

REVISITANDO AS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE FLOTABILIDADE: UMA VISÃO CRÍTICA

Armando Corrêa de Araujo (1)
Roberto Galery (2)
Paulo Roberto de Magalhães Viana (3)
Diego de Souza Arenare (4)

(1) – Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Minas UFMG
armando@demin.ufmg.br

(2) – Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Minas UFMG
rgalery@demin.ufmg.br

(3) – Doutorando, CPGEM UFMG
pviana@demin.ufmg.br

(4) – Bolsista, Curso de Engenharia de Minas UFMG
diegoarenare@yahoo.com.br

RESUMO

O processo de flotação, que comemora seu centenário no presente ano, tem sido sem nenhuma dúvida, o mais bem sucedido processo de concentração de minerais em termos de aplicação prática pela indústria mineral de todo o mundo. A propriedade diferenciadora é, em sua essência, o grau de hidrofobicidade relativo atingido pelos minerais que se desejam separar, na presença de reagentes químicos que modificam suas superfícies. As medidas comumente empregadas para acessar de forma direta o grau da propriedade diferenciadora variaram de forma bastante significativa ao longo do desenvolvimento da flotação. Medidas estáticas de ângulo de contacto trifásico (sólido/água/ar) dominaram os estudos fundamentais da flotação nos seus primeiros cinquenta anos de vida. As medidas estáticas foram gradualmente sendo substituídas na literatura técnica por ensaios de microflotação com o emprego de diversas e diferentes montagens que, essencialmente, objetivam simular as diversas etapas do dinâmico processo da flotação em uma escala muito reduzida. O presente trabalho pretende revisitar essa história dos estudos fundamentais do processo de flotação através das técnicas empregadas para medir uma propriedade, associável ao desempenho do processo, normalmente chamada de flotabilidade. As técnicas de microflotação mais usuais, suas similaridades e diferenças e, principalmente, o significado dos resultados obtidos serão os assuntos discutidos e criticados no presente trabalho. Experiências de sucesso e insucesso serão também comentadas. Uma proposta de padronização de ensaios de microflotação será também sugerida dentro do contexto da comparabilidade desejada para os diversos estudos fundamentais realizados em todo o mundo.

Palavras-chave: flotação, microflotação, flotabilidade

1. INTRODUÇÃO

Tendo completado 100 anos em 2005, a flotação permitiu que a humanidade utilizasse recursos naturais que eram economicamente não atrativos ou que eram desperdiçados pela ausência de tecnologia adequada. É difícil mensurar precisamente os impactos da flotação nas atividades de natureza mineral. De qualquer forma, é impossível se imaginar a extração mineral econômica para praticamente todos os metais básicos (Cu, Pb, Zn, etc.) sem que a flotação tivesse sido desenvolvida e que sua aplicação tivesse sido tão bem sucedida. Diversos outros exemplos em relação a outros bens minerais metálicos e não metálicos podem ser dados como no caso de minérios de ferro, sais solúveis, fosfatos para fertilizantes e muitos outros.

Apesar de um começo pouco científico, a busca pelo entendimento dos princípios fundamentais do processo de flotação ocorreu a partir da primeira década que sucedeu à introdução industrial do processo. A necessidade de se isolar espécies minerais e estudar o comportamento dessas espécies individualmente na presença de reagentes diversos foi logo percebida por alguns poucos pesquisadores atuando no limiar da aplicação do processo de flotação.

O presente trabalho pretende descrever e discutir o emprego de técnicas laboratoriais dinâmicas, de pequena escala, nos estudos que visam tentar compreender, de uma forma de natureza mais fundamental, as interações mais básicas do processo de flotação – a transformação da natureza interfacial de superfícies minerais. Por um tempo significativo no início da aplicação da flotação utilizou-se óleo como fase apolar. O emprego de ar, que deu origem à técnica largamente empregada hoje, originalmente conhecida como flotação em espumas, só foi viabilizado a quando se compreendeu que a superfície dos minerais podia ter seu grau de hidrofobicidade controlado pela adição de reagentes. Esta evolução do processo de flotação aumentou extremamente a importância de estudos dos sistemas mineral-reagentes. Fazer estes estudos em escala industrial ou em bancada era inviável frente ao grande número de reagentes potencialmente empregáveis em diversos papéis na flotação. A tabela I mostra, resumidamente, as principais técnicas empregadas ao longo da história do processo de flotação.

Tabela 1 - Técnicas empregadas ao longo da história do processo de flotação

Técnica	Descrição sucinta
Tubo de ensaio modificado	Precursor de outras metodologias de microflotação, presente na literatura desde 1916 (ver figura 1), (Fuerstenau, 1999), (Leja e Poling, 1968).
Bubble pick-up	Usava tubo de vidro com entrada controlada de bolhas individuais de ar (ver figura 2), (Cooke e Digre, 1949).
Flotação a vácuo	Cilindro de vidro com precipitação de ar facilitada por vácuo. (Schuhmann e Prakash, 1950).
Mini célula de flotação (50g)	Usada para minerais puros e posteriormente para misturas de minerais. Início com Gaudin e colaboradores a partir da década de 20 do século passado, (Fuerstenau, 1999).
Célula de Smith & Partridge	Célula de vidro com agitador mecânico com haste de vidro permitindo uso para minerais magnéticos (ver figura 3), (Partridge e Smith, 1972).
Célula de Fuerstenau "porous frit cell"	Célula de vidro de 125 ml introduzida em 1963 com fundo de placa porosa e agitação com barra magnética, (Fuerstenau, 1999).
Célula EMDEE Microflot	Criada por Chudacek com forma de tubo de ensaio que é sacudida via mecanismo pneumático (ver figura 4), (Chudacek et al., 1992, Silva, 2004).
Tubo de Hallimond (original)	Introduzido em 1944 por Hallimond com o ar sendo introduzido no tubo através de um tubo capilar (ver figura 5), (apud. Klassen & Mokrousov, 1963).
Tubo de Hallimond (modificado 1)	Empregado por Ewers em 1952, que modificou as dimensões do tubo de Hallimond original (apud. Sutherland, K.L. and Wark, I.W., 1955).
Tubo de Hallimond (modificado 2)	Fuerstenau usou duas formas de admissão de gás: capilar ou placa porosa de vidro. Agitação com barra magnética. A versão com placa porosa é hoje usada mundialmente (ver figura 6), (Fuerstenau et al. 1957).
Tubo de Hallimond (outras modificações)	Em função de algumas limitações do tubo de Hallimond, outras alterações foram introduzidas para uso em situações específicas como tubo extensor (ver figura 7), (Marciano Neto, 1989), (Siwek et al., 1981).

2. DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS E CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS

2.1. Tubos de ensaio modificados

Os tubos de ensaio modificados ou não, podem ser considerados como a primeira técnica empregada para a microflotação de minerais. Os resultados são qualitativos e devido à simplicidade do método os tubos são usados até hoje para avaliar-se, de forma expedita, a condição de flotabilidade de minerais. Quando se tem um grande número de reagentes a testar, podem ser usados para se priorizar a realização de testes com técnicas mais apuradas. A figura 1 mostra alguns tubos usados por Ralston e Allen em testes de flotação.

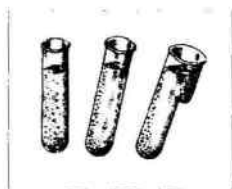


Figura 1 - Tubos de ensaio usados por Ralston e Allen em testes de flotação.

2.2. “Bubble pick-up”(tubo para captura por bolhas)

A técnica “bubble pick-up” gera resultados mostrando regiões de flotação completa, parcial e nula para condições específicas de adição de reagentes. A célula (ver figura 2) é um cilindro de vidro no qual é inserido um tubo central posicionado a poucos milímetros do fundo da célula. Esta posição é crítica, pois o ar passando pelo tubo, deve ser “pressionado” diretamente nas partículas no fundo da célula até que seja formada uma bolha. Os resultados são simplesmente uma condição qualitativa de coleta ou não coleta.

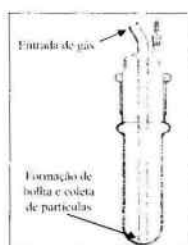


Figura 2 - Seção transversal de uma célula usada em testes pick-up

2.3. Flotação a vácuo

A montagem da flotação a vácuo é simples consistindo de um cilindro graduado de 100 ml com tampa. O cilindro é agitado para saturação da solução com ar e posteriormente é conectado a uma linha de vácuo. A porcentagem de partículas que flotam, devido à precipitação do ar na superfície das mesmas quando se reduz a pressão é estimada visualmente indicando regiões de nenhuma, pouca ou total flotabilidade.

2.3. Mini célula de flotação

A mini célula é uma pequena célula de vidro para a flotação de pequenas amostras, via de regra 50 g. A célula tem um agitador mecânico e o ar é introduzido pela ação do vórtex que se forma. Uma divisória vertical é usada para diminuir o arraste. A espuma é removida como em uma célula de bancada. Podem ser testados minerais puros, misturas sintéticas ou minérios naturais. Esta célula não mostra vantagem se

comparada com células de bancada que podem ter cubas de tamanhos diversos. A turbulência e o desvio de polpa para a espuma são grandes. É raro hoje em dia o uso deste tipo de célula na flotação.

2.4. Célula de Smith & Partridge

A célula de Smith & Partridge, mostrada na figura 3, é uma célula de vidro que possibilita a flotação de minerais fortemente magnéticos, uma vez que a agitação é feita por agitador mecânico também de vidro.

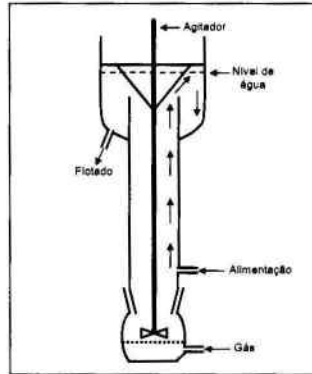


Figura 3 - Célula de Smith & Partridge

2.5. Célula de Maurice Fuerstenau

A célula de Fuerstenau consiste de uma pequena célula de vidro de 125 ml. O gás é introduzido na célula através de uma placa porosa de vidro que cobre todo o fundo da célula e a agitação é feita por barra e agitador magnéticos. A espuma é removida por pás de vidro e uma placa de vidro é submergida parcial e verticalmente para se evitar arraste. A célula é de fácil operação, permite um bom controle das variáveis operacionais, mostra boa repetibilidade e até hoje ainda é usada em pesquisas de caráter fundamental.

2.5. Célula EMDEE Microfot (Chudacek)

Conforme mostrado na figura 4, a célula EMDEE consiste de um tubo de vidro com volume de 100 ml e tampa removível, que é sacudido de forma controlada (número e frequência) por um acionador pneumático. Ao término da agitação do tubo, o material flotado é separado por sucção para secagem e pesagem. As condições operacionais são facilmente controladas e os resultados mostram excelente repetibilidade e reprodutibilidade sendo quase totalmente independentes do operador. Encontra-se com frequência estudos realizados com EMDEE na literatura atual sobre microflotação.

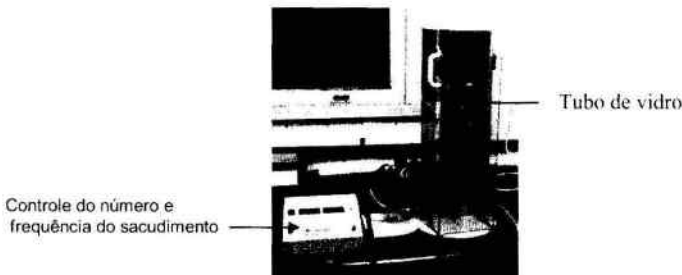


Figura 4 - Célula EMDEE

2.3. Tubo de Hallimond

Tubo de Hallimond original: O tubo criado por Hallimond, A. F. em 1944 está ilustrado na figura 5. Bolhas individuais de ar são introduzidas no fundo do tubo por meio de um capilar e passam através de uma camada de partículas posicionadas no fundo do tubo. As bolhas com as partículas coletadas sobem ao longo das paredes do tubo e alcançam a superfície da solução quando então se quebram soltando as partículas que caem em um depósito específico para partículas flotadas. Espuma pode eventualmente ser formada e neste caso a porção superior do tubo tem de ser lavada após a abertura do depósito.

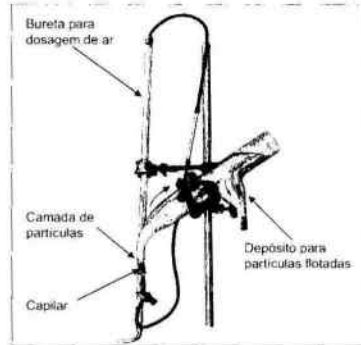


Figura 5 - Tubo de Hallimond original.

Tubo de Hallimond modificado: O tubo original de Hallimond sofreu 3 modificações principais, figuras 6A e 6B. Metzger (apud. Fuerstenau, 1999) dividiu o tubo em duas partes que se encaixavam através de uma junta esmerilhada e Fuerstenau e colaboradores (1957) adicionaram primeiramente um capilar de $60\mu\text{m}$ e usaram um agitador magnético para promover a suspensão das partículas além de estabelecerem os parâmetros geométricos do tubo que são usados até hoje. Posteriormente foi acrescentada uma placa porosa de vidro sinterizado para produzir uma melhor distribuição das bolhas de ar.

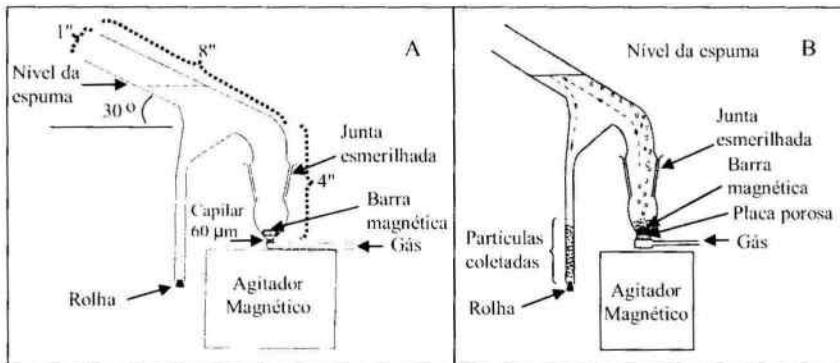


Figura 6 - Tubo de Hallimond modificado (A) e Inserção de placa porosa no tubo modificado (B).

Tubo de Hallimond (outras modificações): Diversas modificações do tubo de Hallimond para experimentos específicos têm sido realizadas. A figura 7 mostra dois exemplos: o uso de tubo de vidro extensor para faixas granulométricas mais finas como uma das medidas para se evitar o arraste das partículas muito finas (figura 7A) conforme Marciano (1987), e o uso de medida contínua de pH e atmosfera controlada na flotação de minerais carbonatados fracamente solúveis (figura 7B), Viana (1982).

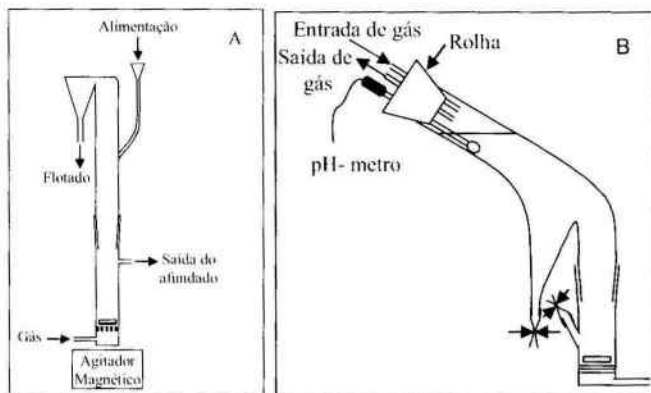


Figura 5 - Tubo modificado para faixas granulométricas mais finas (A) e atmosfera controlada (B)

3. SUGESTÕES PARA PADRONIZAÇÃO - TUBO DE HALLIMOND

As principais vantagens do Tubo de Hallimond sobre as outras técnicas anteriormente descritas são: fácil operação, alto nível de repetibilidade e reprodutibilidade, baixíssimo nível de dependência do operador, rapidez dos testes, excelente controle das variáveis do teste e resultados de flotabilidade mostram boa correlação com testes de bancada e mesmo com resultados de plantas industriais (Coelho, 1968). Para se alcançar as vantagens listadas alguns procedimentos padrão, discutidos a seguir, são recomendados.

3.1. Tempo de condicionamento e coleta

Os tempos de condicionamento e coleta devem ser estabelecidos em testes preliminares, mantendo-se todas as outras variáveis fixas. Uma vez estabelecidos, estes tempos devem ser mantidos. Eventual opção pode ser a adoção de tempos idênticos aos existentes na literatura de referência do pesquisador para que possa se comparar os resultados. Ênfase especial é dada, em geral, ao tempo de coleta porém dependendo da natureza do mecanismo de adsorção do coletor, o tempo de condicionamento pode variar significativamente como mostra a figura 6 (Viana, 2005) na microflotação de espodumênio com oleato.

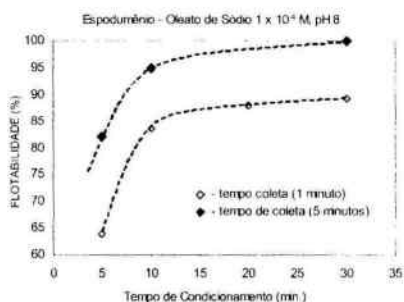


Figura 6 - Curvas dos tempos de condicionamento e coleta na microflotação de espodumênio.

3.2. Velocidade de agitação

A velocidade de agitação estabelecida no separador magnético afeta diretamente a flotabilidade tanto pela variação de arraste mecânico quanto pela variação da elevação de partículas e encurtamento do caminho para a superfície da suspensão. Considera-se que a melhor condição de agitação é a máxima possível em

que não ocorra arraste das partículas na ausência de reagentes coletores. A curva da figura 7 ilustra a forma geral de dependência da flotabilidade com a velocidade de agitação na presença de coletor.

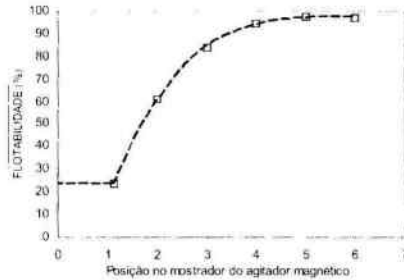


Figura 7 - Variação da flotabilidade com a velocidade de agitação.

3.2. Vazão de gás

Verifica-se na figura 8, adaptada de Fuerstenau et al. (1957), que a flotabilidade varia diretamente com a vazão de gás. Vazões de gás acima de 100 ml/minuto geram fluxos turbulentos no tubo com conseqüente arraste das partículas de forma praticamente independente do tamanho das partículas e do sistema que se estuda. Vazões usuais são de 10 a 80 ml/minuto para faixa de granulometria de 100 a 300 μm .

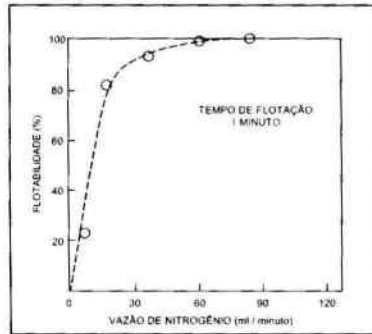


Figura 8 - Efeito da vazão de gás na flotação de esfalerita com etilxantato de potássio.

3.2. Testes em duas etapas - depressão e coleta

Para a realização de testes com uso de duas etapas distintas, primeiro depressão e depois coleta, têm-se normalmente duas opções:

- Condicionamento com o depressor diretamente na parte inferior do tubo e posterior complementação da solução para o condicionamento com o coletor
- Condicionamento com o depressor e coletor fora do tubo e transferência da suspensão para o tubo

Considera-se que o condicionamento fora do tubo, possibilita melhor controle da mistura das soluções e aparentemente melhor homogeneização das mesmas. Testes realizados com quatro minerais, amido e amina, mostraram que, quando as operações de condicionamento eram realizadas diretamente no tubo, ocorreu maior variabilidade dos resultados de flotabilidade (Viana, 2005). Os valores de flotabilidade foram também sistematicamente menores nesta situação. O gráfico da figura 9 mostra os resultados obtidos quando se realizou as etapas de condicionamento fora do tubo.

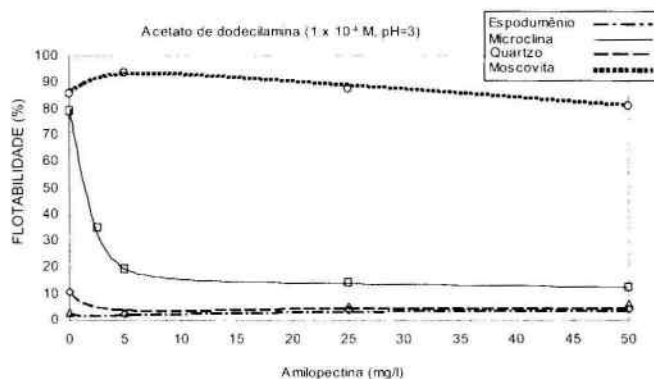


Figura 9 - Testes de microflotação com etapas de depressão e coleta.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chudaeck, M.W.; Fichera, M.A.; Rosa, M.D.; Silva, R.V.G., Flotation testing: from pure minerals to real ores, in: Salum, M.J.G. & Ciminelli, V.S.T. (eds), Flotation: fundamentals, practice and environment, Belo Horizonte, p.338-349, Belo Horizonte, ABTM, 1992.
- Coelho, E. M. Interpretation of microflotation test results. Dissertação de Mestrado. Stanford University, 38 p., 1968.
- Cooke, S. R. B. & Digre, M. Studies on the activation of quartz with calcium ion. Mining Transactions, v. 184, p.299-308, 1949.
- Fuerstenau, D. W.; Metzger, P. H.; Seale G. D. How to use this modified Hallimond tube for better flotation testing. Engineering and Mining Journal, 158:3, p. 93-95, 1957.
- Fuerstenau, D. W. The froth flotation century. In: Advances in flotation technology, Parekh, B. K. & Miller, J. D. (eds). Littleton, p. 3-21, 1999
- Klassen, V. I. & Mokrousov, V. A., An Introduction to the Theory of Flotation. Butterworths, London, p. 417-432, 1963.
- Leja, J & Poling, G.W. Unit Operations in Mineral Processing: Laboratory Manual, The University of British Columbia, Vancouver, 1968
- Marciano Neto, A. Influência dos silicatos de sódio e de potássio na flutuabilidade do sistema apatita/quartzo, dissertação de mestrado, CPGEM/UFMG, Belo Horizonte, 175p., 1989.
- Siwek, B.; Zembala, B.; Pomianowski, A., A method for determination of fine particle flotability, International Journal of Mineral Processing, v.8, p. 85-88, 1981.
- Silva, R.R.R., Sistemas de reagentes surfatantes na flotação reversa de minérios de ferro, dissertação de mestrado, CPGEM/UFMG, 2004.
- Schuhmann, R. & Prakash, B., Effect of $BaCl_2$ and other activators on soap flotation of quartz. Transactions AIME, 187, p. 591-600, 1950.
- Sutherland, K.L. & Wark, I.W., Principles of Flotation, Melbourne, AusIMME, 1955.
- Viana, P. R. M., Flotação de silicato de lítio, feldspato, muscovita e quartzo com coletores aniônicos, catiônicos, anfotéricos e mistura de coletores. Tese de Doutorado em elaboração, CPGEM/UFMG, 2005.