

ESTUDO DAS TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA PROCESSOS DE MINERAÇÃO¹

Marco Aurélio Soares Martins²
Barbara Burgarelli Alves de Aguiar³
Mônica Guimarães Vieira⁴
Rodrigo Cesar de Miranda⁵
Hugo Montalvão Gontijo⁶

Resumo

Sistemas de visão artificial são cada vez mais utilizados para auxiliar seres humanos a realizar diferentes tarefas em diversas áreas. Esses sistemas são capazes de reconhecer padrões em imagens complexas, podendo disponibilizar vários dados. Atualmente, os sistemas de visão são utilizados tanto no monitoramento de tráfego, que emprega radares para reconhecimento de placas veiculares, quanto nas indústrias alimentícias e metalúrgicas para rígidas inspeções de qualidade. O seu uso na mineração ocorre na medição da velocidade de transbordo em flotações, determinação da forma e do tamanho de pelotas, obtenção da tendência do teor de minerais e substituição das análises laboratoriais de granulometria. Com essa ferramenta avançada pode-se alcançar melhoras significativas no processo qualidade, na produtividade e, principalmente, na redução de custos na mineração. O objetivo do trabalho foi contemplar a atual situação da análise de imagem na mineração e vislumbrar as possíveis aplicações que esteja em desenvolvimento.

Palavras-chave: Análise de imagem, Granulometria, Medição de teor.

STUDY OF IMAGE ANALYSIS TECHNIQUES FOR MINING PROCESSES

Abstract

Artificial vision systems are increasingly used to assist humans to perform different tasks in different areas. These systems are able to recognize patterns in complex images, which can provide multiple data. Currently, vision systems are used both in monitoring traffic, which uses radars for vehicular plate recognition, as in metallurgical and food industries to strict quality inspections. Their use in mining occurs in measuring the speed of froth over the lip of a cell, in determining the shape and size of pellets, in obtaining from the tendency of mineral content and as a replacement for laboratory analysis of particle size. With this advanced tool it's possible to achieve significant improvements in quality, productivity, and especially in reducing costs in mining. The objective of this paper is to contemplate the current situation of image analysis in the mining and glimpse the potential applications that are being developed.

Keywords: Image analysis, Granulometry, Content measurement.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Eng. Minas, Operações, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

³ Eng. Controle e Automação, Automação, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

⁴ Eng. Química, Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

⁵ Eng. Químico MSc, Processos, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

⁶ Eng. Controle e Automação, Automação, CEMI – Tecnologia de Processos e Engenharia

1 INTRODUÇÃO

Dos nossos cinco sentidos, a visão é a mais avançada, portanto, não é surpreendente que as imagens desempenham um papel tão importante na percepção humana. Contudo, ao contrário dos humanos que estão limitados à faixa visual do espectro eletromagnético, as máquinas cobrem quase todo o espectro, variando de radiação gama a ondas de rádio. Elas podem operar em imagens geradas por fontes que os humanos não estão habituados a associar como imagens. Essas fontes incluem o ultra-som, a microscopia eletrônica e as imagens computacionais. Por conseguir processar uma faixa mais ampla que o olho humano, o processamento de imagem digital abrange um campo vasto e variado de aplicações.

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional de intensidade da luz, $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas espaciais e a amplitude de f em qualquer par de coordenada (x, y) , é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem naquele ponto. Como a luz é uma forma de energia, $f(x, y)$ deve ser positiva e finita,⁽¹⁾ isto é:

$$0 < f(x, y) < \infty$$

Quando x , y e o valor da amplitude f são finitos, em quantidades discretas, chamamos a imagem de *imagem digital*. Note que a imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada um tem um valor e um lugar particular. Estes elementos são referidos como elementos da imagem (*picture elements*), *pels* e *pixels*. *Pixel* (aglutinação de *picture element*) é o termo mais utilizado para designar os elementos de imagem digital, sendo esse elemento o menor ponto que forma uma imagem digital, e o conjunto de milhares de pixels formam a imagem inteira.

Uma das primeiras aplicações da imagem digital foi na indústria jornalística, quando fotos foram enviadas pela primeira vez por um cabo submarino entre Londres e Nova York. A introdução do sistema *Bartlane* de transmissão de fotos por cabo, no início de 1920, reduziu o tempo necessário para transportar uma figura pelo Atlântico de um pouco mais que uma semana para menos de três horas.



Figura 1 - Uma foto digital produzida em 1921.⁽¹⁾

* *Bartlane*: aglutinação dos nomes dos dois inventores, Harry G. Bartholomew e Maynard D. MacFarlane, ambos de *Daily Mirror* de Londres, Inglaterra. Método utilizado para transmissão de imagem através de cabos no Atlântico.

Embora o caso anterior envolva imagens digitais, ele não é considerado um resultado de processamento digital de imagens, pois os computadores não estavam envolvidos em sua criação. Assim, a história de processamento de imagem digital está intimamente ligada ao desenvolvimento do computador digital. As imagens digitais necessitam do poder computacional e de armazenamento, tornando os progressos no domínio do processamento digital dependentes do desenvolvimento dos computadores e de tecnologias de apoio, que incluem armazenamento de dados, visualização e transmissão. O primeiro computador avançado o suficiente para efetuar essa tarefa de carregar os dados do processamento de imagens só foi aparecer no início de 1960.⁽¹⁾

Dos anos 1960 até os dias atuais, o campo de processamento de imagens cresceu intensamente. Além de empregadas na medicina, em ciências biológicas e em programas espaciais, as técnicas de processamento de imagem e sistemas de visão estão sendo utilizadas em um vasto campo de aplicações, abrangendo tanto no monitoramento de tráfego, que emprega radares para o reconhecimento de placas veiculares, quanto nas indústrias alimentícias e metalúrgicas para rígidas inspeções de qualidade.

O objetivo deste artigo é fazer uma revisão sobre as atuais aplicações do processamento de imagem na mineração, que pode ocorrer na medição da velocidade de transbordo em flotações, determinação da forma e do tamanho de pelotas, obtenção da tendência do teor de minerais e substituição das análises laboratoriais de granulometria, e também fazer uma abordagem para desenvolvimentos futuros.

2 APLICAÇÕES

Através de uma pesquisa realizada para a Vale, Wagner et al.⁽²⁾ mostraram a importância da análise microestrutural das pelotas de minério de ferro, com o intuito de desenvolver produtos e avaliar a sua qualidade. As pelotas foram cortadas ao meio e embutidas em resina epóxi, depois os blocos foram lixados e polidos. A aquisição de imagens foi realizada por um microscópio óptico de luz refletida motorizada e controlada por um computador. O trabalho contribuiu para a compreensão dos fenômenos de aglomeração, das propriedades das pelotas e de seu comportamento nos processos de redução nos alto-fornos. A composição mineralógica das pelotas tornou-se um importante parâmetro a ser controlado, assim como sua porosidade e o arranjo espacial dos poros.

Silva⁽³⁾ é mostrado como o aprimoramento de técnicas de análise de imagem auxiliou no controle do processo de flotação da Samarco Mineração S/A. Foi desenvolvido um instrumento analisador, que é composto por um conjunto de mecanismos, câmera, microcomputador e software, que discrimina por aspectos de coloração e forma os grãos correspondentes ao quartzo em cada quadro de imagem e fornece valores de teor de sílica em intervalos mais curtos, em comparação às 4 horas que eram necessárias para obter resultados de teor através de análises de laboratório. Esse instrumento trouxe ganhos significativos em qualidade, com a redução de variabilidade de sílica no concentrado em 31%, e produtividade, com a redução da perdas de ferro no rejeito de 13,5%, além da redução de custos.

Brown et al.⁽⁴⁾ reportaram o uso da velocidade da espuma, nível, taxa de adição de espumante e taxa de aeração em um simples esquema para controlar um circuito de flotação. Miettunen, Kaartinen e Hätönen⁽⁵⁾ reportaram o uso de um sistema de controle

automático para uma planta de flotação de zinco. De maneira similar, Kaartinen, Haavisto e Hyötyniemi⁽⁶⁾ relataram o uso da coloração vermelha da espuma, no tamanho da bolha, na taxa de colapso das bolhas, assim como nas taxas de adição de reagentes para controlar uma célula *rougher* em um circuito de flotação de zinco. Mais recentemente, Liu e Macgregor⁽⁷⁾ propuseram o uso de um modelo casual para prever a futura aparência da espuma baseado em manipulação e variáveis de processo. Os resultados sugerem a possibilidade de usar um modelo avançado baseado em abordagens nos circuitos de controle da flotação pelo aspecto da espuma.

O trabalho de Lessa et al.⁽⁸⁾ descreve um método automático para auxiliar ou ser uma alternativa à contagem e classificação (mineralógica e textual) visual de partículas de *pellet feed* realizada ao microscópio óptico de luz refletida na Samarco Mineração S/A. A microscopia óptica e a análise digital de imagens compõem um interessante ferramental para a caracterização tecnológica das diferentes tipologias de minérios de ferro, partícula por partícula. Estas técnicas permitem a obtenção de informações fundamentais, qualitativas e quantitativas, acerca da mineralogia, porosidade, forma das partículas, textura do minério, associações minerais e liberação. O método automático para contagem e classificação de partículas de hematita em amostras de *pellet feed* foi testado em três amostras e apresentou um desempenho acima de 85% de acerto global.

Comercialmente vários *softwares* com análise de imagem estão disponíveis. Atualmente para o processo de flotação encontramos: OptVision Froth (CEMI), SmartFroth (UCT), JKFrothCam (JKMRC), ACEFLOT(Chile), Frothmaster (Outotec), VisioFroth (Metso). Para a análise de granulometria temos: OptVision Rock (CEMI), PSI (Particle size analyzers) (Outotec), VisioRock (Metso), OptAnalyzer (CEMI). E para a análise de tamanho de pelotas: OptVision Pellet (CEMI), VisioPellet (Metso). O uso desses *softwares* promove o aumento da produtividade, do rendimento e da disponibilidade dos equipamentos, a diminuição de custos e do consumo desnecessário de reagentes. Além de ter o poder de substituir a análise granulométrica laboratorial, inclusive na avaliação das frações mais finas.

3 ESTUDO DE CASO

Existe uma família de *softwares* de visão no mercado chamada OptVision, desenvolvida pela CEMI, que faz a análise de imagem em diferentes áreas do processo de beneficiamento mineral. Essa família é composta pelo OptVision Froth, OptVision Rock, OptVision Pellet e o OptVision Analyzer.

O OptVision Froth analisa o transbordo da espuma de células ou colunas de flotação, disponibilizando a velocidade de escoamento da espuma e cor das bolhas, que são parâmetros importantes para o controle do processo de flotação. Esse programa, aliado a um controle avançado, é capaz de reduzir as perdas nos rejeitos, o consumo de reagentes e aumentar a produtividade.

O OptVision Rock retorna as faixas granulométricas das rochas. Para obtenção da granulometria, câmeras são instaladas sobre as correias transportadoras e a medida pode ser utilizada para regular a abertura dos britadores em um circuito de britagem ou auxiliar no controle de um moinho SAG em um circuito de moagem, por exemplo.

O OptVision Pellet estima a granulometria de pelotas em fornos de pelotização de minério de ferro. Nesse sistema as câmeras podem ser instaladas nas descargas

dos discos de pelotamento. A medida de granulometria é importante para definir corretamente a velocidade de rotação e alimentação dos discos.

Muitas vezes a análise de rochas em correias transportadoras (quando o minério tem uma faixa granulométrica muito variada) mascara a verdadeira faixa granulométrica existente, pois a fração fina fica por baixo da fração mais grossa. O OptAnalyzer é um sistema formado por equipamentos como peneira, silos, e câmeras, que preparam as rochas para a análise granulométrica. Ele foi construído com o intuito de substituir a análise laboratorial, inclusive mensurando as partículas das frações mais finas, tendo a vantagem de fazer a análise em 30 minutos, muito mais rápido em comparação com a análise laboratorial de 4 horas.

Utilizaremos a família de OptVision, acima citada, para demonstrarmos as etapas do processamento de um sistema de visão e os equipamentos necessários para sua montagem.

A etapa de aquisição da imagem é a mais trabalhosa, pois são necessários mecanismos que preparem o ambiente para tal, especialmente se essa aquisição for feita em tempo real para compor um controle avançado do processo. Para compor esse sistema, além do *software* é necessário utilizar uma câmera com boa resolução, uma câmara escura com uma iluminação adequada para permitir o tratamento e a segmentação da imagem. A Figura 2 apresenta suportes utilizados na flotação e nas correias transportadoras, que, além de garantir um ambiente adequado, são projetados para facilitar a manutenção do sistema no local.



(a)



(b)

Figura 2 - Suportes para instalação das câmeras e luminárias do sistema de visão: (a) em flotação e (b) em correia transportadora.

Na Figura 3 é possível observar o sistema de iluminação usando LEDs, já que na indústria mineral a manutenção é complicada, estes possuem uma vida útil de até 50.000 horas. A disposição aparentemente aleatória dos leds possibilita a homogeneização da área a ser analisada, permitindo uma melhor análise da imagem.

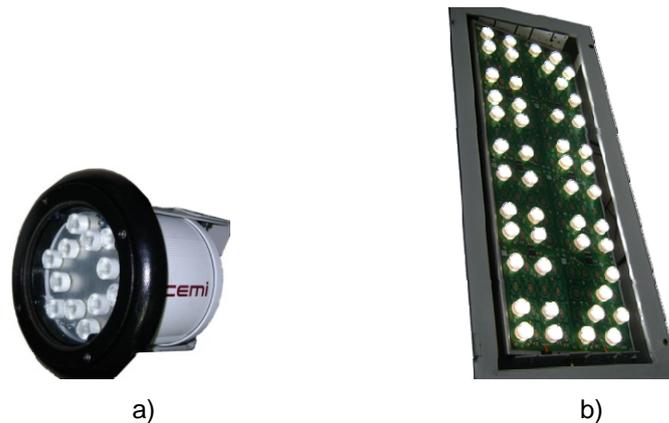


Figura 3 - Luminárias para garantir uma iluminação homogênea para a análise de imagem: a) projetor de 12 leds usado para flotação; b) luminária de 48 leds para análise de rochas em correia.

Todos os *softwares* de visão dessa linha seguem etapas pré-determinadas para a aquisição, pré-processamento, segmentação, representação e descrição, reconhecimento e interpretação. A aquisição e pré-processamento da imagem são as etapas nas quais o fluxo de vídeo é decodificado em sequência de imagens (*frames*), tornando-a digital e retirando qualquer ruído presente, ou seja, preparando-a para extrair os dados almejados. Cada *frame* que foi capturado passa por uma rotina de pré-processamento e validação, que inclui:

- extração da região de interesse (ROI), conforme a sua posição, orientação angular e parâmetros de calibração de escalas definidas;
- aplicação opcional de um filtro dinâmico-adaptativo para compensar a não uniformidade de iluminação;
- ajuste de contraste e brilho (manual ou através de normalização de um histograma); e
- validação da intensidade, ou seja, se a imagem apresenta uma intensidade saturada, de brilho baixo ou alto, fora do nível permitido e durante uma determinada quantidade de *frames*, o sistema alerta o usuário e suspende o processamento, até que as imagens voltem a condições normais.

Na etapa de processamento, determinado algoritmo de análise é aplicado à imagem pré-processada, e posteriormente são estimadas as medidas. Podem ser visualizados os valores instantâneos, médias por ciclo ou médias móveis. Ao final de cada ciclo todas as variáveis coletadas são disponibilizadas para o sistema-cliente por comunicação OPC.

Por exemplo, OptVision Froth (Figura 4), utiliza um algoritmo adaptativo, baseado em estimulação de fluxo ótico (*optical vector flow*) para detecção e análise da velocidade de movimento.

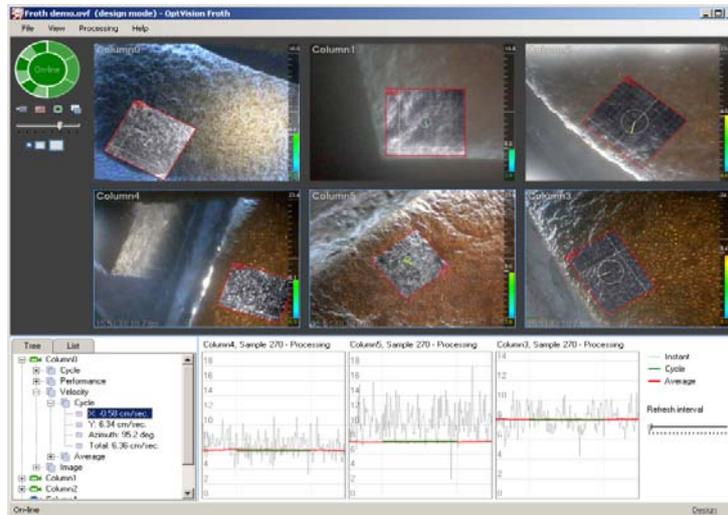


Figura 4 - Tela principal do OptVision Froth. análise velocidade de espuma.

As técnicas de filtragem adaptativa são aplicadas para garantir a estimação de velocidades adequadas, mesmo se somente uma parte isolada da imagem apresenta movimento, no caso, por exemplo, de acontecer um "endurecimento" ou desidratação de espuma. O programa permite ainda processar múltiplos fluxos de vídeos na forma paralela, fornecendo as possibilidades de equilibrar o desempenho de processamento e o carregamento dos recursos *hardware* disponíveis de maneira flexível.

Os sistemas se aplicam tanto a circuitos de flotação direta, onde o minério de interesse é a parte flotada, como é o caso de zinco, ouro e chumbo, e circuitos de flotação reversa, quando o contaminante é a parte flotada e o minério de interesse é a parte afundada, como é o caso do ferro.

O OptVision Rock está ilustrado na Figura 5. Ele utiliza uma modificação do algoritmo *Watershed* para detecção dos contornos (segmentação) das partículas formadas pelo processo de cominuição.

O algoritmo possui os seguintes ajustes:

- tamanho de *markers*: controla a quantidade de partículas grossas, segmentadas em partes;
- filtro de forma: permite eliminar as segmentações que apresentam os contornos irregulares;
- filtro de fundo: permite eliminar a segmentação dos elementos de fundo, tais como correia ou camada de material mais fino que esta fora da faixa de análise.

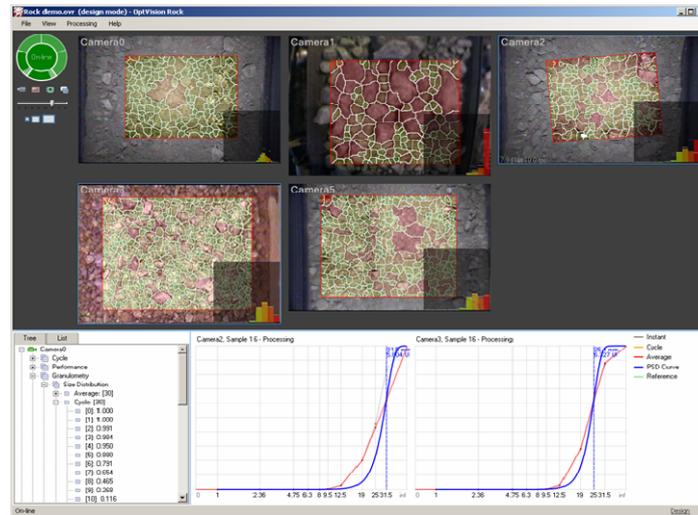


Figura 5 - Tela principal do OptVision Rock; análise de tamanho de rochas.

O OptVision Pellet é baseado em filtro adaptativo de textura e algoritmo original de detecção das formas elípticas pelo gradiente da intensidades utilizando programação não-linear, que surgiu das técnicas de *Active Contour Detection* e *Snakes*. O algoritmo possui vários parâmetros que controlam posições, formas e validações das partículas detectadas que permitem atingir a melhor precisão nas condições diversas de iluminação e filmagem. Na etapa de análise e coleta de resultados, ambas aplicações de OptVision Rock e o Pellet utilizam um modelo de granulometria, que inclui estimação de tamanhos e volumes das partículas. Em seguida os parâmetros da distribuição volumétrica Rosin-Rammler estão estimados através dos resultados de classificação de partículas analisadas. Na Figura 6 apresenta-se o OptVision Pellet.

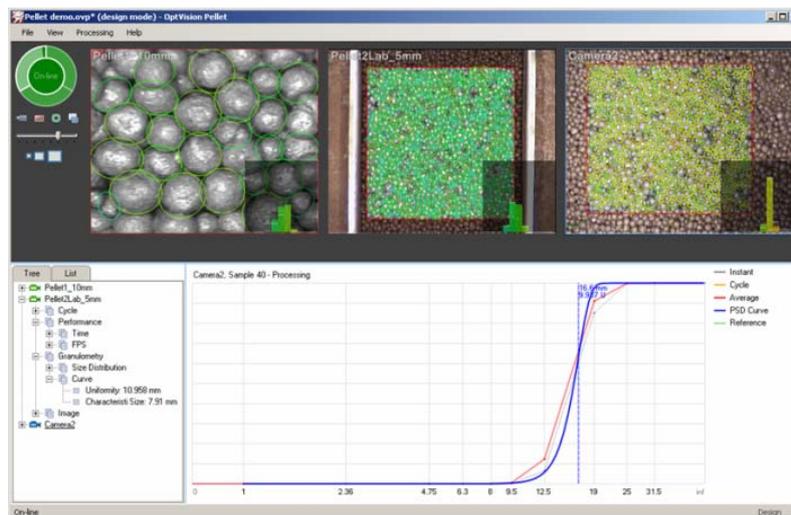


Figura 6 - Tela principal do OptVision Pellet; análise do tamanho de pelotas.

4 PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar de já existirem computadores com excelentes capacidades de processamento de dados e com alta capacidade de armazenamento, infelizmente ainda não o temos aplicados nos processos minerais. Também já possuímos as câmeras com muitos *frames* por segundo, mas nada comparado com a câmera de alta velocidade (*high speed film cameras*) em uma alta resolução. Poderíamos aplicá-la, por exemplo, para acompanhar com precisão a taxa de colapso das bolhas em colunas de flotação, e correlacioná-la em um controle avançado, manipulando a injeção de ar e a adição de espumante. Assim, poderíamos montar uma estratégia de controle mais completa, com mais uma variável controlada. Como visto no estudo de casos, o que temos hoje é o controle da velocidade de transbordo pela injeção de ar e pelo nível.

Geralmente, fazer a medição de partículas finas demora um tempo que é precioso para o processo. Um analisador de finos é de extrema importância para acompanhar a qualidade do produto e ser parâmetro de controle do processo, como por exemplo, pode servir de parâmetro de controle para um circuito de moagem. Os aparelhos hoje encontrados não fazem essa análise através da imagem. A CEMI, fazendo uso das ferramentas disponíveis, está desenvolvendo um analisador de granulometria de finos por análise de imagem, e pretende substituir assim, a análise laboratorial dessas partículas e outros aparelhos, que costumam ter a manutenção complexa.

Além do controle por pressão feito nos ciclones, podemos usar a análise de imagem filmando o *apex* para saber como este está operando dependendo do ângulo de saída da polpa. Se estiver em formato de guarda-chuva o *apex* está muito aberto, muito material grosso no *underflow* do ciclone, este pode entrar em cordão e tomar o formato tubular. Quando a descarga no *underflow* for na forma de um cone de ângulo pequeno, ou chuva, que seria a posição adequada de trabalho. A análise ajudaria o ciclone a ser mais eficiente na classificação das partículas e a não perder a produção pelo mau funcionamento deste.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de imagens encontra-se em um estágio bem avançado em várias aplicações. Na mineração existem produtos confiáveis que, aliados ao um controle avançado de processos, conseguem uma melhora significativa na qualidade, na produtividade e, principalmente, na redução de custos no processo em que for aplicado.

REFERÊNCIAS

- 1 GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 3 ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2008.
- 2 WAGNER, D. T.; ROUCO, H. V.; GOMES, O. F. M.; PACIORNIK, S.; VIEIRA, M. B. *Caracterização de Pelotas de Minério de Ferro por Microscopia Digital e Análise de Imagens*. 2009.
- 3 SILVA, A.J. *Sistema de Medição Teor de Sílica em Minério de Ferro por Análise de Imagem*. In: Tecnologia em Metalurgia e Materiais. São Paulo, v.1, n.3, p.64-67, jan-mar. 2005.

- 4 BROWN, N.; BOURKE, P.; RONKAINEN, S.; VAN OLST, M., 2001. *Improving Flotation Plant Performance at Cadia by Controlling and Optimizing the Rate of Froth Recovery using Outokumpu Frothmaster™*. Proceedings of 33rd Annual Meeting of Canadian Mineral Processors, Ottawa, Canadá, p. 25-36.
- 5 MIETTUNEN, J.; KAARTINEN, J.; HÄTÖNEN, J., 2001. *Image Analysis Based Control of Zinc Flotation*. Regional APCOM 2011, Tampere, Finlândia, 3-5 de Setembro, p. 267-275.
- 6 KAARTINEN, J.; HAAVISTO, O.; HYÖTYNIEMI, H. 2006. *Machine-Vision-Based Control of Zinc Flotation - a case study*. Control Engineering Practice 14, 1455-1466.
- 7 LIU, J.J.; MACGREGOR, J.F., 2007. *Froth-Based Modelling and Control of Flotation Processes*. Minerals Engineering 21 (9), p. 642-651.
- 8 LESSA, A.M.; GOMES, O.D.M.; FERREIRA, H.O.; D'ABREU, J.C.; PACIORNIK, S. *Classificação Automática de Hematita Especular e Hematita Porosa em Pellet Feed por Análise Digital de Imagens*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 8., Salvador, 2007. Anais... São Paulo: ABM, 2007. v. 2, p. 582-588.