especifica a conectividade entre os pixel (Apêndice C) utilizada ao traçar a borda. O valor padrão para conn é 8.

%

%B=boundaries(BW,conn,dir) especifica a direção usada para traçar a borda. dir pode assumir o padrão 'ccw' (anti-horário) ou 'cw' (horário). O sentido padrão é o horário.

%se o número de argumentos de entrada (nargin) for menor do que 3, assume como padrão o sentido horário: if nargin<3 dir='cw'; end %se o número de argumentos de entrada for menor do que 2, assume que a conectividade entre pixels é 8: if nargin<2 conn=8: end %BWLABEL detecta agrupamentos de pixels. Detecta o número máximo de objetos na imagem: L=bwlabel(BW, conn); numObjects=max(L(:)); if numObjects>0 $B=\{zeros(0,2)\};$ B=repmat(B,numObjects,1); else B={}; end %Cria um contorno de zeros na matriz Lp=padarray(L,[1, 1], 0, 'both'); %Indexação linear. M=size(Lp, 1); if conn==8 %Order is N NE E SE S SW W NW. offsets=[-1, M-1, M, M+1, 1, -M+1, -M, -M-1]; else %Order is N E S W. offsets=[-1,M,1,-M]; end %next_search_direction_lut é um vetor de busca. Dada a direção do pixel k para o pixel k+1, define que direção iniciará a busca quando é examinada a vizinhança do pixel k+1. if conn==8 next_search_direction_lut=[8 8 2 2 4 4 6 6]; else next_search_direction_lut=[4 1 2 3]; end %next_direction_lut é um vetor de busca. Próxima direção de busca. if conn==8

```
next_direction_lut=[2 3 4 5 6 7 8 1];
else
  next_direction_lut=[2 3 4 1];
end
%Valores utilizados para identificar se o ponto é de início ou já é um pixel de borda.
START=-1:
BOUNDARY=-2;
%Inicializa vetor para gravar pixels de borda.
scratch=zeros(100,1)
%Busca candidatos para ponto de partida.
[rr, cc]=find((Lp(2:end-1,:)>0) & (Lp(1:end-2,:)==0));
rr=rr+1;
for k=1:length(rr)
  r=rr(k);
  c=cc(k);
  if(Lp(r,c)>0) \& (Lp(r-1,c)==0) \& isempty(B{Lp(r,c)})
     idx=(c-1)*size(Lp, 1)+r;
     which=Lp(idx);
     scratch(1)=idx;
     Lp(idx)=START;
     numPixels=1;
     currentPixel=idx;
     initial_departure_direction=[];
     done=0;
     next_search_direction=2;
     while ~done
       %Busca próximo pixel de borda.
       direction=next_search_direction;
       found next pixel=0;
       for k=1:length(offsets)
          neighbor=currentPixel + offsets(direction);
          if Lp(neighbor)~=0
            %Pixel de borda encontrado.
            if (Lp(currentPixel)==START) & ...
                 isempty(initial_departure_direction)
               % direção do pixel de partida
               initial_departure_direction = direction;
            elseif (Lp(currentPixel)==START) & ...
                 (initial_departure_direction == direction)
               done = 1;
               found_next_pixel=1;
               break;
            end
            %Próximo passo ao longo da borda.
            next_search_direction = ...
               next_search_direction_lut(direction);
            found_next_pixel=1;
            numPixels=numPixels+1;
            if numPixels > size(scratch, 1)
               % Dobra o espaço do vetor de armazenamento.
               scratch(2*size(scratch, 1))=0;
            end
            scratch(numPixels)=neighbor;
            if Lp(neighbor) ~= START
               Lp(neighbor) = BOUNDARY;
            end
            currentPixel=neighbor;
            break;
          end
```

```
76
```

```
direction=next_direction_lut(direction);
       end
       if ~found_next_pixel
         %Se não for encontrado outro pixel de borda
         %o objeto é composto por apenas um pixel.
         numPixels=2;
         scratch(2)=scratch(1);
         done=1;
       end
     end
     %Converte a indexação linear para coordenadas de linhas
     %e colunas e salva.
     [row, col] = ind2sub(size(Lp), scratch(1:numPixels));
     B{which}=[row-1, col-1];
  end
end
if strcmp(dir, 'ccw')
  for k=1:length(B)
     B{k}=B{k}(end:-1:1, :);
  end
end
```

APÊNDICE E – ARQUIVO-M PARA O CÁLCULO DO PARÂMETRO DE PONTA MODIFICADO SPL

Para calcular o parâmetro de ponta SPL, foi criado um Arquivo-M no software Matlab, denominado SPL1.m. Primeiramente é preciso o nome da função na área de comandos do Matlab, conforme ilustrado na Figura 47. A seguir será solicitada a seleção do arquivo que contenha a imagem binária do objeto cujo SPL deseja-se calcular. A imagem individual da partícula obtida no microscópio deve ser submetida anteriormente ao processo de limiarização, resultando em uma imagem na qual os objetos são identificados por 1s e o fundo por 0s. Desta forma a partícula será branca e o fundo preto (maiores detalhes podem ser verificados no passo a passo do apêndice F).

🚸 MATLAB		
Eile Edit Debug Desktop Window Help		
🗅 🥔 🕺 🐚 🛍 🗠 🖂 🎁 🖬 🖬	Current Directory; C:Varquivos de pro	ramas/MATLAB71/work 🗸 🛄 🖻
Shortcuts 🕑 How to Add 🕐 What's New		
Current Directory - C:\Arquivos de pro	ogramas\MATLAB71\work 🛛 🔭 🗙	Command Window * ×
🖻 🖆 🗟 😓 🗖 -		
Al Files A File Type	Size Last Modified	To get started, select <u>MATLAB Help</u> or <u>Demos</u> from the Help menu.
GP2 hmn BMD File	353 KB 21/05/2009 10:34:30	ne source i
GP20-1 hmn BMP File	353 KB 23/05/2009 19:04:25	>> SPL1
GP20 hmn BMP File	353 KB 23/05/2009 18:55:01	
GP3 bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 22:39:37	
GP4.bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 22:41:48	
GP5.bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 22:45:26	
GP6.bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 23:05:06	
GP7.bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 23:08:51	
GP8.bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 23:11:28	
GP9.bmp BMP File	353 KB 21/05/2009 23:14:00	
imagem_20x30.bmp BMP File	2 KB 17/05/2009 15:25:35	
mccExcludedFiles.I LOG File	1 KB 19/05/2009 22:31:28	
4	>	
Current Directory Workspace		
Command History	* ×	
□= 3 19/05/09 22:223	^	
guide		
-SPL2		
-mbuild -setup		
mcc -m -o SPL2 SPL2.fig		
mcc -m -o SPL2 SPL2.m		
-mbuild -setup		
-mcc -m -o SPL2 SPL2.m		
mbuild -setup		
-mcc -m -o SPL2 SPL2.m		
₽ % 21/05/09 21:02%		
-spl		
SPLteste		
₩ 3 23/05/09 13:463		
SPLteste		
	×	
<	3	
A Start		

Figura 47 – Janela de comando do Matlab.

Após selecionar a imagem, a função SPL1 executará a seguinte seqüência de comandos:

function varargout = SPL(varargin) % SPL calcula o parâmetro de ponta modificado SPL %Leitura da imagem no diretório especificado: [arquivo, caminho]=uigetfile('*.bmp','Selecione o arquivo') caminhocomp=strcat(num2str(caminho),num2str(arquivo)) f=imread(caminhocomp) % Determina automaticamente o limiar que separa agrupamento de níveis de % cinza utilizados no processo de limiarização (thresholding): level=gravthresh(f) % converte a imagem f para a forma binária, baseada no processo de % limiarização com limiar = level. Os pixels com valores 1 correspondem ao %objeto e com valores 0 representam o fundo: g=im2bw(f,level) %Detecta a borda da partícula utilizando o arquivo-M para detecção de %bordas (Para maiores detalhes, ver apêndice E): B=boundaries(g) %Seleciona o primeiro objeto encontrado. Obs.: Os cálculos serão feitos %para uma única partícula. b=B{1} [M, N]=size(b); %M linhas e N colunas if $(M < N | N \sim = 2)$ error('B deve ter dimensões M x 2'); %matriz deve estar neste formato end %Como a cordenada do início e fim de uma borda é a mesma, o último ponto %deve ser eliminado if isequal(b(1, :), b(M, :)) b=b(1:M-1, :); M=M-1; end %Cálculo do centróide x0, y0 x0=round(sum(b(:, 1))/M); y0=round(sum(b(:, 2))/M);%Translada o sistema de coordenadas para (x0,y0) b(:, 1) = b(:, 1) - x0;b(:, 2) = b(:, 2) - v0;%Converte as coordenadas para polar %Primeiro é preciso converter as coordenadas da imagem (x,y) para o %sistema de coordenadas usado pelo Matlab para conversão de cartesiano %para polar. Essas coordenadas são denotadas por (xc, yc). Os dois sis %temas se relacionam da seguinte maneira: xc=y e yc=-x xc=b(:, 2); yc=-b(:, 1); [theta, rho]=cart2pol(xc, yc); %converte theta para graus: theta=theta.*(180/pi); %converte todos os ângulos para positivos: i=theta==0: theta=theta.*(0.5*abs(1+sign(theta)))-0.5*(-1+sign(theta)).*(360+theta); %para preservar os valores nulos: theta(j)=0; temp=theta: %A sequência deve começar com o menor ângulo: I=find(temp==min(temp)); temp=circshift(temp, [-(I(1)-1), 0]); k1=abs(temp(1)-temp(2)); k2=abs(temp(1)-temp(3)); %arredondamento do ângulo: theta=round(theta): %Armazena theta e rho em uma mesma matriz: tr=[theta, rho]; %Deleta ângulos duplicados. O operador 'unique' também dispõe os valores em %ordem ascendente: [w, u, v] = unique(tr(:, 1));tr=tr(u,:); %se o último ângulo for igual a 360 mais o primeiro, deleta o último:

```
if tr(end,1)==tr(1)+360
  tr=tr(1:end-1, :);
end
%ângulos e raios:
angle=tr(:, 1);
st=tr(:, 2);
raio_medio=mean (tr(:, 2)); %calcula o raio médio
pos_maiores=find(tr(:, 2)>=raio_medio); %posições dos vetores com raio
%maior do que o raio médio
maiores=[angle(pos_maiores), st(pos_maiores)] %determina os valores dos
%ângulos e raios maiores que o raio médio
k=0;
numobj=length(pos_maiores)-1; %determina o número transições abruptas de
%posição
for i=1:numobj
  if pos_maiores(i+1)-pos_maiores(i)~=1
     k=k+1; %k=3 no exemplo
  end
end
inicio=1
fim=0
i=1
G={zeros(0,2)};
G=repmat(G,k,1);
if maiores(1)~=0
  for t=1:k
     while pos_maiores(i+1)-pos_maiores(i)==1
       fim=fim+1
       i=i+1
     end
     fim=fim+1
     G{t}=inicio:fim
     t=t+1
    inicio=fim+1
    i=inicio
  end
  p=G{1} % primeiro
  G{t}=inicio:length(pos_maiores) % último
  m=G{t}
  MP=\{zeros(0,2)\};
  MP=repmat(MP,k,1);
  MP rad=\{zeros(0,2)\}:
  MP_rad=repmat(MP_rad,k,1)
  MP_cart={zeros(0,2)};
  MP_cart=repmat(MP_cart,k,1)
  pos_r=\{zeros(0,2)\};
  pos_r=repmat(pos_r,k,1)
  for i=1:t
     % Cria a barra de espera.
     h = waitbar(0,'Por favor, aguarde...','name','Contas');
     num = rand;
     n = 1;
     iter = 0;
     % Loop de realização de sorteios.
     while ((num >= 0.05)&(num <= 0.95))
       % Sorteio entre 0 e 1.
       num = rand;
```

```
% Contador de sorteios.
       iter = iter + 1:
       % Atualiza a barra de espera.
       waitbar(iter/n,h);
     end
     % Fecha a barra de espera apos
     % realizar todas as contas.
     close(h);
     MP{i}=[maiores(G{i}, 1), maiores(G{i}, 2)]
     [max_r{i}, pos_r{i}] = max(MP{i}(:, 2))
     MP_rad{i}=[MP{i}(:,1)*pi/180, MP{i}(:,2)]
     [maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]=pol2cart(MP_rad{i}(:,1),MP_rad{i}(:,2))
     MP_cart{i}=[maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]
     A=sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(end,1))^2+(MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(end,2))^2)
     B=sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(pos_r{i},1))^2+(MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(pos_r{i},2))^2)
     C = sqrt((MP_cart\{i\}(pos_r\{i\}, 1)-MP_cart\{i\}(end, 1))^2 + (MP_cart\{i\}(pos_r\{i\}, 2)-MP_cart\{i\}(end, 2))^2)
     if ((A~=0) & (B~=0) & (C~=0))
       a=acos((B^2+C^2-A^2)/(2*B*C))
       sv(i)=cos(a/2)
     end
  end
     kk=sv>0
  num=sum(kk)
  spq=sum(sv)/num
end
if maiores(1)==0
  for t=1:k
     while pos_maiores(i+1)-pos_maiores(i)==1
       fim=fim+1
       i=i+1
     end
     fim=fim+1
     G{t}=inicio:fim
     t=t+1
     inicio=fim+1
    i=inicio
  end
  p=G{1} % primeiro
  G{t}=inicio:length(pos_maiores) % último
  m=G{t}
  f=length(m) %tamanho do último vetor
  q=length(p) %tamanho do primeiro vetor
  G{1}=G{t}
    for n=1:f
       G{1}(f+n)=p(n)
    end
  MP={zeros(0,2)};
  MP=repmat(MP,k,1);
  MP_rad={zeros(0,2)};
  MP_rad=repmat(MP_rad,k,1)
  MP_cart={zeros(0,2)};
  MP_cart=repmat(MP_cart,k,1)
  pos_r={zeros(0,2)};
  pos_r=repmat(pos_r,k,1)
  for i=1:k
     % Cria a barra de espera.
     h = waitbar(0,'Por favor, aguarde...','name','Contas');
```

```
num = rand;
     n = 1;
     iter = 0:
     % Loop de realização de sorteios.
     while ((num \ge 0.05) \& (num < 0.95))
       % Sorteio entre 0 e 1.
       num = rand;
       % Contador de sorteios.
       iter = iter + 1;
       % Atualiza a barra de espera.
       waitbar(iter/n,h);
     end
     % Fecha a barra de espera após
     % realizar todas as contas.
     close(h);
     MP{i}=[maiores(G{i}, 1), maiores(G{i}, 2)]
     [max_r{i}, pos_r{i}] = max(MP{i}(:, 2))
     MP_rad{i}=[MP{i}(:,1)*pi/180, MP{i}(:,2)]
     [maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]=pol2cart(MP_rad{i}(:,1),MP_rad{i}(:,2))
     MP_cart{i}=[maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]
     A=sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(end,1))^2+(MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(end,2))^2)
     B = sqrt((MP_cart\{i\}(1,1)-MP_cart\{i\}(pos_r\{i\},1))^{2} + (MP_cart\{i\}(1,2)-MP_cart\{i\}(pos_r\{i\},2))^{2})
     C = sqrt((MP_cart\{i\}(pos_r\{i\}, 1)-MP_cart\{i\}(end, 1))^2 + (MP_cart\{i\}(pos_r\{i\}, 2)-MP_cart\{i\}(end, 2))^2)
     if ((A~=0) & (B~=0) & (C~=0))
       a=acos((B^2+C^2-A^2)/(2*B*C))
       sv(i)=cos(a/2)
     end
  end
  kk=sv>0
  num=sum(kk)
  spq=sum(sv)/num
end
```

```
str=strcat('SPQ=
',num2str(spq),';raio_medio=',num2str(raio_medio),';xo=',num2str(x0),';yo=',num2str(y0))
msgbox(str,'Resultado','none')
```

end

Finalmente os resultados serão apresentados:



APÊNDICE F – PASSO A PASSO DO ARQUIVO-M PARA O CÁLCULO DO SPL

Na Figura 48 está apresentado um objeto bidimensional gerado para demonst rar passo a passo o cálculo do parâmetro modificado SPL. O objeto possui formas simples, o que possibilita visualizar mais facilmente o que ocorre a cada passo do algoritmo. A imagem possui 20 x 30 pixels.



Figura 48 – Objeto criado para analisar os passos no cálculo de SPL (20 x 30 pixels)

O sistema de coordenadas utilizado trata a imagem como uma grade de elementos discretos, ordenados de cima para baixo e da esquerda para direita, sendo r (*row*) as linhas e c (*column*) as colunas:



Figura 49 – Sistema de coordenadas

>> f=imread('D:\T1_20x30_pixels.bmp') % Faz a leitura da imagem T1_20x30_pixels.bmp no diretório D:\

>> imshow(f) % mostra a imagem f



Figura 50 – Imagem f

>> level=graythresh(f)

level =

0.4980 % Determina automaticamente o limiar que separa agrupamento de níveis de cinza utilizados no processo de limiarização (thresholding)

>> g=im2bw(f,level) % converte a imagem f para a forma binária, baseada no processo de limiarização com limiar = level. Os pixels com valores 1 correspondem ao objeto e com valores 0 representam o fundo.

g=

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

>> B=boundaries(g) % boundaries é uma função M-file que extrai a borda de todos os objetos encontrados. Neste caso, há um único objeto (única região de pixels conectados). M-file boundaries.m.

B =

[77x2 double]

b=B{1} % retorna as coordenadas da borda do primeiro objeto encontrado em B.Inicia o contorno pelo ponto mais à esquerda e mais superior e percorre a borda no sentido horário.

b =

- 18 18 19 18 20 18 21 18 22 18 23 18 24 18 25 18 26 18 27 18 28 18 28 17 28 16 28 15 28 14 28 13 28 12 28 11 28 10 28 9 28 8 28 7 28 6 28 5 28 4 28 3 27 3 26 3 25 3 24 3 23 3 22 3 21 3 20 3 19 3 18 3 17 3 16 3 15 3 14 3 13 3 12 3 11 3
- 10 3

>> C=bound2im(b) % forma a imagem binária correspondente às coordenadas de v.>> imshow(C) % mostra a imagem C.



Figura 51 – Imagem C

Para obter informações sobre cada imagem, o comando whos pode ser utilizado:

>> who	s f				
Name	Size	Bytes	Class		
f	30x20x3	1800	uint8 array		
Grand total is 1800 elements using 1800 bytes					
>> who	s g				
Name	Size	Bytes	Class		
g	30x20	600	logical array		
Grand t	otal is 600 e	lements using	600 bytes		
>> who	s C				
Name	Size	Bytes	Class		
С	25x16	400	logical array		
Grand t	otal is 400 e	lements using	400 bytes		
>> who	s b				
Name	Size	Bytes	Class		
b	77x2	1232	double array		

Grand total is 154 elements using 1232 bytes

>> [M, N]=size(b); %M é o número de linhas de b. M-1 é o número de pontos na borda (o primeiro e o último elemento de b são iguais). N é o número de colunas (este deve ser igual a 2)

M = 77

...'

- N =
 - 2

A seguir verifica-se se o primeiro e o último termo de b são iguais. Caso sejam, o último é eliminado.

>> b(1, :) % primeira linha de b

ans =

10 3

>> b(M,:) % última linha de b. Para este caso, linha 77

ans =

10 3

>> isequal(b(1, :), b(M, :)) % verifica se a primeira e a última linha de b são iguais (retorna 1 se for verdadeiro e 0 se for falso)

ans =

1

>> b=b(1:M-1, :) % elimina a última linha de b

b=

13 3

88

12 3 11 3

>> M=M-1 % ajusta o número de linhas de b.

M =

76 % Agora, M representa o número de pontos na borda do objeto

A seguir é calculado o centróide (x0, y0) da borda. Para cada direção, é definido como a razão entre a soma das coordenadas de todos os elementos multiplicados por suas áreas e a soma destas áreas. Como todos os pixels possuem a mesma área, o cálculo é simplificado para a razão entre a soma das coordenadas de todos os elementos e o número de elementos.

>> b(:, 1) % elementos da primeira coluna de b

ans =

- •

- >> sum(b(:, 1)) % soma dos elementos da primeira coluna de b

ans =

1288

>> sum(b(:, 1))/M % razão entre a soma dos elementos de b e o número de elementos de b

ans =

16.9474

>> round(sum(b(:, 1))/M) % arredonda o valor anterior

ans =

17

>> x0=round(sum(b(:, 1))/M) % coordenada x do centróide

x0 =

17

Similarmente para a direção y:

>> y0=round(sum(b(:, 2))/M) %coordenada y do centróide

y0 =

11

É preciso mudar o sistema de coordenadas de forma que sua origem esteja no centróide do objeto, para posteriormente transformar o sistema para coordenadas polares.

>> b(:, 1) = b(:, 1)-x0 % translação dos elementos da primeira coluna de b

b =

- -7 3
- -7 4
- -7 5
- -7 6
- -7 7
- -8 8
- -9 8
- -10 8
- -11 8
- -12 8
- -13 8
- -13 9
- -10 0
- -13 10
- -13 11
- -13 12
- -13 13
- -12 13
- -11 13
- -10 13
- -9 13
- -8 13
- -7 14

- -7 15
- -7 16
- -7 17
- -7 18
- -6 18
- -5 18
- -4 18
- -3 18
- -2 18
- -1 18
- 0 18
- 1 18
- 2 18
- 3 18
- 4 18
- 5 18
- 6 18
- 7 18
- 8 18
- 9 18
- 10 18
- 11 18
- 11 17
- 11 16
- 11 15
- 11 14
- 11 13
- 11 12
- 11 11
- 11 10
- 11 9
- 11 8
- 11 7
- 11 6
- 11 5
- 11 4
- 11 3
- 10 3
- 9 3
- 8 3
- 7 3
- 63
- 5 3
- 5 5
- 4 3
- 3 3

- 2 3
- 1 3
- 0 3
- -1 3
- -2 3
- -3 3
- -4 3
- -5 3
- -6 3

b =

- -7 -8
- -7 -7
- -7 -6
- -7 -5
- -7 -4
- -8 -3
- -9 -3
- -10 -3
- -11 -3
- -12 -3
- -13 -3
- -13 -2
- -13 -1
- -13 0
- -13 1
- -13 2
- -12 2
- -11 2
- -10 2
- -9 2
- -8 2
- -7 3
- -1 5
- -7 4
- -7 5
- -7 6
- -7 7
- -6 7
- -5 7
- -4 7
- -3 7
- -2 7
- -1 7
- 0 7

- 1 7
- 2 7
- 3 7
- 4 7
- 5 7
- 6 7
- 77
- 8 7
- 97
- 10 7
- 11 7
- 11 6
- 11 5
- 11 4
- 11 3
- 11 2
- 11 1
- 11 0
- 11 -1
- 11 -2
- 11 -3
- 11 -4
- 11 -5
- 11 -6
- 11 -7
- 11 -8
- 10 -8
- 9 -8
- 8 -8
- 7 -8
- 6 -8
- 5 -8
- 4 -8
- 3 -8
- 2 -8
- 1 -8
- 0 -8
- -1 -8
- -2 -8
- -3 -8
- -4 -8
- -5 -8
- -6 -8

O próximo passo é converter as coordenadas de b para o sistema de coordenadas polares. Antes disso é preciso converter o sistema de coordenadas utilizado para pixels para o sistema de coordenadas utilizado pelo matlab (convencional, x para direita e y para cima)



7 7

- 7 7
- 7
- 6
- 5
- 4
- 3
- 2
- 1
- 0
- -1
- -2
- -3
- -4
- -5
- -6
- -7
- -8
- -8
- -0
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- -8
- >> yc=-b(:, 1); %yc=-x
- yc =

 - 7
 - 7
 - 7
 - . 7

- -1
- -2
- -3
- -4
- -5
- -6 -7
- -8
- -9
- -10
- -11
- -11
- -11 -11
- -11
- -11

- -11
- -11
- -11
- -11
- -11
- -11
- -11
- -11
- -11
- -10
- -9
- -8
- -7
- .
- -6
- -5
- -4
- -3
- -2
- -1
- 0
- 1
- 2
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6

>> [theta, rho]=cart2pol(xc, yc); % converte o sistema para coordenadas polares

>> theta

theta = % ângulos, em radianos, dos vetores que ligam o centróide a cada pixel da borda. A convenção é que theta é medido a partir do eixo x, em sentido anti horário.

2.4228 2.3562 2.2794 2.1910 2.0899 1.9296 1.8925 1.8623 1.8370 1.8158 1.7976 1.7234 1.6476

1.4940
1.4181
1.4056
1.3909
1.3734
1.3521
1.3258
1.1659
1.0517
0.9505
0.8622
0.7854
0.7086
0.6202
0.5191
0.4049
0.2783
0.1419
0
-0.1419
-0.2783
-0.4049
-0 5101
-0.5191
-0.6202
-0.6202 -0.7086
-0.6202 -0.7086 -0.7854
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714
-0.3131 -0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220
-0.3131 -0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708 -1.6615
-0.3131 -0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708 -1.6615 -1.7506
-0.3131 -0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708 -1.6615 -1.7506 -1.8370
-0.3131 -0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708 -1.6615 -1.7506 -1.8370 -1.9196
-0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708 -1.6615 -1.7506 -1.8370 -1.9196 -1.9974 -0.9751
-0.3131 -0.6202 -0.7086 -0.7854 -0.8520 -0.9098 -0.9601 -1.0041 -1.0714 -1.1442 -1.2220 -1.3045 -1.3909 -1.4801 -1.5708 -1.6615 -1.7506 -1.8370 -1.9196 -1.9974 -2.0701 -2.0701

-2.1996
-2.2455
-2.2974
-2.3562
-2.4228
-2.4981
-2.5830
-2.6779
-2.7828
-2.8966
-3.0172
-3.1416
3.0172
2.8966
2.7828
2.6779
2.5830
2.4981

>> rho % módulos dos vetores com origem no centróide, com direção theta até os pontos da borda

rho =
10.6301
9.8995
9.2195
8.6023
8.0623
8.5440
9.4868
10.4403
11.4018
12.3693
13.3417
13.1529
13.0384
13.0000
13.0384
13.1529
12.1655
11.1803
10.1980
9.2195
8.2462
7.6158
8.0623

8.2462 8.5440 8.9443 9.4340 10.0000 >> theta=theta.*(180/pi) %converte os valores de theta de radianos para graus theta = 138.8141 135.0000 130.6013 125.5377 119.7449 110.5560 108.4349 106.6992 105.2551 104.0362 102.9946 98.7462 94.3987 90.0000 85.6013 81.2538 80.5377 79.6952 78.6901 77.4712 75.9638 66.8014 60.2551 54.4623 49.3987 45.0000 40.6013 35.5377 29.7449 23.1986 15.9454 8.1301 0 -8.1301

8.0623 8.0000 8.0623

-15.9454 -23.1986 -29.7449 -35.5377 -40.6013 -45.0000 -48.8141 -52.1250 -55.0080 -57.5288 -61.3895 -65.5560 -70.0169 -74.7449 -79.6952 -84.8056 -90.0000 -95.1944 -100.3048 -105.2551 -109.9831 -114.4440 -118.6105 -122.4712 -126.0274 -128.6598 -131.6335 -135.0000 -138.8141 -143.1301 -147.9946 -153.4349 -159.4440 -165.9638 -172.8750 -180.0000 172.8750 165.9638 159.4440 153.4349 147.9946 143.1301

A seguir, todos os ângulos serão convertidos para positivos. Para preservar os índices para os quais theta=0, esses são armazenados em j:

>> sign(theta) % para cada elemento de theta, retorna 1 se o elemento for maior do que 0, 0 se for igual a 0 e -1 se for menor do que 0.

ans =

- -1
- -1
- -1
- -1 -1
- -1
- -1
- -1
- -1
- -1
- -1
- -1 -1
- -1
- -1
- -1
- -1

```
-1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
  -1
   1
   1
   1
   1
   1
   1
>> theta=theta.*(0.5*abs(1+sign(theta)))-0.5*(-1+sign(theta)).*(360+theta);
```

```
% se theta for positivo (sign=1), retorna theta
```

```
% se theta for negativo (sign=-1), retorna 360 menos o módulo de theta
```

```
% se theta for 0 (sign=0), retorna 180
```

```
theta =
```

138.8141 135.0000 130.6013 125.5377 119.7449 110.5560 108.4349 106.6992 105.2551 104.0362 102.9946 98.7462

94.3987
90.0000
85.6013
81.2538
80.5377
79.6952
78.6901
77.4712
75.9638
66.8014
60.2551
54,4623
49.3987
45,0000
40 6013
35 5377
20 7//0
23.1986
15 9454
8 1301
180.0000
251 9600
331.0099
344.0540
330.8014
330.2551
324.4623
319.3987
315.0000
311.1859
307.8750
304.9920
302.4712
298.6105
294.4440
289.9831
285.2551
280.3048
275.1944
270.0000
264.8056
259.6952
254.7449
250.0169
245.5560
241.3895
237.5288 233.9726 231.3402 228.3665 225.0000 221.1859 216.8699 212.0054 206.5651 200.5560 194.0362 187.1250 180.0000 172.8750 165.9638 159.4440 153.4349 147.9946 143.1301

theta(j)=0 % preserva os valores iguais a zero em theta

A seqüência deverá ser ordenada de forma que theta inicie com o menor ângulo

temp=theta % salva os valores de theta em uma variável temporária

>> l=find(temp==min(temp)) %determina a posição na qual theta possui menor valor. Neste caso é a posição 33, cujo valor é zero.

| =

33

>> temp=circshift(temp, [-(I(1)-1), 0]) %translada os valores de theta (-(37-1)) posições para cima, ou seja, 36 posições para cima, de forma que o ponto inicial seja o menor ângulo

>> temp

temp = 0 351.8699 344.0546 336.8014 330.2551 324.4623 319.3987 315.0000 311.1859 307.8750 304.9920 302.4712 298.6105 294.4440

289.9831 285.2551 280.3048 275.1944 270.0000 264.8056 259.6952 254.7449 250.0169 245.5560 241.3895 237.5288 233.9726 231.3402 228.3665 225.0000 221.1859 216.8699 212.0054 206.5651 200.5560 194.0362 187.1250 180.0000 172.8750 165.9638 159.4440 153.4349 147.9946 143.1301 138.8141 135.0000 130.6013 125.5377 119.7449 110.5560 108.4349 106.6992 105.2551 104.0362 102.9946 98.7462 94.3987 90.0000 85.6013

81.2538 80.5377 79.6952 78.6901 77.4712 75.9638 66.8014 60.2551 54.4623 49.3987 45.0000 40.6013 35.5377 29.7449 23.1986 15.9454

8.1301

>> theta=round(theta); %arredonda os valores de theta

>> theta

theta =

120

111

108 107

105

104

103

99

94

90

86

81

81

80

79

77 76

0

166 159 153 148 143 >> tr=[theta, rho]; % insere theta e rho em uma única matriz >> tr tr = 139.0000 10.6301 135.0000 9.8995 131.0000 9.2195 126.0000 8.6023 120.0000 8.0623 111.0000 8.5440 108.0000 9.4868 107.0000 10.4403 105.0000 11.4018 104.0000 12.3693 103.0000 13.3417 99.0000 13.1529 94.0000 13.0384 90.0000 13.0000 86.0000 13.0384 81.0000 13.1529 81.0000 12.1655 80.0000 11.1803 79.0000 10.1980 77.0000 9.2195 76.0000 8.2462 67.0000 7.6158 60.0000 8.0623 54.0000 8.6023 49.0000 9.2195 45.0000 9.8995 41.0000 9.2195 36.0000 8.6023 30.0000 8.0623 23.0000 7.6158 16.0000 7.2801 8.0000 7.0711

187 180 173

	0 7.	0000
352.	.0000	7.0711
344.	.0000	7.2801
337	.0000	7.6158
330	.0000	8.0623
324	.0000	8.6023
319.	.0000	9.2195
315.	.0000	9.8995
311.	.0000	10.6301
308.	.0000	11.4018
305.	.0000	12.2066
302.	.0000	13.0384
299.	.0000	12.5300
294.	.0000	12.0830
290	.0000	11.7047
285	.0000	11.4018
280	.0000	11.1803
275	.0000	11.0454
270	.0000	11.0000
265	.0000	11.0454
260	.0000	11.1803
255.	.0000	11.4018
250	.0000	11.7047
246	.0000	12.0830
241.	.0000	12.5300
238.	.0000	13.0384
234	.0000	13.6015
231.	.0000	12.8062
228	.0000	12.0416
225.	.0000	11.3137
221.	.0000	10.6301
217.	.0000	10.0000
212	.0000	9.4340
207	.0000	8.9443
201	.0000	8.5440
194.	.0000	8.2462
187.	.0000	8.0623
180	.0000	8.0000
173.	.0000	8.0623
166.	.0000	8.2462
159.	.0000	8.5440
153.	.0000	8.9443
148.	.0000	9.4340
143.	.0000	10.0000

	0
	8
	16
:	23
;	30
;	36
	41
	45
	49
:	54
(60
(67
-	76
-	77
-	79
ł	80
ł	81
8	86
9	90
9	94
9	99
1	103
1	104
1	105
1	107
1	108
1	111
1	120
1	126
1	131
1	135
1	139
1	143
1	148
1	153
1	159
1	166

>> [w, u, v] = unique(tr(:, 1)) % Deleta ângulos duplicados. Também dispõe os valores em ordem crescente

w =

- v =

39

- 38
- 37
- 36
- 35
- 34
- 33

>> tr=tr(u,:) % u identifica as linhas únicas. Os valores estão em ordem crescente.

tr =

0 7.0000 8.0000 7.0711 16.0000 7.2801 23.0000 7.6158 30.0000 8.0623 36.0000 8.6023 41.0000 9.2195 45.0000 9.8995 49.0000 9.2195 54.0000 8.6023 60.0000 8.0623 67.0000 7.6158 76.0000 8.2462 77.0000 9.2195 79.0000 10.1980 80.0000 11.1803 81.0000 12.1655 86.0000 13.0384 90.0000 13.0000 94.0000 13.0384 99.0000 13.1529 103.0000 13.3417 104.0000 12.3693 105.0000 11.4018 107.0000 10.4403 108.0000 9.4868 111.0000 8.5440 120.0000 8.0623 126.0000 8.6023 131.0000 9.2195 135.0000 9.8995 139.0000 10.6301 143.0000 10.0000 148.0000 9.4340 153.0000 8.9443

159.0000	8.5440
166.0000	8.2462
173.0000	8.0623
180.0000	8.0000
187.0000	8.0623
194.0000	8.2462
201.0000	8.5440
207.0000	8.9443
212.0000	9.4340
217.0000	10.0000
221.0000	10.6301
225.0000	11.3137
228.0000	12.0416
231.0000	12.8062
234.0000	13.6015
238.0000	13.0384
241.0000	12.5300
246.0000	12.0830
250.0000	11.7047
255.0000	11.4018
260.0000	11.1803
265.0000	11.0454
270.0000	11.0000
275.0000	11.0454
280.0000	11.1803
285.0000	11.4018
290.0000	11.7047
294.0000	12.0830
299.0000	12.5300
302.0000	13.0384
305.0000	12.2066
308.0000	11.4018
311.0000	10.6301
315.0000	9.8995
319.0000	9.2195
324.0000	8.6023
330.0000	8.0623
337.0000	7.6158
344.0000	7.2801
352.0000	7.0711

if tr(end,1)==tr(1)+360 % Se o último ângulo for igual a 360 mais o primeiro ângulo, deverá ser excluído.

tr=tr(1:end-1, :);

Determina-se o raio médio, como sendo a média dos módulos dos vetores que contornam a borda

>> raio_medio=mean (tr(:, 2))

raio_medio =

10.0973

>> pos_maiores=find(tr(:, 2)>=raio_medio) % retorna as posições para os quais o raio local é maior que o raio médio.

>> maiores=[tr(pos_maiores,1), tr(pos_maiores,2)] %retorna as coordenadas polares de todos os pontos da borda cujos raios são maiores do que o raio médio, sendo theta em graus

maiores =

79.0000	10.1980
80.0000	11.1803
81.0000	12.1655
86.0000	13.0384
90.0000	13.0000
94.0000	13.0384
99.0000	13.1529
103.0000	13.3417
104.0000	12.3693
105.0000	11.4018
107.0000	10.4403
139.0000	10.6301
221.0000	10.6301
225.0000	11.3137
228.0000	12.0416
231.0000	12.8062
234.0000	13.6015
238.0000	13.0384
241.0000	12.5300
246.0000	12.0830
250.0000	11.7047
255.0000	11.4018
260.0000	11.1803
265.0000	11.0454
270.0000	11.0000
275.0000	11.0454
280.0000	11.1803
285.0000	11.4018
290.0000	11.7047
294.0000	12.0830
299.0000	12.5300
302.0000	13.0384
305.0000	12.2066
308.0000	11.4018
311.0000	10.6301
>> k=0 %	inicializa a variável que determina o número transições abruptas de posição.
k =	
0	

>> numobj=length(pos_maiores)-1 %número de posições em que o raio é maior que o médio numobj =

34

for i=1:numobj

if pos_maiores(i+1)-pos_maiores(i)~=1

k=k+1;

end

end %determina-se o número de transições k (para este exemplo são 2: da posição 25 para 32, da posição 32 para 46). k assume o valor 3, indicando que existem 3 agrupamentos de pixels fora do círculo delimitado pelo raio médio.

inicio=1 %inicialização da variável que marcará o início de uma região de interesse (raio maior que o médio)

fim=0 %inicialização da variável que marcará o fim de uma região de interesse

i=1 %inicializa a variável de varredura i

 $G = \{zeros(0,2)\};$

G=repmat(G,k,1); %matriz que agrupa as k matrizes dos agrupamentos de pixels cujo raio é maior que o médio

Se o ângulo do primeiro raio cujo valor é maior que o raio médio for diferente de zero, o fluxo de dados a seguir irá detectar e agrupar todos os índices consecutivos na matriz G. Os respectivos valores serão armazenados em MP.

if maiores(1)~=0 %

for t=1:k

while pos_maiores(i+1)-pos_maiores(i)==1

fim=fim+1

i=i+1

end

fim=fim+1

G{t}=inicio:fim

t=t+1

inicio=fim+1

i =inicio

end

p=G{1} % primeiro

G{t}=inicio:length(pos_maiores)

m=G{t} % último

MP={zeros(0,2)}; %inicializa matriz de agrupamento MP

MP=repmat(MP,k,1); %inicializa matriz de agrupamento MP, contendo k matrizes

MP_rad={zeros(0,2)};

MP_rad=repmat(MP_rad,k,1) %inicializa matriz de agrupamento MP_rad, contendo k matrizes (valores em radianos)

MP_cart={zeros(0,2)};

MP_cart=repmat(MP_cart,k,1) %inicializa matriz de agrupamento MP_cart, contendo k matrizes (coordenadas cartesianas)

pos_r={zeros(0,2)};

pos_r=repmat(pos_r,k,1) %inicializa matriz de agrupamento pos_r, contendo k matrizes

MP{i}=[maiores(G{i}, 1), maiores(G{i}, 2)] % maiores valores da ponta i

[max_r{i}, pos_r{i}]=max(MP{i}(:, 2)) % Posição do raio local máximo da ponta i MP_rad{i}=[MP{i}(:,1)*pi/180, MP{i}(:,2)] %Converte os ângulos para radianos [maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]=pol2cart(MP_rad{i}(:,1),MP_rad{i}(:,2)) %Converte %para coordenadas cartesianas

 $\label{eq:maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y] \mbox{\scartesianas} \\ A = sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(end,1))^2 + (MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(end,2))^2) \\$

% A é a distância entre o segmento formado pelo primeiro termo da ponta e o último

B=sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(pos_r{i},1))^2+(MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(pos_r{i},2))^2)

% B é a distância entre o segmento formado pelo primeiro termo e o termo formado pelo raio local %máximo (máximo valor do raio para a ponta)

C=sqrt((MP_cart{i}(pos_r{i},1)-MP_cart{i}(end,1))^2+(MP_cart{i}(pos_r{i},2)-MP_cart{i}(end,2))^2) % C é a distância entre o segmento formado pelo último termo e o termo formado pelo raio local %máximo (máximo valor do raio para a ponta)

%Se A, B e C forem diferentes de zero, calcula-se o ângulo de ponta entre os segmentos B e C. %Considera-se que se A, B e C são nulos, a ponta é formada por um pixel somente e esta deve %ser desconsiderada

if ((A~=0) & (B~=0) & (C~=0)) %

a=acos((B^2+C^2-A^2)/(2*B*C)) % lei dos cossenos

sv(i)=cos(a/2) %valor de ponta para a ponta i

end

end

kk=sv>0 % termos armazenados em sv (valores de ponta) que são não nulos.

num=sum(kk) % número de termos não nulos.

SPL=sum(sv)/num %parâmetro de ponta SPL = média dos valores de ponta.

end

A seguir, procedimento similar é utilizado para os casos em que a ponta inicia na direção x, ou seja, o ângulo do primeiro termo que possui raio maior do que o raio médio é zero. Isto faz com que a ponta possivelmente esteja dividida em duas partes e estes valores devem ser unidos para representar apenas uma ponta.

if maiores(1)==0

for t=1:k

while pos_maiores(i+1)-pos_maiores(i)==1

fim=fim+1 i=i+1 end fim=fim+1 G{t}=inicio:fim t=t+1 inicio=fim+1 i=inicio

```
end
  p=G{1} % primeiro
  G{t}=inicio:length(pos_maiores) % último
  m=G{t}
  f=length(m) %tamanho do último vetor
  q=length(p) %tamanho do primeiro vetor
  G{1}=G{t}
   for n=1:f
      G{1}(f+n)=p(n)
    end
    MP={zeros(0,2)};
    MP=repmat(MP,k,1);
    MP_rad={zeros(0,2)};
    MP_rad=repmat(MP_rad,k,1)
    MP_cart={zeros(0,2)};
    MP_cart=repmat(MP_cart,k,1)
    pos_r=\{zeros(0,2)\};
    pos_r=repmat(pos_r,k,1)
    MP{i}=[maiores(G{i}, 1), maiores(G{i}, 2)]
    [\max_{i}, pos_{i}] = \max(MP\{i\}(:, 2))
    MP_rad{i}=[MP{i}(:,1)*pi/180, MP{i}(:,2)]
    [maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]=pol2cart(MP_rad{i}(:,1),MP_rad{i}(:,2))
    MP_cart{i}=[maiores_ponta_cart_x,maiores_ponta_cart_y]
    A=sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(end,1))^2+(MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(end,2))^2)
    B=sqrt((MP_cart{i}(1,1)-MP_cart{i}(pos_r{i},1))^2+(MP_cart{i}(1,2)-MP_cart{i}(pos_r{i},2))^2)
    C = sqrt((MP_cart\{i\}(pos_r\{i\}, 1)-MP_cart\{i\}(end, 1))^2 + (MP_cart\{i\}(pos_r\{i\}, 2)-MP_cart\{i\}(end, 2))^2)
    if ((A~=0) & (B~=0) & (C~=0))
       a=acos((B^2+C^2-A^2)/(2*B*C))
       sv(i)=cos(a/2)
    end
  end
  kk=sv>0
  num=sum(kk)
 SPL=sum(sv)/num
end
%Apresentação do resultado:
str=strcat('SPL=
',num2str(spq),';raio_medio=',num2str(raio_medio),';xo=',num2str(x0),';yo=',num2str(y0))
msgbox(str,'Resultado','none')
```

end

Para o objeto analisado, foram determinadas três pontas, como pode ser visto a seguir:

Ponta 1: A1 = 4.9984 B1 = 5.7800 C1 = 3.0160 a 1= 1.0443 sv1 = 0.8668 Ponta 2: A2= 0 B2= 0 C2 = 0 sv2 = 0 Ponta 3: A3 = 15.0333 B3 = 4.0299 C3 = 15.2627 A3 = 1.3811 sv3 = 0.7709

```
1 0 1
num =
2 %número de pontas válidas
SPL =
0.8188
```

str =

SPL=0.81882;raio_medio=10.0973;xo=17;yo=11



Figura 52 – Apresentação do resultado

APÊNDICE G – ARTIGO - COBEM

ABRASIVE PARTICLE CHARACTERIZATION FOLLOWING DIFFERENT MEASUREMENTS OF SHAPE FACTOR

Mário Coseglio, mariocoseglio@hotmail.com Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Curitiba – Paraná - Brasil

Abstract. The abrasion of equipments and components is a significant problem for earth moving operations. The wear rate is affected by the characteristics of abrasive particles. The effects of particle size and hardness of abrasives have been extensively studied. However, the shape of particles is the parameter most difficult to incorporate in the wear models. Besides the qualitative descriptors, obtained from a visual inspection of bidimensional images, these particles can be characterized by quantitative parameters that are able to give information on the geometry. It can be more adequate to describe the removal material rates. In this paper many shape parameters are investigated, such as the roundness factor, the aspect ratio, as well as the spike parameters early developed. A critical review based on these parameters is presented. Initial results of a computational routine developed in Surface and Contact Lab are presented in order to characterize the size and shape of abrasive particles.

Keywords: abrasion, shape characterization, image analysis

1. INTRODUCTION

The abrasion of metals is an important failure mode for many components, as the grinding bodies and powder and slurry pipes. This kind of wear can be considered as the most important wear mode, because it corresponds about 50% of total losses by wear (Stachowiak and Batchelor, 2001).

The shape of particles in these tribological systems has been studied, in order to predict the wear rates. The usual approach to describe and differentiate the particle shape is the visual inspection by means of microscopy. Besides this type of analysis, there are quantitative parameters that relate the shape with the capacity to remove material from surface.

In this paper the classic shape parameters will be described, as the aspect ratio, roundness factor, as well as the spike parameters developed by Hamblin and Stachowiak (1995). Moreover, a new proposition to describe the particle shape is presented, denominated as modified spike parameter, SPL.

2. SHAPE CHARACTERIZATION OF ABRASIVE PARTICLES

A usual description of shape factors is based on how the bi-dimensional projection of particle differs from that describes a circle. The particles can be grouped in three families of shape, having a circle as their origin (Wojnar, 1999). The former corresponds to ellipses with different elongations (Fig 1a), the second case represents the situations where the shape keeps rounded, but there is an increase in the irregularity of border (Fig 1b), and the last case is a combination of the previous cases, i.e., there is an elongation of shape and an increase in the complexity of the border (Fig 1c). For each one, a most adequate factor to describe the particle shape could be assumed.

The roundness factor is one of the most used parameters to characterize the shape of abrasive particles. It can be defined as the relation between the area of the bi-dimensional projection of particle, A, and the corresponding area of the circle that has the same perimeter L (Eq 1).

$$f_1 = \frac{4\pi A}{L^2} \tag{1}$$

This factor is a good solution to define the case shown in Fig 1b. In these cases, where the particle is rounded, the factor is sensible to border irregularities. For a circle, $f_1 = 1$, and as the border becomes irregular, its value decreases.



Figure 1. Three families of shape originated from a circle: (a) Ellipses with varied elongations; (b) rounded shapes with different irregularities; (c) combination of the previous cases (Adapted from Wojnar, 1999).

The elongation, presented in Fig 1a, is very common in nodular particles plastically deformed, due to the action of axial stresses, for example. An efficient manner to measure the elongation is use the factor presented by Heywood in 1937 (ASM Handbook, 1998), known as aspect ratio, defined as the ratio between the major and the minor dimensions of the rectangle (a and b, respectively) with a minimum area that contains the bi-dimensional projection of particle. This factor is also known as elongation ratio. The aspect ratio can be determined as the ratio between the major and the minor axis (*a* and *b*, respectively) of the ellipse that better adapt to the particle format (Fig 2).

$$f_2 = \frac{a}{b} \tag{2}$$

For the case shown in Fig 1c, which the particle is elongated and irregular, the parameter shape factor, defined as the ratio between the minimum diameters, inscribe and circumscribe, is more appropriated than the previous ones (Wojnar, 1999).





Figure 2. Geometry quantities required for the calculus of different shape factors.

Fractals (from the Latin *fractus*) are geometric forms that can be divided indefinitely in similar parts to the original object. The geometry of fractals is an extension of classic geometry and can be used to build models

capable to represent the most complex aspects of nature forms. In Tribology this concept was introduced to describe the characteristics of borders of abrasive particles, resulting in parameters that indicate the irregularities. Pioneers works were performed by Mandelbrot (ASM Handbook, 1998). A usually employed technique is the structured walk, also known as the Richardson method (Podsiadlo and Stachowiak, 1998), which the particle border is scanned for a given step length, resulting in a polygon (Fig 3a). The process is repeated for many step lengths, leading the Richardson curve in logarithm scale (Fig 3b). From the slope, m, generated by the best fitting to the curve, the fractal dimension is calculated by



Figure 3. Richardson's curve for fractal dimension calculus.

Two new parameters were introduced by Hamblin and Stachowiak (1995) to describe the angularity. One of them, called spike parameter – linear fitting (SP) is based on the border representation by a series of triangles, in similar process to the method to calculate the fractal dimension. It is assumed that the sharper the angle, and the higher the triangle size, the higher is the abrasivity. In order to characterize both the angularity and the size, the spike value, s_{ν} , defined in Eq 5, is used, where θ is the angle of vertices and h is the height of triangle (Fig 4).

$$sv = \cos(\theta / 2)h$$

(5)

(6)

For each resulted triangles, the maximum spike value is determined. The process to the calculus of spike value is repeated for all steps along the perimeter. After a cycle is completed, the maximum value is determined. The procedure should be repeated for all possible starting points at the border, resulting in an average spike value. The spike parameter - linear fitting, SP, is thus calculated following this equation (Hamblin, Stachowiak, 1995):

$$SP = \frac{1}{n} \Sigma \left[\frac{1}{m} \Sigma \left(\frac{sv_{\text{max}}}{h_{\text{max}}} \right) \right]$$

where:

 $sv_{\text{max}} = \max(\cos[\theta/2)h])$ for a given triangle base;

 h_{max} is the corresponding height for sv_{max} ;

m is the number of spike values valid for a given step size; *n* is the number of different step sizes used;



Figure 4. Method to calculate the spike parameter SP.

The other parameter (Hamblin and Stachowiak, 1996), called spike parameter – quadratic fitting (SPQ) is based on the localization of the centroid of the bi-dimensional section of particle and the circle that radius is equal to the average radius of particle (Fig 5). The areas outside from circle are considered as interest regions, while the bulk is suppressed. The maximum local diameter is determined for each region outside the circle and this point is treated as spike vertices, M. The spike laterals, which are between the segments sp-mp and mp-ep are represented by polynomial quadratic functions. Differentiating the functions at point mp, led in the apex angle θ .

$$sv = \cos(\theta/2)$$
(5)

Figure 5. Method to the calculus of spike parameter SPQ.

The spike parameter – quadratic fitting (SPQ) is thus obtained from the average value of valid spikes, where n is the number of found spikes:

$$SPQ = \frac{1}{n} \sum sv \tag{7}$$

4. METHODOLOGY

Five minerals – crushed sintered alumina, silica sand, quartz, silicon carbide and garnet (Fig. 6) - were selected in order to investigate the shape factors. The average particle size of those minerals is 250-300 μ m. The bi-dimensional images were obtained from those presented by Hamblim and Stachowik (1996).

Aspect ratio, fractal dimension and roundness were determined using specific software for image processing, *Image Pro Plus 4.5.* A modified spike parameter, SPL, is presented. Its definition is presented in Fig 7.

The modified spike parameter is similar to the SPQ one. The difference between them is that the fittings at the borders between EM and MS are linear and they are not polynomial quadratic.

The method to calculate the SPL parameter is based on the following steps:

mp (apex)

(a) Determination of the particle centroid, \overline{x} , \overline{y} ;

(b) Calculus of the average radius \overline{r} , defined as the average of radius with origin at the centroid that turn round the particle border;

(c) Detection of the outer regions to the circle defined by the average radius, for those $r > \overline{r}$. These regions are identified as spikes;

(d) Each detected spike is defined by two segments of straight line EM and SM, formed by the intersection points of circle with the border (E and S) and the point determined by the maximum local radius of spike (M);

(e) The spike value is determined by Equation 8 for each interesting region, defined as the cosine of half angle among the segments, θ ;

(f) The modified spike parameter is thus calculated from the average of spike values:

$$SPL = \frac{1}{n} \sum sv \tag{9}$$

This routine of calculus was performed applying digital images processing techniques (Gonzalez et. al, 2004), with the use of the Image Processing Toolbox in Matlab software.



Figure 6. Abrasive grits. (a) crushed sintered alumina (b) sílica sand (c) quartz (d) silicon carbide (e) garnet. (Adapted from Hamblin and Stachowiak, 1996).



Figure 7. Method to the calculus of the modified spike parameter SPL.

5. RESULTS AND DISCUSSIONS

The numerical results obtained for the shape parameters of five investigated minerals are presented in Tab 1. The values reported by Hamblin and Stachowiak (1996) for the spike parameters SP and SPQ are also presented for comparison.

Abrasive material	Aspect ratio	1/Roundness	Fractal dimension	Spike parameter SP	Spike parameter SPQ	Spike parameter SPL
Crushed sintered alumina	1.6535	1.9374	1.0424	0.3591	0.6008	0.7114
Silica sand	1.2211	1.1902	1.0058	0.2077	0.1919	0.6312
Quartz	1.6247	1.6781	1.0246	0.3239	0.5336	0.8626
Silicon carbide	1.6563	1.5293	1.0145	0.2942	0.4247	0.7131
Garnet	1.0624	1.2226	1.0116	0.2168	0.2515	0.8626

Table 1. Numerical results for the investigated shape factors.

A visual inspection allows distinguishing the analyzed particles in two groups: the sharp particles, composed by crushed sintered alumina, quartz and silicon carbide, and the round ones, silica sand and garnet. In the former group the spikes are very remarkable, in opposition to the observed geometry of silica and garnet.

Table 1 shows that all shape factors are sensitive to this classification, with exception to fractal dimension and aspect ratio. This observation was just made by Hamblin and Stachowiak (1996).

The modified spike parameter SPL presented similar trends to the SPQ and SP parameters. However, their values were higher than those expressed by Hamblin and Stachowiak (1996). A possible explanation for this fact is that the approximation of border sections between the segments SM and ME is linear when SPL definition is applied, the vertices angles of spikes are small, and consequently, a high value is obtained for this parameter. The detected spikes for each particle are presented in detail in Fig. 8.



Figure 8. Details of detected spikes for each mineral: (a) crushed sintered alumina (b) silica sand (c) quartz (d) silicon carbide (e) garnet.

Another important analysis to qualify the use of modified spike parameter is the establishment of a ranking among the studied images. The SP and SPQ parameters gave the same crescent order: silica sand, garnet, silicon carbide, quartz and crushed sintered alumina. Likewise, the roundness factor led to a same sequence. On the other hand, the SPL parameter resulted in the following order: garnet, silica sand, crushed sintered alumina, silicon carbide and quartz. One can observe that there were two changes in the ranking predicted by SP and SPQ parameters. Moreover, the great change occurred in silica sand. This fact should be investigated in the light of the number of measurements. While Hamblin and Stachowiak (1996) reported an average value based on 20 measurements, here an only one determination was performed.

Finally, the correlation between shape factor and abrasion resistance is the main application of this kind of development. Figs 9a and 9b present the already published results of Hamblin and Stachowiak (1996), where the wear rate due to the sliding abrasion is well correlated with SP and SPQ parameters. Fig 9c shows that the SPL value for silica sand seems too high, while for the alumina it sounds too low. This result implies that SPL should be received further investigation.



Figure 9. Plot of average wear rates *vs*. different spike parameters: (a) SP for different abrasive types, 20 particles measured for each abrasive type (b) SPQ for different abrasive types, 20 particles measured for each abrasive type, (c) SPL for different abrasive types, 01 particle measured for each abrasive type.

6. CONCLUDING REMARKS

A brief review of factual shape factors used to describe the abrasivity of mineral particles was presented. A new routine to calculate a spike parameter was developed, called modified spike parameter, SPL. It is expected that this routine consumes a smaller time than those required to calculate SP and SPQ parameters. Even though, further investigation is necessary to explain a high value of SPL for silica sand and a low value for crushed sintered alumina.

7. REFERENCES

ASM Handbook Vol.7, 1998, "Powder Metal Technologies and Applications", ASM International.

Gonzalez, C.R., Woods, R.E., Steven, L.E., 2004, "Digital Image Processing using Matlab", Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 624 p.

Hamblin, M.G.; Stachowiak, G.W., 1995, "A multi scale of particle abrasivity", Wear, Vol. 183, pp. 225-233.

Hamblin, M.G.; Stachowiak, G.W., 1996, "Description of abrasive particle shape and its relation to two-body abrasive wear", Tribology Transactions, Vol. 39, pp.803-810.

Podsiadlo, P.; Stachowiak, G.W. 1998, "Evaluation of boundary fractal methods for the characterization of wear particles", Wear, Vol. 217, pp. 24-34.

Stachowiak, G. W.; Batchelor, A.W., 2001, "Engineering Tribology", Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 744 p.

Stachowiak, G. W.; Podsiadlo, P., 1999, "Surface characterization of wear particles", Wear Vol. 225-229, pp. 1171-1185.

Wojnar, L., 1999, "Image Analysis: Applications in Materials Engineering", CRC Press LLC, Boca Raton, 245 p.

8. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.