

## ESTUDO DA GERAÇÃO DE BOLHAS E SUA RELAÇÃO COM O DESEMPENHO DA FLOTAÇÃO DE APATITA

A. S. REIS<sup>1\*</sup>, A. M. R. FILHO<sup>1</sup>, G. R. L. CARVALHO<sup>1</sup>, P. H. M. LUZ<sup>1</sup>, M. A. S. BARROZO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

\*e-mail: sreis.angelica@gmail.com

### RESUMO

A flotação é um processo complexo no qual estão presentes fenômenos físico-químicos e hidrodinâmicos. O desempenho da flotação está relacionado com a probabilidade de colisão bolha-partícula e a estabilidade do agregado formado. Atualmente, um dos maiores desafios da indústria mineral é a flotação de partículas finas e a utilização de bolhas com tamanho intermediário (100-1000  $\mu\text{m}$ ) tem se apresentado como boa alternativa para aumentar a recuperação dessas partículas. Portanto, determinar e controlar o tamanho de bolhas tornam-se ações importantes para produzir bolhas na faixa de diâmetros desejada. Desta forma esse trabalho teve por objetivo avaliar a influência da adição de tensoativos na geração de bolhas em uma coluna de flotação, e também verificar sua relação com o desempenho da flotação de apatita (teste de cinética). As bolhas foram medidas a partir de três diferentes métodos de filmagem (método intrusivo, não intrusivo e sondas PVM e FBRM). Os resultados mostraram que a adição de tensoativo foi uma boa alternativa para gerar bolhas menores, principalmente, favorecendo a porcentagem de bolhas produzidas com tamanho intermediário (80-90%) e, simultaneamente, com altos valores de *holdup* de ar (10-12%). A comparação com o teste de cinética mostrou uma relação direta da variação do tamanho de bolha com a variação do teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

### 1 INTRODUÇÃO

A flotação é um processo bem complexo no qual estão presentes fenômenos físico-químicos e hidrodinâmicos. As variáveis físicas, químicas e operacionais influem fortemente na recuperação, teor e seletividade buscada no processo da flotação mineral.

Desta forma, alguns autores relatam que embora muito conhecimento teórico e prático sobre o processo já tenha sido adquirido a partir das sucessivas pesquisas desenvolvidas, existe ainda uma necessidade de uma compreensão, dos fenômenos envolvidos (físicos, químicos e hidrodinâmicos), a

respeito do processo (NGUYEN e EVANS, 2004).

A interação bolha-partícula é o subprocesso principal da flotação, e a eficiência de colisão bolha-partícula está diretamente relacionada com o tamanho das partículas e das bolhas de ar. Portanto, um maior conhecimento sobre como ocorre essa interação e de que maneira ela pode ser favorecida são de extrema importância para alcançar melhorias na flotação mineral.

O processamento de partículas finas é fundamental para a indústria mineral e hoje constitui um dos seus maiores desafios. Os principais estudos desenvolvidos na flotação de partículas finas são baseados no aumento da probabilidade de colisão bolha-partícula.

Uma possibilidade para aumentar essa probabilidade é promover a flotação utilizando microbolhas. Porém, os resultados de trabalhos anteriores apresentaram baixas recuperações, devido à baixa capacidade de carregamento das microbolhas. Por isso, bolhas com tamanho intermediário, com maiores valores de ‘força de arraste’, tem se apresentado como uma boa alternativa para se atingir maiores recuperações no processamento dessas partículas (FUERSTENAU, 1980; CAPPONI et al., 2006; SANTANA et al., 2012).

A importância do tamanho de bolhas no desempenho da flotação tem sido investigada e confirmada por diversos autores, além disso, também tem se apresentado como um importante indicador da eficiência da dispersão do gás. Portanto, o tamanho de bolha é uma variável física essencial e determinante na eficiência de flotação (ZHOU et al., 1993; AHMED e JAMESON, 1985).

Assim, a flotação para diversos tamanhos de partículas exige uma variação extensa da DTB (distribuição de tamanho de bolha). O tamanho das bolhas pode variar de 10-100  $\mu\text{m}$  (microbolhas), 100-1000  $\mu\text{m}$  (bolhas intermediárias) e 1000-4000  $\mu\text{m}$  (bolhas grandes) (REIS, 2015). O controle dessas bolhas pode ser feito através da variação da vazão de ar e da adição de soluções tensoativas, como exemplo.

Várias técnicas para determinar o tamanho de bolhas no sistema bifásico (ar-água) e trifásico (ar-água-minério) têm sido desenvolvidas nos últimos anos, porém a maioria se restringe aos sistemas bifásicos, devido à dificuldade de se obter informações precisas do tamanho das bolhas com a presença do minério. Essa dificuldade se deve ao fato de que a maioria das técnicas desenvolvidas consiste na amostragem das bolhas ou na filmagem da coluna em operação, situações comprometidas com a presença do minério.

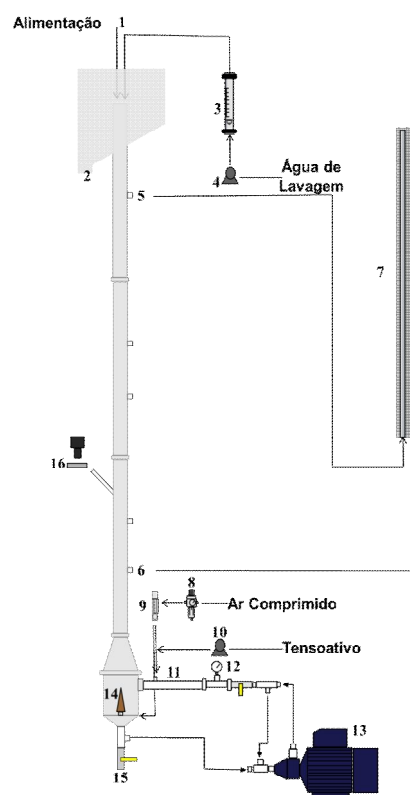
Desta forma, esse trabalho teve por objetivo o estudo de caracterização e controle do tamanho de bolhas no sistema ar-água, bem como durante a flotação mineral (teste de cinética). As bolhas medidas foram geradas em uma coluna de flotação através de um Venturi acoplado externamente à coluna.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Unidade Experimental

A Figura 1 representa um esquema da unidade experimental a qual se encontra no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

**Figura 1** - Unidade Experimental



A unidade consiste de uma coluna de flotação feita em acrílico dividida em três seções. Uma seção cilíndrica com 150 cm de

comprimento e 4 cm de diâmetro, abaixo dessa a segunda seção, com formato tronco-cônica de 9,5 cm de altura e, logo após, a terceira seção de formato cilíndrico com 12 cm de altura e 10 cm de diâmetro. No topo da coluna ficava um módulo no qual era recolhida a espuma e despejada em um reservatório.

Através da Figura 1, pode-se observar o ponto de alimentação de água de lavagem (1) e coleta do concentrado (2), rotâmetro (3), bombas peristálticas (4,10 e 13), sendo que os pontos 5 e 6 indicam os locais de amostragem do *holdup*, manômetros diferenciais (7), sistema de alimentação de ar comprimido com filtro de ar e rotâmetro em 8 e 9. É possível também identificar o Venturi (11) onde as bolhas são formadas, manômetro (12) e aerador (15). Na figura pode-se observar também o ponto de coleta do rejeito (15) e o sistema de amostragem de bolhas (16).

## 2.2 Metodologias para medida do diâmetro de bolha

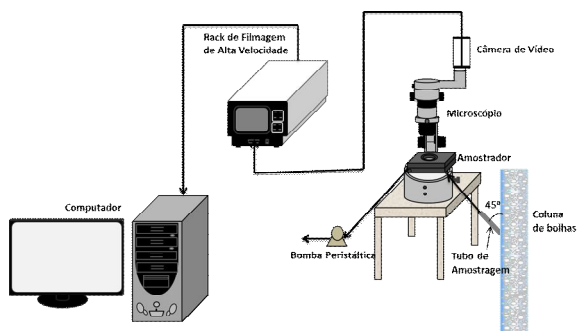
Para obtenção das imagens das bolhas produzidas no sistema ar-água foram utilizados dois métodos diferentes, o primeiro método denominado intrusivo e o segundo denominado não-intrusivo.

### 2.2.1 Método intrusivo

Neste método a amostragem de bolhas foi feita por meio da captura das bolhas no interior da coluna através de um amostrador projetado por Ribeiro (2012). Desta forma, conforme mostrado na Figura 2, a coleta das bolhas foi realizada através de um tubo de aço, conectado ao amostrador, com 6 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento posicionado no centro da coluna e com um ângulo de 45° em relação à mesma. Com o auxílio de uma bomba peristáltica, posicionada à jusante do amostrador, as bolhas eram succionadas com velocidade previamente controlada de forma a diminuir o

efeito de quebra e coalescência das bolhas coletadas.

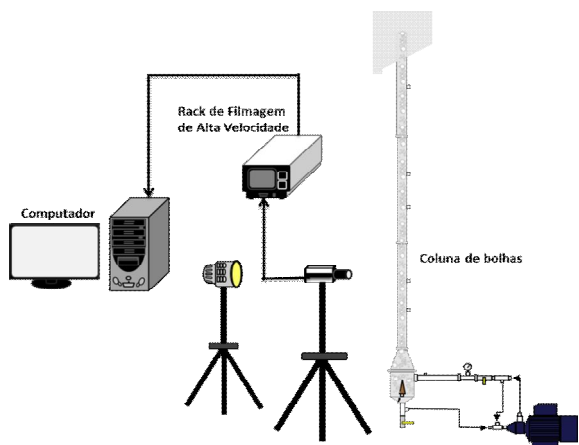
**Figura 2** - Esquema representativo do método intrusivo



### 2.2.2 Método não-intrusivo

Neste método a filmagem realizada obtinha imagem das bolhas em estado dinâmico, ou seja, as bolhas em movimento na coluna eram filmadas, com a mesma câmera de alta velocidade utilizada no método anterior, posicionada em paralelo com a coluna, como mostra a Figura 3. As filmagens foram realizadas a 250 quadros por segundo e reproduzidas com uma velocidade de 5 até 250 quadros por segundo para serem gravadas.

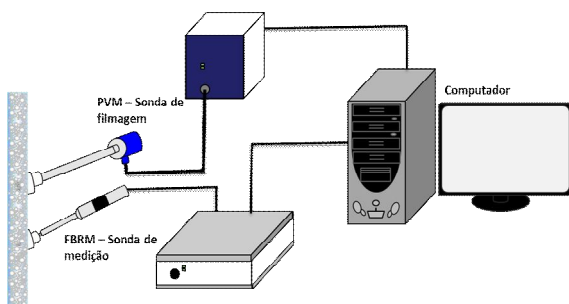
**Figura 3** - Esquema representativo do método não-intrusivo



### 2.2.3 Método online

Para obter o tamanho das bolhas geradas durante a flotação mineral foram utilizadas as sondas PVM (*Particle Vision and Measurement*) e FBRM (*Focused Beam Reflectance Measurement*). A PVM faz a filmagem das bolhas no sistema e a FBRM realiza a medição do tamanho das bolhas. Essas sondas foram adaptadas à unidade experimental com um ângulo de aproximadamente 45°, como mostra a Figura 4. A sonda FBRM é composta por uma fonte que emite o laser para módulos óticos. O laser é cuidadosamente focado no visor da sonda, cuja superfície externa está em contato com as partículas (no caso bolhas e partículas minerais). Assim, quando o laser passava por uma partícula, um pulso referente ao tempo que ele levava para percorrer de uma extremidade à outra da partícula era computado. Por fim, a duração de cada pulso multiplicado pela velocidade de varredura do laser resultava no comprimento de corda (distância entre as extremidades) da partícula medida. Como se trata de um método online, ao passo com que as bolhas eram medidas e filmadas, essas informações eram enviadas ao computador e processadas em tempo real. Ou seja, através de dois softwares distintos era possível observar as bolhas presentes no interior da coluna (PVM) e no outro (FBRM), a contagem das bolhas.

**Figura 4** - Esquema representativo do método online



### 2.3 Metodologia para medida do *holdup* de ar

Os valores de *holdup* de ar na coluna foram obtidos a partir dos manômetros diferenciais (7) acoplados à coluna como ilustrados na Figura 1, assim a partir dos valores de pressão obtidos foi possível obter o valor de *holdup* (DOBBY et al., 1988). Os desníveis observados nos manômetros eram medidos no momento em que não se observava uma variação significativa no *holdup* de ar da coluna.

### 2.4 Planejamento Experimental para o sistema ar-água

O Planejamento composto central (PCC) está apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** - Planejamento Composto Central

Teste	$J_G$ (cm/s)	C (ppm)	$Q_t$ (mL/min)	t (min)
1	0,5	15	50	5,0
2	0,5	15	50	20,0
3	0,5	15	100	5,0
4	0,5	15	100	20,0
5	0,5	50	50	5,0
6	0,5	50	50	20,0
7	0,5	50	100	5,0
8	0,5	50	100	20,0
9	2,0	15	50	5,0
10	2,0	15	50	20,0
11	2,0	15	100	5,0
12	2,0	15	100	20,0
13	2,0	50	50	5,0
14	2,0	50	50	20,0
15	2,0	50	100	5,0
16	2,0	50	100	20,0
17	0,1	32,5	75	12,5
18	2,4	32,5	75	12,5
19	1,25	6,6	75	12,5
20	1,25	58,5	75	12,5
21	1,25	32,5	38	12,5
22	1,25	32,5	112	12,5
23	1,25	32,5	75	1,4
24	1,25	32,5	75	23,6
25	1,25	32,5	75	12,5
26	1,25	32,5	75	12,5

Com o objetivo de verificar a ação do tensoativo (Genagen) e da velocidade superficial do gás no tamanho de bolha, no *holdup* de ar e na porcentagem de bolhas intermediárias geradas, os testes foram realizados a partir desse PCC. Foi utilizado um fator de ortogonalidade de 1,483 e duas réplicas no ponto central. As DTB foram obtidas a partir da amostragem de bolhas e da filmagem direta. A análise das imagens foi realizada através do software *ImageJ* e para cada condição foram medidas 500 bolhas, aproximadamente.

## 2.5 Planejamento Experimental para a flotação mineral

O estudo do tamanho de bolhas, utilizando as sondas FBRM e PVM, foi realizado em testes de flotação com minério. O minério (Apatita) utilizado para a realização deste trabalho foi fornecido pela Vale Fertilizante (unidade de Araxá-MG) e corresponde à alimentação do circuito de flotação de finos. Esses testes, realizados em regime batelada, foram conduzidos de modo a se obter a cinética da flotação, ou seja, a variação do teor de  $P_2O_5$  com o tempo de flotação.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise dos resultados do PCC

Na análise de regressão do PCC, as variáveis independentes: velocidade da fase gasosa ( $J_G$ ), concentração de tensoativo ( $C$ ), vazão de alimentação de tensoativo ( $Q_t$ ) e tempo de operação ( $t$ ) foram adimensionalizadas conforme as Equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

$$x_1 = \frac{J_G (\text{cm/s}) - 1,25}{0,75} \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{C (\text{ppm}) - 32,5}{17,5} \quad (2)$$

$$x_3 = \frac{Q_t (\text{mL/min}) - 75}{25} \quad (3)$$

$$x_4 = \frac{t (\text{min}) - 12,5}{7,5} \quad (4)$$

Para cada resposta avaliada foram obtidas, a partir de regressões múltiplas, equações empíricas que demonstram quais e de que forma as variáveis independentes influenciam o sistema. Assim nas equações abaixo,  $y_1$  é o *holdup* de ar ( $\epsilon_o$ ) com  $R^2 = 0,99$ ,  $y_2$  é o diâmetro médio de Sauter ( $D_{32}$ ) com  $R^2 = 0,92$  e  $y_3$  é a porcentagem de bolhas intermediárias ( $P_{BI}$ ) com  $R^2 = 0,87$ . Vale ressaltar que, a análise de regressão dos parâmetros foi realizada com um nível de significância de 10%.

$$y_1 = 10,49 + x_1 b_1 + x_2 B_1 x \quad (5)$$

onde:

$$b_1 = \begin{bmatrix} 3,66 \\ 1,11 \\ 1,01 \\ 0,88 \end{bmatrix} \text{ e } B_1 = \begin{bmatrix} -1,46 & 0,15 & 0 & 0 \\ 0,15 & 0 & 0,28 & 0 \\ 0 & 0,28 & 0 & -0,13 \\ 0 & 0 & -0,13 & -0,52 \end{bmatrix}$$

$$y_2 = 1383 + x_1 b_2 + x_2 B_2 x \quad (6)$$

$$\text{onde: } b_2 = \begin{bmatrix} 232 \\ -365 \\ -95 \\ -104 \end{bmatrix} \text{ e } B_2 = \begin{bmatrix} -225 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 160 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$y_3 = 50 + x_1 b_3 + x_2 B_3 x \quad (7)$$

$$\text{onde: } b_3 = \begin{bmatrix} -7 \\ 6 \\ 0 \\ 7 \end{bmatrix} \text{ e } B_3 = \begin{bmatrix} 11 & 4 & 0 & -3 \\ 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,5 \\ -3 & 0 & 2,5 & 0 \end{bmatrix}$$

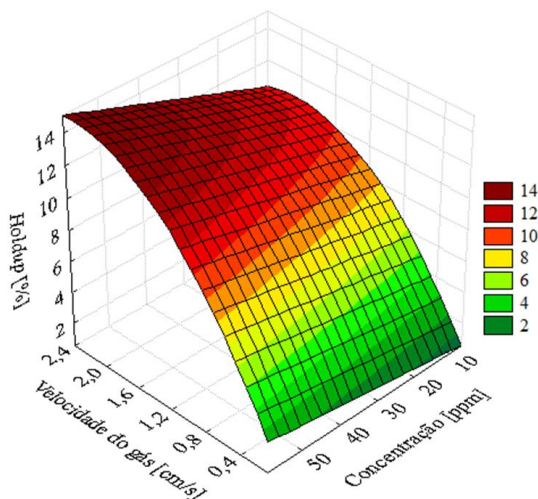
Na análise dos modelos empíricos obtidos notou-se que, para o tamanho de



bolha ( $y_2$ ), a variável que mais influenciou foi a concentração de tensoativo. A adição do tensoativo provoca a redução da tensão superficial do sistema o que contribui para diminuir a coalescência entre as bolhas, tendo como consequência a produção de bolhas com menor diâmetro (parâmetro negativo).

As Figuras 5 e 6 mostram a influência da velocidade superficial da fase gasosa ( $J_G$ ) e da concentração de tensoativo ( $C$ ) no holdup ( $\epsilon_0$ ) e no diâmetro médio de Sauter ( $D_{32}$ ), respectivamente. Para essa análise, as variáveis, vazão de alimentação de tensoativo e tempo de operação, foram fixadas no valor do seu nível central do planejamento.

**Figura 5** - Superfícies de resposta para o *holdup* de ar em função da velocidade superficial da fase gasosa e concentração de tensoativo.

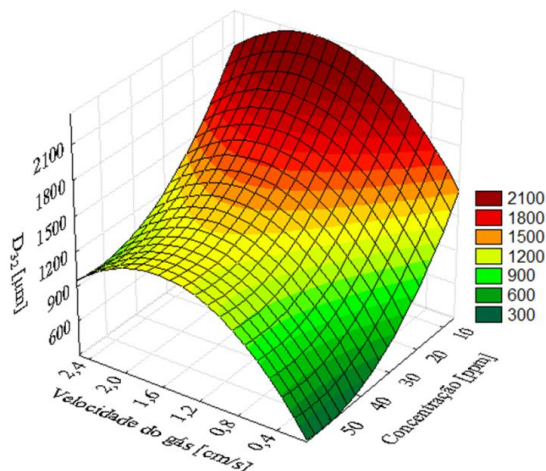


Observa-se que os maiores valores de holdup (12-14%) foram alcançados em uma região determinada da superfície de resposta, a qual corresponde às velocidades superficiais do gás entre 1,2 e 2,4 cm/s relacionadas a uma faixa de concentração de tensoativo a partir de 30 ppm.

Essa mesma região da velocidade superficial do gás na superfície obtida para o  $D_{32}$  corresponde às bolhas grandes para baixas e médias concentrações de tensoativo,

e para maiores concentrações de tensoativo os valores de  $D_{32}$  indicam uma DTB com bolhas provavelmente do tamanho intermediário.

**Figura 6** - Superfícies de resposta para o  $D_{32}$ , em função da velocidade superficial da fase gasosa e concentração de tensoativo.

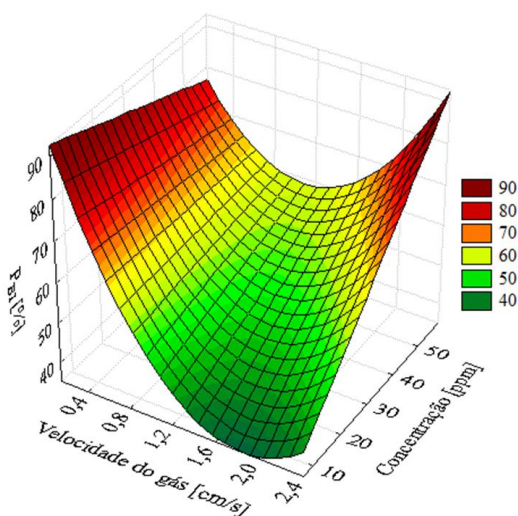


Zhou et al. (1993) observaram esse mesmo comportamento e afirmaram que os maiores valores de *holdup* na coluna não são necessariamente indicação de que foram geradas bolhas com diâmetro médio pequeno. Tal comportamento pode ser explicado pelo efeito de retardamento na ascensão das bolhas causado pela adição de tensoativos e/ou devido às maiores velocidades superficiais do gás.

O comportamento da porcentagem de bolhas intermediárias ( $P_{BI}$ ) frente às variações da velocidade superficial do gás ( $J_G$ ) e da concentração de tensoativo ( $C$ ) pode ser observado na Figura 7. O efeito quadrático da  $J_G$  e a sua interação com a concentração de tensoativo mostram que há duas regiões favorecendo a geração de bolhas com tamanho intermediário. A primeira região com  $J_G$  na faixa de 0,3 a 0,8 cm/s apresentou altos valores para a  $P_{BI}$  devido à formação de muitas bolhas pequenas. Porém, como foram vazões baixas, corresponderam aos menores

valores de *holdup* (2-8%). Nessa região observou-se que  $P_{BI}$  diminui com o aumento da concentração de tensoativo, pois, como nessas condições, sem a adição de tensoativo, as bolhas geradas apresentavam tamanho intermediário a pequeno, se utilizada uma alta concentração de tensoativos será favorecida a produção de microbolhas (Figura 6).

**Figura 7** - Superfícies de resposta para a  $P_{BI}$  em função da velocidade superficial da fase gasosa e concentração de tensoativo.



A segunda região, com altos valores de  $P_{BI}$ , ocorreu quando se utilizou simultaneamente as maiores velocidades superficiais de gás e concentrações de tensoativo. Relacionando essa região com a superfície de resposta obtida para o *holdup* ( $\epsilon_0$ ), nota-se que corresponde aos maiores valores de  $\epsilon_0$  encontrados (Figura 5).

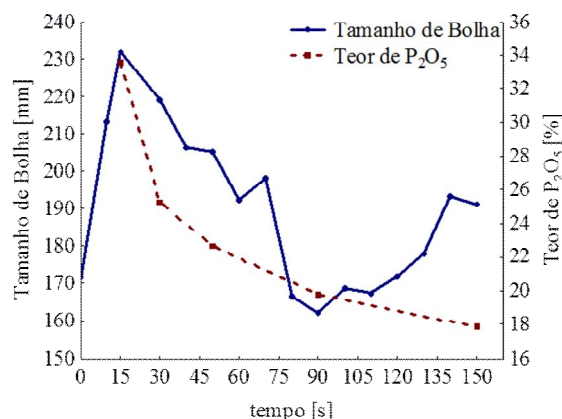
### 3.2 Análise do teste de cinética de flotação

As curvas que representam a cinética de flotação com base no teor de  $P_2O_5$  e a distribuição de tamanho de bolhas (DTB), para uma mesma condição de operação, são mostradas na Figura 8.

Observa-se que à medida que diminui o teor de  $P_2O_5$ , há uma consequente diminuição também no tamanho de bolha até o instante

$t=90$  s. Após esse tempo, observa-se que, embora o teor continue a diminuir, as bolhas começam a apresentar um tamanho médio maior do que o obtido nos instantes anteriores.

**Figura 8** - Variação do teor de  $P_2O_5$  e do tamanho de bolha na flotação.



Para melhor compreensão do comportamento observado para as curvas de teor de apatita e DTB, a Figura 9 mostra imagens da espuma de flotação correspondente a cada um dos tempos amostrados no teste de cinética.

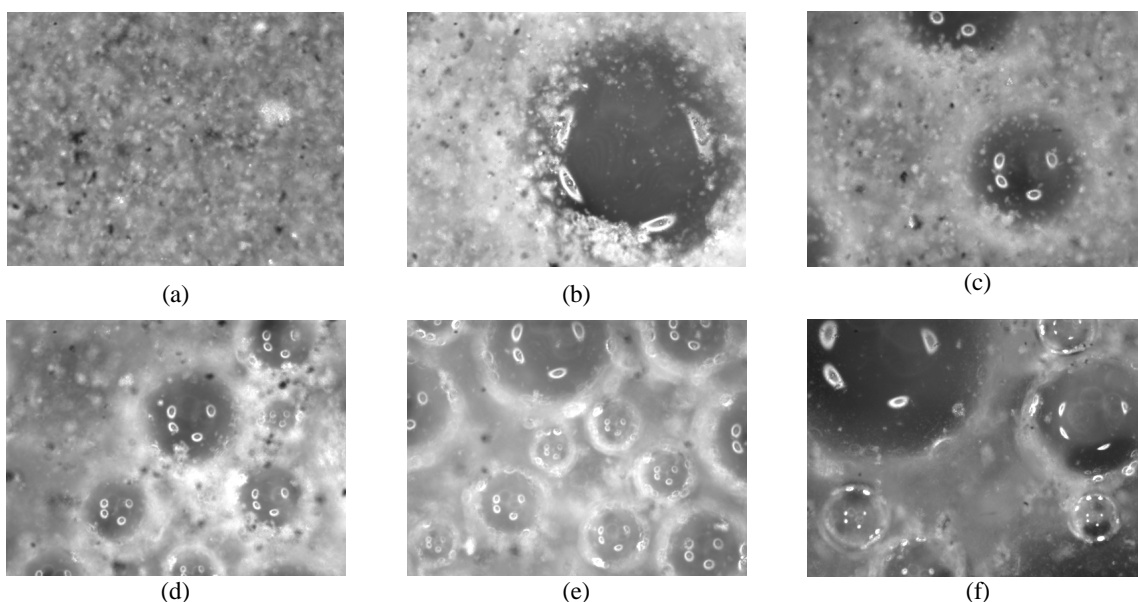
A Figura 9 (a), correspondente ao tempo  $t=0$  s, mostra o instante em que a polpa era alimentada à coluna correspondente ao início da formação da camada de espuma. Após 15 s de teste, a Figura 9 (b) mostra que neste intervalo havia uma espuma rica em minérios, pois é possível identificar os aglomerados de minério aderidos à superfície da bolha e uma extensa camada formada em torno da bolha, constituída de minérios e agregados de microbolhas e partículas.

Comparando essa imagem (Figura 9b) com o gráfico da Figura 8, nota-se que, nesse instante, foi obtido o maior teor de  $P_2O_5$ , e o maior tamanho de bolhas. O maior valor do teor de  $P_2O_5$  se deve pelo fato de que nesses 15 segundos iniciais, havia uma espuma rica em minério observada na imagem, e que o

mecanismo que prevalecia era o de adesão ou flotação verdadeira, ou seja, grande quantidade do mineral de interesse foi coletada pelas bolhas de forma seletiva, apresentando assim um maior teor. Quanto ao tamanho de bolha ter sido maior, isso ocorreu porque a sonda não distinguia bolha de minério, assim o diâmetro medido

correspondia à bolha e tudo o que estava envolto a ela. Como se observa, nesse instante, a camada de minério em torno da bolha é grande, consequentemente, foram medidas cordas maiores das bolhas, e o tamanho médio volumétrico das bolhas também foi maior.

**Figura 9** - Imagens da fase de espuma na flotação de apatita no tempo de (a) 0 s (alimentação da polpa); (b) 15 s; (c) 30 s; (d) 50 s; (e) 90 s e (f) 150 s.



A Figura 9 (c) mostra a imagem da espuma para 30 segundos de flotação. Confrontando essa informação com o gráfico da Figura 8, observou-se que nesse momento houve uma diminuição no valor do teor de  $P_2O_5$  e também do tamanho de bolhas. Observa-se na imagem, Figura 9 (c), que a espuma apresentou uma quantidade menor de aglomerados de partículas e a diminuição do teor indicou que houve uma flotação menos seletiva, ou seja, o mecanismo de adesão ocorreu com uma menor frequência. O que se pode concluir, é que já se pôde observar um empobrecimento da camada de espuma, pela diminuição da quantidade de minério presente. Por isso, o tamanho de bolhas

também diminuiu, pois, como na medida foi considerada a bolha e a camada de minério aderida à superfície da bolha, com uma espuma mais pobre, consequentemente essa camada de minério em torno da bolha foi menor, logo, tamanhos menores de corda foram medidos.

Este efeito então se prolonga para os tempos de 50 e 90 s nos quais se observam pela Figura 8 que, simultaneamente, o teor e o tamanho de bolhas continuam a diminuir. Pelas imagens, correspondentes aos tempos de  $t=50s$  e  $t=90s$  das Figuras 9 (d) e 9 (e), observa-se de forma mais intensa o empobrecimento da espuma a qual, à medida que avança o tempo, se apresenta com uma



quantidade menor de partículas. Logo, a coleta de partículas pelas bolhas torna-se um evento raro. Isso é comprovado pela diminuição do teor de  $P_2O_5$  mostrando que provavelmente o mecanismo de arraste prevaleceu, aumentando a recuperação de ganga a qual prejudica o teor alcançado ao final do processo. A diminuição do tamanho de bolhas confirma o empobrecimento da espuma pela diminuição da camada de minério envolvendo as bolhas.

Por fim, a Figura 9 (f) mostra uma espuma composta praticamente apenas por bolhas de ar e a fase líquida, e o baixo teor obtido neste instante mostra que o minério que estava sendo flotado era consequência, praticamente, apenas do mecanismo de arraste. A imagem comprova isso, pois se observa que a quantidade de partículas aderidas às bolhas é mínima. O gráfico da Figura 8 mostra que nesse instante o tamanho de bolhas aumentou. Esse efeito pode ser explicado pelo fato de que a diminuição considerável de partículas na fase de espuma possibilitou um contato maior entre as bolhas e, consequentemente, aumentou o fenômeno de coalescência resultando no aumento do tamanho médio das bolhas.

Cumpram ressaltar, que este teste de cinética mostrou informações importantes que dizem respeito à determinação do tempo de encerramento do teste, visto que foi observado que há uma queda considerável do valor do teor de apatita com o tempo de flotação.

#### 4 CONCLUSÕES

Portanto, uma análise global dos resultados do PCC, mostra que foi possível gerar bolhas nas três faixas de tamanho apresentadas, com a unidade projetada com o sistema de aeração de contato polpa-ar, através do acoplamento externo de um tubo Venturi à coluna. Assim, quando houve a adição de solução com tensoativo no sistema,

essa se apresentou como uma boa alternativa para gerar bolhas menores (intermediárias e microbolhas) e, principalmente promover condições em que foram obtidas altas porcentagem de bolhas intermediárias geradas, simultaneamente, com altos valores de *holdup* de ar. Condições estas favoráveis para o processo de flotação.

A comparação da DTB com um teste de cinética do teor de apatita permitiu observar que no processo batelada ocorreu um empobrecimento (redução de partículas minerais) da camada de espuma com o tempo de flotação, comprovado pela diminuição do teor observada no teste de cinética. Conclui-se que esse fato revela a necessidade de uma melhor definição da condição ideal de encerramento do teste de flotação.

#### REFERÊNCIAS

AHMED, N.; JAMESON, G. J. The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles. **International Journal of Mineral Processing**, v. 14, n. 3, p. 195-215, 1985.

CAPPONI, F., SARTORI, M.; SOUZA, M.L.; RUBIO, J. Modified column flotation of adsorbing iron hydroxide colloidal precipitates. **International Journal of Mineral Processing**, v. 79, n. 3, p. 167-173, 2006.

DOBBY, G. S.; YIANATOS, J. B.; FINCH, J. A. Estimation of bubble diameter in flotation columns from drift flux analysis. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 27, n. 2, p. 85-90, 1988.

FUERSTENAU, D. W. Fine particle flotation. In: Somasundaram, P. (Ed.), *Fine Particles Processing*. P. 669-705, 1980;

NGUYEN, A. V.; EVANS, G. M. Movement of fine particles on the air bubble surface

studied using high-speed vídeo microscopy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 273, p. 271-277, 2004.

REIS, A. S. **Estudo da geração de bolhas de diversos tamanhos em coluna de flotação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2015.

RIBEIRO, J. A. **Contribuição ao estudo experimental e em CFD da fluidodinâmica de colunas de bolhas com aplicações na separação de misturas oleosas e processamento mineral por ar dissolvido**. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

SANTANA, R.C.; RIBEIRO, J.A.; SANTOS, M.A.; REIS, A.S.; ATAIDE, C.H.; BARROZO, M.A.S. Flotation of fine apatitic ore using microbubbles. **Separation and Purification Technology**, v. 98, p. 402-409, 2012.

ZHOU, Z. A.; EGIEBOR, N. O.; PLITT, L. R. Frother effects on bubble size estimation in a flotation column. **Minerals engineering**, v. 6, n. 1, p. 55-67, 1993.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq, FAPEMIG e a CAPES pelo apoio Financeiro para a realização da pesquisa.