

ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS DE ESPUMA DE FLOTAÇÃO UTILIZANDO ALGORITMOS DE SEGMENTAÇÃO

R.D.S. Nicolato⁽¹⁾M.V.L. Pereira⁽¹⁾R. Galéry⁽¹⁾

1-Departamento de Engenharia de Minas da UFMG

Rua Espírito Santo, 35 s/702 30160 030 Belo Horizonte – MG BRASIL.

E-mail: robertodsn@ufmg.br; marcos_vlp@yahoo.com.br; rgalery@demin.ufmg.br;

RESUMO

A “visão computacional” integrada à inteligência artificial tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas de análise e controle de processos que estão sendo aplicados em diferentes áreas da engenharia mineral. Nos circuitos de flotação a visão computacional tem sido empregada para a análise das características de tamanho, forma e velocidade das bolhas que fluem no topo das colunas ou células de flotação. Esses sistemas têm possibilitado a melhora dos índices de desempenho possibilitando a otimização e o controle dos processos industriais de flotação. Para realizar as tarefas de monitoramento e análise é necessário, portanto, o desenvolvimento de sistemas específicos empregados na aquisição, processamento e análise digital de imagens obtidas em tempo real. Esses sistemas são normalmente, compostos por um conjunto de câmeras digitais acopladas a computadores de alta performance. No presente trabalho as metodologias adotadas no desenvolvimento de um sistema dessa natureza são apresentadas. São mostradas algumas técnicas aplicadas na análise digital de imagens. As imagens utilizadas foram coletadas, “*off-line*”, sob condições controladas de laboratório, no topo de uma célula de flotação *rougher* numa campanha de testes de concentração de minério de sulfetado de ouro.

Palavras-chave: flotação, análise de imagem, segmentação.

1. INTRODUÇÃO

A flotação é um processo complexo e versátil que tem se tornado indispensável e insubstituível quanto se trata das operações industriais de beneficiamento das frações mais finas do minério. Apesar da grande quantidade de trabalhos de pesquisa desenvolvidos na área, somente nas últimas décadas é que se tornaram disponíveis os primeiros sistemas para o monitoramento e controle *on-line* dessas operações em escala industrial. A evolução desses sistemas de controle foi lenta e o otimismo inicial foi gradativamente substituído pela cautela em face das grandes dificuldades encontradas. A razão é que o processo de flotação está sujeito a um grande número de distúrbios. Alguns causados pelas características do minério e outros, causados por variações inerentes aos procedimentos operacionais. Podemos citar como exemplos de distúrbios, as variações de fluxos, de densidade, de distribuição de tamanhos, de forma das partículas, das propriedades superficiais e de composição, dentre outras. Todas essas propriedades podem variar causando impacto significativo na eficiência operacional do circuito de flotação. Além disso, o mau funcionamento dos equipamentos, os erros de medidas e aqueles associados aos mecanismos atuadores contribuem com muita frequência para outros tantos distúrbios verificados na operação diária de uma usina de beneficiamento mineral. Técnicas robustas que atinjam um nível de controle satisfatório ainda precisam ser desenvolvidas. As técnicas de controle normalmente são desenvolvidas em cima de alguns modelos matemáticos específicos. Elas são complicadas e requerem habilidades na área da engenharia que nem sempre estão disponíveis. De acordo com McKee (1991), a dificuldade de mão de obra qualificada é um problema sério relacionado ao desenvolvimento de sistemas de controle. No Brasil alguma sinalização no sentido de melhorias nessa direção tem sido detectada. A necessidade de um sistema simples, confiável, cujo mecanismo de funcionamento possa ser assimilado pelos operadores de usinas é de fundamental importância.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DA ESPUMA DE FLOTAÇÃO

Estudos recentes desenvolvidos a partir de observações visuais mostram que a estrutura da espuma de flotação fornece informações importantes tanto em relação ao teor quanto em relação à recuperação dos minerais úteis presentes no flotado. Esses efeitos são bem conhecidos e difundidos no nível operacional de uma usina onde o conhecimento heurístico, isto é, a observação sistemática do processo gera um conjunto de regras práticas para controle das condições operacionais. Essas correlações existentes entre as propriedades das espumas de flotação e a eficiência do processo têm recebido pouca atenção. Woolburn et al. (2004), mostram que a estrutura ideal da espuma pode ser reconhecida visualmente e analisada quantitativamente empregando sistemas de análise digital de imagem. Resultados envolvendo a caracterização estrutural de espumas de flotação apresentam três classes básicas de estruturas de espuma de flotação que podem ser utilizados numa análise para distinguir o estado operacional em um processo de flotação. As três classes básicas serão descritas a seguir e exemplificadas nas Fig. 1a-1c.

1. *Espuma com estrutura irregular, elíptica e rígida* – bolhas elípticas (Fig. 1a) estão presentes, representando uma espuma excessivamente carregada pela fase sólida, muito estável e rígida. Em termos de profundidade indica, também, a presença de uma camada espessa e bem drenada de espuma.
2. *Espuma com bolhas poliédricas* – este tipo de estrutura (Fig. 1b) representa uma espuma de profundidade média, bem drenada em que houve uma separação adequada entre o mineral útil e a ganga. As diferenças entre a estrutura elíptica e a poliédrica é que a última é menos profunda, menos viscosa e dessa forma, escoo mais rápido. Pode-se observar que a estrutura da espuma pode indicar a sua espessura e ser utilizada para manipular o nível da polpa de acordo com os parâmetros de controle do processo;
3. *Espumas com bolhas pequenas* – esta estrutura de espuma (Fig. 1c) pode ser identificada pela presença de pequenas bolhas esféricas com baixo conteúdo mineral. As bolhas esféricas representam uma camada rasa e instável (quebradiça). Se o nível da polpa estiver demasiadamente elevado e a porcentagem de sólidos da polpa for baixa, a camada de espuma tornar-se-á rasa e resultará nesse tipo de estrutura de espuma frágil e quebradiça.

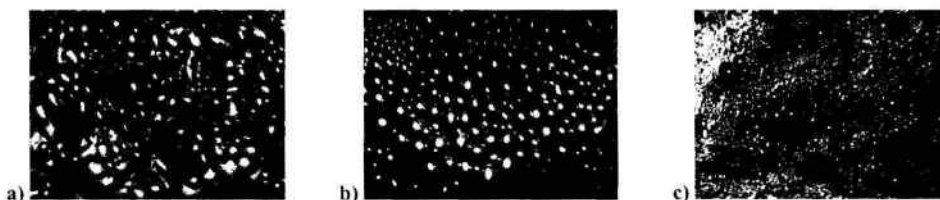


FIGURA 1: (a) estrutura irregular, elíptica e rígida da espuma; (b) bolhas poliédricas; (c) baixo conteúdo mineral.

A flotação é um método de separação de misturas heterogêneas. A técnica utiliza as diferenças nas propriedades superficiais existentes entre as várias espécies minerais presentes numa polpa aquosa. A eficiência da flotação é governada pela molhabilidade dos sólidos bem como pela tensão superficial na interface líquido-gás. As partículas de determinadas espécies tornam-se hidrofóbicas (não molháveis pela água) seletivamente pela adição de reagentes coletores. Fazendo-se passar ar através do sistema, na forma de bolhas finamente subdivididas, as partículas hidrofóbicas adsorvem-se a essas bolhas de ar e deslocam-se da polpa heterogênea para a superfície, onde se acumulam sob a forma de espuma. De acordo com Dobby e Fynch, (1986), quanto menor o tamanho da bolha maior é a eficiência da flotação. De acordo com esses autores a redução do tamanho de bolhas é, também, função direta da adição dos reagentes classificados como espumantes. Dessa forma, o efeito da adição de reagentes, coletores e espumantes influenciam diretamente as características estruturais da espuma.

Estudos envolvendo a análise estrutural de espuma em células ou colunas de flotação têm mostrado que o problema é complexo e que a observação extensiva ainda é necessária para o desenvolvimento de um sistema de visão de máquina. As dificuldades a serem vencidas estão relacionadas tanto com o próprio sistema de análise de imagem quanto com o processo de flotação. Inicialmente envolveria, caracterizar a dimensão de cada bolha individual presente na imagem digital, coletada através de um sistema de amostragem em tempo real, conforme apresentado na Fig.2.

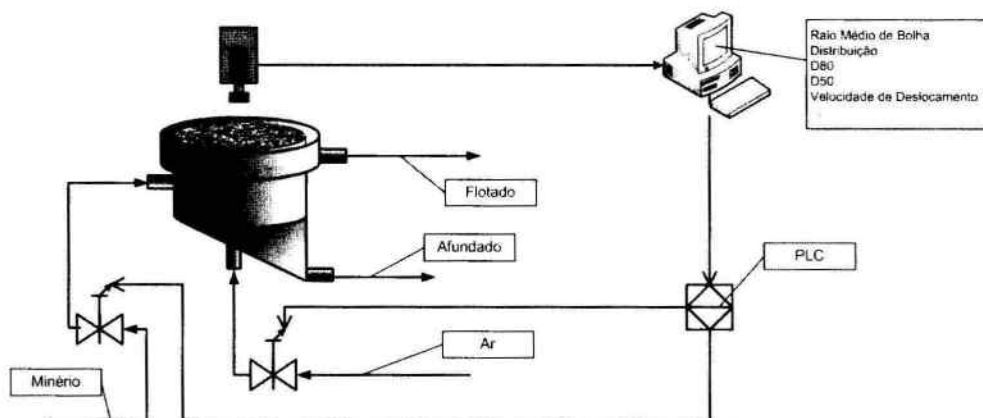


Figura 2: Representação de um sistema de controle baseado em análise digital de imagens.

Na seqüência, adotar um sistema para a classificação do tamanho das bolhas e determinar a distribuição completa dos tamanhos desse conjunto de bolhas. A caracterização da qualidade do regime de escoamento da espuma poderia também ser feita a partir da análise de uma seqüência de imagens submetidas ao mesmo processo.

3. PROCESSAMENTO DE IMAGENS NO PROCESSO DE FLOTAÇÃO

As técnicas utilizadas nesses processos são aquelas difundidas na teoria de análise digital de imagens. No processo de análise de imagens o primeiro passo é o *pré-processamento* que realça na imagem as características necessárias para a definição dos objetos de interesse. É importante ressaltar que, o *pré-processamento* aplicado diretamente não é muito conveniente. Dependendo da qualidade da imagem pode ocorrer segmentação excessiva, que seria um particionamento indesejado da imagem. Esse fenômeno ocorre muitas vezes devido à presença de defeitos na imagem como, por exemplo, sombras, ausência de contraste e textura. Logo, é necessário um pré-processamento intenso a fim de remover ou suavizar tais características indesejadas na imagem. O passo seguinte é denominado por *segmentação* que consiste no processo de definir automaticamente os segmentos que são os objetos de interesse. A segmentação subdivide uma imagem em regiões distintas. O nível de segmentação depende tanto da técnica utilizada, como do problema que está sendo resolvido. Os algoritmos de segmentação permitem achar diferenças entre dois ou mais objetos e, a partir daí, distinguir as formas do plano de fundo. Esta distinção permitirá avaliar comparativamente *pixels* contíguos e agrupá-los em regiões ou distingui-los. Os algoritmos de segmentação para imagens monocromáticas são geralmente baseados em uma das seguintes propriedades básicas de valores de tons de cinza: descontinuidade e similaridade. Na descontinuidade a abordagem é particionar a imagem baseado em mudanças bruscas nos tons de cinza. O principal foco de interesse é a detecção de pontos isolados, de linhas e bordas na imagem. Na similaridade as principais abordagens baseiam-se em limiarização e crescimento de regiões.

Na flotação as técnicas adotadas se diferenciam principalmente pelas estratégias adotadas na etapa de pré-processamento da imagem amostrada. O caso observado no presente trabalho é singular, pois apresenta uma etapa de pré-processamento diferenciado da maioria dos trabalhos pesquisados adotando, também, uma estratégia de

segmentação que tenta evitar, ao máximo, problemas de segmentação excessiva que provocam uma estimativa incorreta do tamanho de bolhas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Um conjunto de imagens coletadas por uma câmera Sony Cyber-Shot, 3.2 mega pixels, instalada no topo de uma célula convencional operando a flotação "rougher" de minério de sulfetado de ouro foram selecionadas para os trabalhos de determinação da distribuição do tamanho de bolhas aplicando as técnicas de análise digital de imagens. A resolução da câmara foi ajustada em 640X480 pixels e o fator de correção dimensional real determinado foi de 0,46875 mm/pixel, medidos com uma escala posicionada, convenientemente, na frente das bolhas. Com essas imagens coletadas sob condições controladas de luminosidade, foram testados os algoritmos desenvolvidos em linguagem de programação C++ utilizando as técnicas convencionais de filtragem e segmentação propostas por Vincent (1991).

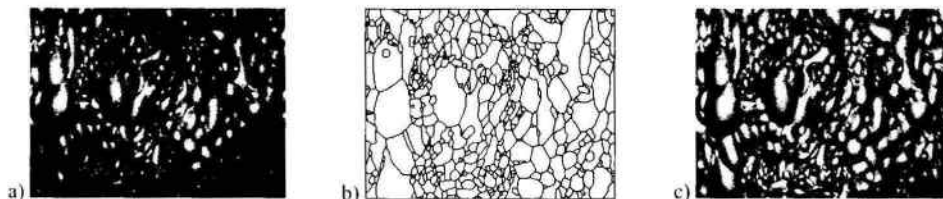


FIGURA 3: (a) imagem com características complexas - sombra, textura, falta de foco, bolhas de diversos tamanhos e formas; (b) segmentação mecânica da imagem (c) equalização do histograma da imagem – CLAHE (Pizer, 1990).

Para exemplificar o desenvolvimento desse trabalho, foi escolhida uma imagem (Fig.3a) contendo problemas de iluminação, textura e formas irregulares de bolhas. Uma criteriosa segmentação mecânica (Fig. 3b) foi realizada nessa imagem sem o auxílio da programação. A imagem (Fig.3c) é o resultado do pré-processamento básico objetivando eliminar ruídos e aumentar o contraste da imagem apresentada na Fig. 3a.

A imagem resultante da última etapa (Fig. 3c) é então submetida a um processamento (Fig. 4a-4c) e posteriormente submetida ao algoritmo *Watershed* (Fig. 4d), desenvolvido por Vincent, 1990. Com relação às etapas de pré-processamento enumeradas, algumas observações devem ser feitas: a) o tamanho da semente dos filtros para realce de contraste deve ser igual ao tamanho médio dos objetos a serem encontrados na imagem para obtenção do resultado ótimo; b) as zonas que apresentam sombras acentuadas continuam problemáticas.

A abordagem inicialmente proposta para o processamento das imagens apresentadas nas Fig. 4a-4c, seguiu a seguinte ordem:

- Estimativa inicial iterativa das sementes dos filtros de realce de contraste a partir da dimensão dos centros dos objetos;
- Equalização de histograma – existem formas de aumentar o contraste via equalização do histograma da imagem (Fig. 3a) e a ferramenta mais indicada é o "Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization" CLAHE, (Pizer, 1990). Contudo este ajuste não é suficiente para resolver o problema da segmentação excessiva e até favorece o surgimento de novos problemas como o aumento de textura, mas será integrado definitivamente à 1ª etapa de pré-processamento devido ao ganho de contraste entre bordas e centros luminosos das bolhas;
- Filtragem não-linear – utilizando-se de filtros de difusão (Weickert et al., 1990) para promover redução de textura na imagem;
- Filtros de realce de contraste - *top-hat* e *bottom-hat* (Vincent, 1993);
- Localização de regiões de mínimos na imagem – regiões de mínimos definem os centros das bolhas na imagem (Vincent, 1993);
- Erosão e Dilatação – remoção de ruídos na imagem dos mínimos encontrados (Vincent, 1993);
- Imposição da informação dos mínimos na imagem por meio de reconstrução (Vincent, 1990);
- Segmentação – no presente estudo foi utilizado dois métodos semelhantes: o *Watershed* e outro desenvolvido especificamente para o presente estudo.

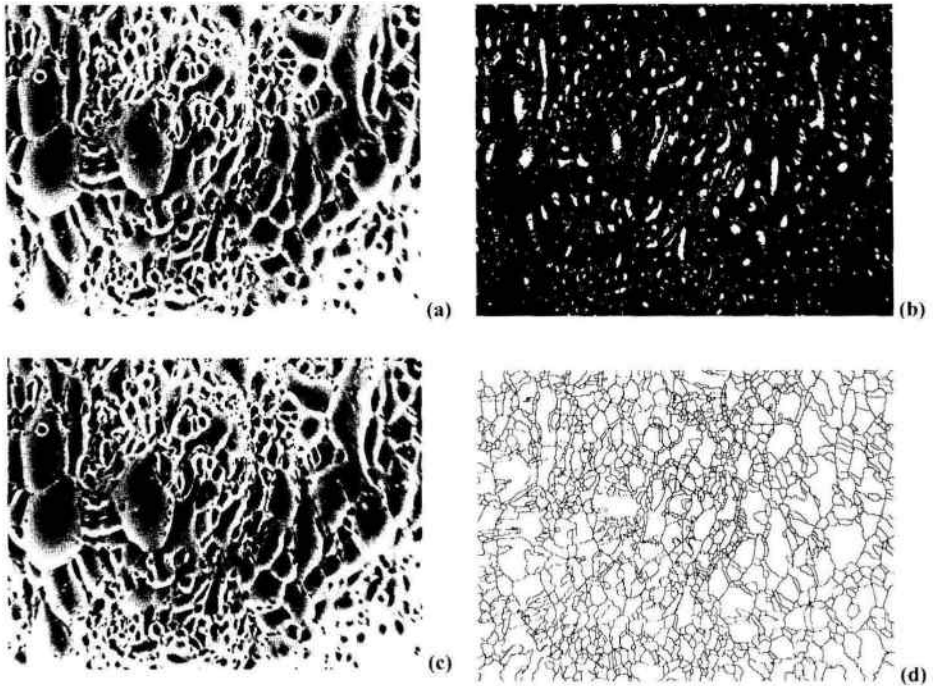


FIGURA 4: Etapas da metodologia somente baseada em aumento de contraste e eliminação de ruídos. (a) Realce de contraste utilizando filtros top-hat e bottom-hat com Imagem invertida; (b) Determinação dos mínimos; (c) Imposição dos mínimos na imagem; (d) *Watershed*.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após verificação visual da ineficiência da estratégia inicialmente proposta (Fig. 4d), foi adotada uma nova base para a segmentação da imagem. Ao se analisar essas imagens (Fig. 1), foi observado que seria impossível determinar as bordas (fronteiras entre as bolhas) por meio de limiarização (*threshold*). Sabendo destas limitações, o pré-processamento se fez necessário e presente para eliminação de ruídos assim como a erosão dos mínimos encontrados para posterior reconstrução, objetivando eliminação dos falsos centros.

Utilizando filtros de difusão não-linear, é possível eliminar texturas das superfícies das grandes bolhas sem perdas de nitidez das bolhas pequenas. Essa técnica possibilita uma segmentação mais eficiente (Fig. 5b e 5c). Para esta nova fase foi desenvolvida e aprimorada uma metodologia que envolve pré-processamento com filtros de difusão na tentativa de eliminar textura antes de aplicar a transformação de CLAHE, operação de esta que tende a aumentar a textura além do contraste. Posterior a esta etapa de aumento de contraste, segue-se uma etapa de eliminação de ruído por meio de difusão com um maior grau destrutivo. Finalmente, a etapa de segmentação é realizada adotando um novo algoritmo proposto no presente trabalho. Comparando-se as Fig. 5a e 5c pode ser notado visualmente que a metodologia proposta é mais robusta à sobre-segmentação do que se compararmos ao *Watershed* convencional (Fig. 5a e 5b). Lembrando que ambos os resultados demonstrados em FIG. 5b e 5c foram de resultados decorrentes de imagem onde o pré-processamento foi realizado visando melhorar a imagem (remoção de ruídos, textura e aumento de contraste). Sendo assim as metodologias de segmentação analisadas estavam analisando uma mesma imagem, portanto, estariam em igualdade de condições iniciais.

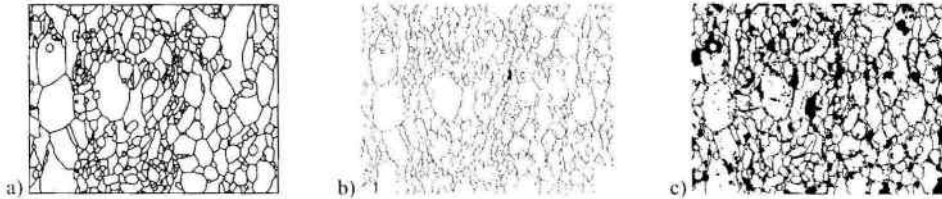


Figura 5: - Comparação dos resultados: (a) Imagem segmentada mecanicamente; (b) Watershed ; (c) Simulação da segmentação proposta

Os resultados de segmentação foram analisados em termos da distribuição da área superficial de bolhas medidas em $pixels^2$ (1 pixel = 0,46875 mm). A escolha da disposição da informação em termos de área superficial se deve a eliminação de erros decorrentes da conversão para raio equivalente, possibilitando uma comparação mais confiável entre as distribuições. As informações extraídas das figuras 5a, 5b e 5c estão dispostas nas Figuras 6 e 7.

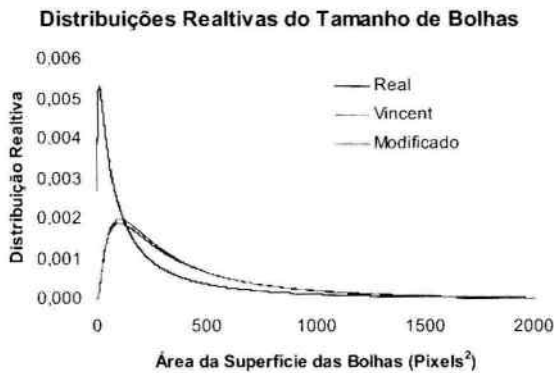


Figura 6: Distribuição relativa da área superficial de bolhas calculada em $pixels^2$.

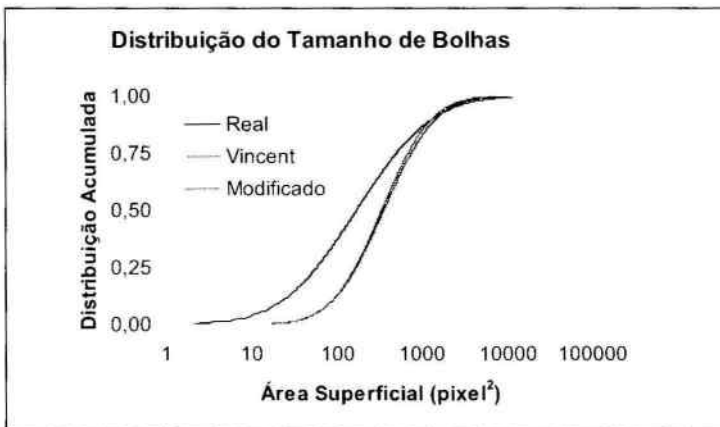


Figura 7: Distribuição acumulada em escala log da área superficial de bolhas calculada em $pixels^2$.

Observando as figuras 5, 6 e 7, podemos constatar que os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido por Vincent apresenta problemas de segmentação excessiva. Isso não é verificado no método modificado, quando observamos os resultados da Fig. 5. Esse fato deve-se a uma limitação imposta no algoritmo Modificado que não permite avançar para regiões duvidosas e não criar um novo segmento em áreas que já foram consideradas como parte de outra estrutura. Contudo observamos uma limitação para a detecção de bolhas de um determinado tamanho mínimo de área superficial. Isso é consequência da aplicação de erosão objetivando a diminuição de ruído na imagem. Esta limitação provoca o deslocamento da curva de distribuição na direção de bolhas de maior área superficial em relação as medições mecânicas

que apresentam uma concentração maior de bolhas de menor área superficial. Este fato pode ser observado nas Fig. 6 e 7. Observa-se também uma semelhança nos resultados dos dois algoritmos, Vincent e Vincent Modificado. O algoritmo de Vincent compacto e robusto, é simplista com relação a análise da informação da imagem. Ele deixa a desejar quanto se tem uma faixa ampla de distribuição de tamanhos de bolhas. O algoritmo modificado apresenta a possibilidade de detecção tanto das maiores bolhas quanto das menores. As áreas escuras das imagens segmentadas da Fig. 5c mostram, por inspeção visual, ser áreas onde grande parte das bolhas de menor diâmetros estão concentradas. Esse tipo de informação não pode ser extraído do algoritmo do Vincent. Isso constitui, então, uma informação extra que pode vir a ser utilizada em desenvolvimentos futuros.

7. CONCLUSÕES

A utilização de filtros lineares em sistemas complexos relacionados a processamento de imagens para eliminação de problemas locais, apesar de bem difundida, tem como consequência a corrupção das bordas, o que pode muitas vezes levar a impossibilidade de distinção de bolhas muito pequenas ou muito próximas, dificultando assim a segmentação por meio do algoritmo de segmentação estilo *Watershed* ocasionado junção de pequenos objetos (sub-segmentação). Ao mesmo tempo a inexistência de filtros de ruídos tem como consequência a quebra excessiva de grandes objetos (segmentação-excessiva). Pode ser desenvolvida uma infinidade de metodologias baseadas em seqüências de operações realizadas durante o pré-processamento combinando ferramentas destrutivas e extratoras de informações para reforço de características distintas, mas o aumento do esforço computacional onera a tarefa. A utilização de filtros de difusão não-linear pode ser a resposta para os problemas de textura encontrados ao longo dos testes e produz bons resultados em comparação aos lineares para mesma a situação em questão, contudo a existência de muitas variáveis operacionais, para realização de tal tipo de filtragem, atua como um fator complicador.

A filtragem por difusão apresenta melhores resultados para eliminação de textura da superfície das bolhas de flotação e a simulação da metodologia proposta demonstra melhor desempenho quando se trata de oferecer mais robustez ao problema da sobre-segmentação, pois em flotação as bolhas de tamanho maior são mais interessantes no processo pelo fato delas carregarem mais massa e evidenciarem o desempenho do processo.

A aplicação em um sistema on-line de monitoração e controle do processo de flotação se faz necessário para comprovar a eficácia do método. A evolução da metodologia para determinar velocidade média da frente de espumas é o próximo passo a ser dado.

8. REFERÊNCIAS

- Dobby, G.S., and Fynch, J. A., Column flotation, Pergamon Press, New York, 180 p, 1990.
- McKee, D.J., Automatic flotation control – a review of 20 years of effort, *Minerals Engineering*, 4, p653-666, 1991.
- Moolman, D.W., Aldrich, C., van Deventer, J.S.J., Stange, W.W., The classification of froth structures in a copper flotation plant by means of a neural net. *International Journal of Mineral Processing*, 43, 193-208, 1995.
- Moolman, D.W., Eksteen, J.J., Aldrich, C., van Deventer, J.S.J. The significance of flotation froth appearance for machine vision control, *International Journal of Mineral Processing*, 48 p. 135-158, 1996.
- Pizer, S.M., Johnston, R.E., Ericksen, J.P., Yankaskas, B.C., Muller, K.E., Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization: Speed and Effectiveness, *Proceedings of the First Conference Visualization in Biomedical Computing*, p.337-345, 1990.
- Vincent, L. and Pierre Soille, Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations, *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 13, No. 6, p. 583-598, 1991.
- Vincent, L., Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 2, No. 2, p. 176-201, 1993.
- Weickert, J., Zuiderveld, K.J., ter Haar Romeny, B.M., Niessen, W.J., Parallel implementations of AOS schemes: a fast way of nonlinear diffusion filtering; *Image Processing, Proceedings, International Conference on Vol.3*, p. 26-29, 1997.