

## ANÁLISE DE IMAGEM COMPUTADORIZADA APLICADA AO PROCESSAMENTO DE MINERAIS

*J. Farias de Oliveira*<sup>1</sup>; *C. M. Juarez*<sup>2</sup>

A importância da análise computadorizada de imagem como método moderno de caracterização mineralógica para controle dos processos de beneficiamento de minérios cresceu rapidamente nos últimos anos. No entanto, por duas razões principais, ainda é limitada sua difusão na indústria mineral. De um lado, o desconhecimento do enorme potencial que a técnica pode oferecer em termos de produtividade das usinas instaladas ou em instalação. Em segundo lugar, o custo relativamente elevado de implantação de um sistema de análise de imagem.

O Sistema Integrado de Análise de Imagem (SIAI), implantado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ inclui um analisador de imagem IBAS-KONTRON interfaceado com um microscópio eletrônico varredura Cambridge 250 MK 3 e um instrumento para microanálise por dispersão em energia Link 860. No presente trabalho são apresentadas metodologias utilizadas na análise de imagem para fins de caracterização mineralógica aplicadas ao processamento de minérios.

### IMAGE ANALYSIS APPLIED TO MINERAL PROCESSING

The importance of image analysis as a modern method for mineralogical characterization applied to process control of mineral dressing increased in the last few years. However, it remains limited because of two main reasons. First, the little diffusion of the method as a tool for improving the productivity of plants. The second reason probably, is the relatively high investment to configurate and operate the whole system.

The Integrated System of Image Analysis recently installed in the Metallurgical and Materials Engineering Department of COPPE/UFRJ interfaces an image analyser IBAS-KONTRON, a scanning electron microscope Cambridge 250 MK 3, and an energy dispersive system Link 860. In this work are discussed the methods used in mineralogical characterization by image analysis applied to mineral processing.

<sup>1</sup>D.Sc., Professor do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68505, Rio de Janeiro, CEP: 21945, e pesquisador do CETEM-CNPq, Centro de Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, RJ.

<sup>2</sup>M.Sc., Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

## INTRODUÇÃO

A análise de imagem aplicada a minerais é uma técnica utilizada para determinar quantidades, distribuição de tamanhos de grãos, intercrescimentos e associações mineralógicas, grau de liberação e alteração de minerais em rochas ou minérios (1,2). Para a definição de um processo novo de beneficiamento ou inovações em processos já existentes são particularmente indispensáveis informações sobre a composição mineralógica percentual e o grau de liberação dos minerais valiosos.

Inicialmente, foi tentada a quantificação da imagem do microscópio ótico, obtida via uma câmara preto e branco, com base nas diversas tonalidades de cinza. No entanto, mesmo com a utilização posterior de uma câmara a cores, as dificuldades na discriminação dos minerais continuaram apresentando sérias limitações. A microscopia ótica como fonte para a análise automática de imagem não conseguiu consolidar-se, sendo definitivamente substituída pela microscopia eletrônica de varredura nos anos recentes.

Os avanços na área de informática, software e hardware, o desenvolvimento dos analisadores de raios X por dispersão em energia (EDS), o controle digital do microscópio eletrônico varredura (MEV), e os novos detetores de elétrons retroespalhados (BSE), possibilitaram melhores condições para a aplicação da análise automática de imagem na área mineral.

O Sistema Integrado de Análise de Imagem (SIAI) implantado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ, inclui um analisador de imagem IBAS-KONTRON (AI), interfaceado com um microscópio eletrônico varredura Cambridge 250 MK 3 (MEV), e um analisador de raios X por dispersão em energia Link 860 (EDX). O sistema deverá brevemente passar por nova fase de modernização com a transferência do IBAS para um novo conjunto MEV-EDS em fase de aquisição.

## EVOLUÇÃO DA ANÁLISE DE IMAGEM

Tem-se observado que as imagens produzidas com microscópio ótico não são adequadas para a análise de imagem automatizada. A discriminação dos minerais em função do nível de cinza é extremadamente precária. A birrefringência dos minerais, por exemplo, produz variações nos níveis de cinza, não existindo um recurso alternativo para a identificação nos casos duvidosos (3).

Uma análise comparativa das imagens produzidas com o detetor de elétrons retroespalhados no MEV e as imagens obtidas a partir do microscópio ótico, mostra que as primeiras são superiores em termos da discriminação entre espécies mineralógicas, além de permitir a identificação das fases utilizando um analisador de raios X por dispersão de energia (EDS).

Nos modernos métodos de análise automatizada as imagens do microscópio eletrônico de varredura são primeiramente discretizadas e digitalizadas por uma interface. O procedimento consiste em converter o sinal do detetor numa faixa de 256 níveis de cinza onde o nível zero corresponde ao preto e o nível 255 ao branco. Segundo a resolução fixada, normalmente 512 x 512 pixel, cada elemento da imagem em correspondência com cada ponto da amostra recebe um nível de cinza, de acordo com a intensidade do sinal transferido para a interface.

Numa imagem de elétrons retroespalhados (BSE) obtida a partir do microscópio eletrônico de varredura (MEV), a intensidade da sinal emitida pelo detetor é proporcional ao número atômico médio do mineral, observando-se níveis de cinza distintos para cada mineral. A discriminação entre diferentes minerais dependerá, assim, da variação de composição química dos minerais e das condições operacionais do MEV e detetor, que deverão ser mantidas constantes durante todo o processamento da imagem.

As amostras a serem analisadas devem ser planas, tais como seções polidas de rochas ou briquetes de material granular embutido em resina epoxy. Trabalha-se normalmente com aumento na faixa de 40x a 400x para as imagens de elétrons retroespalhados (BSE), pois aumento menor que 40x produz sombreamento que varia da parte superior do campo para a parte inferior, e com aumento maior que 400x tem-se a formação de um halo perturbador nas bordas das partículas.

### PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE IMAGEM

Os passos normalmente seguidos em um procedimento qualquer de análise de imagem são os seguintes (3):

- a. Aquisição da imagem;
- b. Aprimoramento da imagem;
- c. Identificação das fases;
- d. Segmentação;
- e. Medições das características;
- f. Procesamento dos dados obtidos.

#### a. Aquisição da imagem

As imagens normalmente utilizadas obtidas a partir do MEV são as de detetores de elétrons secundários (SE) e detetores de elétrons retroespalhados (BSE). Trabalha-se, preferencialmente, com o detetor de elétrons retroespalhados (BSE) cuja imagem é discretizada e digitalizada por uma interface e transferida ao analisador de imagens, num formato pré-fixado, com diferentes níveis de cinza (Figura 1A).

As imagens de raios X (EDS) devem ser obtidas com velocidades de varredura menores do que as utilizadas para imagens BSE. Tem-se como objetivo tempos maiores para a contagem em cada ponto, normalmente 10 ou mais milisegundos, visando obter uma maior relação sinal/ruído.

Para poder discriminar os minerais em função dos níveis de cinza, a faixa que caracteriza um mineral deve permanecer constante para as diferentes posições da platina e para diferentes aumentos. Para isso, têm que ser estáveis a voltagem de aceleração e a corrente do feixe de elétrons.

Cada imagem num formato de 512x512 pixels representa 262.144 bytes. Portanto, a capacidade de memória em um analisador de imagem têm que ser suficientemente grande para não apresentar limitações de trabalho. Para isso, o Sistema Integrado de Análise de Imagem (SIAI) foi configurado com 8 Mbytes de memória de imagem, 4 Mbytes de RAM para o sistema e programas, e uma capacidade livre em disco rígido fixo de 50 Mbytes. Além disso, possui 2 drives tipo Bernoulli para discos rígidos removíveis de 44 Mbytes.

#### b. Aprimoramento da imagem

Para incrementar a discriminação dos níveis de cinza na imagem, é necessário utilizar diversos algoritmos para, por exemplo, melhorar as bordas ou realizar equalizações da imagem.

O aprimoramento das bordas devido à presença de halos, e o aumento do contraste da imagem é efetuado através da transformação dos baixos gradientes nos níveis de cinzas por gradientes maiores.

Entre os algoritmos que têm por objetivo realizar equalizações encontram-se aqueles que trocam os diferentes níveis de cinza por um mesmo nível comum dentro de uma área definida. Podem também ser utilizados algoritmos que modificam o histograma de frequência dos níveis de cinza da imagem.

### c. Identificação dos minerais

Cada mineral estará representado por uma faixa de cinzas que lhe é característica e que é decorrente do seu número atômico médio. A identificação de cada faixa é realizada com o analisador de raios X (EDS), por amostragem de vários pontos da fase que se deseja identificar.

No caso de apresentar-se mais de um mineral para uma faixa de níveis de cinzas, o procedimento automático para sua identificação deverá realizar-se através de um mapeamento de raios X para os elementos diferenciadores.

### d. Segmentação

A etapa de segmentação compreende separar em diferentes imagens as faixas de cinzas correspondentes a cada mineral. Em seguida, a fração de imagem com determinada faixa de cinzas é transformada numa imagem binária, onde o mineral selecionado passa a ter o nível 255 (branco) e o restante da imagem nível zero (preto), Figuras 1B, 1C e 1D.

Também são utilizados diversos algoritmos nesta etapa cuja finalidade é preparar as imagens para sua avaliação. Entre os diferentes algoritmos encontra-se o utilizado para extrair pequenos detalhes sem alterar a imagem, e o conjunto de funções para separar as partículas eliminando o contato entre elas.

### e. Medições das características

Uma classificação das características avaliadas numa imagem é a seguinte:

- Objeto específico: são medições feitas em cada grão ou partícula, previamente identificadas, por exemplo, área ou perímetro.

- Campo específico: são medições de uma característica global da imagem binária, por exemplo, área coberta pelos grãos de uma imagem.
- Análise da corda: compreende medir o comprimento da interseção de uma linha horizontal sobre detalhes da imagem para diferentes varreduras horizontais.
- Densitométrica: são medições usadas para comparar imagens, por exemplo, a área de uma partícula e a porcentagem de um mineral em uma mesma partícula.

## 6. Processamento dos dados obtidos

Os novos analisadores de imagem usam o sistema operativo MS-DOS que torna possível utilizar outros softwares além do fornecido pelo próprio fabricante, flexibilizando o trabalho e a interpretação da análise.

## TECNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM

A análise de imagem simples visando a determinação da quantidade de um mineral ou análise de tamanho pode ser feita diretamente na imagem binária de cada mineral. Entre as análises que necessitam uma preparação da imagem estão a percentagem de inclusões e as associações de minerais.

### Distribuição de tamanho

Vários tipos de análises de tamanho podem ser realizados usando-se diferentes parâmetros, fazendo uma análise de corda ou medindo a área das partículas. Para definir o tamanho da partículas, pode-se utilizar o diâmetro máximo ou mínimo, o diâmetro circular equivalente ou o diâmetro quadrado equivalente (Figura 2). Os dois últimos são obtidos a partir da área de cada partícula. O diâmetro quadrado equivalente é praticamente igual ao tamanho da partícula caracterizado pelas aberturas de uma peneira (4).

## Quantidade de mineral

As quantidades de minerais podem ser determinadas avaliando-se o comprimento de corda total, ou a área total coberta pelas partículas nas imagens binárias. Utilizando-se funções que especificam o parâmetro a avaliar, por exemplo a área, transfere-se os resultados a arquivos para serem lidos posteriormente (Tabela 1). Como o comprimento e a área são proporcionais ao volume, as percentagens em peso são obtidas utilizando-se os pesos específicos de cada mineral.

## Associações de minerais e inclusões

No estudo dos processos é muito importante conhecer as interrelações entre um mineral qualquer e os minerais adjacentes, como também é necessário, frequentemente, determinar a fração de área ocupada por inclusões. O grau de liberação pode ser determinado através da percentagem do perímetro em contato com o outro mineral ou como a percentagem da área do mineral correspondente a partículas livres. Para avaliar o perímetro e as áreas utilizam-se diversos algoritmos, entre os quais pode-se mencionar aqueles para dilatar as fases e as operações booleanas, conjuntamente com algoritmos especiais da KONTRON para identificar objetos ou características nas imagens binárias (Figura 3).

## CONCLUSÕES

A análise de imagem computadorizada permite extrair uma enorme quantidade de informações comparada à análise mineralógica tradicional. O Sistema Integrado de Análise de Imagem (SIAI) constitui uma ferramenta de elevado potencial na área de tecnologia mineral como em outras áreas da ciência dos materiais.



## BIBLIOGRAFIA

1. Jones, M. P., "Applied Mineralogy - A quantitative Approach", Graham and Trotman, 1987.
2. Oliveira, J. F., "Caracterização Tecnológica por Análise de Imagem : Um Método Automático de Estudos Mineralógicos", Anais do XIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, pp:325-332, São Paulo, 1988.
3. Petruk, W. (Editor), "Course on Image Analysis Applied to Mineral and Earth Sciences", Mineralogical Association of Canada, Vol:16, 1989.
4. Petruk, W., "Automatic Image Analysis for Mineral Beneficiation", Journal of Metals, pp:29-31, April, 1988.

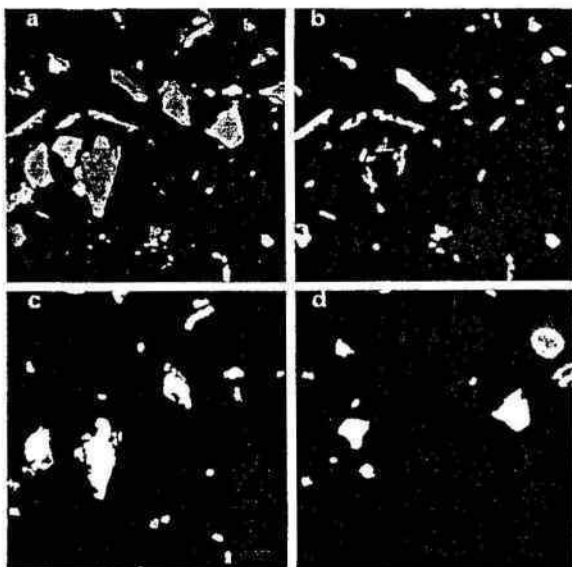


Figura 1 - Imagens no IBAS-KONTRON de um pré-concentrado de flotação do minério de cobre de Carajas: a) Imagem de elétrons retroespalhados, b) Quarzo, c) Óxido de ferro e d) Calcocita.

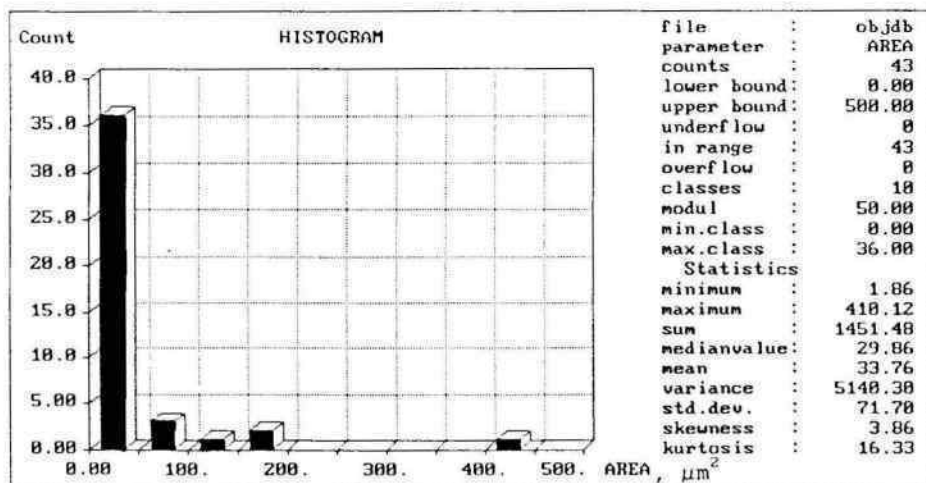


Figura 2 - Histograma de distribuição de tamanho das partículas contidas no campo visual da Figura 1.

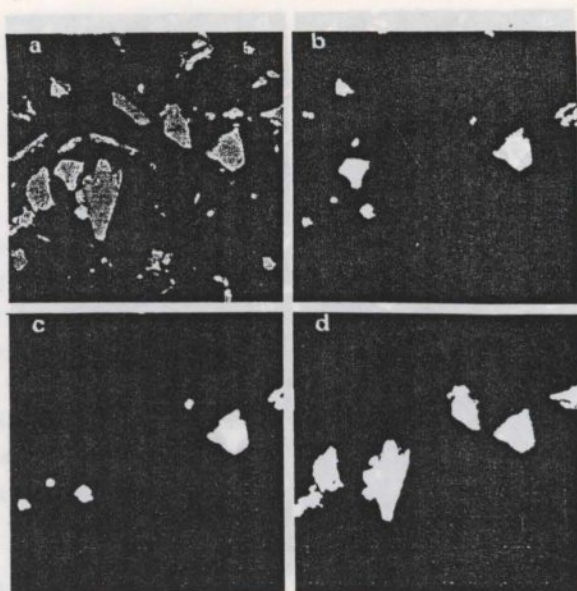


Figura 3 - Associação mineralógica correspondente ao campo visual da Figura 1: a) Imagem de elétrons retroespalhados, b) Fase de calcocita, c) Fase de calcocita que está ligada a óxido de ferro, e d) Partículas mistas que contêm calcocita ligada a óxido de ferro.

Tabela 1 - Percentagem de área ocupada pelos minerais discriminados na Figura 1.

Mineral	%
Quarzo (Fig.1b)	30,3
Óxido de ferro (Fig.1c)	38,8
Calcocita (Fig. 1d)	20,7
Outros	10,2