

## OTIMIZAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DE FINOS NO SCAVENGER-CLEANER NA USINA DO SOSSEGO

W.J. RODRIGUES<sup>1</sup>; M.A. NANKRAN<sup>2</sup>; R. FONSECA<sup>3</sup>; L. RABELO<sup>4</sup>

- (1) Diretoria do Departamento de Operações de Não Ferrosos de Carajás, Gerência de Processo do Cobre, Mina do Sossego - Cia. Vale do Rio Doce - Canaã dos Carajás, PA [wendel.rodrigues@cverd.com.br](mailto:wendel.rodrigues@cverd.com.br)
- (2) Diretoria do Departamento de Operações de Não Ferrosos de Carajás, Gerência de Processo do Cobre, Mina do Sossego - Cia. Vale do Rio Doce - Canaã dos Carajás, PA [marco.nankran@cverd.com.br](mailto:marco.nankran@cverd.com.br)
- (3) Diretoria do Departamento de Operações de Não Ferrosos de Carajás, Gerência de Processo do Cobre, Mina do Sossego - Cia. Vale do Rio Doce - Canaã dos Carajás, PA [ronaldo.fonseca@cverd.com.br](mailto:ronaldo.fonseca@cverd.com.br)
- (4) Diretoria do Departamento de Operações de Não Ferrosos de Carajás, Gerência de Processo do Cobre, Mina do Sossego - Cia. Vale do Rio Doce - Canaã dos Carajás, PA [lidiane.rabelo@cverd.com.br](mailto:lidiane.rabelo@cverd.com.br)

### RESUMO

Este trabalho descreve os estudos em laboratório e planta para aumentar a recuperação de finos no circuito industrial de flotação de minério de cobre do Sossego (Canaã dos Carajás-PA). Atualmente, o processo de concentração é constituído de duas linhas de flotação rougher, seis colunas de flotação cleaner e uma linha scavenger-cleaner. Ressalta-se que após o primeiro ano de operação da usina, observou-se a perda aproximada de 10% de cobre contido na fração inferior a 0,037 mm, nos estágios rougher e scavenger-cleaner, visualizando assim, uma oportunidade de melhora na recuperação metalúrgica total.

Numa fase inicial, focar-se-ão variáveis de processo do circuito industrial de flotação do Sossego, através de caracterização hidrodinâmica, amostragem, balanço de massa e avaliação dos pontos de dosagens de reagentes e pH. Ensaios em escala de laboratório foram realizados e evidenciaram um aumento na recuperação dos finos em dois pontos percentuais através do estagiamento de tio-coletores e carregamento de finos por grosso hidrofóbicos na flotação scavenger-cleaner.

Após conhecimento da influência das variáveis hidrodinâmicas e termodinâmicas nos mecanismos de flotação de partículas finas, serão propostas alterações operacionais no circuito de flotação, no intuito de otimizar a recuperação do cobre contido em partículas menores que 0,037 mm.

PALAVRAS CHAVES: finos; calcopirita; recuperação; flotação.

## 1. INTRODUÇÃO

A mina de cobre do Sossego, primeira da Companhia Vale do Rio, está localizada no norte do Brasil, precisamente no município de Canaã do Carajás-PA. O minério de cobre é basicamente calcopirítico (2 - 3%), sendo que a ganga compreende silicatos e magnetita, além de óxidos e carbonatos em quantidade menores. A mineralização com maiores teores de cobre é encontrada preferencialmente na zona brechada, além de sua disseminação, principalmente, em granitos, actinolitos e magnetitos.

A flotação do Sossego, constituída por duas linhas paralelas de rougher, seis colunas cleaner e uma linha de scavenger cleaner, tem capacidade de processo da ordem de 1.840 t/h. O minério tem um teor médio de cobre na alimentação em torno de 1%, sendo posteriormente concentrado por flotação em pH natural (~8,5) e com  $P_{80}$  de alimentação da ordem de 0,104 mm. Vale ressaltar ainda que, os reagentes utilizados na flotação com suas, respectivas, dosagens estão descritos na tabela 1.

Tabela 1. Reagentes usados na flotação do Sossego.

Reagente	Função	Dosagem típica (g/t)
éster xântico	Coletor	25
amil xantato de potássio	Coletor	10
metil iso-butil carbinol	Espumante	15
propileno glicol	Espumante	15

Durante primeiro ano de operação da usina do Sossego, observou-se nos estágios rougher e scavenger-cleaner, a perda aproximada de 10% de cobre contido na fração inferior a 0,037 mm. Desta forma, são, relativamente, freqüentes os problemas de alterações nos teores de cobre típicos dos rejeitos de ambas etapas. Este trabalho tem por objetivo propor alterações hidrodinâmicas e termodinâmicas ao processo para propiciar a otimização da flotação de ultrafinos.

Os processos básicos que governam a recuperação, ou a eficiência de coleta ( $E_{col}$ ), de partículas numa célula de flotação consistem no sucesso de três sub-processos consecutivos, a colisão ( $E_c$ ), adesão ( $E_a$ ) e estabilidade do agregado ( $E_s$ ), representados por suas, respectivas, eficiências, conforme apresentado na equação 1 (Trahar, 1981; Jewett, 1980; Schulze, 1977; Crawford e Ralston, 1988; Derjaguin e Dukhin, 1960; Rodrigues e Leal Filho, 2003).

$$E_{col} = E_c E_a E_s \quad (1)$$

A ocorrência de colisões entre partículas hidrofóbicas e bolhas de ar está condicionada ao ambiente hidrodinâmico no interior da célula, como a velocidade da bolha e turbulência, dentre outros fatores, enquanto que a adesão é dependente das condições termodinâmicas entre a partícula e bolha, como o tempo para adelgaçamento do filme líquido entre a fase sólida e gasosa. Quanto à eficiência de estabilidade do agregado, há domínio tanto das forças hidrodinâmicas como da termodinâmica (Jewett, 1980; Schulze, 1977; Crawford e Ralston, 1988; Derjaguin e Dukhin, 1960; Rodrigues e Leal Filho, 2003; Ralston et al., 1988; Finch e Dobby, 1990).

Desta forma a flotação apresenta um importante dilema prático: as mesmas forças que promovem o encontro das partículas com as bolhas (colisão) são capazes de prejudicar a estabilidade do agregado, ou seja, causar o seu rompimento. De um modo geral, o desempenho da flotação diminui quando o tamanho da partícula é superior a 300  $\mu\text{m}$  ou menor que 10-20  $\mu\text{m}$  (Trahar, 1981; Jewett, 1980; Schulze, 1977; Crawford e Ralston, 1988; Derjaguin e Dukhin, 1960; Rodrigues e Leal Filho, 2003; Ralston et al., 1988; Finch e Dobby, 1990).

Segundo a literatura corrente, o maior problema da flotação de partículas finas está associado à sua baixa eficiência de colisão com as bolhas. Embora o mecanismo de colisão partícula-bolha num ambiente turbulento seja bastante complexo, o sólido deve ter quantidade de movimento suficiente para resistir às linhas de fluxo da água que escoam em torno da bolha. O diagrama que representa o movimento da partícula hidrofóbica em direção à bolha é apresentado na figura 1 (Derjaguin e Dukhin, 1960; Rodrigues e Leal Filho, 2003; Ralston et al., 1988; Finch e Dobby, 1990; Schulze, 1984; Schulze, 1989).

Quando estes três eventos ocorrem com sucesso, na seqüência desejada, presume-se que a cinética de flotação seja discutida adequadamente por um modelo de 1.<sup>o</sup> ordem ( $n=1$ ). Todavia, caso um desses eventos falhe, modelos com ordens superiores à unidade ( $n>1$ ) seriam mais apropriados para descrever a cinética do processo. Além disso, partículas podem se reportar ao produto flutuado por arraste hidrodinâmico, esta situação pode ser explicada por um modelo cinético de ordem zero. Para fins de modelamento matemático do processo, a grande maioria dos autores descreve a

flotação tendo cinética de primeira ordem, admitindo-se que as condições termodinâmicas e hidrodinâmicas permaneçam constantes, assim este processo pode ser expresso na equação 2 (Vatcha, 1987; Connors, 1990; Foggler, 1999; Ahmed e Jameson, 1989).

$$\frac{dRec}{dt} = -k(1 - Rec) \quad (2)$$

Onde:

Rec = recuperação do processo;

t = tempo;

k = constante cinética de flotação, com unidade tempo<sup>-1</sup>.

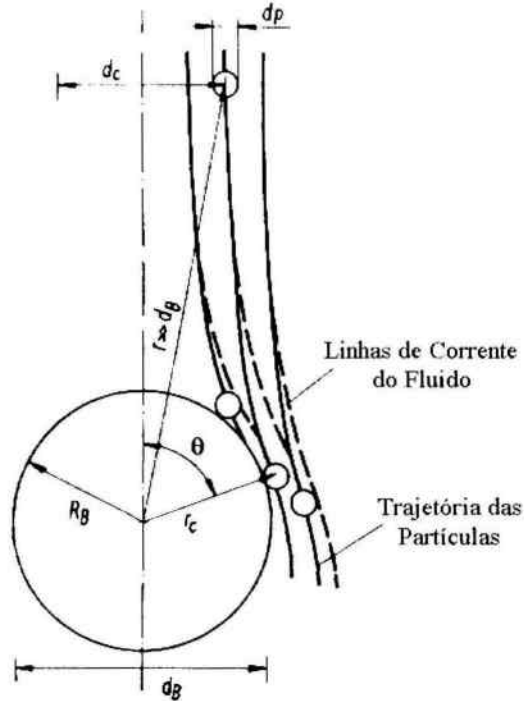


Figura 1. Representação esquemática da colisão de uma partícula com uma bolha (Schulze, 1989).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Minério utilizado nos experimentos

Nesta fase inicial do trabalho, realizada em escala de laboratório, minério de cobre, proveniente da mina do Sequeirinho, foi devidamente moído para se obter um  $P_{80}$  similar ao circuito industrial, que está na ordem de 0,100 mm. Este material apresenta um peso específico de  $3,0 \text{ kg/m}^3$  e as amostras foram coletadas de modo a comporem os teores típicos do depósito, neste primeiro quinquênio, variando de 1,0% a 1,5% de cobre, conforme descrito na tabela 1.

Para execução dos ensaios em laboratório, todo o material foi britado e reduzido totalmente a granulometria inferior a 1mm e homogeneizada em pilha alongada. Retirando-se alíquotas de 1,6 kg para a realização dos ensaios.

Tabela 1. Composição química típica da mina do Sequeirinho.

Elementos	Sequeirinho
Cu (%)	1,17
Au (g/t)	0,34
S (%)	1,1
Fe (Total) (%)	15,1
Si (%)	21,9
Al (%)	5,53
F (ppm)	896
Ag (ppm)	2

## 2.2. Experimentos de flotação

Os ensaios de flotação foram realizados na faixa de pH natural de polpa no circuito industrial, 8,5-8,7. O éster xântico e amil xantato são utilizados como coletores, enquanto que metil-isobutil carbinol (MIBC) e propileno glicol são aplicados como espumantes.

O minério é inicialmente moído, a 60% de sólidos, posteriormente é submetido a flotação rougher, que está sendo realizada com 35% de sólidos, conforme realizado na usina. Os ensaios padrões consistem de uma etapa rougher, sendo seu concentrado é remoído e flotado no circuito de limpeza, que consiste em dois cleaners e um scavenger-cleaner. As dosagens dos ensaios e suas respectivas diluições, bem como os tempos de condicionamento nas etapas de flotação e a rotação da célula de flotação estão descritos nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Etapas e características do circuito rougher.

Etapa	Condições			Reagentes			
	Tempo (min)	Volume (L)	Rotação (rpm)	xantato (g/t)	éster (g/t)	propileno glicol (g/t)	MIBC (g/t)
diluição	-	-	-	1%	1%	1%	0,1%
moagem	80% < 104 $\mu$ m	-	40	10	25	-	-
condic. 1	1	3,45	1949	-	-	5	5
rougher 1	5	3,45	1949	-	-	-	-
condic. 2	3	3,45	1949	12,5	-	-	-
condic. 3	1	3,45	1949	-	-	5	5
rougher2	6	3,45	1949	-	-	-	-
condicion. 4	1	3,45	1949	-	-	5	5
rougher 3	2	3,45	1949	-	-	-	-

Tabela 3. Etapas e características do circuito de limpeza.

Etapa	Condições			Reagentes		
	tempo (min)	volume (L)	Rotação (rpm)	xantato (g/t)	propileno glicol (g/t)	MIBC (g/t)
diluição	-	-	-	1%	1%	0,1%
remoagem	80% < 44 $\mu\text{m}$	-	40	-	-	-
Cleaner 1	6	1,8	1260	-	-	-
Cond. 1	3	1,8	1260	5	-	-
Cond. 2	1	1,8	1260	-	5	5
scavenger cleaner 1	6	1,8	1260	-	-	-
Cleaner 2	4 a 5	0,8	1000	-	-	-

O comportamento cinético da flotação foi avaliado na etapa rougher, considerando um mecanismo de reação de 1.<sup>a</sup> ordem, para obtenção da constante cinética. Além disso, os ensaios possibilitaram o acompanhamento da evolução da flotabilidade do minério.

Ensaio com recirculação do concentrado do 3.<sup>o</sup> rougher no scavenger-cleaner foram realizados para acompanhar o desempenho do scavenger com a interferência de partículas que possui cinética retardada. Por outro lado, o estagiamento de reagentes, bem como o aumento das dosagens foi avaliado para observar a contribuição das variáveis termodinâmicas.

Finalizando esta primeira fase de experimentos, ensaios com adição de óleo diesel no scavenger-cleaner também foram verificados. A dosagem do óleo diesel foi da ordem de 50 g/t e foi preparado em emulsões 10%.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presença de partículas grosseiras ou ultrafinas age em detrimento ao desempenho da flotação, uma vez que interfere no sucesso dos eventos que possibilitam a coleta da partícula hidrofóbica pela bolha. Admitindo-se um mecanismo de primeira ordem, o comportamento cinético de uma amostra com %Cu de alimentação típica do depósito do Sequeirinho foi analisado somente na etapa rougher, em condições hidrodinâmicas e termodinâmica padrões, conforme apresentado na figura 2.

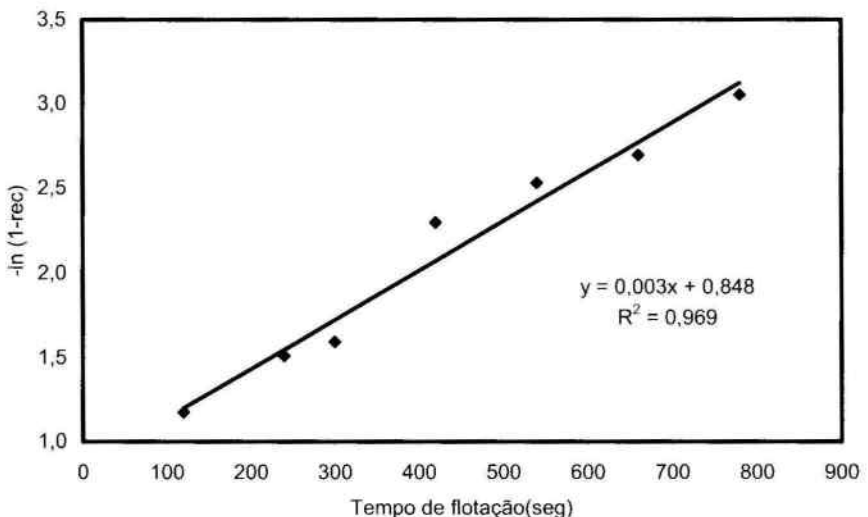


Figura 2. Comportamento cinético da flotação rougher padrão.

Conforme observado na figura 2, é possível verificar que a constante cinética é da ordem  $3.10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Isto significa, que a geração de ultrafinos possivelmente irá decrescer a constante cinética, por conseguinte a eficiência de coleta da partícula pela bolha, tal fato é observado no circuito industrial em que a classificação, operando em condições de alta pressão e densidade de alimentação elevada, prejudica o desempenho da flotação. Nesta situação a fração menor que  $0,037 \text{ mm}$  alcança 70% e a recuperação fica abaixo do patamar de 90%.

A premissa básica da recuperação dos finos teria duas vertentes: recircular o concentrado das duas últimas células das linhas de flotação rougher no scavenger-cleaner e reforça a hidrofobização nas células intermediárias da linha rougher e scavenger-cleaner, no intuito de coletar partículas ultrafinas. As granulometrias do concentrado rougher-3 e alimentação num ensaio de bancada padrão têm seus resultados mostrados na figura 3.

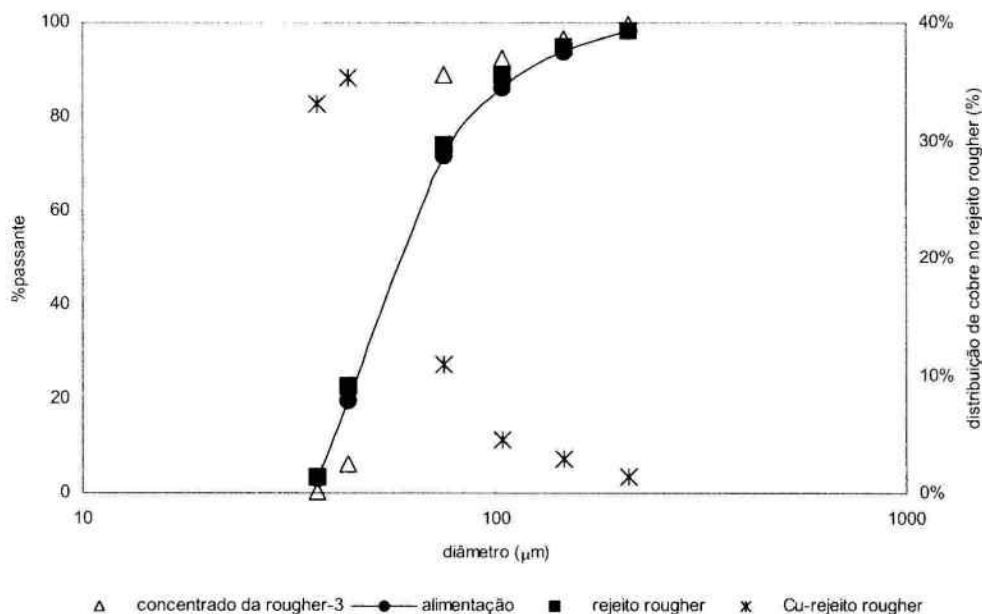


Figura 3. Análise granulométrica do concentrado da rougher 3 e alimentação.

É possível observar, que aproximadamente 30% do cobre perdido no rejeito está na fração menor que  $37 \mu\text{m}$ . Além disso, há concentração de ultrafinos no rougher-3, evidenciando que entrada deste material no scavenger-cleaner, sem a devida preparação de superfície, pode acarretar no aumento da viscosidade de polpa, modificando assim, o ambiente hidrodinâmico da célula e atuando em detrimento à eficiência de colisão (Jewett, 1980; Schulze, 1977; Crawford e Ralston, 1988; Derjaguin e Dukhin, 1960; Rodrigues e Leal Filho, 2003; Ralston et al., 1988; Finch e Dobby, 1990).

Em virtude da necessidade de reforçar a hidrofobicidade das partículas flotadas no rougher-3, iniciou-se a avaliação do estagiamento de reagentes, bem como, a recirculação do último rougher no scavenger-cleaner. Os resultados destes ensaios são apresentados na figura 4.

Verifica-se na figura 4, que a recuperação de cobre no rougher não tem alteração significativa, encontrando um patamar entre 88 a 90% de recuperação, mesmo aumentando a dosagem de xantato no rougher 2 e 3.

No que se refere ao scavenger-cleaner, a recirculação do concentrado rougher-3 atuou em detrimento à recuperação de cobre, possivelmente em função da elevação de finos no circuito. Todavia, a partir do momento que a hidrofobicidade destas partículas foi reforçada, com aumento das dosagens, houve crescimento considerável na recuperação metalúrgica do scavenger-cleaner.

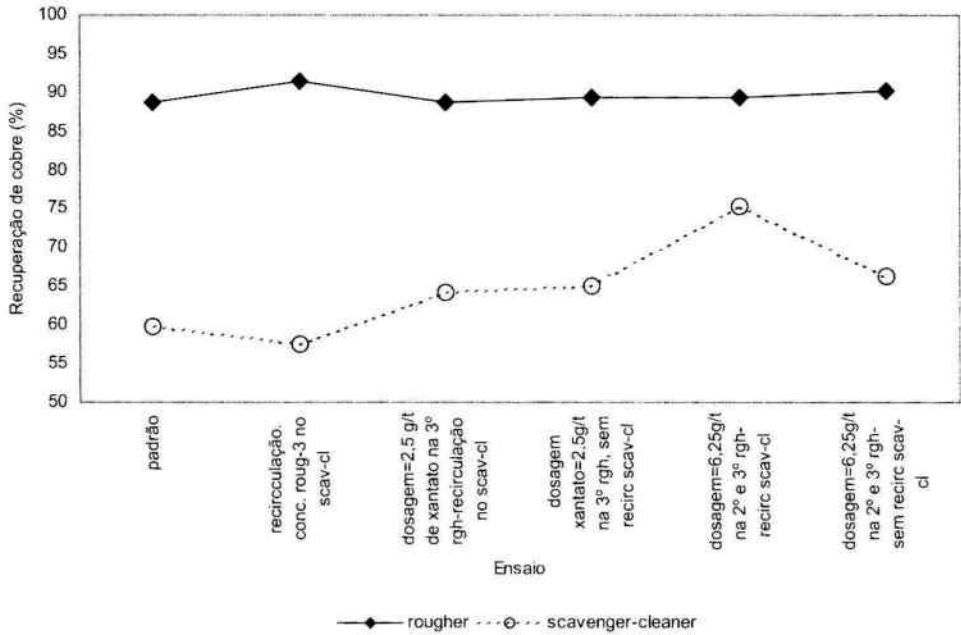


Figura 4. Ensaio de circuito aberto de flotação, com alterações no processo.

No intuito de reforçar a hidrofobicidade dos ultrafinos, três ensaios foram realizados com dosagem de 50 g de óleo diesel/t no scavenger-cleaner (King, 1982; Fuerstenau, 1978). Vale ressaltar que nestes ensaios o teor médio de cobre na alimentação foi da ordem de 1,3%. Os resultados estão na figura 5.

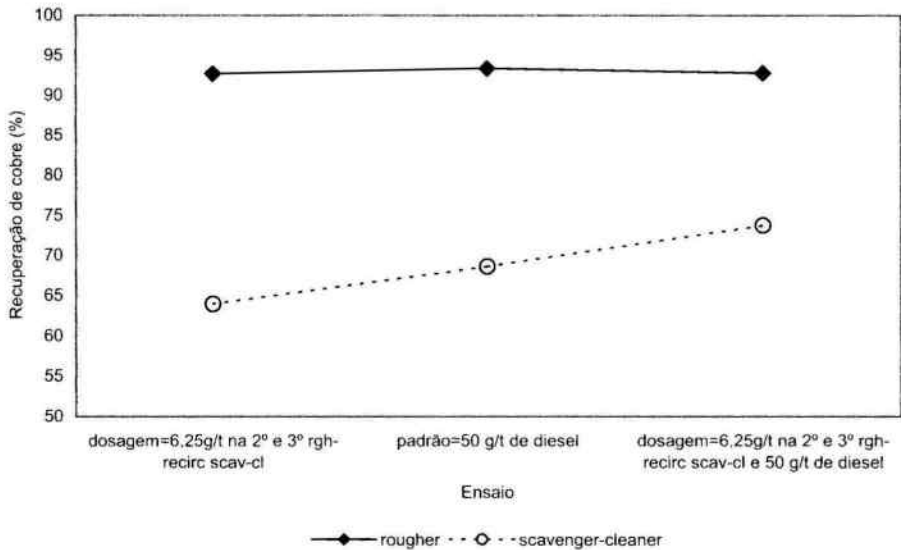


Figura 5. Ensaio de flotação com adição de óleo diesel no scavenger-cleaner.

Estes ensaios ratificam a necessidade de aumento da quantidade de reagente adsorvida sobre a superfície da calcopirita fina, além disso, pode haver o carregamento de material ultrafino por partículas grosseiras hidrofóbicas. Portanto, a dosagem de óleo diesel deve ser controlada para que não haja arraste de ganga para o concentrado final.

#### 4. CONCLUSÃO

A recirculação do concentrado rougher na flotação scavenger-cleaner, sem intensificar sua hidrofobização, não se traduziu em elevações de recuperação de cobre na flotação. Todavia, a recirculação indica uma oportunidade de aumento da recuperação scavenger-cleaner de até 15%, desde que haja o estagiamto de reagentes para alterar as condições termodinâmicas do sistema e propiciou um ambiente favorável a flotação.

Por outro lado, a adição de óleo diesel no scavenger-cleaner intensificou a força do coletor, por conseguinte, a cobertura da partícula aumentou o carregamento de cobre que estava se perdendo para rejeito.

Certamente, a avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos deve ser observada na flotação dos finos. Deste ponto, as correlações entre os aspectos termodinâmicos e hidrodinâmicos otimizariam a cinética de flotação da calcopirita do Sossego.

#### BIBLIOGRAFIA

- TRAHAR, W., J., *International Journal of Mineral Processing*, 8 (1981), 289.
- JEWETT, A., "Formation and disruption of particle-bubble aggregates in flotation", in *Fine particles processing* (P. Somasundaran, ed), Vol 1, AIME, New York (1980), 720.
- SCHULZE, H.J., *International Journal of Mineral Processing*, 4 (1977), 241.
- CRAWFORD, R., RALSTON, J., *International Journal of Mineral Processing*, 23 (1988), 1.
- DERJAGUIN, B., V.; DUKHIN, S., S., *Trans. Inst. Mining Met.*, 70 (1960), 221.
- LEAL FILHO, L. S.; RODRIGUES, W. J.; RALSTON, J., (2003). Importance of hydrodynamics in coarse particle flotation. *Proceedings of the international conference Flotation and Flocculation – from Fundamentals to Applications*. University of South Australia, Mawson Lakes, pp. 203-212.
- RALSTON, J.; FORNASIERO, D.; HAYES, R. *International Journal of Mineral Processing*, 56 (1999), 133.
- FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. *Column flotation*, Oxford, Pergamon Press, (1990), 180 p.
- SCHULZE, H.J. *Physico-chemical Elementary Processes in Flotation: An Analysis from the Point of View of Colloid Science including Process Engineering Considerations*, Amsterdam, Elsevier, (1984), 348 p.
- SCHULZE, H. J. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5 (1989), 43.
- VATCHA, S.R., *Chemical Engineering*, 4 (2) (1987), 195.
- CONNORS, K. A., *Chemical kinetics- the study of reaction rates in solutions*. VCH Publishers, (1990.), pp. 469.
- FOGGLER, H. S., *Elements of chemical reaction engineering*, 3rd edition, Prentice-Hall, (1999), 967pp.
- AHMED, N.; JAMESON, G. J. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 5 (1989), 77.
- KING, R. P. Flotation of fine particles. In: King, R. P., ed. *Principles of Flotation*, Johannesburg, South African Institute of Mining and Metallurgy, (1982), 268 p.
- FUERSTENAU, D. W.; CHANDER, S. The recovery of fine particles by physical separation methods. In: Somasundaran, P., ed. *Beneficiation of mineral fines: problems and research needs*, New York, E.U.A. (1978), 406p.