

## **CLASSIFICADOR QUALITATIVO DE TEOR DE SÍLICA NO CONCENTRADO DE FLOTAÇÃO REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO POR TAMANHO DE BOLHAS**

**SILVA, F.T.D.<sup>1</sup>, GALÉRY, R.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Samarco Mineração S/A. flaviot@samarco.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas.  
rgalery@demin.ufmg.br

### **RESUMO**

Na prática industrial, operadores experientes dos circuitos de flotação de minério de ferro utilizam as características denominadas “aspecto” visual da espuma para a tomada de decisões e parametrização do processo. Este aspecto é descrito frequentemente como características visuais da espuma. Entre as características visuais mais exploradas encontram-se a textura, velocidade de deslocamento, cor e tamanho de bolhas, sendo esta última a mais complexa das medidas devido a características específicas das imagens obtidas, requerendo que sejam capturadas com iluminação apropriada para aplicação dos algoritmos tradicionais. O presente trabalho estudou a utilização do algoritmo de espectro de textura como classificador qualitativo de teores de sílica no concentrado através de classes de tamanhos de bolhas em espuma de flotação reversa de minério de ferro em coluna na Samarco Mineração S/A.

**PALAVRAS-CHAVE:** visão computacional; flotação; tamanho de bolhas; minério de ferro.

### **ABSTRACT**

In daily practice, experienced operators use flotation circuit characteristics called "aspect" of froth for visual decision-making process and parameterization. This is often described as visual characteristics of the froth. Among visual features are more exploited texture, speed, color and size of bubbles, the latter being the more complex measures due to the specific characteristics of the images obtained by requiring light appropriate to apply the traditional algorithms. The present study investigated the use of spectrum texture algorithm to classify qualitative silica concentrate grade through bubble size classes in reverse column flotation of iron ore at Samarco S/A.

**KEYWORDS:** machine vision; flotation; froth bubbles size; iron ore.

## 1. INTRODUÇÃO

A flotação catiônica reversa de quartzo é o método de concentração de minérios de ferro itabiríticos mais utilizado para a produção de pellet feed. O quartzo é flotado com eteraminas parcialmente neutralizadas com ácido acético e os minerais de ferro são deprimidos por amidos não modificados.

Na etapa de concentração do minério de ferro, muitas variáveis afetam o desempenho operacional do processo de flotação. Na operação diária, as variações na composição do minério enviados para as usinas trazem embutidos diversos fatores que nem sempre explicam de forma satisfatória o comportamento observado na prática industrial. É reconhecido pelos operadores e nas pesquisas sobre a flotação a forte relação entre o desempenho da flotação e a estrutura da fase espuma (Glembotskii, 1972; Cutting *et al.*, 1986; McKee, 1991).

Essas variações se traduzem em características visuais na superfície da espuma, comumente denominada pelos operadores de aspecto, modificando sua aparência e permitindo a classificação. Estes julgamentos são utilizados para modificar os parâmetros quantitativos de controle do processo. Operadores experientes conseguem prever várias características operacionais com um nível alto de precisão (Morar *et al.*, 2005).

O uso de técnicas de processamento de imagens digitais tem sido utilizado para classificar e determinar a performance da fase espuma em diversas aplicações de flotação direta de diversos minerais, em especial cobre, platina e zinco e carvão (Bothat *et al.*, 1999; Holtham e Nguyen, 2002; Kaartinen e Koivo, 2002; Heinrich, 2003; Kaartinen *et al.*, 2006; Morar *et al.*, 2005). De forma geral, propriedades visuais da espuma de flotação como mobilidade, cor, tamanho de bolhas e texturas são as relatadas com frequência pelos operadores como informações extraídas da observação, e não por coincidência, são as propriedades mais estudadas pelas técnicas de tratamento de imagens (Silva, 2012).

## 2. ESPUMA DE FLOTAÇÃO

As bolhas na fase espuma estão separadas por finas lamelas. As interseções das lamelas são chamadas de bordas de Plateau, onde três lamelas se encontram. Quatro bordas de Plateau se encontram em um vértice. As bordas de Plateau e vértices contêm praticamente todo o líquido em uma espuma. Como a curvatura da interface e a tensão superficial exercem uma pressão negativa que drena o líquido das lamelas, só uma fração muito pequena do líquido em uma espuma reside nelas (Figura 1)

Em uma espuma de 3 fases (ar, líquido e sólido), as lamelas contêm partículas hidrofóbicas aderidas às bolhas. O fenômeno de coalescência na espuma ou explosão das bolhas na superfície, ambas devido à ruptura de lamelas, resulta na liberação de partículas inseridas dentro das bordas de Plateau. Partículas não ligadas às lamelas movem-se livremente através das bordas de Plateau e podem ser drenadas de volta para a polpa.

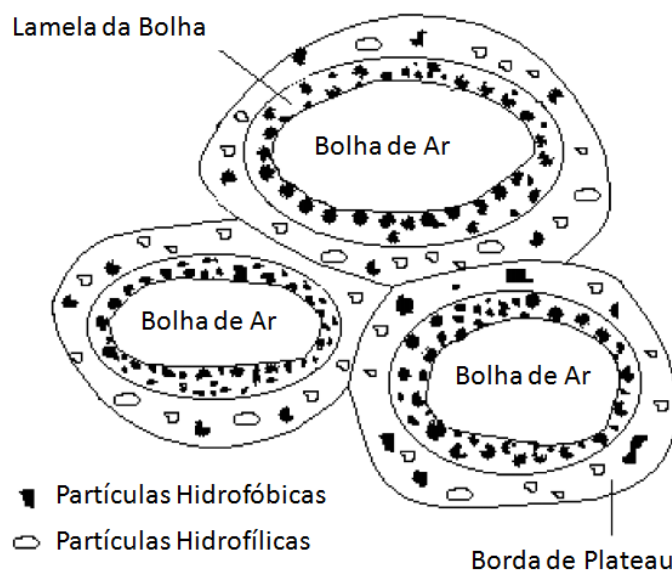


Figura 1. Estrutura conceitual da espuma (Cilliers *et al.*, 1998).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme descrito por Vieira (2008), o tratamento de minérios de ferro da SAMARCO foi iniciado em 1977, com a lavra da Mina de Germano. A SAMARCO foi pioneira no Brasil no beneficiamento do itabirito especularítico friável pobre, com teores médios de ferro na faixa de 49%. A tecnologia utilizada na concentração também foi pioneira para minérios de ferro: a utilização de flotação catiônica reversa em células mecânicas de sub-aeração.

A SAMARCO teve um aumento de capacidade de 16,5 para 24,0 milhões de toneladas de concentrado por ano em 2008, com a construção do segundo concentrador e da terceira usina de pelotização.

#### 3.1 Aquisição das Imagens

Foi instalado um sistema para coleta de imagens digitais no circuito de flotação em colunas no segundo concentrador da Samarco. Por meio desse sistema, foram amostradas 32.400 imagens em diversas condições operacionais e selecionado um conjunto contínuo de 72 horas de operação para a realização dos testes. As análises foram realizadas considerando o valor médio horário.

O conjunto de imagens foi processado através de rotinas, desenvolvidas especialmente para este fim, utilizando a plataforma AForge e interface de usuário IPLAB, em linguagem C#.

A câmera foi posicionada sobre uma das colunas *cleaner* da etapa de flotação em colunas sendo este um ponto de controle importante do processo, pois essa coluna é responsável pela última etapa de concentração. Após a coluna *cleaner*, a polpa deve possuir a especificação físico-química final para envio à próxima etapa de produção na usina de pelotização. Esta escolha também foi influenciada pela impossibilidade de instalação do conjunto da câmera sobre as outras colunas sem uma grande intervenção.

Foi desenvolvido um conjunto de caixa e suporte especial para instalação da câmera e proteção dos componentes eletrônicos. Estes acessórios são importantes para garantir a integridade da instalação e condições adequadas para a aquisição da imagem.

O circuito de flotação bem como o local de instalação da câmera podem ser visualizados na figura 2.

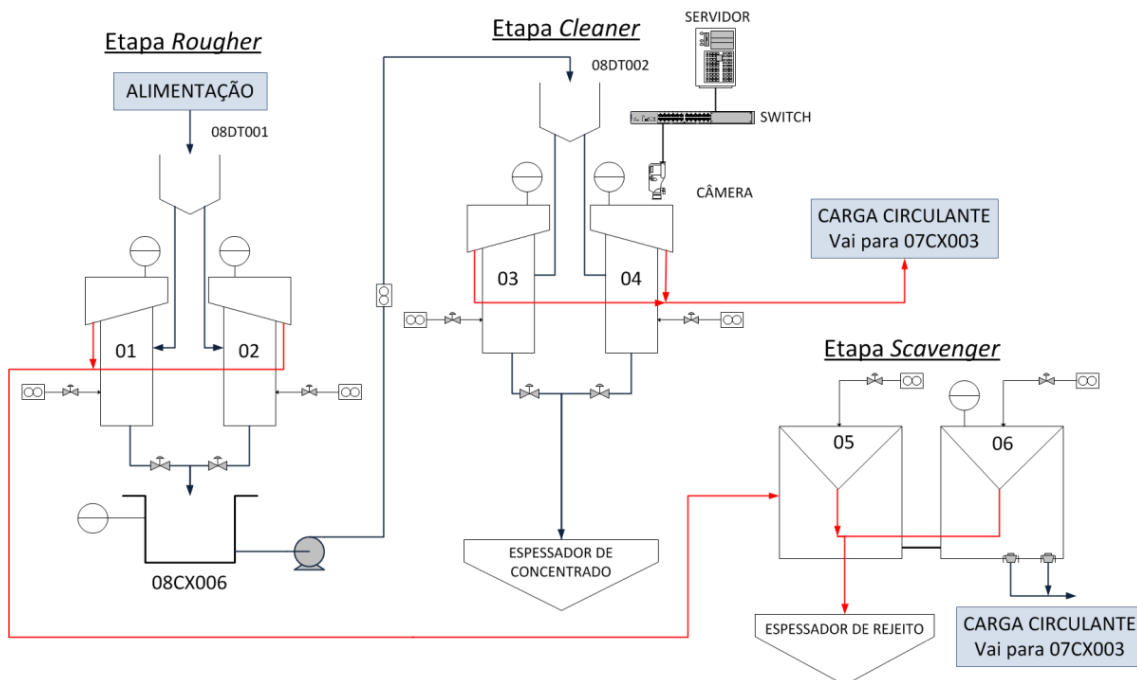


Figura 2. Fluxograma de processo da etapa de flotação em colunas e local de instalação da câmera.

A câmera e os componentes auxiliares podem ser visualizados nas Figuras 3.



Figura 3. Componentes do sistema de visão.

### 3.2. Espectro de Textura

Um grande número de métodos são propostos na literatura para a tarefa de determinar o tamanho de bolhas através da análise de imagens, destacando-se os algoritmos de detecção de bordas, segmentação e espectro de textura (Aldrich *et al.*, 2010).

A abordagem por espectro de textura se apresenta como um método menos susceptível a variações da iluminação na imagem, e esta característica é interessante para o caso da SAMARCO, visto que as operações ocorrem em espaço aberto e estão sujeitas a variações da iluminação ambiente.

O algoritmo foi originalmente proposto por He e Wang (1990). Hargrave e Hall (1997) e Holtham e Nguyen (2002) aplicaram a análise espectral da textura para classificação tipológica em espumas de flotação.

A análise espectral consiste de um histograma calculado pela aplicação de uma máscara 3x3 deslocada *pixel a pixel* sobre a imagem analisada, conforme apresentado na Figura 4.

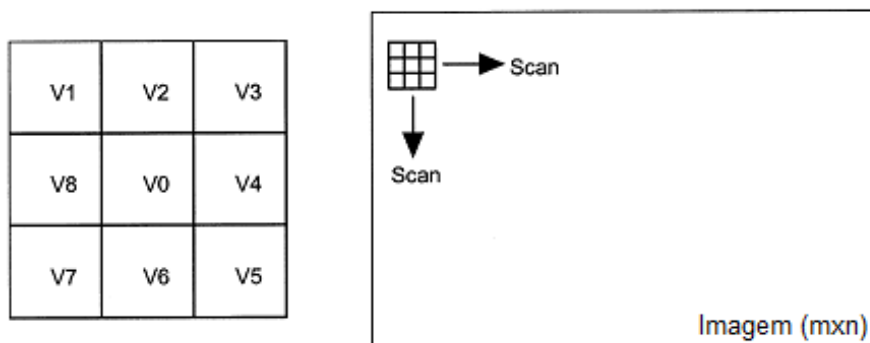


Figura 4. Máscara de análise de textura e o processo de escaneamento da imagem (Holtham & Nguyen, 2002).

Essa máscara é denominada unidade de textura (UT), sendo a intensidade de cinza do pixel central definido como  $V_0$  e de seus vizinhos  $V_i$  ( $i=1,2,\dots,8$ ).  $V_i$  pode ser menor (-1), igual (0) ou maior (1) que  $V_0$ , podendo assumir um destes estados. A combinação de todas as UT's possíveis é igual a  $3^8 = 6561$ . Cada UT pode ser representada por um número de 0 a 6560, chamado Número da Unidade de Textura ( $N_{UT}$ ).

O espectro de textura é disposto na forma de um histograma de frequência de todos os UT's, sendo a abscissa os valores dos  $N_{UT}$  e a ordenada representando a frequência de ocorrência.

O centro do histograma, denominado de  $Mid\_TU$ , é definido pela  $UT=3280$  e ocorre quando todos os valores dentro da máscara 3x3 são iguais.

A justificativa para aplicação do algoritmo de espectro de textura está na constatação de que imagens com bolhas grandes tendem a possuir um  $Mid\_TU$  de valor elevado quando comparadas a imagens com bolhas pequenas, dada a menor quantidade de bordas na imagem (Holtham e Nguyen, 2002). Observa-se na Figura 5 a diferença dos espectros para duas imagens de espuma com tamanho de bolhas diferentes, destacando o pico central no histograma.

Holtham & Nguyen (2002) apresentam a relação entre o  $Mid\_TU$  e o tamanho médio das bolhas, em *pixels*, reforçando sua aplicação como estimador de tamanho de bolhas.

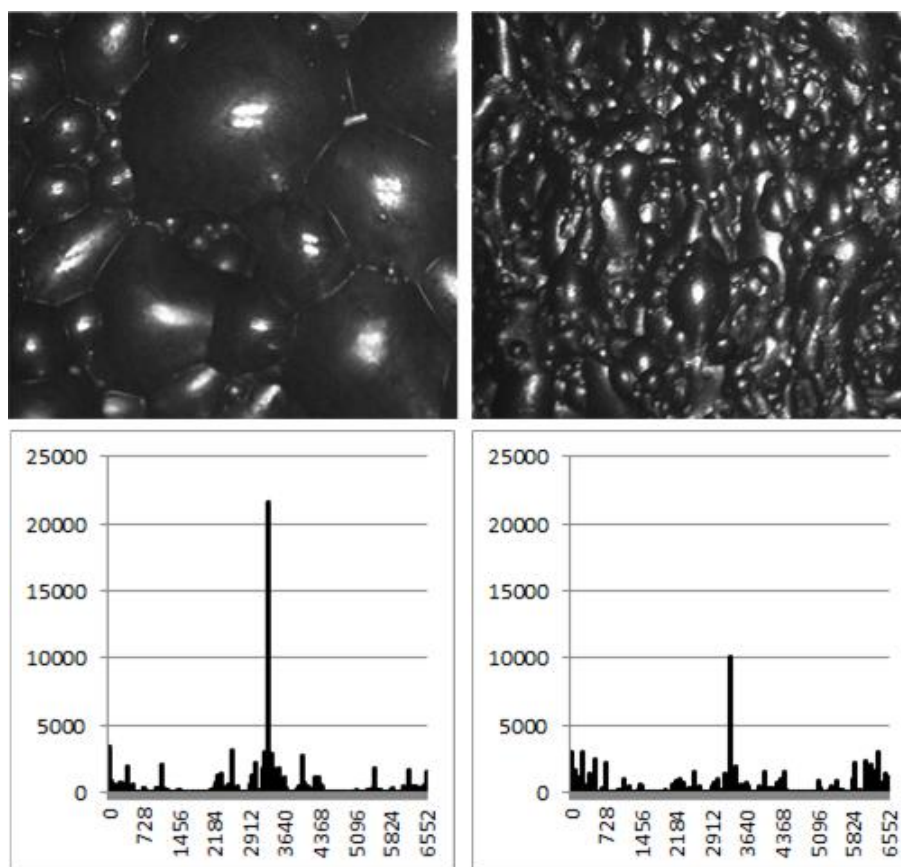


Figura 5. Espumas de flotação e seu respectivo espectro de textura.

#### 4. RESULTADOS

Considerando todo o conjunto de imagens amostradas, normalizando o Mid\_TU para valores entre 0 a 100, pode-se definir quatro faixas de valores, a saber:

- Pequenas: valores entre 0 a 24;
- Médias: valores entre 25 e 49;
- Grandes: valores entre 50 e 74;
- Muito grandes: valores entre 75 e 100.

Da análise dos dados, o conjunto “muito grande” apresentou apenas dois valores, e foi descartado.

Deve ser ressaltado que este método classifica como grande o conjunto de imagens com maiores bolhas encontradas na base de imagens, não significando que, em tamanho absoluto, estas sejam as maiores bolhas possíveis. O mesmo é válido para as outras classificações. Em todos os momentos a operação estava controlada e as bolhas estáveis.

Aplicando os testes ANOVA e Kruskal-Wallis em relação ao teor de sílica no concentrado, chega-se a conclusão que os intervalos não possuem médias nem medianas iguais, o que aponta esta propriedade como um bom classificador de teores (Silva, 2012).

Da análise visual do Boxplot fica evidente que o tamanho de bolhas influencia tanto a média dos resultados de sílica no concentrado quanto o desvio padrão dos mesmos (Figura 6). Desta forma,

bolhas maiores são consideravelmente melhores que bolhas menores quanto ao resultado de teor de sílica no concentrado.

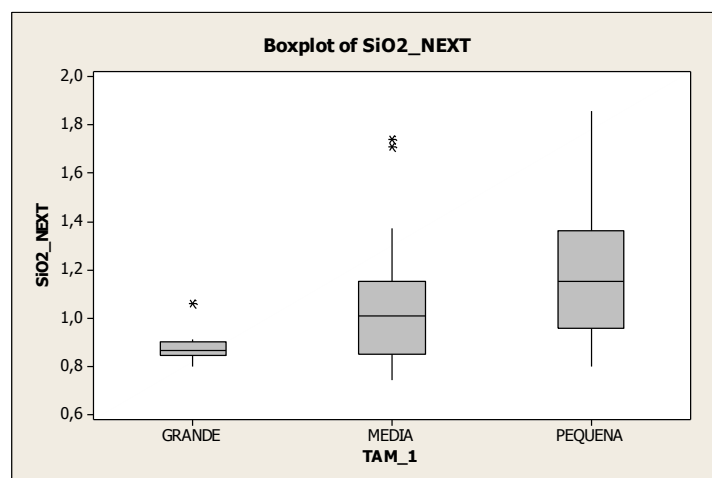


Figura 6. Boxplot do teor de sílica versus tamanho de bolhas.

O tamanho de bolha medido pelo método de espectro de textura não permite estimar o tamanho médio de forma quantitativa, porém, é possível afirmar que, dentro do intervalo de tamanho de bolhas capturado nas 70 horas de operação, quanto maior a bolha menor o teor de sílica no concentrado. A mesma afirmação pode ser feita a respeito da variabilidade do teor.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou que existe uma relação mensurável entre as propriedades visuais de espuma de flotação obtidas através da análise de imagens e o desempenho operacional das colunas de flotação do segundo concentrador da Samarco Mineração.

A análise do espectro de textura da imagem demonstrou que o pico central no histograma das unidades de textura serve como um bom classificador para o teor de sílica no concentrado. É possível concluir que na flotação em colunas do segundo concentrador da SAMARCO, bolhas maiores resultam em um concentrado com menor teor de sílica e com uma menor variabilidade. Este resultado apresenta uma nova perspectiva para análise e controle do tamanho de bolhas e sua relação com a recuperação do processo de flotação.

Não foi possível determinar quantitativamente o tamanho das bolhas através do método de espectro de textura. Para tal tarefa, outra abordagem deve ser utilizada. Dentro do intervalo de tamanho de bolhas analisado nas 70 horas de operação a espuma apresentou-se estável, indicando que a mesma estava adequada para o processo.

O resultado, inicialmente, contradiz o conceito estabelecido de que maiores recuperações são alcançadas com bolhas menores. Porém, não é possível concluir que o contínuo aumento do tamanho das bolhas acarretaria na diminuição no teor de sílica no concentrado, pois o fenômeno de coalescência e instabilidade da espuma, esperado para espumas com bolhas muito grandes, influenciariam negativamente o resultado. Logo, a afirmação anterior é válida somente dentro do conjunto de bolhas amostrado.

## 6. REFERÊNCIAS

- Aldrich, C., Marais, C., Shean, B. J., & Cilliers, J. J. (2010). Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: a review. *International Journal of Mineral Processing*, 1–13.
- Botha, C.P., Weber, D.M., Van Oltst, M., Moolman, D.W., 1999. A practical system for realtime on-plant flotation froth visual parameter extraction. *Proceedings of the 5th IEEE Africon*, Cape Town, South Africa, 1, 103–106, ISBN: 0-7803-5546-6.
- Cutting, G.W., Barber, S.P. e Newton, S., 1986. Effects of froth structure and mobility on the Performance and simulation of continuously operated Flotation cells. *International Journal of Mineral Processing*, 16 , pp.43--61.
- Glembotskii, V.A., 1972. *Flotation*. New York.
- Hargrave, J. M., & Hall, S. T. (1997). Diagnosis of concentrate grade and mass flowrate in tin flotation from color and surface texture analysis. *Minerals Engineering*, Vol 10, Nº 6, 613-621.
- He, D. C., & Wang, L. (1990). Texture feature extraction from texture. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 28, pp. 509–512.
- Holtham, P.N., Nguyen, K.K., 2002. On-line analysis of froth surface in coal and mineral flotation using JKFrothCam. *International Journal of Mineral Processing* 64 (2–3), 163–180.
- Kaartinen, J., Koivo, H., 2002. Machine vision based measurement and control of zinc flotation circuit. *Studies in Informatics and Control* 11 (1), 97–105.
- Kaartinen, J., Hätönen, J., Hyötyniemi, H., Miettunen, J., 2006. Machine–vision-based control of zinc flotation — a case study. *Control Engineering Practice* 14, 1455–1466.
- McKee, D.J., 1991. Automatic flotation control — a review of 20 years of effort. *Minerals*
- Morar, S.H., Forbes, G., Heinrich, G.S., Bradshaw, D.J., King, D., Adair, B.J.I., Esdaile, L., 2005. The use of a colour parameter in a machine vision system, SmartFroth, to evaluate copper flotation performance at Rio Tinto's Kennecott Utah copper concentrator. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series* 147–151.
- Silva, F. T. (2012). Propriedades visuais de espuma para predição dos teores da flotação em coluna do segundo concentrador da SAMARCO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 139p. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia Mineral).
- Vieira, M. G. (2008). Produção de um pellet feed a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 89p. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia Mineral).