

INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS FÍSICAS NA FLOTAÇÃO DE PARTÍCULAS DE OURO

47

*FERNANDO FREITAS LINS
RUPEN ADAMIAN*

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA
Fernando Collor de Melo

SECRETÁRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
José Goldemberg

PRESIDENTE DO CNPq
Gerhard Jacob

DIRETORIA DE UNIDADES DE PESQUISA
José Duarte de Araújo

DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO
Jorge Almeida Guimarães

DIRETORIA DE PROGRAMAS
Augusto Cesar Bittencourt Pires

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

DIRETOR
Roberto C. Villas Bôas

VICE-DIRETOR
Francisco Rego Chaves Fernandes

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS - DTM
Adão Benvindo da Luz

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRATIVA - DME
Juliano Peres Barbosa

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE QUÍMICA INSTRUMENTAL - DQI
José Antonio Pires de Mello

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ESTUDOS E DESENVOLVIMENTO - DES
Ana Maria B. M. da Cunha

CHEFE DO DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO - DAD
Vornei Mendes

INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS FÍSICAS NA FLOTAÇÃO DE PARTÍCULAS DE OURO

FERNANDO FREITAS LINS *
RUPEN ADAMIAN **

* Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Pesquisador do CETEM/CNPq
** Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., Professor da COPPE/UFRJ

INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS FÍSICAS NA
FLOTAÇÃO DE PARTÍCULAS DE OURO. CETEM/CNPq
SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

FICHA TÉCNICA

COORDENAÇÃO EDITORIAL
Dayse Lúcia M. Lima

REVISÃO
Milton Torres B. e Silva

EDITORIAÇÃO ELETRÔNICA

PROGRAMAÇÃO VISUAL
Alessandra S. Wisnerowicz

COMPOSIÇÃO DE TEXTO
Fátima Mello

APOIO TÉCNICO
Divisão de Informática

ILUSTRAÇÃO
Jacinto Frangella

Pedidos ao:
CETEM - Centro de Tecnologia Mineral
Departamento de Estudos e Desenvolvimento - DES
Rua 4- Quadra D - Cidade Universitária - Ilha do Fundão
21949 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
Fone: 260-7222 - Ramal: 127 (BIBLIOTECA)

Solicita-se permuta.
We ask for change.

Lins, Fernando Freitas

Influência de algumas variáveis físicas na flotação de partículas de ouro / Fernando Freitas Lins e Rupen Adamian.
- Rio de Janeiro: CETEM, 1991

28 p. - (Série Tecnologia Mineral, 47)

1. Flotação. 2. Partículas de ouro. I. Adamian, Rupen.
II. Título. III. Série.

ISBN - 85-7227-005-1

CDD 622.7

**TECNOLOGIA
MINERAL**

INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS FÍSICAS NA FLOTAÇÃO DE PARTÍCULAS DE OURO

47

**FERNANDO FREITAS LINS
RUPEN ADAMIAN**



APRESENTAÇÃO

A influência das variáveis operacionais na flutuação mineral tem recebido a atenção de inúmeros pesquisadores. Entretanto, em que pese os enormes ganhos no conhecimento do fenômeno, ainda perduram pendentes questões das mais relevantes da hidrodinâmica e físico-química superficial referentes ao processo de concentração.

Este trabalho, muito bem exposto pelo Prof. Rupen Adamian e pelo Eng^o Metalúrgico; M.Sc. em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fernando Freitas Lins, apresenta aos engenheiros de processo e pesquisadores em geral, uma revisão analisada da problemática hidrodinâmica.

ROBERTO C. VILLAS BÔAS
DIRETOR

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	1
1. INTRODUÇÃO	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Percentagem de Sólidos	3
2.2 Aeração	6
2.3 Agitação	7
2.4 Granulometria Máxima de Recuperação por Flotação	8
3. MATERIAIS E MÉTODOS	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
5. CONCLUSÕES	23
6. COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES	24

RESUMO

A influência das variáveis percentagem de sólidos, aeração e velocidade de agitação no processo de flotação, foi estudada através de ensaios de bancada, utilizando-se misturas artificiais de quartzo com partículas de ouro de diversas granulometrias. Os resultados mostraram a importância do ajuste adequado nos níveis dessas variáveis para a recuperação de partículas grosseiras e melhoria da seletividade na flotação. O tamanho máximo de partícula de ouro recuperada eficientemente (0,71mm) está de acordo com modelos teóricos que não consideram a turbulência do processo de flotação. Comentários e sugestões sobre a aplicação dos resultados à prática industrial são apresentados.

ABSTRACT

An investigation on the influence of several variables, as solids percent, air flow rate and impeller speed on froth flotation of gold and quartz mixtures has shown the importance of adjusting these variables to recover coarse gold and to improve the selectivity of the process. The maximum size of gold particle efficiently recovered (0,71mm) agrees with theoretical models that do not take into account the turbulence existing in the flotation process. Comments and suggestions concerning the link of the data of this work with the mineral industry practice are envisaged.

1. INTRODUÇÃO

A flotação é um processo de concentração empregado desde o início deste século e, na atualidade, é largamente aplicada ao processamento de uma vasta gama de minérios. Apesar de sua consagração pela indústria mineral, sua complexidade, no entanto, faz com que os fenômenos envolvidos no processo não estejam ainda completamente esclarecidos. Os esforços dos pesquisadores neste sentido privilegiaram o estudo dos aspectos da química da flotação, deixando em segundo plano aqueles fatores chamados de físicos ou hidrodinâmicos: aeração, intensidade de agitação, percentagem de sólidos da polpa, geometria da célula e do rotor etc. O presente trabalho está direcionado ao estudo da influência da percentagem de sólidos, da aeração e da intensidade de agitação na flotação, através de uma revisão da literatura e de ensaios laboratoriais, com misturas de quartzo e partículas de ouro, de granulometria média (0,15mm) à grosseira (1,0mm). Os resultados ensejaram considerações sobre a granulometria máxima de recuperação por flotação e a seletividade do processo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - Percentagem de Sólidos

Gaudin ^[1], em 1939, afirmou que melhores recuperações são obtidas com polpas mais densas, devido à maior probabilidade de colisão entre os minerais e as bolhas de ar. O efeito na economia do processo também foi ressaltado por Gaudin: maior concentração de reagentes (para uma mesma vazão mássica), menor volume de células, menor consumo de água e de energia.

Taggart [2], em 1945, mencionou que a flotação é normalmente mais rápida e completa com uma polpa mais densa, enquanto o teor do concentrado varia inversamente com a percentagem de sólidos. Como exemplo, citou uma experiência realizada por Gaudin com mistura artificial de grãos de galena e granito, apresentada a seguir.

% Sólidos	8,0	12	15	21	38	46
Concentrado, % Pb	75	68	64	62	57	43
Rejeito, % Pb	0,56	0,45	0,27	0,15	0,14	0,12

Foi indicado também que uma polpa com minerais grosseiros deve ser mais densa que a formada por minerais finos, para compensar a tendência de sedimentação das partículas grosseiras e pesadas. Fez menção, no entanto, que para a flotação de partículas lamelares uma polpa mais diluída seria adequada.

Ainda Taggart [3], em seu livro-texto, afirmou, com base na experiência industrial, que, para um determinado mineral, quanto mais densa a polpa maior é o tamanho da partícula passível de ser flotada, mantidas as demais condições. E, também, que quanto menos denso for o mineral, maior o limite superior de tamanho sujeito à flotação. Reafirmou ainda que a elevação da percentagem de sólidos da polpa ajuda a levitação através do decréscimo do efeito gravitacional.

Sutherland e Wark [5], em 1955, ao comentarem o efeito da densidade de polpa, ativeram-se à sua influência no teor do concentrado. Gaudin [4], em 1957, em seu livro sobre o processo de flotação, fez a ressalva de que a diluição da polpa de flotação era um assunto ainda não definitivamente esclarecido; embora tomando como exemplo aquela mesma experiência da mistura de galena com granito, e levando em conta o aspecto prático do processo, considerou que a

polpa deve ser mais densa nas etapas primárias e mais diluídas nas etapas de limpeza. Em um *Handbook* mais recente, editado por Weiss [6], voltado ao processamento de minérios, as afirmações anteriores são repetidas (inclusive a experiência de Gaudin com galena e granito – a essa altura um exemplo clássico).

Em resumo, está mais ou menos estabelecido o seguinte: (i) maior recuperação e menor teor são obtidos com elevação da percentagem de sólidos em peso; (ii) a economicidade do processo é favorecida pela utilização de polpas mais densas (células com menor capacidade, menos água e energia) e (iii) polpas mais densas são requeridas com produtos de moagem grosseira e/ou com minerais de maior peso específico.

Fazendo agora uma incursão pela escola soviética, Glembotskii et al. [7], em 1963, afirmaram que a elevação da percentagem de sólidos além de certo ponto deteriora as condições de aeração na célula e também a flotabilidade das partículas grosseiras, além de aumentar a abrasão da superfície dos grãos.

Klassen e Mokrousov [8], em 1963, comentando a afirmação de Taggart de que a levitação das partículas grosseiras é reforçada pela maior densidade da polpa, levantaram uma questão interessante: a variação na densidade da polpa não afeta apenas a estabilidade da suspensão, mas também a fricção entre as partículas e bolhas, a aeração da polpa, a concentração de reagentes etc. Afirmam, então, que este é um tema ainda não suficientemente compreendido. Como exemplo, reportam ensaios realizados com enxofre nativo de várias granulometrias, nos quais as partículas grosseiras foram melhor recuperadas em polpas mais diluídas e as finas em polpas mais densas. Citam também que experiências industriais de várias usinas, com minérios não-sulfetados e carvões, mostraram que polpas mais diluídas favoreceram a flotação de partículas grosseiras. Por outro lado, em outra experiência relatada, foi constatada a maior dificuldade na flotação de galena grosseira em polpas mais diluídas.

2.2 - Aeração

As células de flotação mecânicas subaeradas podem ser divididas em dois tipos, segundo o modo de introdução do ar: auto-aeradas (*self-aerating cells*) e pressurizadas (*forced air cells*). No primeiro tipo a aeração é obtida pela geração de vácuo na região do rotor, suficiente para aspirar o ar atmosférico pelo eixo do rotor até o fundo da célula; o fluxo de ar, neste tipo de célula, depende da intensidade de agitação do rotor (ex.: Denver, Wemco). Nas células pressurizadas o ar é suprido, externamente à célula, através também do eixo do rotor, com pressão bastante para superar a pressão hidrostática da polpa na célula; a aeração e a velocidade de agitação são, portanto, variáveis independentes (ex.: Agitair).

Para os dois tipos de células o aumento da aeração, quantificada pelo fluxo de ar, reduz o volume de polpa que pode ser movimentado pelo rotor, diminuindo a velocidade de recirculação da polpa e, conseqüentemente, a capacidade de transporte das partículas grosseiras. Exemplificando: o aumento da aeração em uma célula pressurizada reduz a capacidade de suspensão, e a restrição da entrada de ar numa célula auto-aerada aumenta a capacidade de suspensão.^[9]

O efeito da variação do fluxo de ar na recuperação foi estudado por Sun e Zimmerman^[10] em uma célula de laboratório pressurizada, utilizando amostras pré-concentradas de carvão e galena, em três granulometrias. Com baixa aeração os minerais mais finos já eram flotados, enquanto os mais grossos começavam a flotar com aeração maior. Alcançada a recuperação máxima, para cada tipo de mineral e faixa de tamanho, as finas não sofriam mudança no nível de recuperação com o aumento da aeração. As intermediárias, e principalmente as grossas (8/10 malhas para o carvão e 35/48 malhas para galena), tinham suas recuperações diminuídas a partir de um determinado fluxo de ar.

Os mesmos pesquisadores^[10] explicaram a deficiência na recuperação das partículas grosseiras com baixa aeração pela falta de bolhas de ar para formar uma camada de bolhas quase compacta na superfície dos grãos, segundo eles, necessária à levitação e recuperação. Foi sugerida a hipótese de múltiplas bolhas aderidas ao mineral grosseiro para possibilitar a flotação, a qual será abordada mais adiante. A explicação para o decréscimo da recuperação, a partir de determinado fluxo de ar, foi o excesso de turbulência, que provocaria a desagregação do grupamento bolha(s)-partícula. Segundo Arbiter et al.^[9], o efeito da aeração excessiva seria comprometer a capacidade de transporte das partículas mais grosseiras, provocando, em última instância, a sedimentação das mesmas. Qualquer que seja o fator atuante, ou predominante, a flotação de minerais grosseiros é bastante sensível à taxa de aeração empregada, contrariamente ao que ocorre com os finos.

2.3 - Agitação

A suspensão dos minerais no seio da polpa é um pré-requisito para que ocorra a ligação bolha-partícula. As correntes de polpa originárias da região do rotor precisam ter velocidades iniciais suficientes para transportar as partículas grosseiras para os locais mais distantes da célula. Nas regiões onde a velocidade crítica, determinada pelo maior tamanho de partícula, não é mantida ocorrerá a sedimentação, até o ponto em que essas regiões sejam preenchidas com sólidos.^[9]

Nas experiências realizadas por Sun e Zimmerman^[10], variando-se a velocidade de agitação e fixando-se a aeração, verificou-se que uma agitação mínima foi requerida para a recuperação eficiente dos minerais (carvão e galena, três faixas granulométricas), e quanto maiores o tamanho e a densidade da partícula, maior a velocidade de agitação mínima. Aumentando-se a agitação, a partir de determinada magnitude, ocorreu primeiramente a queda na recuperação das

partículas grosseiras e densas, depois a das frações intermediárias e densas. A fração fina de galena (< 200 malhas), e a intermediária e a fina de carvão não tiveram a recuperação afetada com a agitação excessiva. O decréscimo na recuperação foi explicado pelo aumento da turbulência, provocando a ruptura do agregado bolha-partícula quando a partícula é mais pesada. A adesão das partículas finas e leves às bolhas é mais estável e estes agregados apresentam maior mobilidade, tornando-se menos sensíveis ao excesso de turbulência.

O estudo dos aspectos físicos e hidrodinâmicos relacionados ao escalonamento da célula de flotação e às condições operacionais mereceu mais atenção nos últimos vinte e cinco anos. [11] [15] Uma vez definida a geometria do sistema, as variáveis velocidade de agitação e aeração podem afetar marcadamente as condições de suspensão da polpa, a cinética e a seletividade do processo, merecendo a mesma atenção na otimização do processo, juntamente com a percentagem de sólidos, que aquela normalmente reservada ao estudo de química de superfície.

2.4 - Granulometria Máxima de Recuperação por Flotação

O tamanho máximo de um mineral recuperável por flotação depende principalmente de dois fatores:[16] da reduzida estabilidade do agregado bolha-partícula, devido ao peso da partícula, e da limitada capacidade da bolha de carrear partículas grandes para a superfície da polpa.

Primeiramente considere-se o caso de uma partícula que se mantém na superfície livre de um líquido em condições estáticas, mercê de um grande ângulo de contato θ . Se a força que impede a partícula de afundar, força de adesão, for igualada ao efeito da força da gravidade, obtém-se a equação [I], onde V_p é o volume da partícula, ℓ o perímetro da linha de contato das três fases (sólidos, líquido e gás), γ_{LG} a tensão superficial entre líquido e o gás, u_p e

u_L as massas específicas da partícula e do líquido, e g a aceleração da gravidade. [17]

$$\text{sen } \theta = \frac{V_p}{\ell \gamma_{LG}} (u_p - u_L)g \quad [I]$$

Esta equação permite calcular o menor valor de θ que dá sustentação à partícula na superfície do líquido. Em uma célula de flotação o agregado bolha-partícula não está sujeito apenas à força da gravidade, mas também às forças centrífuga e de fricção [18]. Gaudin [17] [18] explicitou a equação [I] para o tamanho de partícula, D , considerando um cilindro com diâmetro da base igual à altura, considerando também o líquido sendo água ($u_L = 1,0\text{g/cm}^3$), a área de contato entre as três fases como uma circunferência de diâmetro D (implicando em $\ell = \pi D$) obtendo a equação [II], onde $n = 1$ em uma condição estática. Em uma operação de flotação, n apresenta valores entre 50 e 100.

$$D_{max}^2 = \frac{4\gamma_{LG} \cdot \text{sen } \theta}{(u_p - 1)ng} \quad [II]$$

Para partículas de ouro ($u_p = 19\text{g/cm}^3$), os valores de D_{max} para n igual a 1, 50 e 100 são, respectivamente, 1,26mm, 0,18mm e 0,13mm (para $\theta = 90^\circ$ e $\gamma_{LG} = 70 \text{ dyn/cm}$).

Finch e Smith [19] usaram a equação [III] para o cálculo teórico de tamanho máximo de flotação, desenvolvida para uma partícula esférica. Para uma esfera de ouro resulta num tamanho máximo de flotação de 1,1mm, próximo daquele calculado com a equação [II], com $n = 1$.

$$D_{max}^2 = \frac{6\gamma_{LG} \cdot \text{sen}^2(\theta/2)}{(u_p-1)g} \quad \text{[III]}$$

Schulze^[17] desenvolveu a equação [IV] para partículas esféricas, a qual, em condições estáticas ($b_m = 0$) se reduz à equação [III]. A aceleração do vortex, b_m , representa a aceleração média na célula de flotação.

$$D_{max}^2 = \frac{-6\gamma_{LG}\text{sen}(180-0,5\theta)\text{sen}(180+0,5\theta)}{(u_p-u_L)g+u_p b_m} \quad \text{[IV]}$$

De modo geral, o cálculo teórico da granulometria máxima de flotação em condição estática – isto é, situação na qual apenas a força de gravidade contrabalança a força de adesão entre a partícula e a bolha – supera de uma ordem de grandeza o verificado na indústria. [19]

Uma vez assegurada a estabilidade do agregado bolha-partícula, é mister que a bolha possa carrear a partícula até a superfície da polpa. Considerando-se a massa específica do ar como nula e a da água igual a $1,0\text{g}/\text{cm}^3$, a equação [V] relaciona o volume de bolha mínimo (V_b) que sustenta uma partícula imóvel, no seio da água, com o peso aparente da partícula, ou com suas dimensões e massa específica (V_p e u_p , volume e massa específica da partícula, respectivamente).

$$V_b = V_p(u_p - 1) \quad \text{[V]}$$

Sun e Zimmerman^[10] e Nicol^[20] sugeriram que o tamanho máximo de flutuação ou levitação da partícula é alcançado quando

esta, em vez de aderida a uma única bolha, se apresenta inteiramente recoberta por múltiplas bolhas, em uma monocamada. Sugeriram, então, a equação [VI], onde ΣV_b é o somatório dos volumes de bolhas aderidas às partículas e u_{pol} é a massa específica da polpa.

$$u_{pol} \cdot \Sigma V_b = V_p(u_p - u_{pol}) \quad \text{[VI]}$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra de ouro foi obtida a partir da purificação de um concentrado gravítico de um depósito aluvionar de Almerim-PA. Após peneiramento, cada fração foi submetida a uma limpeza química com solução de ácido nítrico por 48 horas. A caracterização das partículas de ouro foi realizada através da determinação do peso médio e do fator de forma de Corey (C_f)^[21] [22], obtido através da medição em microscópio da espessura (E), comprimento (C) e largura (L) da partícula. Os resultados estão na Tabela 1. A amostra de quartzo foi obtida com a britagem de cristais de quartzo em britadores de mandíbula e de rolos, utilizando-se nos ensaios a fração abaixo de 48 malhas, após purificação em separador magnético. A distribuição granulométrica do quartzo está apresentada na Tabela 2.

Tabela 1 - Caracterização da amostra de ouro.

Granulometria		Peso Médio **	C_f ***
(malhas)	(mm)*	(mg)	(E/\sqrt{CL})
14 x 20	1,001	7,79	0,42
20 x 28	0,711	3,24	0,48
28 x 35	0,503	1,21	0,46
35 x 48	0,356	0,41	0,58
48 x 65	0,251	0,23	0,44
65 x 80	0,191	0,10	0,40
80 x 100	0,161	0,05	0,44

* Dimensão média de abertura das peneiras

** Peso médio de 100 partículas

*** Dimensões médias de 20 partículas

(E = espessura, C = comprimento, L = largura da partícula)

Obs: Esferas e cubos apresentam $C_f = 1,0$

Tabela 2 - Granulometria da amostra de quartzo

Fração (malhas)*	Peso (%)	Peso Acumulado (%)
48 x 65	36,3	36,3
65 x 100	21,4	57,7
100 x 150	12,0	69,7
150 x 200	8,6	78,3
200 x 270	6,9	85,2
270 x 400	5,0	90,2
- 400	9,8	100,0
	100,0	

*Tyler

Os ensaios de flotação foram realizados em uma célula Galigher, Agitair, mod.LA-500 (subaeração, pressurizada), utilizando-se uma cuba de acrílico de volume nominal de 1,5ℓ. A aeração da célula foi efetuada com ar comprimido, filtrado, e controlado por um manômetro e um rotâmetro. Em cada ensaio colocava-se uma determinada quantidade de amostra de quartzo na cuba, adicionava-se água destilada e deionizada. A seguir, punha-se uma quantidade conhecida de ouro, adicionava-se o coletor (Aero 350, amil xantato, 50g/t), condicionava-se a polpa por 3 minutos e adicionava-se o espumante (Aerofroth-65, 30g/t); após 0,5min dava-se início à coleta, com a introdução de ar. A coleta da espuma (6min) foi efetuada manualmente por meio de um sistema de palhetas que limitava a penetração na espuma em 1,0cm. O pH de flotação esteve entre 6,5 e 7,2, ajustado com carbonato de sódio.

Para a variação da percentagem de sólidos em peso foram utilizadas quantidades de quartzo e ouro diferentes, de modo a manter o mesmo teor de ouro no "minério", qual seja, 167g/t. A quantidade de ouro em cada ensaio variou entre 25 e 117mg, e a de quartzo entre 150 e 700g. Em cada ensaio utilizou-se apenas uma fração granulométrica de ouro. A percentagem de sólidos variou de 9 a 40%, sendo mantidas nesta série de ensaios a velocidade de rotação (1200rpm) e a aeração (3,6ℓ/min).

No estudo do efeito da agitação, a aeração foi mantida em 10,8ℓ/min e a percentagem de sólidos na polpa em 33%. Para o estudo do efeito da aeração, a agitação foi de 1200rpm, com a mesma percentagem de sólidos anterior.

Para avaliar a recuperação de ouro em cada ensaio foi necessário apenas saber-se a quantidade de ouro presente no concentrado de flotação. Após secagem e pesagem o concentrado de flotação era purificado em bromofórmio. O afundado constava de partículas de ouro e de algumas partículas ferrosas, que eram eliminadas com um ímã. Após observação sob lupa binocular dos produtos magnéticos e não-magnéticos, para recuperação de partículas de

ouro ou eliminação de impurezas, fazia-se a pesagem do ouro em balança analítica. Calculava-se então a recuperação e o teor de ouro no concentrado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. 1 estão representados as recuperações e os teores dos concentrados de flotação para quatro granulometrias de ouro em função da percentagem de sólidos. As curvas mostram a tendência do teor decrescer com a elevação da percentagem de sólidos, confirmando a experiência prática e o mencionado na literatura; daí as operações de limpeza serem normalmente realizadas com polpas mais diluídas. Esses resultados estão associados à maior recuperação de ganga no concentrado com o aumento da densidade da polpa.

As curvas de recuperação indicam claramente que polpas mais diluídas favorecem a recuperação das frações de 20 x 28 e 28 x 35 malhas de forma marcante, e menos acentuadamente a fração 48 x 65 malhas, não afetando a recuperação da fração 80 x 100 malhas. Estes resultados contrariam as expectativas [1] [4] [6] no que diz respeito às partículas grosseiras. É possível que para partículas mais finas que 100 malhas a recuperação aumentasse com a elevação da percentagem de sólidos. A explicação desses resultados poderia ser feita pela variação das condições da polpa com a diluição, favorecendo a flotação das partículas grosseiras: menor fricção entre o agregado bolha-partícula e os minerais da polpa [8] e maior tamanho de bolha [24], o que ajudaria na levitação do agregado bolha-partícula. [16]

As curvas da Fig. 1 também indicam que, para uma determinada percentagem de sólidos, os teores e recuperações diminuem com o aumento da partícula de ouro, o que pode ser explicado pelo fato de que as outras variáveis físicas – velocidade de agitação e

aeração – estarem fixadas em níveis mais apropriados à seletividade e recuperação das partículas mais finas (confirmado pelos resultados dos ensaios apresentados a seguir).

Os resultados de variação do fluxo de ar estão representados na Fig. 2. Com respeito à recuperação de ouro, a fração mais fina (80 x 100 malhas) requer taxas de aeração menores do que aquelas necessárias às frações grosseiras, e, num intervalo relativamente amplo, de 1,8 a 5,4ℓ/min, a recuperação é satisfatória, seguindo-se uma tendência de decréscimo na recuperação com o aumento do fluxo de ar. Com as frações 35 x 48 e 28 x 35 malhas, os intervalos de aeração, nos quais a recuperação é satisfatória, são mais restritos, e quanto mais grosseiro o ouro maior a sua sensibilidade a essa variável. A explicação para a queda na recuperação com o aumento da aeração seria a desestabilização dos agregados bolha-partícula pela turbulência na polpa [10], principalmente com as partículas de maior tamanho, e/ou a diminuição da capacidade de recirculação da polpa, provocando primeiramente a sedimentação das partículas mais pesadas. [9]

O teor de ouro no concentrado também é afetado com o aumento da aeração, a partir de certa magnitude, dependendo esta da granulometria do ouro, o mais grosseiro mostrando-se mais sensível. A par da menor recuperação de ouro (em termos absolutos), a maior recuperação de ganga, devida ao arraste induzido por crescente fluxo de ar, explica esses resultados. Importante notar que os resultados da Fig. 2 indicam a possibilidade de obtenção de recuperações e teores aproximadamente equivalentes, em cada caso, se taxas de aeração adequadas forem aplicadas para cada fração granulométrica de ouro.

Os resultados de variação da velocidade de agitação do rotor estão representados na Fig. 3. Com a fração 80 x 100 malhas verifica-se um aumento na recuperação com a elevação da agitação. Apesar do aumento da turbulência, isto pode ser explicado pela melhoria das condições cinéticas, pela pouca sensibilidade do agre-

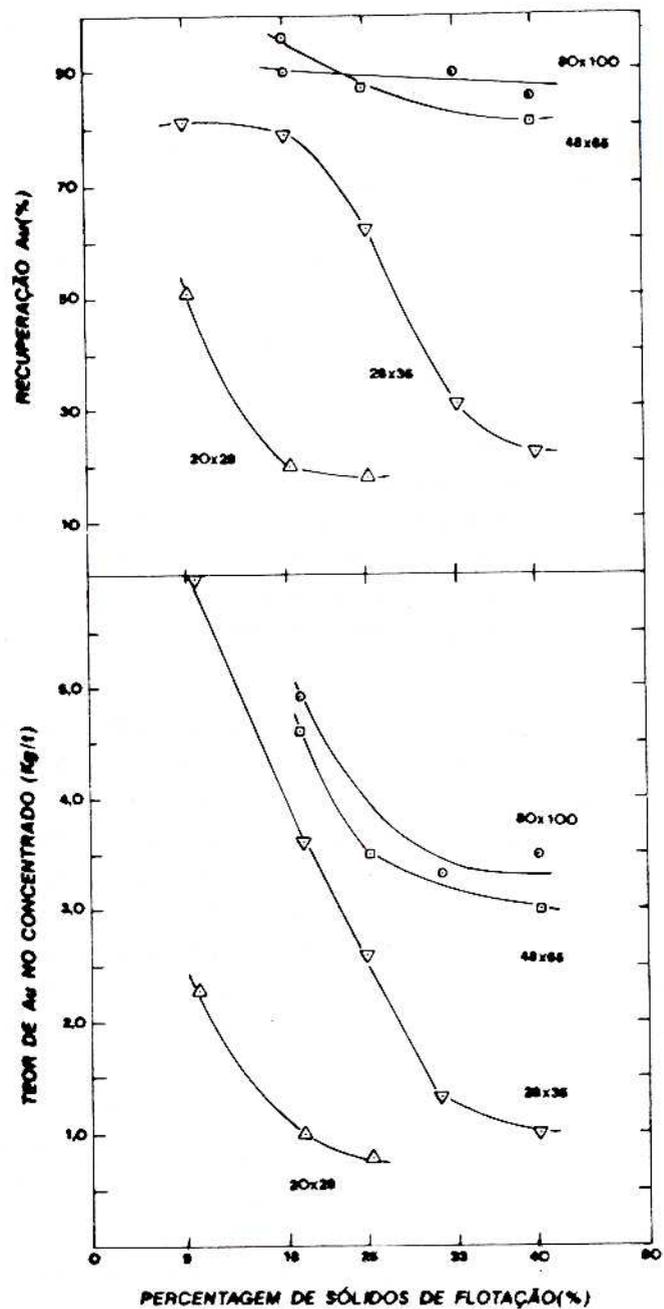


FIG. 1: RECUPERAÇÃO E TEOR DE OURO NO CONCENTRADO EM FUNÇÃO DA (%) DE SÓLIDOS, PARA DIVERSAS GRANULOMETRIAS DO OURO.

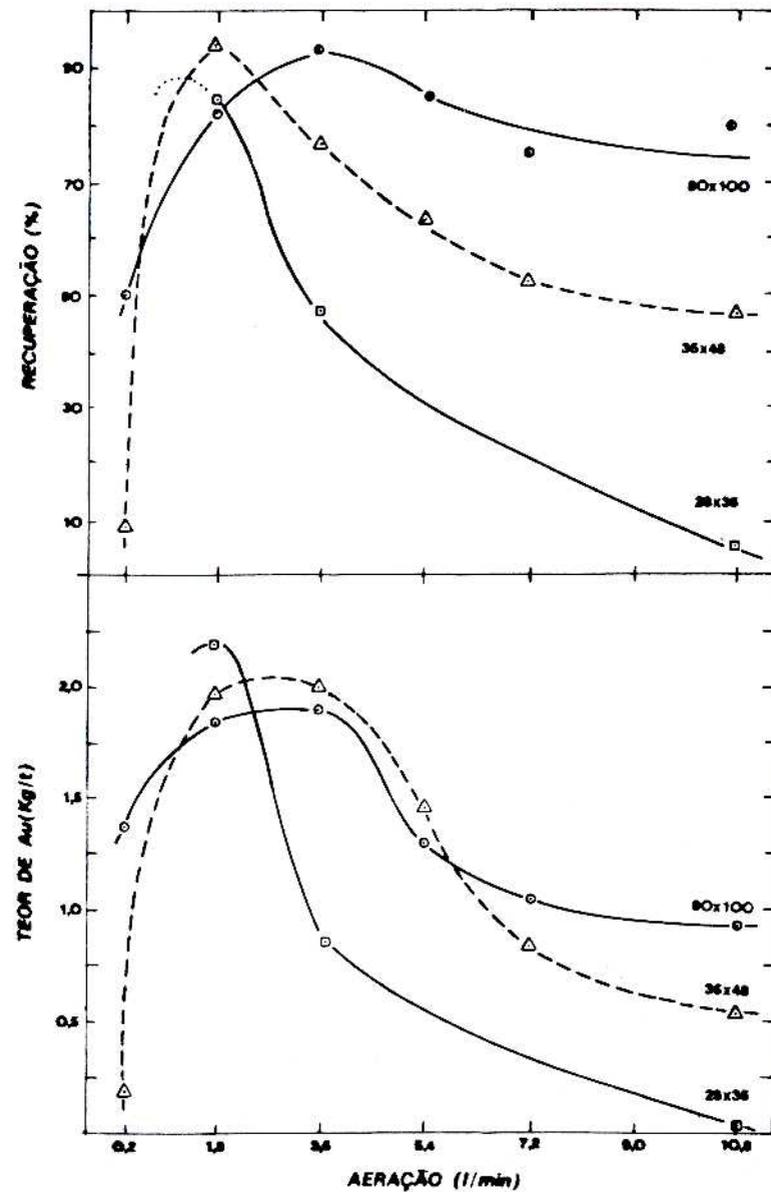


FIG. 2: RECUPERAÇÃO E TEOR DE OURO NO CONCENTRADO EM FUNÇÃO DA AERAÇÃO, PARA DIVERSAS GRANULOMETRIAS DO OURO.

gado bolha-partícula fina à turbulência e pela melhor condição de suspensão da polpa. Com relação ao teor, a previsível maior recuperação de ganga com o aumento da agitação parece ter sido compensada pela maior recuperação de ouro.

Com frações 35 x 48 e 28 x 35 malhas, as curvas da Fig. 3 mostram que as recuperações aumentam com a agitação a partir de valores distintos, correspondendo à melhoria da recirculação de polpa na célula, atingindo máximos de recuperação em valores de agitação diferentes. A agitação excessiva provoca a queda na recuperação, explicada pela predominância do efeito negativo da turbulência, que leva à desagregação da entidade de bolha-partícula, constatando-se também a maior susceptibilidade da fração 28 x 35 às condições físicas de flotação, apresentando menor recuperação que a fração 35 x 48 malhas. Com relação ao teor de ouro, o perfil das curvas dessas duas frações é semelhante àqueles de recuperação, e os mesmos argumentos já utilizados explicam os resultados; além da maior recuperação de massa de quartzo com a elevação da velocidade de agitação.

É interessante comparar as Figs. 2 e 3 e notar a diferença marcante nos teores máximos obtidos. Particularmente com a fração 80 x 100 malhas, a despeito de recuperações semelhantes (80 - 90%), o teor máximo obtido em condições mais brandas de flotação (Fig. 2) é o dobro daquele locado na Fig. 3, indicando a importância das condições físicas também na seletividade.

Em trabalho anterior [22], a partir do qual este foi extraído, as condições físicas mais favoráveis à recuperação de ouro grosso foram mais intensamente pesquisadas. Os resultados estão representados em curvas na Fig. 4, na qual a recuperação do ouro em função da granulometria pode ser apreciada, em duas situações de condições físicas (demais condições, químicas e outras, mantidas constantes). Verifica-se que, em condições físicas ajustadas, a granulometria máxima de ouro flotada eficientemente ($\simeq 80\%$ de recuperação) corresponde a 0,71mm (20 x 28 malhas), enquanto

em condições físicas não-favoráveis o tamanho máximo se limita a cerca de 0,3mm (48 malhas), o que torna evidente a importância dos níveis das variáveis físicas para a recuperação de partículas grosseiras.

É pertinente agora tecer algumas considerações a respeito da granulometria máxima de flotação. O tamanho máximo de partícula de ouro flotada eficientemente foi 0,71mm (Fig. 4). Considerando-se uma adesão estável entre bolha e partícula, por cálculos simples (equação [VI]) determina-se que uma bolha de diâmetro $\simeq 1,9$ mm seria requerida para levantar uma partícula de ouro de 0,71mm em água (ou uma bolha de $\simeq 1,5$ mm em polpa de quartzo com 37% de sólidos, quando $u_p = 1,3\text{g/cm}^3$). Segundo Arbiter [24], o tamanho das bolhas nas células de flotação varia entre 0,1 e 1,1mm, com média de 0,5mm. A adesão de múltiplas bolhas [10] [21] seria naturalmente uma explicação para a flutuação de partículas de ouro de 0,71mm.

Cálculos simples [22], a partir da equação [V], mostraram no entanto que, embora favorável, a adesão de múltiplas bolhas à partícula de ouro não é suficiente para fazê-la flutuar. Para o ouro foi obtida a relação $n = 0,8N^{3/2}$, na qual n é o número de bolhas de mesmo diâmetro necessário à flutuação e N o número de bolhas que é possível acomodar em uma monocamada na superfície da partícula. Verifica-se que, a partir de $N = 2$, n apresenta um valor progressivamente superior a N , com o aumento deste ($N = 5$, $n = 9$; $N = 10$, $n = 25$;...). A hipótese de aderência de múltiplas bolhas para permitir a levitação é, contudo, comprovável para partículas cúbicas de carvão, para as quais obteve-se a relação $n = 0,04N^{3/2}$.

Pode-se, portanto, especular sobre as razões que permitem a levitação de uma partícula de ouro de 0,71mm: (i) coalescência de bolhas antes ou depois da adesão partícula-bolha; (ii) componente vertical de velocidade do fluxo de polpa no interior da célula também pode ajudar na ascensão do agregado bolha-partícula e (iii) pode-se, alternativamente, por em questão o tamanho máximo de bolha no

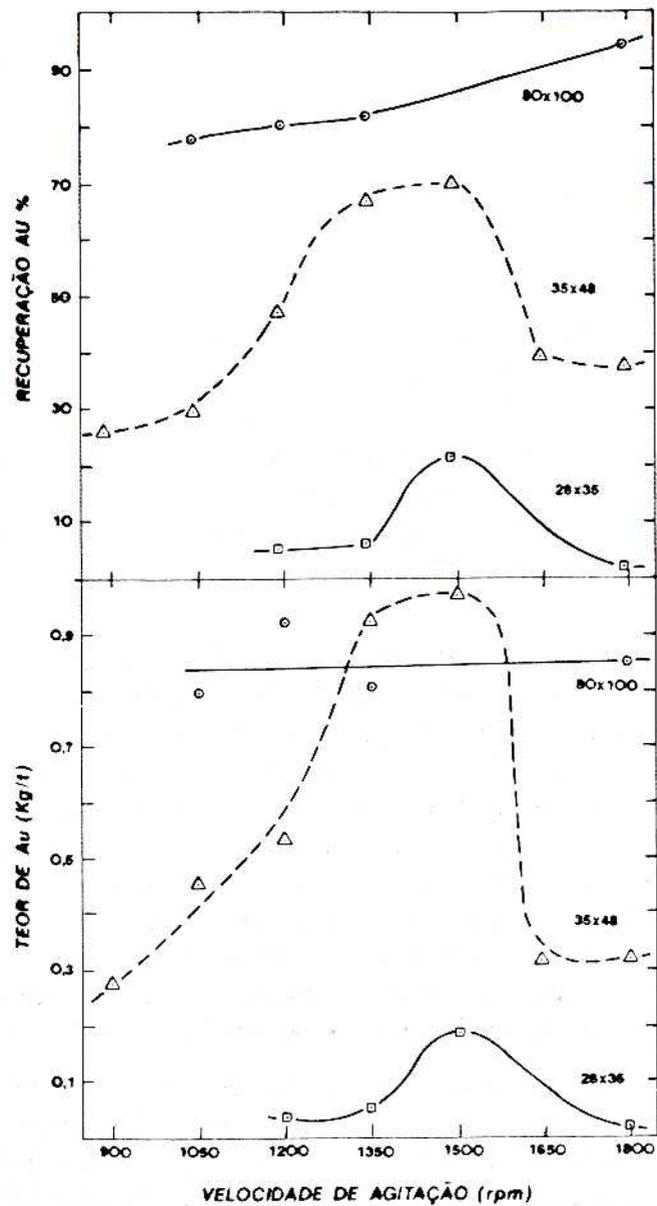


FIG. 3: RECUPERAÇÃO E TEOR DE OURO NO CONCENTRADO EM FUNÇÃO DA AGITAÇÃO, PARA DIVERSAS GRANULOMETRIAS DO OURO.

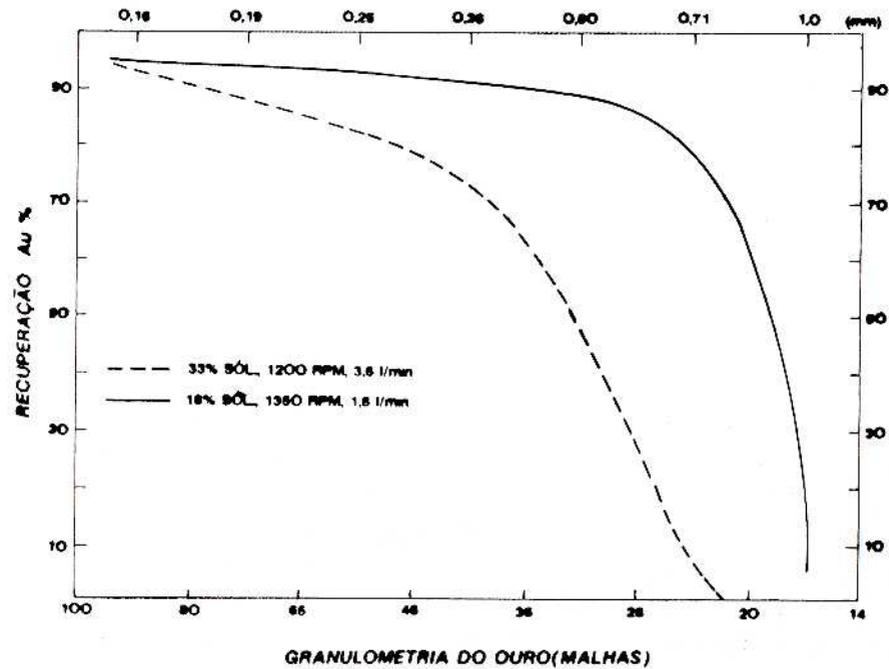


FIG. 4: RECUPERAÇÃO DO Au VERSUS GRANULOMETRIA, EM DUAS CONDIÇÕES FÍSICAS DISTINTAS

interior de uma célula de flotação – poderia ser maior que 1,1mm.

Finch e Smith [19] sugeriram que, a despeito da dificuldade de se obter modelos teóricos apropriados à previsão da granulometria máxima de flotação, pouco esforço tem sido realizado para determinar o tamanho limite de flotação da partícula. Citam que o valor de 0,8mm para o carvão resulta de considerações econômicas; 0,1mm para os sulfetos seria mais provavelmente o tamanho máximo que é alimentado na célula. Concluem finalmente que a indústria de flotação opera com granulometria muito menor do que aquela teoricamente possível.

Essa conclusão vai ao encontro deste trabalho. Com efeito, a utilização das equações [II], para $n = 1$, e [III], com $\gamma_{LG} = 50 \text{ dyn/cm}$ e $\theta = 60^\circ$ (valores mais realísticos para o sistema de flotação [19]), resulta em tamanhos máximos para partículas de ouro de 0,99mm (cilindro) e 0,65mm (esfera), comparáveis com aquele obtido neste trabalho (0,71mm), após o ajuste adequado das condições físicas.

A comprovação de que é possível recuperar eficientemente partículas em uma célula convencional de flotação com a granulometria máxima prevista teoricamente por equações que não consideram a turbulência é, sem dúvida, uma verificação empírica de interesse. Nesse sentido, a flotação de ouro constitui-se em um caso exemplar, devido à sua elevada massa específica, na medida em que a literatura consultada não registra flotação eficiente ($\geq 80\%$ de recuperação) de ouro grosseiro (> 48 malhas), em operações industriais ou em ensaios de laboratório convencionais.

5. CONCLUSÕES

- O decréscimo do teor de ouro no concentrado com a elevação da percentagem de sólidos na polpa de 9% a 40% correspondeu à expectativa;

- A maior recuperação de partículas de ouro grosseiras (80% para a fração 28 x 35 e 50% para a fração 20 x 28 malhas) obtida com polpas diluídas é de certo modo surpreendente, embora a literatura registre casos semelhantes para outros minerais; a mudança nas condições da polpa com a diluição, menor fricção e maior tamanho de bolha, pode ser uma explicação;

- A variação da taxa de aeração, utilizando-se as frações 28 x 35, 35 x 48 e 80 x 100 malhas, indicou que, se taxas adequadas forem aplicadas para cada fração, é possível obter-se recuperações e teores aproximadamente equivalentes, em cada caso, mostrando também a importância da variável para a seletividade;

- Com fração 80 x 100 malhas, o aumento da agitação elevou a recuperação de 80 a 95%, enquanto o teor de ouro não se alterou. Com as frações 35 x 48 e 28 x 35 malhas, a recuperação elevou-se de 25 a 70% e de 5 a 25%, respectivamente, até 1350-1500rpm. A partir de 1650rpm a recuperação de cada fração decresceu. A variação do teor com as frações 35 x 48 e 28 x 35 malhas foi semelhante à ocorrida com a recuperação.

- O cálculo do diâmetro de bolha necessário à flutuação de ouro 20 x 28 malhas (0,71mm) resultou em $\cong 1,9\text{mm}$, superior ao aceito como o predominante nas células de flotação (0,1 a 1,1mm). A adesão de múltiplas bolhas à partícula de ouro foi mostrada ser insuficiente para explicar a flutuação.

- O tamanho máximo de partícula de ouro (0,71mm) recuperado eficientemente (80%) está de acordo com o previsto teoricamente por equações que não consideram as condições de turbulência no

interior da célula. Neste sentido, esta verificação empírica é surpreendente, considerando-se a elevada massa específica do ouro.

6. COMENTÁRIOS FINAIS E SUGESTÕES

A abordagem deste trabalho permite a seguinte conclusão geral: a recuperação de partículas grosseiras por flotação e a seletividade podem ser maximizadas através do ajuste das variáveis físicas em uma célula de flotação convencional.

O incentivo para estender estes resultados a outros minerais é justificável. É sabido que, nas operações industriais de flotação, o aspecto da curva de recuperação versus tamanho dos concentrados de flotação obtidos mostra um declínio na recuperação na faixa fina e grosseira. Esta última, uma vez que as condições químicas sejam adequadas, poderia ser mais eficientemente recuperada pelo ajuste das condições físicas. As partículas mistas de tamanho médio a fino – que podem ser consideradas como apresentando a mesma dificuldade de flotação que partículas grossas liberadas – também poderiam ser melhor recuperadas em etapas de flotação primária ou em etapas de *scavenger*.

Aparentemente, as operações industriais de flotação em células convencionais podem estar trabalhando com excesso de turbulência: uma agitação muito maior do que a necessária para manter a polpa em suspensão e uma aeração muito superior à requerida para flotar os minerais hidrofóbicos, o que estaria prejudicando a seletividade em geral e a recuperação de partículas mais grosseiras.

A esse respeito, cabe comentar sobre dois tipos de células que nos últimos anos têm sido introduzidas na indústria mineral. A célula de flotação em coluna tem alcançado um crescente sucesso, embora inicialmente tenha se pensado em seu uso apenas nas etapas de limpeza – considerando sua eficiência na obtenção de concentrados

com maiores teores, portanto sua maior seletividade. Atualmente, no entanto, já é empregada em etapas primárias de flotação, onde já se verificou até sua eficiência na flotação de partículas grosseiras. A ligação com as conclusões deste trabalho é que a flotação em coluna trabalha em condições hidrodinâmicas mais brandas, ou seja, com menos turbulência.

Do outro lado, temos a flotação instantânea (*flash flotation*), sucedânea da flotação unitária empregada nos anos 30, que se caracteriza por ser uma célula circular que é alimentada pelo *underflow* do classificador do circuito de moagem, quer dizer, com 60 a 70% de sólidos.^[25] Nesse tipo de flotação as condições de turbulência a que é submetido um agregado bolha-mineral, devido só à alta percentagem de sólidos da polpa, são bastante acentuadas. Não surpreende que a recuperação seja baixa e o rejeito seja recirculado para o moinho; a recuperação adicional se dá na flotação convencional, que é alimentada pelo *overflow* do classificador. Logicamente a liberação insuficiente é um motivo para a baixa recuperação, mas a alta percentagem de sólidos também pode contribuir para tal.

Esse assunto, diante dos benefícios que podem ser obtidos, merece ser aprofundado. Na parte experimental deste trabalho fez-se uso de misturas sintéticas de ouro e quartzo; portanto, o percentual de minerais densos foi mínimo. No caso da flotação na etapa de limpeza de, por exemplo, minérios sulfetados, quais seriam os efeitos das variáveis físicas, considerando que a percentagem de minerais densos (sulfetos) é maior que aquela de ganga?

Informações bem recentes nos dão conta de que há um interesse emergente em estudos voltados para a recuperação de partículas grosseiras^[26], tanto pelo aspecto químico, investigando-se os espumantes (Universidade da Flórida - EUA), como pelo hidrodinâmico (Universidade de Laval - Canadá); assim como para o aumento da seletividade^[27] através da diminuição da turbulência pelo uso de placas ou lamelas em células convencionais.

O CETEM, em sua atual programação trienal, prevê um estudo visando avaliar o efeito de variáveis físicas na flotação em célula convencional, sendo desejável uma estreita colaboração com empresa(s) que se interesse(m) por um trabalho conjunto. Uma metodologia adequada englobando ensaios de laboratório e de usina piloto e/ou industrial seria indispensável. O aumento de recuperação e de teor, mesmo que apenas algumas unidades percentuais, bem como a diminuição do consumo energético na flotação e talvez na moagem (não se estaria moendo um pouco demais em alguns casos?) seriam objetivos mais que bem-vindos por qualquer empresa de mineração.

Referências

- [1] GAUDIN, A.M. Principles of Mineral Dressing. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1979. p. 358 - 404
- [2] TAGGART, A.F. Handbook of Mineral Dressing. New York: John Wiley, 1945. cap. 12, p. 28.
- [3] TAGGART, A.F. Elements of Ore Dressing. New York: John Wiley, 1951. cap. 18.
- [4] GAUDIN, A.M. Flotation 2. ed. New York: MacGraw-Hill, 1957. p. 366.
- [5] SUTHERLAND, K.L. & WARK, I.W. Principles of Flotation. Melbourne: AIMM, 1955, p. 20.
- [6] WEISS, M.L. (ed.). SME Mineral Processing Handbook. New York: SME, 1985. cap. 5, p. 9.
- [7] GLEMBOTSKII et alii. Flotation. New York: Primary Sources, 1972. p. 354.
- [8] KLASSEN, V.I. & MOKROUSOV, V.A. An Introduction to the Theory of Flotation. Tradução de J. Leja e G. Poling. London: Butterworths, 1963. p. 394-395
- [9] ARBITER, N. et alii. The air flow number in flotation machine scale up. Int. J. Mineral Processing, v. 3, p. 257-280, 1976.
- [10] SUN, S. C. & ZIMMERMAN, R. E. The mechanism of coarse coal and mineral froth flotations. Trans. AIME, v. 187, p. 616-622 [s.d]
- [11] ARBITER, N. & STEININGER, J. Hydrodynamics of flotation machines. In: Mineral Processing, New York: Pergamon Press, 1965. p. 595-608.

- [12] ARBITER, N. et. alii Hydrodynamics of flotation cells. *Trans. AIME*, v. 244, p. 134-148, 1969.
- [13] ARBITER, N. & HARRIS, C.C. Impeller speed and air rate in the optimization and scale-up of flotation machinery. *Trans. AIME*, v. 244, p. 115-117, 1969.
- [14] SCHUBERT, H.J. & BISCHDFBERGER, C. On the hydrodynamics of flotation machines. *Int. J. Mineral Processing*, v. 5, p. 131-142, 1978.
- [15] HARRIS, C.C. Flotation machine design, scale-up e performance: data base. In: SOMASUNDARAN, p. (ed.). *Advances in Mineral Processing*, New York: SME, 1986. p. 618-635.
- [16] SCHULZE, H.J. Dimensionless number and approximate calculations of the upper particle size of floatability in flotation machine. *Int. J. Mineral Processing*, p. 321-328, Oct. 1982.
- [17] Referência 4, cap. 7
- [18] Referência 1, cap. 15
- [19] FINCH, J.A. & SMITH, G.W. Contact angle and wetting. *Minerals Sci. Eng.*, v. 11, n. 1, p. 36-63, Jan. 1979.
- [20] NICOL, S.K. Some recent advances in coal flotation research. In: JONES, M.H. (ed.) & WOODCOCK, J.T. (ed.), *Principles of Mineral Flotation - The Wark Symposium*. Victoria: AIMM, 1984. p. 273-283.
- [21] WENQUAN, W. & POLING, G. Methods for recovering fine placer gold. *CIM Bulletin*, Ottawa, p. 47-56, Dec. 1983
- [22] LINS, F.A.F. Aspectos químicos, físicos e cinéticos da flotação de partículas de ouro, Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 1987. 120p. Tese de Mestrado.
- [23] Referência 7, p. 271-274.
- [24] ARBITER, N. The flotation cell - a critique. *Referência* 20, p. 301-311.
- [25] KALLIOINEM, J. & NITII, T. The basis of coarse flotation kinetics and practical realization of classifier sands flotation. In: *International Mineral Processing Congress*, 15. Cannes, 1985, 8p.
- [26] MOUDGIL, B. Curso proferido na COPPE-UFRJ em agosto de 1990.
- [27] RUBIO, J. & SOLARI, J. O processo de flotação lamelar no tratamento de um minério sulfetado de chumbo e zinco. In: *Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, 14. Salvador, 1990. *Anais*. p. 177-195.

NÚMEROS PUBLICADOS NA SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

- 01) - Flotação de carvão; estudos em escala de bancada; (esgotado)
- 02) - Beneficiamento de talco; estudos em escala de bancada; (esgotado)
- 03) - Beneficiamento de talco; estudos em usina piloto; (esgotado)
- 04) - Flotação de cianita da localidade de Boa Esperança (MG);
- 05) - Beneficiamento de diatomita do Ceará; (esgotado)
- 06) - Eletrorefino de zinco; uma revisão das variáveis influentes; (esgotado)
- 07) - Redução da gipsita com carvão vegetal; (esgotado)
- 08) - Beneficiamento de diatomita de Canavieira, Estado do Ceará; (esgotado)
- 09) - Moagem autógena de itabirito em escala piloto; (esgotado)
- 10) - Flotação de minério oxidado de zinco de baixo teor; (esgotado)
- 11) - Estudos de corrente de pulso sobre o eletrorefino de prata; (esgotado)
- 12) - Lixiviação bacteriana do sulfeto de cobre de baixo teor Caraíba; (esgotado)
- 13) - Flotação de minérios oxidados de zinco; uma revisão de literatura; (esgotado)
- 14) - Efeitos de alguns parâmetros operacionais no eletrorefino do ouro; (esgotado)
- 15) - Flotação de carvão de Santa Catarina em escala de bancada e piloto; (esgotado)

- 16) - Aglomeração seletiva de carvão de Santa Catarina, estudos preliminares;
- 17) - Briquetagem e sua importância para a indústria (em revisão); (esgotado)
- 18) - Aplicação de petrografia no beneficiamento de carvão por flotação;
- 19) - Recuperação do cobre do minério oxidado de Caraíba por extração por solventes em escala de bancada; (esgotado)
- 20) - Dynawhirpool (DWP) e sua aplicação na indústria mineral; (esgotado)
- 21) - Flotação dos rejeitos finos de scheelita em planta piloto; (esgotado)
- 22) - Coque de turfa e suas aplicações;
- 23) - Processo eletrolítico de ouro, processo Wohlwill; (esgotado)
- 24) - Flotação de oxidados de zinco; estudos em escala piloto;
- 25) - Dosagem de ouro;
- 26) - Beneficiamento e extração de ouro e prata de minério sulfetado;
- 27) - Extração por solvente de cobre do minério oxidado de Caraíba;
- 28) - Preparo eletrolítico de solução de ouro;
- 29) - Recuperação de prata de fixadores fotográficos; (esgotado)
- 30) - Amostragem para processamento mineral; (esgotado)
- 31) - Indicador de bibliotecas e centros de documentação em tecnologia mineral e geociências do Rio de Janeiro;
- 32) - Alternativa para o beneficiamento de minério de manganês de Urucum, Corumbá-MS;
- 33) - Biolixiviação de minério de cobre de baixo teor;
- 34) - Beneficiamento do calcário da região de Cantagalo;
- 35) - Aplicação da simulação de hidrociclones em circuitos de moagem;
- 36) - Estudos de um método simplificado para determinação do "Índice de Trabalho" e sua aplicação à remoagem;
- 37) - Metalurgia extrativa do ouro;
- 38) - Estudos de flotação do minério oxidado de zinco de Minas Gerais;
- 39) - Lista de termos para indexação em tecnologia mineral;
- 40) - Distribuição de germânio em frações densimétricas de carvões;
- 41) - Aspectos do beneficiamento de ouro aluvionar;
- 42) - Estudos tecnológicos para o aproveitamento da atapulgita de Guadalupe-PI;
- 43) - Tratamento de efluentes de carvão através de espessador de lamelas;
- 44) - Recuperação do ouro por amalgamação e cianetação - problemas ambientais e possíveis alternativas;
- 45) - Geopolítica dos novos materiais;
- 46) - Beneficiamento de calcário para as indústrias de tintas e plásticos;

