

ANÁLISE MORFOLÓGICA DE
PARTÍCULAS FINAS*

John Keith Beddow
 Depto. de Engenharia Química
 Universidade de Iowa, Iowa City, Iowa, EEUU

(Recebido em 16/5/79)

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve um novo approach de pesquisa para caracterizar partículas finas. As propriedades básicas das partículas finas podem ser descritas em termos de quatro características gerais:

tamanho
 forma
 química
 física

As propriedades físicas incluem condutividade elétrica e térmica, comportamento óptico e densidade. As propriedades de tamanho e forma podem ser incorporados no título geral de morfologia da partícula.

2. IMPORTÂNCIA DO SISTEMA DE PARTÍCULA

A morfologia de partícula é básico para a tecnologia do pó. Até recentemente éramos incapazes de definir o tamanho de uma partícula com segurança e também não tínhamos informações morfológicas completas que caracterizassem uma partícula ou pó (um conjunto de partículas).

A civilização é construída sobre um sistema de partículas: cimento, terra, tijolo, argamassa, pintura, vidro, e metais são alguns exemplos. Nossa comida cresce em solos que são um complexo sistema de partículas. Óleo e água localizam-se sob a terra em sistema de partículas semi-consolidados; mas apesar da grande importância do sistema de partículas pouca pesquisa coordenada tem sido feita neste campo.

Quando a maioria das pessoas pensam em indústria, pensam em líquidos como petróleo, apesar de que a maioria do material de trabalho numa indústria se apresenta em forma de partícula. Bilhões e bilhões de toneladas de material em forma de partícula são trabalhados pela indústria: minas, ferro, carvão de pedra, pedra calcária, areia, cascalho, fosfato; químicas: cimento, plásticos, fertilizante, tinta, metais, comidas, vidros, cerâmicas, tijolos, bloco de concreto de cinzas; construção: concreto, terra sedimento; agricultura: sementes, produção, terra; detritos: lixo, resíduos, água de esgoto, lama, "fly ash", resíduos de minas, sedimentos de rios. Cerca de 70% dos problemas de poluição nos Estados Unidos, por exemplo, são causados por partículas.

Onze bilhões de toneladas de partículas de detritos, tais como minerais, produtos químicos, e carvão de pedra, suficientes para cobrir com dois metros de altura o estado

de Delaware, em 1974, foram descarregados pelas indústrias dos EEUU, e constituíram um grande problema. Neste material não se pode plantar grama, construir, nem se pode fazer uma previsão do que vai acontecer com ele. Se os EEUU utilizassem seu óleo ou argila de urânio, esta figura seria quintuplicada.

O melhor método atualmente em uso para dessulfurização de gás de escapamento resulta em um terço de tonelada de lama para cada tonelada de carvão de pedra queimada. Durante os próximos 10 anos, se os padrões de EPA (Agência de Proteção ao Meio Ambiente) forem alcançados por novas fábricas que queimam carvão de pedra, a produção anual de lama será de 300 milhões de toneladas.

Sessenta por cento da poluição da água nos EEUU é causada por matéria em forma de partículas como limo de fosfato, esterco e escoadouro de ácido de mina. Estes materiais tóxicos não sedimentam em tempo razoável. Atualmente não existe tratamento satisfatório destas partículas e lamas — nada vai crescer neles, elas apodrecem nossa água, sufocam nossa terra e poluem nosso ar. O tratamento de partículas é um problema que está crescendo nacional e internacionalmente. Embora bilhões e bilhões de dólares estejam sendo investidos todo ano em tecnologias obsoletas que consomem muita energia, para resolver este problema. Companhias químicas e de equipamento não têm incentivo de lucro para apoiar pesquisa básica de tecnologia de partícula. Nos EEUU, agências federais como EPA, "Bureau of Mines", e ERDA (Administração de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia, agora incorporado ao DOE, Departamento de Energia), não têm interesse no problema de partícula, e embora eles apoiem pesquisa aplicada e projetos de demonstração, nenhum deles têm a missão de apoiar a pesquisa de *engenharia fundamental* necessária para efetivas soluções de custo e energia.

A caracterização morfológica das partículas é o problema mais premente. Novos avanços técnicos no campo, junto com instrumentos desenvolvidos e instrumentos matemáticos irão permitir a predição de características morfológicas e relacionar estas características teórica e experimentalmente com a força de apoio, permeabilidade, resistência a condensação, fluxo e solubilidade do sistema de partículas. Esta tecnologia de partículas será imediatamente aplicável a diversos campos, como agricultura, tratamento de água, processamento químico, e acima de tudo, redução da poluição. De uma pequena amostra, engenheiros poderão tirar resíduos de minas, caracterizar morfológicamente as partículas, determinar sua media de lixivia, sua velocidade de condensação e força de apoio a longo prazo.

Apesar da óbvia importância das partículas, foi somente nos últimos 15 anos que as nações industriais começaram a perceber que esta tecnologia de pó — partículas — é um campo de considerável preocupação científica e tecnológica. Na verdade, foi somente nos últimos quatro anos que o governo dos EEUU instituiu um programa básico de pesquisa nesta área¹. Com base nesta situação, não é surpresa que existam mais e maiores problemas técnicos do que em antigas áreas similares de sólidos, líquidos ou gases, respectivamente. Entretanto muitos destes problemas técnicos de partículas são efetivamente intratáveis no momento porque eles dependem de soluções adequadas de problemas científicos básicos no estudo de partículas. Por hora, o mais premente destes problemas básicos é a caracterização, especificação e morfologia da partícula².

Com uma tal diversidade de interesse para as indústrias, deve estar claro que a ciência e a tecnologia de partículas é interdisciplinar por natureza, isto é, nenhuma especialidade tem ou pode ter o inteiro domínio de habilidades técnicas e base filosófica para resolver muitos destes problemas, principalmente o problema de morfologia das partículas.

Com poucas exceções, físicos e químicos estão profundamente preocupados com moléculas, átomos e partículas subatômicas. Por outro lado, as bases da tecnologia das partículas, são as próprias partículas, as quais cobrem uma grande variedade de tipos — de agregados polimoleculares a grandes pedaços de cascalho. A maioria do spectrum de partículas está no campo de engenharia e desta forma é mais apropriado que nós, em engenharia, aceitemos a responsabilidade de desenvolver a tecnologia de análise morfológica das partículas.

O interesse na análise do tamanho das partículas tem sido intenso nos últimos 30 anos³ mas devido a falta de formulação técnica, o interesse na morfologia da partícula, embora presente, tem sido menos intenso⁴. Na última década entretanto, está ocorrendo um rápido envolvimento de cientistas e engenheiros na área, resultando num profundo avanço teórico.

3. TAMANHO DA PARTÍCULA³

Se considerarmos uma partícula de um tamanho arbitrário e desejarmos medir seu tamanho duas categorias gerais de medidas nos são disponíveis:

1. Métodos essencialmente estáticos de medidas nos quais alguma dimensão ou diâmetro é medido, usando-se microscópios de luz, de eletrons ou o método de Raios-X, por exemplo. O principal passo desta abordagem é medir o tamanho de uma interseção. Repetindo-se este procedimento para várias partículas, os dados serão manipulados usando-se métodos estatísticos a fim de conseguir a média, o desvio padrão, etc. do diâmetro.

Pensar um pouco neste tipo de medida mostra que no caso de partículas de forma arbitrária, a interseção e uma imitação do tamanho real da partícula e o tamanho não é uma coisa que simplesmente se conceba ou meça. Na verdade, a interseção é simplesmente o comprimento da linha x_1y_1 para x_2y_2 onde x_1y_1 é o ponto no perfil e x_2y_2 é outro ponto no perfil, mas na outra ponta da interseção. Logicamente, a interseção é completamente

arbitrária e qualquer partícula pode resultar numa miríade de interseções de diferentes comprimentos. Até mesmo no caso de introdução dos conceitos de diâmetro de Martins e Fered, é impossível fugir da arbitrariedade de escolha da interseção e mais importante, sua completa inadequação para descrever o tamanho da partícula. Soma-se a este fato a crença de que se não descrevermos e medirmos a propriedade de uma partícula adequadamente, nenhum artifício estatístico irá melhorar a qualidade da informação obtida em muitas partículas.

2. O outro principal grupo de métodos é essencialmente dinâmico em caráter. Nestes métodos, o conjunto de partículas é colocado num ambiente o qual é subseqüentemente perturbado. Os elementos do conjunto de partículas reagem diferentemente a estes impulsos impostos ao ambiente e estas reações (e interações) diferentes provocam uma difusão ou spectrum de respostas da amostragem teste. O observador arbitrariamente supõe que esta difusão de respostas é devida ao tamanho da partícula e confere aos dados a interpretação de que o resultado indica a distribuição do tamanho do conjunto de partículas que está sendo testado. Exemplos destes métodos incluem peneiração, sedimentação, decantação, centrifugação, e medida da viscosidade. Todos são métodos eminentemente carentes quando passam para o rigor científico.

4. FORMA DA PARTÍCULA

O problema associado à medida do tamanho da partícula torna-se insignificante quando comparado com os problemas dos métodos clássicos de medir sua forma. Além do trabalho tedioso de alguns dos métodos de medir forma (alguns deles são tão trabalhosos que virtualmente os seus idealizadores foram os únicos a usá-los, ou dizer que os usaram) a maior crítica que pode ser feita a eles é, mais uma vez, sua falta de rigor científico. Considere os dois exemplos abaixo:

1. Um dos fatores de forma usualmente citado é a proporção de seu aspecto que tem sido definido de várias maneiras. Uma breve definição para nossos propósitos seria: a proporção do comprimento máximo dividido pelo comprimento mínimo do ângulo direito do comprimento máximo. Este método se propõe a reduzir a forma da partícula a um número. Ele ignora, por conseguinte, a questão da dimensionalidade da forma da partícula, assim como ignora suas outras características. Mas, e talvez isto seja o mais sério, este método extrai pouca informação a respeito da partícula e ainda tenta dizer alguma coisa importante e definitiva a respeito de sua forma.

2. Existem vários instrumentos de medidas aparentemente sofisticados, no mercado, que realizam várias medidas da imagem da partícula. Estas medidas incluem interseção, área e perímetro do perfil. Usando-se estes dados preliminares vários fatores da forma podem ser calculados. Novamente, deve-se criticar estas medidas sabendo-se que elas não fornecem uma medida inequívoca da forma da partícula. Por exemplo, uma função do perímetro dividido pela área não é única e além disso falha em descrever a forma da partícula. No mínimo pode-se esperar que sejamos capazes de reconhecer as significantes características de forma, mas isto não se realiza. A informação é útil para o trabalho de controle de qualidade e processo, mas é enganador, do ponto rigorosamente científico.

5. ANÁLISE DA MORFOLOGIA

Existem dois estágios no desenvolvimento histórico da morfologia. No primeiro estágio foram aproveitadas as incríveis habilidades humanas de observar, reconhecer e codificar partículas de diferentes formas. Este método encontra sua penúltima expressão no Particle Atlas⁵ o qual é o único e valioso guia para identificação de partículas finas usando o poder humano de observação em conjunto com a ciência especializada. É difícil dizer quando o segundo e mais recente desenvolvimento começou. É suficiente dizer que os 3 componentes principais deste desenvolvimento mais recente são Beddow⁶, Ehrlich⁷ e Meloy⁸. As bases para estas abordagens serão agora descritas. Uma definição do que seja forma da partícula é um pre-requisito indispensável para começarmos a medi-la: "Forma da partícula é o conjunto de todos os pontos da superfície da partícula". Desta definição pode-se deduzir vários corolários:

1. Forma é uma propriedade intrínseca de uma porção de material. Onde define a extensão da partícula e a forma define a maneira como o material se apresenta.
2. Forma pode ser a propriedade de uma abstração assim como de uma partícula real.
3. Forma diz respeito exclusivamente ao contorno externo da superfície da partícula. Poros internos, por exemplo, são excluídos desta consideração, exceto quando eles interceptam a superfície da partícula.
4. As características da forma abrangem desde o contorno total até o mínimo detalhe que pode ser observado.
5. Para diferenciá-lo dos detalhes internos da partícula, o último será chamado *textura*⁹. Portanto a composição microquímica de um ponto a outro dentro da partícula é uma propriedade de *textura*, por exemplo.
6. As diferenças entre uma forma e outra são percebidas pela observação da diferença entre o respectivo padrão de pontos da superfície em estudo.

De acordo com a definição acima, para medir a forma do perfil da partícula temos que obter uma amostra de coordenadas dos pontos do perfil que adequadamente representam todos os pontos da sua superfície. Uma vez obtidos os dados, eles têm que ser condensados ao mínimo enquanto retêm o seu padrão original, isto é, a informação da forma. Note que o *modus operandi* aqui é obter o máximo de informação conveniente e então reduzi-los a um mínimo aceitável.

O método para se obter a amostra dos pontos do perfil é chamado *digitização*. Este conjunto de coordenadas $\{x, y\}$ é então convertido em coordenadas polares $\{R, \theta\}$ o qual dá um gráfico que se pode ver na Figura 1. A curva pode então ser convertida em uma equação através de uma transformação ortogonal. No exemplo da Figura 1 utilizaremos a série de Fourier. A forma geral desta equação é a conhecida equação de Fourier:

$$R(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\theta - \alpha_n) \quad (1)$$

em que A_n é o coeficiente Fourier, α_n é o ângulo da fase n é a ordem harmônica.

Esta série tem muitas propriedades interessantes porém a mais útil para nosso propósito é a que toma o número de termos (a ordem de n) tão alto quanto se queira para reduzir o erro abaixo de um dado nível. Isto é ilustrado na Figura 2, a qual mostra o aumento de exatidão da

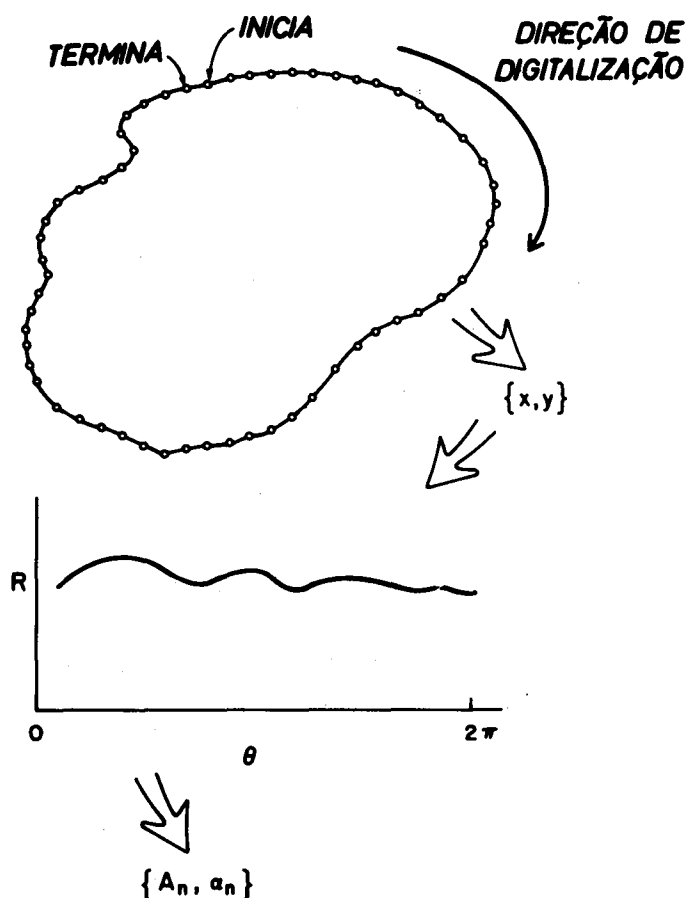


Figura 1

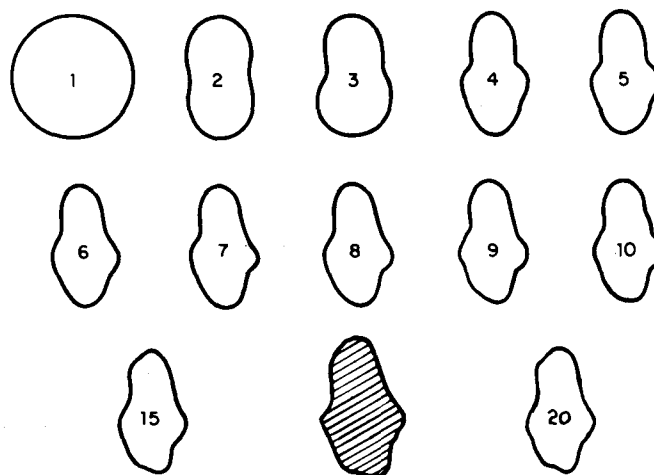


Figura 2

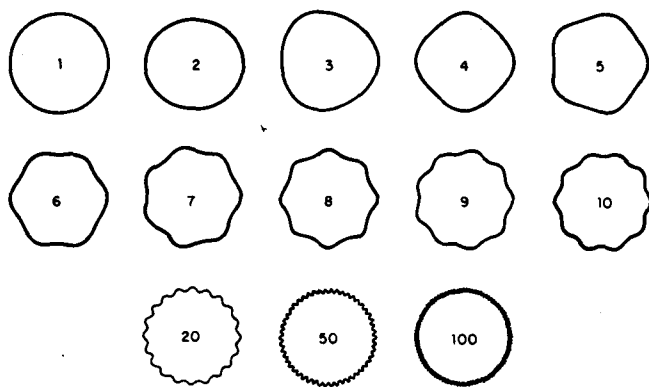


Figura 3

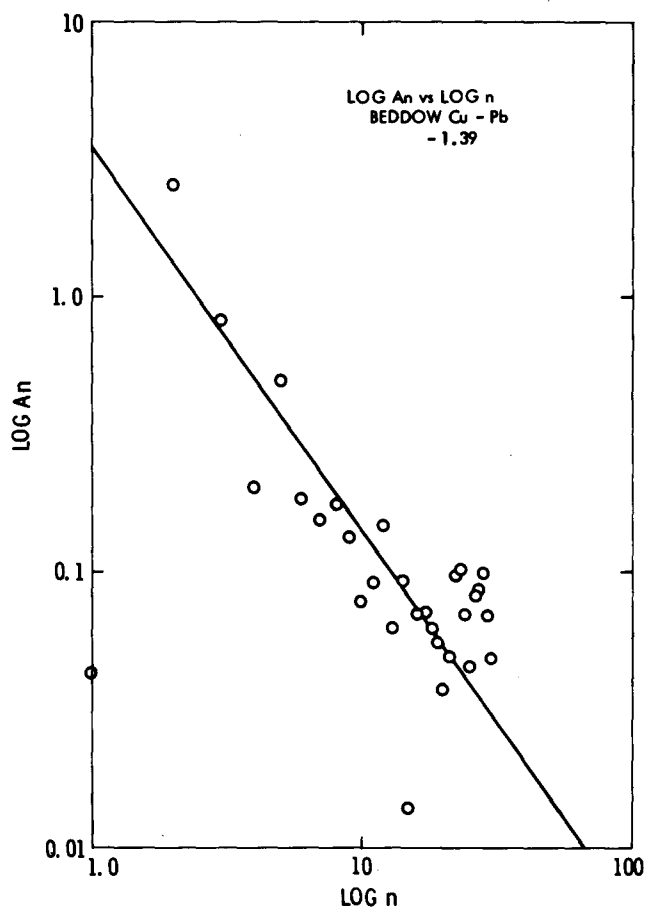


Figura 4

reprodução do perfil original (o que está sombreado) devido ao aumento do número de harmônicos usado nesta análise. Então, se somente 3 harmônicos são usados o esquema geral está lá, mas não os detalhes. Teremos uma reprodução mais exata, é óbvio, se usarmos 20 harmônicos. A prova de que os termos da equação (isto é, o conjunto de coeficientes $\{A_n, \alpha_n\}$) representa realmente a informação originalmente presente no perfil é dada pela habilidade de se regenerar o mesmo perfil utilizando-se a série de coeficientes.

Os próprios coeficientes individuais representam diferentes tipos de características geométricas. Por exemplo, A_2 indica o aspecto do raio; A_3 a triangularidade, etc ... como mostra a Figura 3. Existem outras funções ortogonais incluindo a transformação das ondas quadradas de Walsh e a pulsação da onda Haar. Cada uma destas têm suas vantagens e desvantagens comparadas com a de Fourier.

6. CARACTERÍSTICAS DE SELEÇÃO

Com a informação geométrica do perfil transformada em informação matemática na forma de conjuntos de coeficientes, o último, agora representa dados da forma. Para analisar esta nova forma de dados podemos utilizar uma variedade de técnicas de reconhecimento de padrões. Estas têm sido revistas nesta conexão¹⁰ os proponentes da análise morfológica têm desenvolvido técnicas analíticas em 3 grandes categorias correspondendo a 3 diferentes abordagens. Estas são, análise de sinal (Meloy), análise harmônica (Ehrlich), e classificação de padrões (Beddow).

7. ANÁLISE DE SINAL

Um ponto do logaritmo A_n versus n dá uma curva decrescente a qual uma pode-se aproximar por uma linha reta (veja a Figura 4). Esta linha é chamada sinal de partícula (na realidade Meloy a tem chamado de impressão digital da partícula e as impressões digitais coletadas de várias partículas, ele chama *sinal de uma partícula*). A linha pode ser descrita pela intersecção entre a linha dos y e o declive. Este sinal da partícula portanto representa uma considerável condensação da informação originalmente no perfil, mas as propriedades estatísticas dos coeficientes e faces dos ângulos têm que ser concomitantemente consideradas para esta abordagem ser bem sucedida. Trabalhos de pesquisa básica estão sendo correntemente processados nesta área.

8. ANÁLISE HARMÔNICA

O princípio em que se baseia esta abordagem é a coleta de informação a respeito dos coeficientes individuais na forma da curva de distribuição da mesma. Isto é, construída como um histograma. A análise subsequente têm três estágios e o investigador pode parar em qualquer estágio particular dependendo do tipo de informação requerida para a análise.

O estágio 1 envolve análise χ^2 e o seu resultado final é que o investigador pode determinar a lista de coeficientes significativos. Como exemplo, digamos que dois grupos de partículas foram comparados e contrastados e descobriu-

se que os seguintes coeficientes são significativamente diferentes:

$$A_2, A_3, A_8, A_{11}, A_{15}, A_{16}, A_{18}$$

Isto é igual ao conhecido teste "spot" (análise de toque) na química. Neste exemplo podemos dizer que constatamos que os dois grupos de partículas diferem, com base nos coeficientes acima, e portanto podemos esperar que eles possam ser diferenciados com base também nos mesmos coeficientes.

O estágio 2 leva em conta a análise do fator *modo-R* no histograma para deduzir os "fatores básicos" inerentes ao conjunto de coeficientes em questão. Estes fatores estão linearmente relacionados com os coeficientes. Por exemplo, deve haver 3 destes fatores, *X*, *Y* e *Z*, os quais estão linearmente relacionados aos primeiros coeficientes da lista. Esta técnica é análoga a análise química qualitativa.

Estágio 3 conduz uma análise do fator *modo-Q* para determinar a proporção da forma básica presente numa dada amostra de material de partícula. Esta técnica nesta aplicação é portanto análoga a análise química quantitativa. Estas técnicas de análises harmônicas desenvolvidas por Ehrlich representam um poderoso instrumento com as quais ele e seus colaboradores têm respondido algumas questões muito importantes em geologia.

9. CLASSIFICADORES

Existem três categorias gerais de classificadores: determinística, estatística e "fuzzy". Um classificador determinístico capaz de separar dados de entrada (input) (os coeficientes em uma forma ou em outra) em classes de forma¹² foi por nós determinado. Este tem sido aplicado inicialmente a quatro conjuntos de partículas com modesto sucesso. Desde este tempo, sucessivos melhoramentos na técnica têm diminuído substancialmente as classificações mal sucedidas. Enquanto a classificação determinística ignora as propriedades estatísticas dos dados de entrada (input), a classificação estatística usa estas propriedades para discriminar os dados. Nos temas investigados, três tipos de classificadores (função discriminante linear, função discriminante quadrática e a regra "Fix-Hodges") usando como dados de entrada (input) um número mínimo de coeficientes de Walsh (três) de quatro conjuntos de partículas. Os escores classificados erroneamente têm sido afortunadamente baixos¹³.

A importância da classificação de "fuzzy" é devido ao Bezdeck¹⁴. Este classificador depende da aplicação da teoria de conjunto de "fuzzy" aos dados. Um conjunto ordinário, tem dois graus de combinação associados a ele, 1 para as que são associados e zero para os não associados. Alternativamente, o conjunto de "fuzzy" tem graus de associação, indo de zero a 1. Este conceito é mais útil quando aplica as propriedades multidimensionais complexas, como é o caso da morfologia das partículas finas.

10. APLICAÇÕES

Numa nova disciplina como esta, aplicações são necessariamente muito poucas, entretanto, a seguir mencionaremos três delas:

Traços Naturais

Ehrlich têm mostrado que a areia que vem dos rios junto da costa do Alasca não segue diretamente para o oceano em sua parte mais profunda. Em vez disso, a areia move-se ao longo da praia em águas rasas¹⁵. Ehrlich mostrou também que a areia em Charleston Harbor em North Carolina veio de mar. A areia é do rio¹⁶. Todos estes estudos e outros mais, têm sido predito nas propriedades morfológicas dos grãos de areia.

Modelando características morfológicas

Meloy propõe o uso do quadrado da onda (funções de Walsh) para representar o perfil das partículas ao invés das ondas de Fourier. Usando esta abordagem ele pode desenvolver funções ditas representantes de certas características da superfície da partícula incluindo excesso de areia de superfície da partícula — isto é, a área da superfície da partícula acima e abaixo da esfera, de media do raio do comprimento do canto da superfície da partícula — isto é, comprimento total dos cantos observados quando a superfície é representada por uma série de quadrados de onda. (veja Figura 5):

SIMULAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE UMA PARTÍCULA

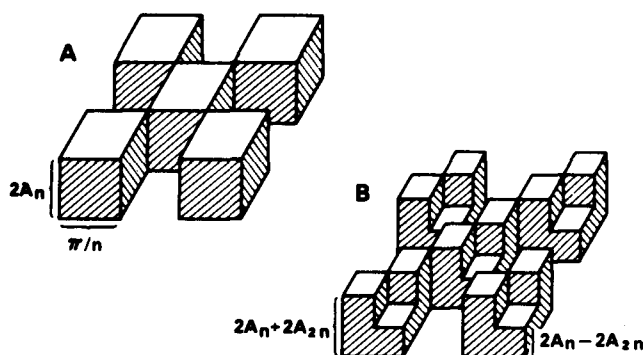


Figura 5

Reação Química¹⁷

Temos estudado os efeitos duma reação química sobre a morfologia de pequenas partículas de metal. O sistema estudado foi zinco em HCl. Cinco representações sucessivas do perfil da mesma partícula em ataque podem ser vistas na Figura 6. Figura 7 mostra a soma dos coeficientes $\sum A_n$. Como podemos ver, uma vez que o ataque secundário começa, o valor de A_n começa a aumentar. O primeiro estágio do ataque é caracterizado pelo gradual abrandamento da superfície e a simplificação da forma que corresponde a uma diminuição em A_n , como mostra a Figura 7.

11. Conclusão

Este trabalho apresentou em pequeno relatório dos mais recentes desenvolvimentos sobre análise morfológica das partículas finas. Um tratamento mais completo pode ser encontrado tanto na literatura referente ao assunto como em forma de livro¹⁸.

Alguns definições

1. fly ash – um produto de carvão de pedro depois de queimá-lo numa fábrica de energia
2. teste "spot" – um teste rápido na química
3. fuzzy – não distinto, falta de definição, vago
4. R-Mode – uma transformação ortogonal de tipo especial
5. Q-Mode – um método de análises de fatores

*Traduzido gentilmente, nos EE.UU. por Maria Saete Figueiredo Linhares.

¹NSF Program on Solids and Particulates Processing, Director Dr. M. Ojalvo.

²Ad Hoc Committee on particulate morphology of the Fine Particle Society, Chicago, August 1976.

³Veja por exemplo os livros de Allen, Cadle, Jelinec on Particle Size Analysis.

⁴J. K. Beddow, 2-part review in "Powder Metallurgy International," 1976. Part 1 in Vol. 2, pp. 69-76, Part 2 in Vol. 3, pp. 107-109 (co-authors A. F. Vetter and K. Sisson). See also Heywood, H., "Symposium of Particle Size Analysis," Trans. Inst. Chem. Eng., (1947), 25, pp. 14-24.

⁵W. McCrone and J. G. Delly, *Particle Atlas*, Ed. 2, 1973, 1979, Vol. 1-4, Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor, Michigan.

⁶J. K. Beddow, G. Philip, "On the Use of a Fourier Analysis Technique for Describing the Shape of Individual Particles," *Planseeberichte für Pulver Metallurgie*, 23, 1, (1975), pp. 3-13.

⁷R. Ehrlich and B. Weinberg, "An Exact Method for Characterization of Grain Shape" *J. Sed. Pet.*, 40, 1, pp. 205-212, 1970.

⁸T. P. Meloy, "A Hypothesis for Morphological Characterization of Particle Shape and Physicochemical Properties," *Powder Technology*, 16, 2, pp. 233-253, 1977.

⁹J. Tou, Oral Presentation, NSF Residential Research Workshop on Advanced Particle Morphology, Univ. of Iowa, August, 1977.

¹⁰J. K. Beddow, G. C. Philip and M. D. Nasta, "On the Use of Pattern Recognition Methods in Particle Shape Analysis," *Planseeberichte für Pulver Metallurgie*, 24, pp. 167-174, 1976.

¹¹R. Ehrlich, J. V. Mrakovich and B. Weinberg, "New Techniques for Stratigraphic Analysis and Correlation-Fourier Grain Shape Analysis Louisiana Offshore Pliocene," *J. Sed. Pet.*, 46, 1, March 1976.

¹²J. K. Beddow, "Physical Characterization of Particulates," *Powtech 77 Proceedings of 4th International Powder Technology and Bulk Solids Conference*, Harrogate, England, 1977, pp. 99-105, Heyden and Sons Ltd., London.

¹³C. Wang, J. K. Beddow and A. F. Vetter, "Statistical Classifiers in Particle Morphology Analysis" *Proceedings of International Powder and Bulk Solids Handling and Processing Conference*, Chicago, 1978 to be published in *J. Powder and Bulk Solids Technology*.

¹⁴J. Bezdek, "Fuzzy Mathematics in Pattern Classification," PH. D. Thesis, Cornell University, Ithaca, N. Y., 1973.

¹⁵J. M. Yarus, R. Ehrlich and B. F. Molnia, "Bottom Sediment Circulation Patterns in the Gulf of Alaska, Fourier Grain Shape Analysis," *Geological Society of America Meeting*, July 1978, Washington, Abstract.

¹⁶R. Ehrlich, J. M. Yarus and R. S. Pryzgocki, "Sources of Shoaling in Charleston Harbor," *J. Sed. Pet.*, in preparation.

¹⁷S-T. Fong, J. K. Beddow and A. F. Vetter, "A technique to Study the Effect of a Chemical Reaction on Particle Morphology," *Proceeding International Powder and Bulk Solids Conference*, Chicago, 1978, to be published.

¹⁸"Advanced Particulate Morphology" Ed. by J. K. Beddow and T. P. Meloy a ser publicado por CRC Press, Florida.

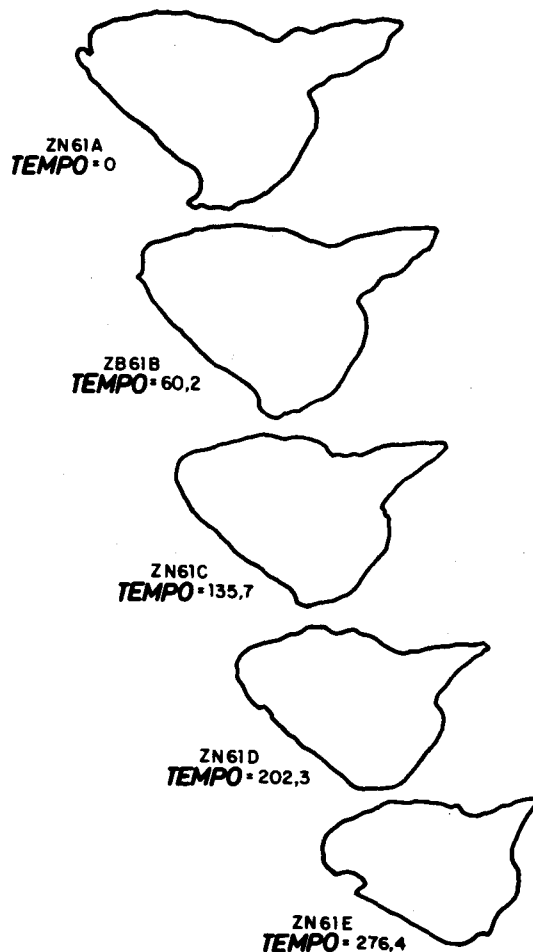


Figura 6

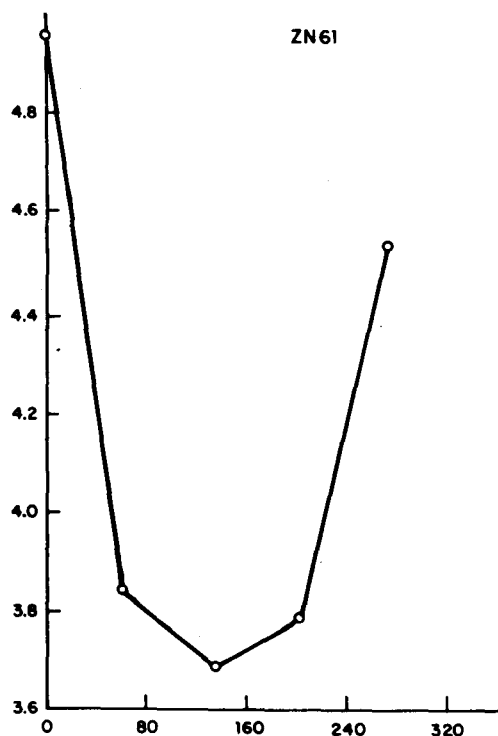


Figura 7