

AVALIAÇÃO DA CINÉTICA DE FLOTAÇÃO EM CIRCUITOS DE CONCENTRAÇÃO MINERAL ALIMENTADOS COM PRODUTOS DE PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO

RAMALLI NETO, F.¹, NETO, A. L.², NETO, D. J.³, Horta, D. G.⁴, BERGERMAN, M.G.⁵

¹Universidade de São Paulo. fernando.ramalli@gmail.com

²Universidade de São Paulo. alfn2015@gmail.com

³Universidade de São Paulo. dimasnetosri@gmail.com

⁴Universidade Federal de Alfenas. daniela.horta@unifal-mg.edu.br

⁵Universidade de São Paulo. mbergerman@usp.br

RESUMO

Os custos operacionais de uma usina de tratamento mineral são notavelmente elevados, principalmente se o minério beneficiado for de baixo teor. A fim de atenuar este problema, a pré-concentração surge como uma alternativa promissora. Neste estudo, apresentam-se os impactos da pré-concentração sobre a flotação do minério de cobre (sulfeto de cobre) do Projeto Boa Esperança, da Mineração Caraíba S/A e como estes impactos auxiliam na economia de capital. O presente estudo contempla desde a preparação das amostras, a operação de pré-concentração por jigagem, passando pela britagem e moagem dos minérios até a flotação e respectiva análise química. Os ensaios de flotação foram realizados com o minério com e sem a pré-concentração. Os resultados mostraram os impactos causados pela pré-concentração no circuito do processamento mineral.

PALAVRAS-CHAVE: Beneficiamento, Pré-concentração, Cobre, Flotação.

ABSTRACT

The operational costs from a mineral-processing plant are notably high, especially when low content mineral is involved. In order to soften that issue, the pre-concentration arises as a promising alternative. In this study, the impacts of the pre-concentration on the flotation of copper mineral (copper sulphide) from Projeto Boa Esperança of Mineração Caraíba S/A are presented and how these impacts help to save capital. The present study approaches from the samples preparation, pre-concentration via jig, followed by crushing and grinding until the flotation and respective chemical analysis. The flotation tests were performed with a feeding ore without pre-concentration and the pre-concentrated mineral. Last but not the least, results showed the impacts caused by the pre-concentration among the mineral treatment circuit.

KEYWORDS: Processing, Pre-concentration, Copper, Flotation.

1. INTRODUÇÃO

O beneficiamento mineral é um dos principais processos que compõem o universo da mineração e, atualmente, vem adquirindo cada vez mais espaço neste ramo, já que com a queda observada nos teores, operações cada vez mais complexas de beneficiamento mineral são necessárias.

A pré-concentração, etapa presente no beneficiamento, não surge como uma única solução para erradicar os problemas relacionados ao baixo teor do minério, mas sim como um caminho a este entrave.

Neste processo, descarta-se quantidade expressiva de amostra com baixo teor do mineral de interesse, reduzindo, pois, a massa a ser processada nas operações subsequentes. Desta forma, espera-se que a pré-concentração poupe energia gasta nas usinas e obtenha um forte impacto sobre o produto final da flotação, isto é, que o produto final tenha maior teor. Cerca de 20% da energia total consumida pela usina pode ser economizada se o projeto de beneficiamento incluir uma etapa de pré-concentração, segundo Klein et al.(2010) e Bamber (2008).

Existem diversas formas de se realizar a pré-concentração, entre elas estão: separação magnética, separação densitária, ore sorting, etc. Cada um destes métodos utiliza uma propriedade diferenciadora para a separação. Neste trabalho, apresenta-se uma separação densitária utilizando-se o jig. A pré-concentração dos minérios no jig é comandada por forças de inércia e da gravidade a que estão submetidas as partículas do minério em água, quando há uma pulsação alternada no sentido ascendente e descendente (Paiva 2012).

Assim, a pré-concentração impacta fortemente na flotação, já que diminui a massa a ser processada. Além disso, com um aumento no teor, mais minério será recolhido do produto flotado, pois a proporção de mineral de interesse/rejeito aumentou.

A literatura dispõe de poucas publicações que avaliam o impacto da pré-concentração na flotação quando se é comparado a flotação alimentada pelo minério advindo do ROM e alimentada pelo produto da pré-concentração. Desta forma, o objetivo deste trabalho é ilustrar o impacto da pré-concentração na flotação, cooperando assim para a enumeração de vantagens da implantação desta técnica, sobretudo em relação à uma usina que não utiliza tal método.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2 Preparação de amostras

O minério utilizado em questão é o sulfeto de cobre do Projeto Boa Esperança da Mineração Caraíba S/A, localizado no Pará (Mineração, 2017). As amostras do minério de cobre da Caraíba - antes de serem separadas em alimentação e pré-concentrado - estavam, inicialmente, no mesmo conjunto “tal qual” enviado pela empresa, cujo tamanho de partícula está entre 10 mm e 3 mm. Este conjunto foi posto em uma pilha de homogeneização, na qual cerca de metade desta foi armazenada como “alimentação” (mesma maneira que o minério é tratado em Caraíba) e a outra parcela foi enviada a jigagem, a fim de pré-concentrar o material.

Vale ressaltar que, durante a formação da pilha, sempre se tomou o cuidado de retomar as pontas para garantir uma amostragem mais representativa. Além disso, as amostras foram recompostas com fino natural (abaixo de 3 mm, que em um processo de pré-concentração seguiriam direto para a moagem, sem passar pelo jig) e a distribuição granulométrica da amostra foi devidamente reproduzida.

O material resultante da pré-concentração foi apenas o material extraído da primeira gaveta do jig (G1), já que esta apresenta os materiais mais densos. No caso, o mineral de interesse, sulfeto de cobre (calcopirita), é mais denso ($4,76 \text{ g/cm}^3$) que o rejeito ($2,65 \text{ g/cm}^3$), que são basicamente silicatos, caracterizados pela coloração cinza e branca. As condições da única jigagem realizada são expressas na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições de operação do jig

Massa na alimentação (kg)	Válvula de ar (% de abertura)	Válvula de pressão (% de abertura)	Rotação do motor (rpm)	Tempo de operação (min)
79,42	50	50	74	30

2.3 Preparação dos padrões

As amostras que não passaram pela pré-concentração e as que passaram foram devidamente britadas até suas partículas ficarem menores que 1,18 mm. Esta foi a granulometria usadas nos padrões. O cálculo da massa do padrão utilizado na moagem e na flotação baseou-se na porcentagem de sólidos da flotação (usada na Caraíba) e no volume de água na cuba da célula de flotação, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 - Dados da flotação

% sólidos	Volume de água na cuba (L)
35	2

A fim de se obter o correto enchimento da cuba, calculou-se que cada amostra deve ter 1077 gramas.

2.4 Curva de moagem

Os testes realizados na moagem seguiram o mesmo padrão dos testes realizados na Mineração Caraíba S/A.

Foi fornecido que o P_{75} da moagem corresponde a $106 \mu\text{m}$. Desta forma, foi necessário encontrar o tempo em que a moagem deixa 75% do mineral presente dentro do moinho com granulometria de $106 \mu\text{m}$. Para isto, foram traçadas as curvas de moagem para a alimentação e para o material pré-concentrado. As condições da moagem se encontram na Tabela 3.

Tabela 3 - Condições da moagem

Dimensões do moinho (pol.)	Diâmetro interno do moinho (m)	Velocidade crítica (rpm)	Rotação de trabalho (rpm)	% sólidos
8 x 10	0,2032	93,84	67	60

A rotação de trabalho adotada neste caso foi de 70% da velocidade crítica do moinho. Foi utilizado um tacômetro para conferir a rotação do moinho. A velocidade

crítica foi calculada conforme a expressão (Equação 1) descrita por Oliveira et al. (2012).

Equação 1 – Velocidade crítica

$$V_c = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{g}{r}}$$

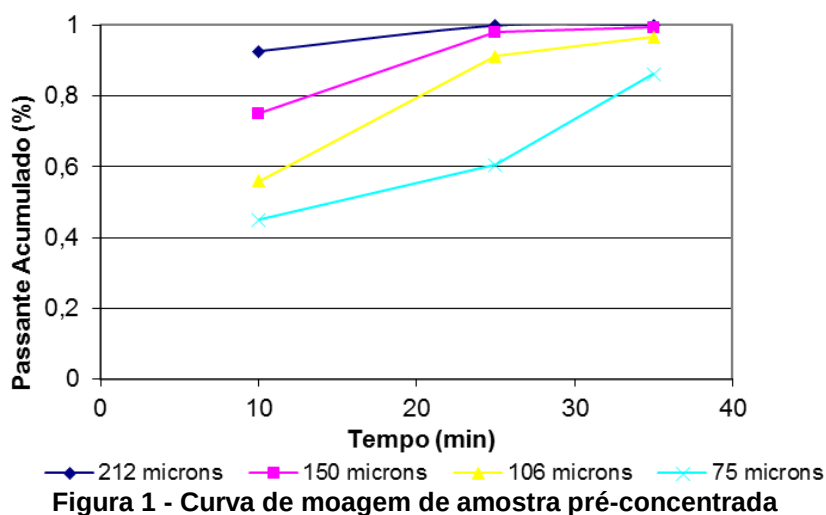
Onde V_c é a velocidade crítica, g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) e r é o raio do moinho (em m). O resultado desta expressão será dado em Hertz. Multiplicando por 60, temos o valor em rpm. Assim, a velocidade crítica foi aquela descrita na Tabela 3.

A Tabela 4 mostra a distribuição da carga de bolas utilizada nas moagens.

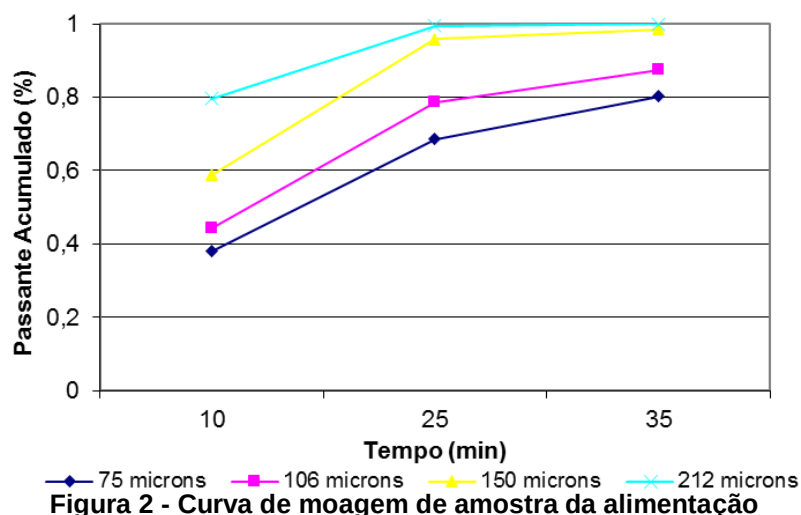
Tabela 4 - Distribuição da carga de bolas

Número de bolas	16	31	33	47
Diâmetro da bola (mm)	40	30	25	20

Uma vez que as condições de trabalho da moagem foram descritas, testes foram realizados variando apenas o tempo de moagem e mantendo as condições descritas acima. Ao total, foram feitas 6 moagens (3 tempos para a alimentação e 3 tempos para o pré-concentrado) e posteriormente peneiramento à úmido para averiguar a porcentagem passante na malha de $106 \mu\text{m}$. Os tempos adotados foram de 10, 25 e 35 minutos. Assim, determinou-se a curva de moagem, relacionando o tempo de moagem, a abertura da malha de cada peneira e a porcentagem passante em cada uma delas. Os gráficos obtidos, após feita uma análise granulométrica utilizando as malhas 212, 150, 106 e 75 μm , estão reproduzidos nas Figuras 2 e 3.



Observando-se a curva de moagem determinou-se o tempo em 19 minutos e 55 segundos, aproximadamente.



Analogamente ao pré-concentrado, também foi encontrado o tempo em que 75% é passante em 106 μm . O valor determinado foi de 25 minutos e 57 segundos.

2.5 Flotação

Analogamente à moagem, os testes realizados na flotação seguiram o mesmo padrão dos testes realizados na Mineração Caraíba S/A. Assim, os valores e algumas quantidades também foram baseadas nos processos realizados pela companhia. Os parâmetros da flotação, operada em uma célula autoaerada da marca DENVER, se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros da flotação

Granulometria	% sólidos	Rotação (rpm)	Padrão (g)	pH	Ditiofosfato (g/t)	MIBC (g/t)	Vazão de ar
P75 = 106 μm	35	1600	1077	10,5	27	20	Válvula completamente aberta

Sete testes foram realizados para a flotação, sendo que o primeiro foi um preliminar com uma amostra do pré-concentrado, 3 formaram uma triplicata do teste do pré-concentrado e outros 3 uma tréplica para alimentação. A espuma contendo o cobre foi coletada aos 30 segundos, 1 minuto e depois de minuto em até 13 minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 descreve os resultados da jigagem.

Tabela 6 – Resultados referente à jigagem

Produto	Massa (kg)	Massa (%)	Teor Cu (%)	Distribuição Cu (%)
Gaveta 1	9,27	44,27	1,45	85,04
Gaveta 2	5,21	24,88	0,28	9,23
Gaveta 3	4,38	20,95	0,15	4,16
Gaveta 4	2,07	9,90	0,12	1,57
Total	20,93	100		100
Teor calculado			0,75	
Teor analisado			0,75	

A Tabela 7 representa os valores calculados (após análise química por absorção atômica) de um dos testes do pré-concentrado e a Tabela 8 da alimentação. Os resultados de todos os ensaios de flotação realizados estão em Ramalli Neto, 2017.

Tabela 7 – Cálculos para teste de amostra pré-concentrada

	Massa (g)	Massa (%)	Tempo (min)	Teor de Cu (%)	Distribuição de Cu (%)	Teor acumulado de Cu (%)	Distribuição acumulada de Cu (%)
	26,39	2,461	0,5	11,838	20,51	11,84	20,51
	18,11	1,689	1	11,526	13,71	11,71	34,22
	24,88	2,320	2	9,660	15,78	10,9	50,00
	16,81	1,567	3	7,950	8,78	10,3	58,78
	11,9	1,110	4	6,510	5,09	9,92	63,86
	7,73	0,721	5	5,175	2,63	9,57	66,49
	4,13	0,385	6	4,563	1,24	9,38	67,73
	4,36	0,407	7	3,729	1,07	9,17	68,79
	31,99	2,983	8	2,939	6,17	7,80	74,97
	10,53	0,982	9	2,218	1,53	7,43	76,50
	3,72	0,347	10	2,338	0,57	7,31	77,07
	2,05	0,191	11	2,075	0,28	7,24	77,35
	1,8	0,168	12	2,075	0,25	7,19	77,60
	1,3	0,121	13	2,28	0,19	7,15	77,79
Rejeito	906,77	84,550		0,373	22,21		
Total	1072,47	100			100		
Teor calculado				1,420			
Teor analisado				1,424			

Tabela 8 – Cálculos para teste de alimentação sem pré-concentrar

	Massa (g)	Massa (%)	Tempo (min)	Teor de Cu (%)	Distribuição de Cu (%)	Teor acumulado de Cu (%)	Distribuição acumulada de Cu (%)
	36,99	3,412	0,5	9,440	30,72	9,44	30,72
	30,14	2,780	1	7,902	20,95	8,75	51,66
	29,79	2,748	2	6,972	18,27	8,20	69,93
	20,42	1,884	3	5,724	10,28	7,77	80,22
	12,48	1,151	4	4,873	5,35	7,49	85,57
	6,86	0,633	5	3,931	2,37	7,31	87,94
	3,69	0,340	6	4,031	1,31	7,23	89,25
	4,07	0,375	7	3,578	1,28	7,13	90,53
	9,16	0,845	8	2,514	2,03	6,85	92,55
	3,45	0,318	9	2,081	0,63	6,75	93,18
	2,22	0,205	10	2,119	0,41	6,68	93,60
	1,4	0,129	11	2,195	0,27	6,64	93,87
	1,23	0,113	12	*	0,00	6,59	93,87
	1,14	0,105	13	*	0,00	6,55	93,87
Rejeito	920,96	84,959		0,073	5,91		
Total	1084,00	100			100		
Teor calculado				1,049			
Teor analisado				1,052			

*Massa insuficiente para análise química

Na flotação do minério de cobre, apenas o sulfeto de cobre é flotado. À medida que acontece a flotação, menos cobre há na polpa, pois boa parte do cobre presente na espuma já foi recolhido. Assim, a massa do produto flotado diminui com o tempo. A Figura 4 abaixo ilustra tal situação.

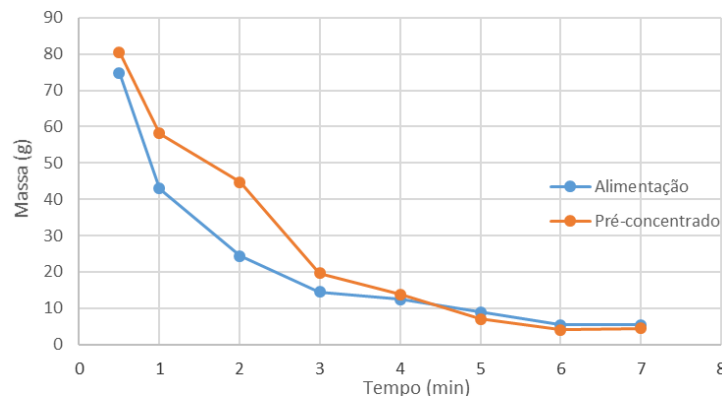


Figura 3 – Massa recolhida dos produtos flotados

A Figura 5 resume os resultados de teores e recuperações acumuladas nos dois ensaios descritos anteriormente (Tabelas 7 e 8).

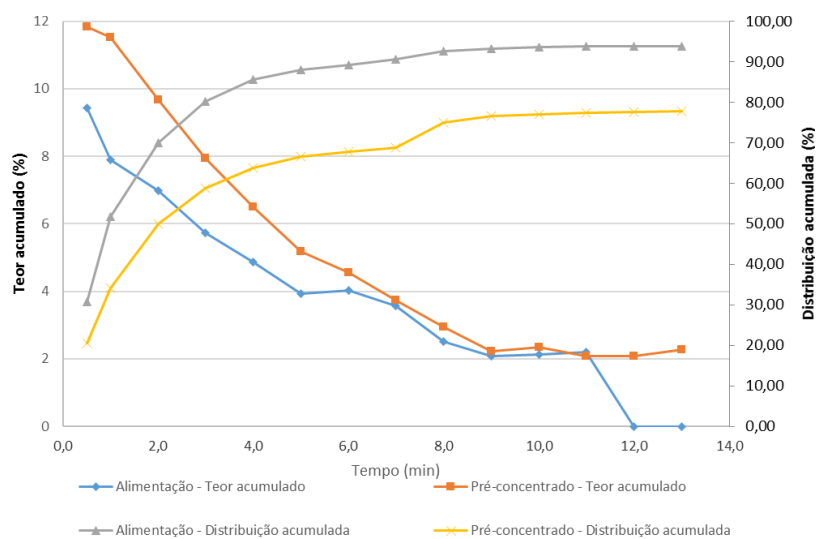


Figura 5 - Valores de distribuição e teor

Referente aos dados obtidos, as seguintes observações foram feitas:

- I. A quantidade em massa do rejeito das amostras da alimentação foi maior quando comparada às pré-concentradas (cerca de 3% maior).
- II. O teor acumulado de Cu da pré-concentração, como esperado, foi maior que o teor acumulado de Cu da alimentação. No entanto, a recuperação metalúrgica para a amostra da alimentação foi maior do que as amostras pré-concentradas (ver Figura 5). Como o teor de Cu das amostras pré-concentradas eram cerca de 50% maior do que as da alimentação, esperava-se que a recuperação de Cu do pré-concentrado fosse maior do que o apresentado. Entende-se que a quantidade de coletor pode ter sido insuficiente para a flotação de todo o cobre a amostra pré-concentrada.
- III. Considerando a massa descartada na jigagem (55% da massa com 15% do cobre da amostra), o circuito de flotação alimentado com o material pré-concentrado receberia uma alimentação aproximadamente 50% menor. Além disso, o rejeito da jigagem é composto de material com granulometria acima de 3 mm, sendo que pode ser empilhado,

dispensando assim o uso de barragens. Destaca-se ainda que a opção de jigagem não foi completamente otimizada, a fim de se minimizar o cobre perdido no rejeito. A pré-concentração ainda poderia ser realizada com outras tecnologias, como ciclones de meio denso, permitindo assim uma maior recuperação do cobre da amostra (Cresswell 2001).

4. CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que a operação de jigagem permitiu o descarte de 55% da massa com 15% do cobre da amostra. Em relação a flotação, os resultados indicam que a amostra pré-concentrada produz menor massa de rejeitos e um teor de concentrado final mais elevado. A recuperação metalúrgica, no entanto, foi menor para a amostra pré-concentrada, ao contrário do esperado. Um estudo de otimização da quantidade de reagentes, bem como o de tempo de flotação está em andamento a fim de obter o ponto ótimo da flotação e, assim, apresentar maiores ganhos que a alimentação.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Mineração Caraíba pela doação das amostras, a Vale S.A. pela realização das análises químicas, ao IPT pelo apoio com a realização dos ensaios de jigagem e ao Laboratório de Tratamento de Minérios da EPUSP pelo apoio para a realização dos ensaios de britagem, moagem e flotação. Agradecemos também ao CNPq pelo apoio por meio do edital Universal, processo 449932/2014/1 e bolsa produtividade, processo CT2016 – 308767/2016-0.

6. REFERÊNCIAS

BAMBER, A. S.; Integrated mining, pre-concentration and waste disposal systems for the increased sustainability of hard rock metal mining. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in The Faculty of Graduate Studies (Mining Engineering) University of British Columbia (Vancouver). Abril 2008.

CRESSWELL, G. M.; Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. SAIMM Copper, Cobalt, Nickel and Zinc Recovery Conference. SECTION: Mineral Processing. Julho 2001.

KLEIN, B.; Energy efficiency technologies for the mining industry. In: CIM CONFERENCE, 2010, Vancouver. Proceedings. Westmount: CIM, 2010.

OLIVEIRA, R. De F.; MONTENEGRO, L. C. M. (2012). Uma Revisão dos Princípios de Funcionamento e Métodos de Dimensionamento de Moinhos de Bolas. Departamento de Engenharia de Minas – UFMG. P. 32.

PAIVA, R. S. de; (2012). Relatórios de Análise Laboratorial: Jigagem. Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente – UFPA. Marabá – PA. P.3.

Mineração Caraíba S/A: <www.minacaraiba.com.br> Acesso em 28 Jan. 2017.

RAMALLI NETO, F.; “Avaliação da cinética de flotação em circuitos de concentração mineral alimentados com produtos de pré-concentração de minérios de cobre” (2017). Relatório final – PIBIC (CNPq), São Paulo.