

CARACTERIZAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE PLANTAS DE FLOTAÇÃO: PARÂMETROS CINÉTICOS POR TAMANHO E TEOR¹

Keila L. Gonçalves²
Claudio Luiz Schneider³
Marisa Bezerra de Melo Monte⁴

Resumo

Um dos projetos de pesquisa da Vale está direcionado para a implementação de um procedimento prático de escalonamento de plantas de flotação. Neste contexto, uma caracterização detalhada da cinética de flotação é de grande importância. Este trabalho apresenta os resultados de uma campanha de caracterização de parâmetros de cinética de flotação em função da composição das partículas de minério de ferro. Uma amostra de itabirito compacto foi escolhida para o trabalho experimental porque este minério contém essencialmente duas fases, quer sejam quartzo e hematita, as quais apresentam densidades bastante distintas. Este tipo de minério responde à flotação iônica do quartzo e produz concentrados de hematita dentro das especificações de mercado. Uma série de ensaios de cinética foi executada de forma a produzir material suficiente para análise granulométrica e mineralógica para cada tempo de flotação. Estas análises produziram distribuições de teores de partícula condicionais em tamanho e tempo de flotação, nas tradicionais doze classes de composição começando em partículas de quartzo completamente liberado e terminando em hematita completamente liberada. Os cálculos envolvem a determinação de recuperações de partículas do mesmo tipo, ou seja, na mesma classe de teor, tamanho e tempo de flotação. Os resultados mostram que a taxa de flotação não varia com a composição e que a fração de partículas flotáveis e o tamanho das partículas controlam a seletividade do processo.

Palavras-chave: Flotação; Escalonamento; Simulação; Cinética.

CHARACTERIZATION FOR SIMULATING FLOTATION PLANTS: KINETIC PARAMETERS BY GRADE AND SIZE

Abstract

One of Vale's sponsored research projects is aimed at the implementation of a practical scale-up procedure for flotation. In this context, detailed flotation kinetics characterization is of critical importance. This work presents the results of a campaign aimed at characterizing flotation kinetic parameters with respect to particle composition. A special type of iron ore known as compact itabirite was chosen for the experimental work because it consists of essentially two phases, namely quartz and hematite which in turn have very distinct densities. This type of ore is amenable for ionic quartz flotation and produces concentrates within industrial specification. A series of standard kinetic tests were carried out in order to produce enough material in each flotation time for size analysis and mineralogical characterization. MLA analysis was carried out for 40 narrow-sized particle samples with known flotation time. This produces conditional, on size and flotation time, grade distributions with the traditional twelve grade classes, ranging from completely liberated quartz to completely liberated hematite. The calculations involve the determination of recoveries for particles of the same type, i.e. size and composition, at each flotation time. The results show that the rate of flotation of the particles doesn't vary much with composition and that the fraction of floatable particles in each grade class controls the separation action. Particle size also has an important role in the fraction of floatable phase.

Key words: Flotation; Scaling-up; Simulation; Kinetics.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira Química, Gerente, Cia. Vale, Belo Horizonte, Brasil.

³ Engenheiro de Minas, Coordenador de Processamento Mineral, CETEM, Rio de Janeiro, Brasil.

⁴ Engenheira Química, Coordenadora de Planejamento e Gestão da Inovação, CETEM, Rio de Janeiro, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O Centro de Desenvolvimento Mineral (CDM) da Vale, em Santa Luzia, Minas Gerais, realiza projetos de flotação e escalonamento. Uma das principais atividades do CDM é o projeto de circuitos de flotação. O problema do escalonamento de flotação dos vários minerais que vêm sendo estudados tem sido amplamente tratado com a utilização de uma Mini Planta Piloto (MPP). A principal razão para tal prática é a falta de um procedimento de escalonamento adequado com base em qualquer outro tipo de teste que não seja o de grande escala. A fim de melhorar a sua capacitação para projetos de flotação, a Vale decidiu investir no desenvolvimento de um procedimento de escalonamento de flotação, com base em um simulador de plantas de processamento e em alguns testes de flotação para a determinação de parâmetros. Se for bem sucedido, o simulador deverá fornecer informações suficientes sobre as configurações de circuito alternativas, incluindo as operações de remoagem, e que poderiam ser testadas em futuras campanhas de MPP. Modelos de flotação são amplamente discutidos em King,⁽¹⁾ Sutherland^(2,3) e Ralston.⁽⁴⁾ Uma descrição compreensiva e detalhada de todos os aspectos dos modelos de flotação está disponível em King.⁽⁵⁾ Os modelos de King e Sutherland estão implementados no simulador de plantas ModSim™.

A ideia básica do escalonamento de qualquer processo é basear o processo de escalonamento em um teste fundamental. Assim, um ensaio de flotação em batelada deveria servir como base para um procedimento de aumento de escala de flotação. A questão é: por que o ensaio de flotação em batelada não tem sido amplamente aceito como a base para o escalonamento de circuitos de flotação industriais? Como será mostrado aqui, um dos fatores é que o ensaio de flotação em batelada nem sempre mede parâmetros cinéticos fundamentais. Em vez disso, ele mede um conjunto de parâmetros cinéticos que resultam de uma série de processos, incluindo o arraste e a velocidade de ascensão das bolhas.

O ensaio tradicional de cinética em batelada é normalmente baseado na análise química das fases de interesse, e esta prática ignora totalmente a presença de partículas compósitas, ou, em outras palavras, as partículas não liberadas que contêm mais do que uma fase. A fim de eliminar este problema, é necessária uma caracterização detalhada da liberação. Aqui, os resultados de um ensaio padrão de cinética em batelada são mostrados para os quais os rejeitos e os produtos foram completamente caracterizados usando análise de imagem e o Analisador de Liberação Mineral (MLA). Isto produz informação cinética com base no teor e no tamanho. Por exemplo, é possível investigar como as partículas de um intervalo de tamanho específico, por exemplo -75+53 micrômetros, e uma classe de teor específica, digamos partículas com teor $g > 10\%$ de hematita até $g \leq 20\%$ de hematita, flutam. Comparações entre os diferentes tipos de partículas existentes na alimentação podem ser feitas em detalhe.

O conjunto completo dos resultados obtidos a partir desta caracterização é vasto. Uma análise inicial com base apenas na composição das diversas partículas foi apresentada em outra publicação por Gonçalves et al.⁽⁶⁾ Aqui, o efeito do tamanho das partículas é explorado mais detalhadamente.

2 EXPERIMENTAL

Uma grande amostra de itabirito compacto do sul do Brasil foi escolhida visto que este minério contém basicamente duas fases, hematita e quartzo, com outros

minerais apresentando teores tão baixos que, para todos os efeitos práticos, a amostra pode ser considerada um minério binário.

A amostra foi britada e moída num moinho de bolas a um P80 de cerca de 106 micrômetros, que é semelhante ao tamanho utilizado na planta industrial de flotação. Várias bateladas de 850 gramas cada foram preparadas a partir da amostra de alimentação, após homogeneização e amostragem. Os testes de flotação foram realizados em lotes em uma máquina de flotação Denver de laboratório com uma célula de dois litros. As condições experimentais dos ensaios são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições do ensaio da cinética de flotação

Condição	Valor
% sólidos	35
Velocidade do Rotor (RPM)	1100
Aeração (l/min)	3,0
Coletor	Éter-amina a 720 g/t de SiO ₂
Depressor	Amido a 800 g/t de minério
pH	10,5 ajustado com soda cáustica

A dosagem dos reagentes nos ensaios de batelada segue a dosagem utilizada na MPP. Este sistema é adequado para investigar o processo de escalonamento em questão. A fase a ser flotada é o quartzo e espera-se que a hematita, por sua vez, não flote.

Os intervalos de tempo dos ensaios foram escolhidos para fornecer informação segura sobre a taxa de flotação (com intervalos de tempo curtos na fase inicial do ensaio) e sobre a fração de partículas flotáveis (intervalos de tempo maiores ao final do ensaio), assegurando que a recuperação final fosse claramente definida. Os intervalos de tempo escolhidos foram de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-120 segundos. Os ensaios cinéticos em batelada produziram pequenas quantidades de amostra, especialmente nos intervalos de tempo maiores. Para solucionar este problema, o teste foi repetido cinco vezes, sob as mesmas condições, a fim de produzir material suficiente em cada intervalo de tempo para a análise granulométrica e mineralógica. Após a confirmação de que os cinco ensaios produziram resultados semelhantes, as cinco amostras de cada tempo de flotação e os afundados foram misturadas, homogeneizadas e peneiradas em seis faixas de tamanho: 212x150, 150x106, 106x75, 75x53, 53x38 e 38x0 micrômetros. Desta forma, a granulometria completa foi determinada para cada tempo de flotação.

O trabalho experimental produziu 40 amostras em um tempo de flotação e faixa de tamanho específicos, e seis amostras de afundados em faixas estreitas de tamanhos, representando o material não flotável após 120 segundos. Cada uma das amostras, com exceção das partículas <38 micrômetros, foi preparada para a análise mineralógica no MLA, a fim de produzir as distribuições de teores do sistema hematita-quartzo. As partículas >38 micrômetros foram submetidas à análise química apenas para determinar as frações relativas de quartzo e hematita. Isto completou o trabalho experimental.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Descrição Completa do Ensaio de Flotação em Batelada

Os resultados dos cinco ensaios de flotação em batelada que foram unificados estão resumidos na Figura 1. A informação que é necessária para determinar as taxas de flotação do quartzo e da hematita pode ser obtida por meio de análise química. Aqui, não há informação disponível sobre a composição das partículas e não se sabe se a hematita que está flotando está associada a partículas que também contém quartzo, ou se a hematita é livre e flota por arraste e/ou aprisionamento, por exemplo. Na Figura 1, as recuperações foram interpoladas com o modelo de primeira ordem mostrado na Equação 1.

$$R(t|g) = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

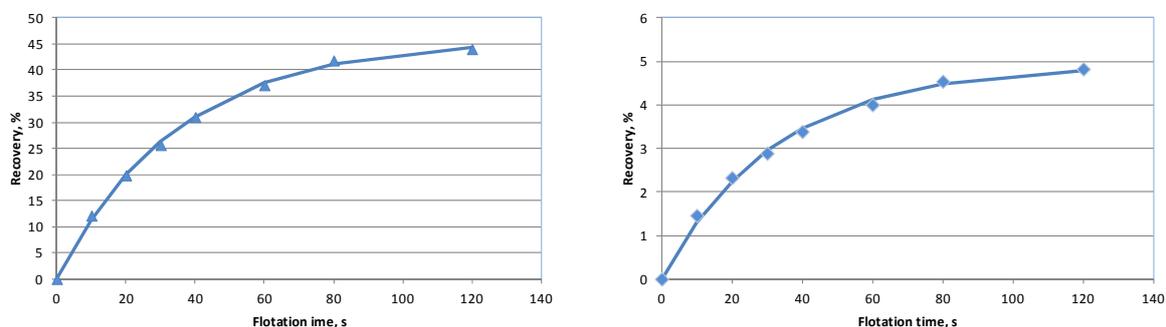


Figura 1. Recuperações do quartzo (esquerda) e da hematita (direita) versus tempo de flotação. Os símbolos são as recuperações medidas e as linhas representam as recuperações calculadas conforme a Equação 1.

Os parâmetros resultantes para a interpolação dos resultados gerais são apresentados na Tabela 2. Nota-se que a recuperação final do quartzo é uma ordem de magnitude maior que a da hematita. Por outro lado, as taxas de flotação estão muito próximas uma da outra com a hematita flotando ligeiramente mais rápido que o quartzo.

Tabela 2. Parâmetros cinéticos para as recuperações totais por fase

Fase	Taxa de flotação k , s^{-1}	Recuperação final R_{∞} , %
quartzo	0,0283	45,795
hematita	0,0307	4,899

É possível argumentar que as taxas de quartzo e hematita são próximas uma da outra porque as partículas de quartzo não liberadas carregam consigo, inevitavelmente, alguma hematita para a espuma com a mesma velocidade com que flutam. A hematita não flota e a recuperação final de cerca de 4,9% seria, em sua maioria, a hematita presa a partículas de quartzo. Como será mostrado na análise detalhada abaixo, isso não é o que está ocorrendo neste sistema.

3.2 Parâmetros Cinéticos por Tipo de Partícula

Os resultados das medições de cada intervalo de tempo do flotado e do afundado estão claramente ilustrados nas Figuras 2 e 3. O software MLA emite a fração em peso das partículas nos intervalos de teor que tem largura de 10%, e os dois

extremos completamente liberados, de quartzo puro (teor 0%) e de hematita pura (teor 100%). Na Figura 3, são mostradas as partículas recolhidas na espuma durante o segundo intervalo de tempo. Há uma grande contribuição das partículas de quartzo puro (classe de teor 0%) e quantidades consideráveis de partículas quase liberadas de quartzo no intervalo de teor 0-10%. A hematita liberada (classe 100%) aparece na espuma, principalmente na forma de partículas finas, no intervalo de tamanho 53 x 38 micrômetros. Distribuições condicionais como esta foram medidas para todos os sete intervalos de tempo de flotação, bem como para os afundados (partículas não flotáveis). Esta última é mostrada na Figura 3. Os afundados contêm principalmente partículas grossas de quartzo e partículas quase liberadas de quartzo grosseiro, bem como quantidades significativas de hematita liberada.

Os dados podem ser convertidos de volta para os tipos de partículas individuais caso se conheça a granulometria para cada intervalo de tempo de flotação e para os afundados. Os cálculos são bastante simples e podem ser realizados utilizando-se uma planilha de computador. Os cálculos são descritos em detalhe em Gonçalves, 2012. A tarefa principal é converter as distribuições condicionais na distribuição trivariada dos teores de partícula, tamanhos de partículas e tempos de flotação, $f(g,D,t)$. Uma vez que esta distribuição é conhecida, o cálculo das recuperações versus o tempo de flotação torna-se simples para qualquer tipo de partícula (combinação de tamanho e classe de teor).

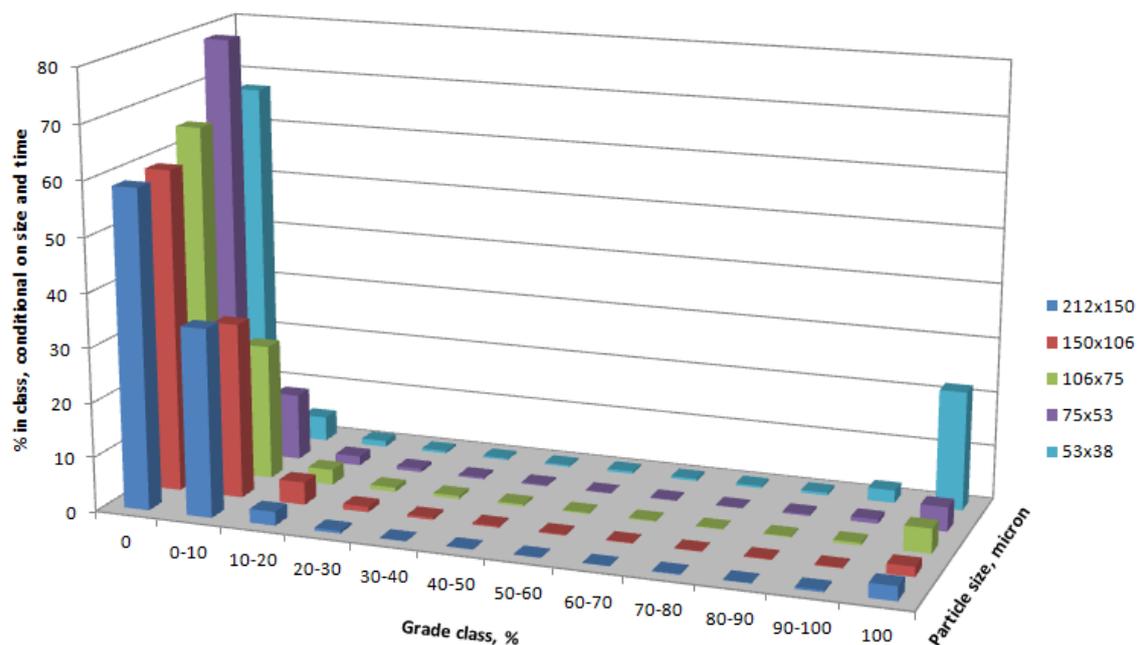


Figura 2. Distribuições condicionais, em tamanho, de teores de hematita para partículas que flotaram entre 10 e 20 segundos.

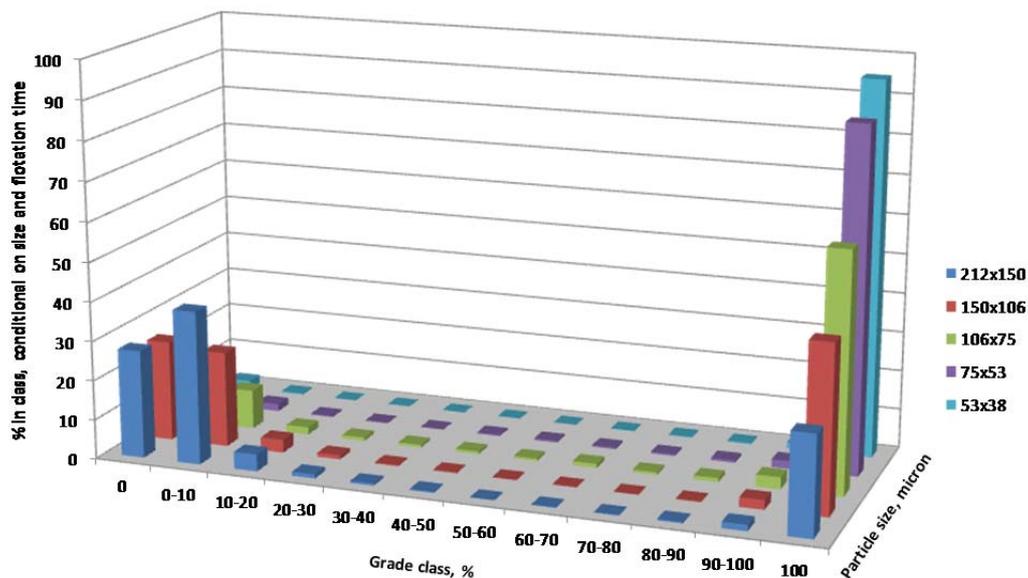


Figura 3. Distribuições condicionais, em tamanho, de teores de hematita para partículas que não flotaram após 120 segundos.

Foram realizadas sessenta interpolações cinéticas de primeira ordem, como as da Figura 1, cada uma correspondendo a uma combinação de tamanho de partículas e teor. As taxas resultantes, de acordo com o modelo de primeira ordem, são mostradas na Figura 4.

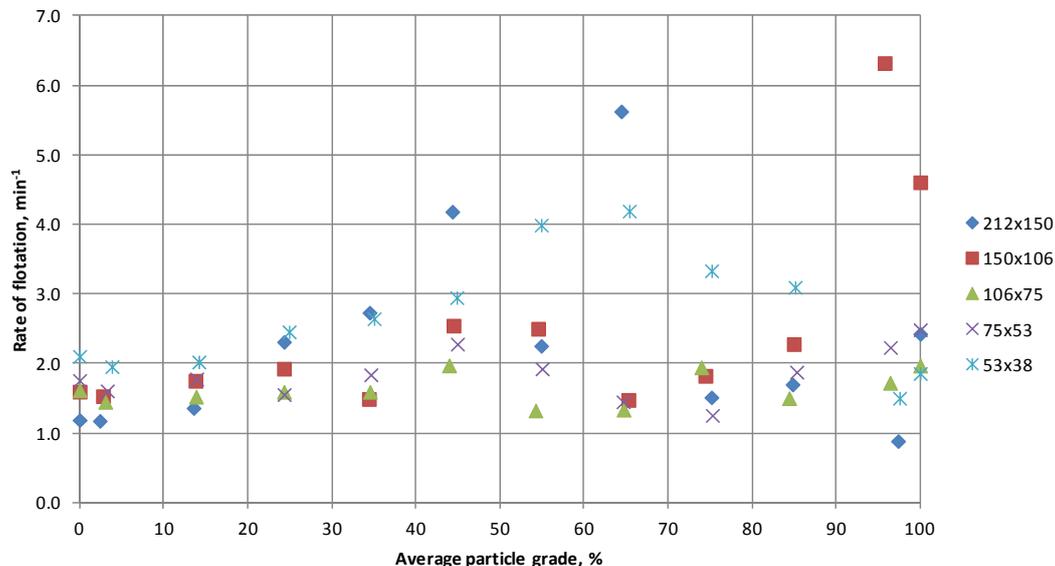


Figura 4. Taxas de flotação dos sessenta tipos de partículas analisadas.

Estes resultados, bem como os resultados gerais de flotação, mostram que as partículas de quartzo puro e as partículas de hematita pura flotam à mesma taxa. Na verdade, a maioria das taxas medidas gira em torno do valor de 2 min⁻¹. Há também uma abundância de ruído nas medições e as razões para tal fato são muitas. Uma razão importante é que existem muito poucas partículas nas classes de teor intermediárias, como mostrado nas Figuras 2 e 3. Há também alguma incerteza gerada a partir da natureza diferenciada da medição, uma vez que não é possível recolher a espuma em intervalos de tempo muito curtos, no início do ensaio. A medição do coeficiente k parece ser muito sensível ao primeiro ponto na curva de

cinética. Além disso, há erro de medição que é inerente à análise de imagem e também alguma segregação quando a hematita é amostrada, preferencialmente, devido à sua maior densidade nas seções transversais preparadas para a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A próxima fonte de erro é, provavelmente, devido à natureza estereológica do problema. No entanto, mesmo com todos esses problemas, o padrão principal é claro: as partículas parecem flotar à mesma taxa, independentemente do tamanho e do teor.

Embora este resultado possa parecer confuso, num primeiro momento, surge uma teoria que pode ser a única explicação razoável. Obviamente, esta não é uma medição das taxas cinéticas fundamentais e, de fato, o que está sendo medido é a taxa à qual as partículas são removidas com a espuma e o que está controlando a taxa de remoção é a velocidade de ascensão da bolha em vez da taxa líquida de adesão bolha-partícula, o que deve ter realmente ocorrido muito mais cedo na fase de polpa.

As recuperações finais da interpolação de primeira ordem são mostradas na Figura 5. Isso representa a fração de partículas flotáveis. As partículas restantes não flutam e são consideradas como tendo taxa zero.

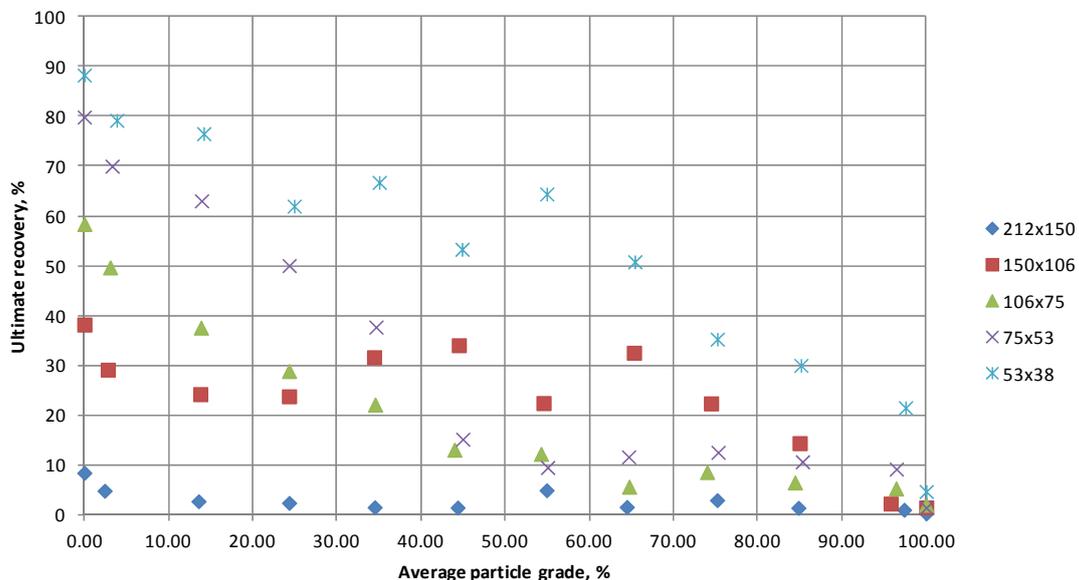


Figura 5. Recuperações finais medidas para cada tipo de partícula.

Os resultados na Figura 5 são muito menos ruidosos. Em primeiro lugar, é evidente que as partículas maiores são menos flotáveis do que as partículas mais finas. É possível concluir que o tamanho máximo para flotação situa-se nas partículas de tamanho entre 212 e 150 micrômetros. Quanto menor o tamanho das partículas, maior a fração flotável. É também evidente que as partículas de 53x38 micrômetros ainda são maiores do que o tamanho de recuperação máxima, o qual deve estar, provavelmente, bem abaixo de 38 micrômetros. À medida que o teor de hematita aumenta, a quantidade de partículas flotáveis diminui. Partículas de hematita pura são em sua maioria não flotáveis, como seria esperado, e a pequena fração de partículas que realmente flutam encontra-se ali provavelmente devido a processos hidrodinâmicos de arraste e aprisionamento. Para a faixa de 53x38 micrômetros observa-se uma relação praticamente direta entre a quantidade de quartzo na partícula e a fração flotável. Para as faixas de tamanhos de 75x53 e 106x75 micrômetros, parece que as partículas realmente flutam até cerca de 50% de hematita e as partículas de teor mais alto são apenas arrastadas para fora da célula

de flotação juntamente com as partículas flotáveis. As partículas mais grosseiras mal flotam e as de tamanho 150x106 micrômetros seguem um padrão estranho, talvez por estarem justamente na interface definida pelo tamanho máximo de partículas flotáveis.

4 CONCLUSÕES

O procedimento proposto parece ser confiável. No entanto, a modelagem de todo o processo de flotação em batelada usando um modelo simples de cinética de primeira ordem não é, claramente, a melhor estratégia. O próximo passo é a interpolação dos dados produzidos com uma implementação do modelo de King para a flotação em batelada. Isto irá produzir parâmetros para o efeito do tamanho de partícula, os coeficientes de transferência de massa que são requeridos, a fração flotável ou recuperação final de cada tipo de partícula, e, finalmente, os coeficientes e regimes de arraste que descrevem a hidrodinâmica da célula de flotação experimental. Também terão de ser medidas a distribuição de tamanhos de bolhas e as velocidades de ascensão.

É muito possível que, para a maioria dos sistemas, as taxas reais de flotação não possam ser medidas. Este deve ser o caso de todo o sistema para o qual a taxa líquida de adesão é muito mais rápida do que a taxa de remoção. Para todos estes sistemas, o escalonamento deve ser baseado na velocidade de ascensão da bolha em vez da taxa de flotação verdadeira.

A fração de partículas flotáveis tem relação direta com o teor das partículas, ou seja, a fração flotável de quartzo puro é sempre mais alta, e cai monotonicamente, a medida que o teor de hematita na partícula aumenta. A título de exemplo, a fração flotável de partículas de 106x75 μm de quartzo puro é de aproximadamente 58%, já as partículas deste tamanho que tem 50% de quartzo e 50% de hematita tem fração flotável de 10%, dadas as condições físico-químicas do ensaio.

Agradecimentos

Este projeto foi financiado com recursos do CNPq, através do CT-Mineral e pela Cia Vale, através de um projeto de cooperação científica e tecnológica com o CETEM.

REFERÊNCIAS

- 1 King, R.P. Model for the design and control of flotation plants. *Applications of Computer Methods in the Mineral Industry*. (M.D.G. Salamon and F. H. Lancaster, eds.) S. Afr. Inst. Min. Metall. Johannesburg. pp. 341-350, 1973.
- 2 Sutherland, D.N. An appreciation of galena concentration using a steady-state flotation model. *Intl. Jnl. Mineral Processing*, Vol. 4 pp. 149-162, 1977.
- 3 Sutherland, D.N. Batch flotation behaviour of composite particles. *Minerals Engineering*, Vol. 2 pp. 351-367, 1989.
- 4 Ralston, J. From Turbulence and Collision to Attachment and Detachment: A General Flotation Model, In: _____, *Flotation and Flocculation - From Fundamentals to Applications*, Proceedings from Strategic Workshop (J. Ralston, J. Miller and J. Rubio, eds.) University of South Australia, Adelaide, 2002.
- 5 King, R.P. Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems, 2nd Edition, Chapter 9, p. 341, SME, 2012.
- 6 Gonçalves, K., Schneider, C.L., Monte, M.B.M. and Hacha, R. (2012) Characterization for simulating flotation plants: complete batch scale test. Proceedings of the XXVI IMPC, New Delhi, India, 2012.