

## **AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DE ALIMENTAÇÃO E DOS PRODUTOS DA ETAPA *ROUGHER* DE FLOTAÇÃO DA USINA DO SALOBO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE COBRE SULFETADO**

**FONSECA, R.<sup>1</sup>, OLEGARIO, F.<sup>2</sup>, BERGERMAN, M.G.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Vale S.A. ronaldo.fonseca@vale.com

<sup>2</sup>Vale S.A. olegario.francisco@vale.com

<sup>3</sup>Universidade de São Paulo. mbergerman@usp.br

### **RESUMO**

A usina do Salobo processa um minério sulfetado de cobre e ouro. A etapa de flotação compreende estágios *rougher*, *cleaner* e *scavenger* do *cleaner*, sendo que os concentrados das etapas *rougher* e *scavenger* do *cleaner* passam por um estágio de remoagem antes de seguir para a etapa *cleaner*. Ao longo dos primeiros anos de operação, observou-se que a granulometria de alimentação da remoagem estava consistentemente mais fina que o esperado, mesmo considerando-se que a granulometria de alimentação da flotação (etapa *rougher*) estava dentro dos parâmetros esperados e significativamente mais grossa que o concentrado *rougher*. Este trabalho apresenta os resultados de ensaios laboratoriais e das amostragens de campo para identificar a origem de tal diferença e quantificar a mesma, assim como ilustra os impactos na etapa de remoagem do concentrado *cleaner*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Flotação, Remoagem, Cobre, Classificação.

### **ABSTRACT**

Salobo plant processes a copper and gold sulfide ore. The flotation process comprises the *rougher*, *cleaner* and *scavenger* of *cleaner* stages. The concentrate from the *rougher* and *scavenger* of *cleaner* stages goes through a regrinding process before being fed into the *cleaner* stage. During the first years of operation, it was noticed that the regrinding feed size was consistently finer than expected, even though the flotation feed size (*rougher* stage) was within the planned parameters and significantly coarser than the concentrate from the *rougher* stage. This paper describes the results of field samplings to identify the factors behind such difference and to quantify it. Moreover, it shows the impacts of such size difference on the concentrate regrinding stage.

**KEYWORDS:** Flotation, Regrinding, Copper, Classification.

## 1. INTRODUÇÃO

A mina do Salobo, da Vale, localizada em Marabá, estado do Pará, iniciou suas operações em 2012. Esta possui uma reserva estimada de 1,2 bilhões de toneladas com teores de 0,76% de cobre e 0,56 g/t de ouro (para um *cut off* de 0,3% de cobre equivalente) (Vale, 2016).

O minério de cobre é basicamente calcocítico, com pequena presença de bornita e calcopirita. A usina do Salobo processa 78.000 toneladas de minério de cobre por dia e está projetada para uma produção superior a 470.000 toneladas de concentrado de cobre por ano. O fluxograma de processo é apresentado na Figura 1.

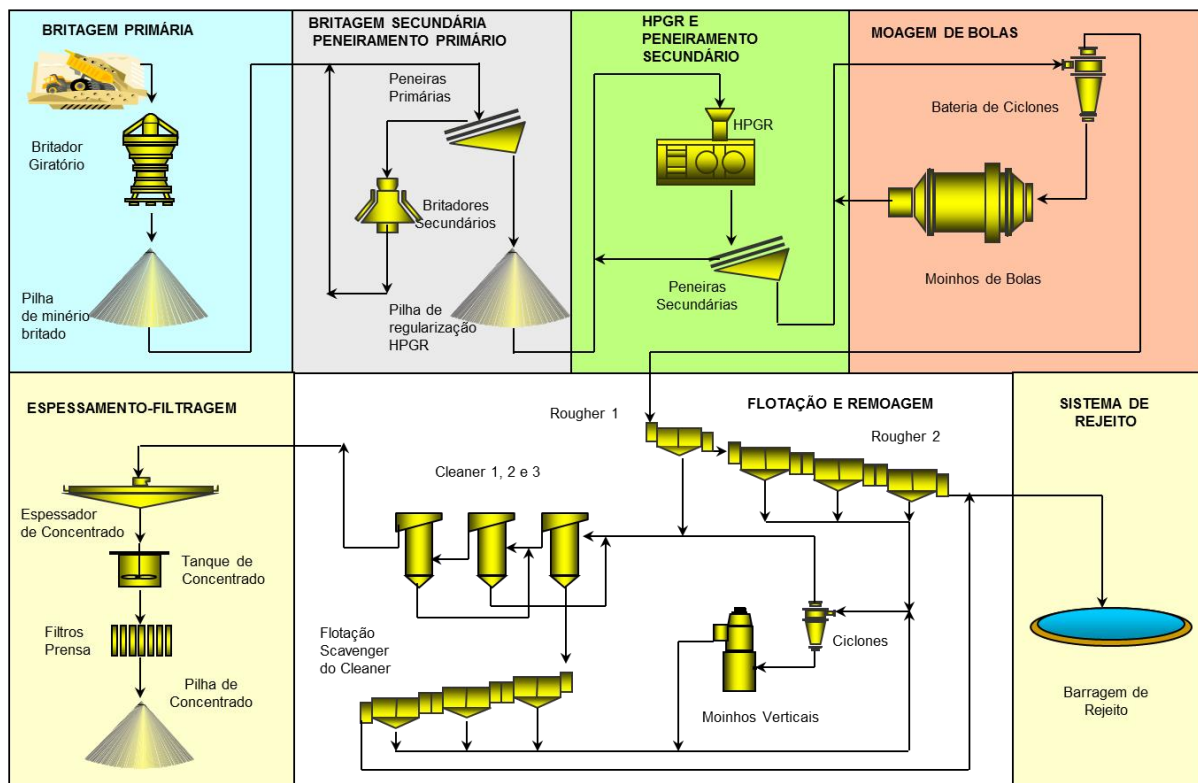


Figura 1. Fluxograma de processo da usina do Salobo (Fonte: ROSA et al., 2007)

O circuito da usina do Salobo é descrito em detalhes por Godoy et al. (2010) e Rosa e Rodrigues (2013). A seguir é apresentada uma breve descrição do circuito de flotação do Salobo, foco do presente trabalho. O *overflow* dos ciclones da moagem de bolas, com um  $P_{80}$  da ordem de 106  $\mu\text{m}$ , segue para a etapa *rougher* de flotação. Os concentrados *rougher* e *scavenger* do *cleaner* da flotação alimentam, por meio de bombas de velocidade variável, duas baterias de ciclones. O *underflow* da ciclonagem é direcionado, por gravidade, para a alimentação dos moinhos verticais. Os dois moinhos verticais operam em circuito fechado com a ciclonagem. A descarga do moinho vertical segue para a classificação em ciclones. O produto da remoagem (*overflow* dos ciclones), com  $P_{80}$  da ordem de 24  $\mu\text{m}$ , é submetido à flotação *cleaner* em colunas, sendo o concentrado *cleaner* o produto final e o rejeito *cleaner* a alimentação da etapa *scavenger* do *cleaner*.

Como medida para avaliar o desempenho da flotação, criou-se uma rotina de amostragens mensais do circuito completo de flotação nas usinas de cobre da região

de Carajás (Sossego e Salobo). As amostras coletadas eram submetidas a análise granulométrica e química por faixa. Os resultados permitiam que a equipe de processo pudesse sempre buscar otimizações nesta etapa do circuito. Uma avaliação dos dados quanto ao comportamento da distribuição granulométrica ao longo do circuito (Bergerman, 2013) mostrou que eram observadas significativas diferenças de granulometria entre a alimentação da flotação *rougher* e o concentrado da mesma etapa na usina do Sossego. Os dados detalhados do estudo realizado no Sossego estão apresentados em Miranda et al. (2016). Ficou demonstrada a diferença de granulometria entre a alimentação *rougher* e o concentrado *rougher*. Apesar dos Projetos Salobo e Sossego terem sido exaustivamente estudados em termos de rotas de processo, tal diferença não foi prevista em projeto, tendo em vista que a granulometria esperada para a alimentação dos moinhos verticais proveniente do concentrado *rougher* foi determinada como a mesma granulometria da alimentação da etapa *rougher*. O presente trabalho tem por objetivo quantificar tal diferença e avaliar o impacto da mesma sobre a flotação e remoagem da usina do Salobo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a etapa de diagnóstico do circuito, foram coletadas amostras nos seguintes pontos da usina do Salobo:

- *Overflow* dos ciclones da moagem de bolas (alimentação da flotação *rougher*);
- Concentrado *rougher*;
- Rejeito *rougher*;
- Alimentação *cleaner*;
- Concentrado *cleaner*;
- Rejeito *cleaner* (alimentação da flotação *scavenger* do *cleaner*);
- Concentrado *scavenger* do *cleaner*;
- Rejeito *scavenger* do *cleaner*;
- Rejeito final (tubulação que reúne o rejeito *rougher* e o rejeito *scavenger* do *cleaner*).

A Figura 2 ilustra o amostrador utilizado para a tomada das amostras da ciclonagem e a Tabela 1 ilustra os fatores utilizados no cálculo da massa mínima a ser coletada em cada fluxo.



**Figura 2 – Amostrador utilizado para amostragem da ciclonagem**
**Tabela 1 – Cálculo das massas mínimas utilizando a fórmula proposta por Gy (1992).**

Fluxo	Fator de forma do material	Densidade do material (g/cm <sup>3</sup> )	Tamanho máximo do intervalo de interesse (mm)	Nível de confiança (%)	Precisão (%)	Proporção esperada no intervalo de interesse	Ordenada normal no nível de confiança escolhido	Massa mínima (g)
Alimentação <i>rougher</i>	0,60	3,62	0,05	95	10	20	1,96	260
Concentrado rejeito <i>rougher</i>	0,60	3,62	0,3	99,9	10	35	3,29	93
Concentrado rejeito <i>scavenger</i>	0,60	4,00	0,3	99,9	10	35	3,29	104
Concentrado rejeito <i>cleaner</i>	0,60	3,62	0,3	99,9	10	35	3,29	93
Alimentação <i>cleaner</i>	0,60	3,62	0,3	99,9	10	35	3,29	93

As amostragens foram sempre realizadas durante um período de duas horas, no qual a usina foi considerada sob operação estável, com incrementos tomados a cada 15 minutos. Um ponto importante de atenção durante a amostragem foi quanto à operação de bombas de poço, que caso em operação, podem desestabilizar o circuito. No presente trabalho, adotou-se o procedimento de não operar as mesmas 2 h antes da realização das amostragens.

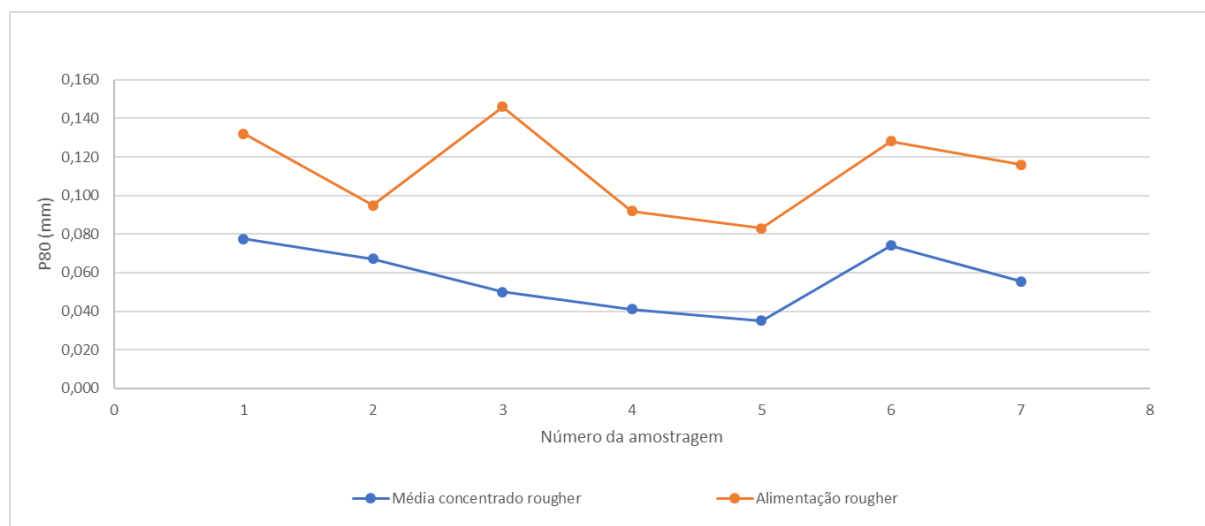
As amostras foram enviadas para o laboratório de processo da usina do Salobo. Inicialmente, foram determinadas as porcentagens de sólidos de todas as amostras. Em seguida, foi realizado o peneiramento a úmido, com telas nas seguintes aberturas: 425, 212, 150, 106, 75, 45 e 38  $\mu\text{m}$ . O produto retido em cada malha foi encaminhado para análise química no Laboratório Químico da usina do Salobo, para determinação do teor de cobre por meio de absorção atômica.

Para a realização deste trabalho, foram realizadas 7 amostragens entre os anos de 2015 e 2017.

Foram realizados ainda ensaios em escala laboratorial simulando a etapa *rougher* com a mesma alimentação da usina industrial. O objetivo destes ensaios é o de avaliar se em escala laboratorial também se observa a mesma segregação granulométrica.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados das amostragens no circuito industrial, foram reunidos dados da granulometria de alimentação da flotação *rougher* e comparados com os dados da granulometria do concentrado *rougher*, que constitui a alimentação nova do circuito de remoagem. Estes dados estão ilustrados na Figura 3.



**Figura 3 - Comparação da granulometria de alimentação *rougher* e do concentrado *rougher***

Os dados da Figura 3 ilustram uma clara tendência de uma granulometria significativamente mais fina do concentrado *rougher* em relação à alimentação da mesma etapa. Essa diferença se deve possivelmente a dois fatores. O primeiro é que partículas mais grosseiras podem não estar liberadas ou são pesadas demais para serem flotadas, sendo encaminhadas assim para o rejeito. O segundo é que os sulfetos presentes no minério do Salobo, que são concentrados na etapa *rougher*, apresentam densidade significativamente maior que o restante da ganga, constituída principalmente de óxidos e silicatos. Essa diferença de densidade provavelmente faz com que partículas de sulfetos de mesmo tamanho das partículas de ganga sejam encaminhadas para o *underflow* do ciclone da moagem de bolas, sendo assim moídas além do necessário. Tal diferença possui um significativo impacto positivo sobre a operação dos moinhos verticais da usina do Salobo, que recebem uma alimentação com granulometria aproximadamente 50% mais fina que a projetada.

A fim de avaliar o impacto na recuperação da etapa *rougher* desta diferença entre as granulometrias da alimentação e do concentrado, foi determinada a recuperação por faixa granulométrica para todos os resultados de amostragens. Os resultados dos valores médios para as amostragens realizadas estão ilustradas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Recuperação metalúrgica de cobre por faixa granulométrica – média das amostragens de 2008 a 2011**

Malha (μm)	Recuperação metalúrgica de cobre (%)	Partição do cobre por fração (%)
212	3,60	1,49
150	25,05	5,15
106	54,29	8,82
75	68,89	12,37
45	80,03	14,67
38	86,85	11,30
<38	87,80	46,20
Média etapa	77,97	100

Pode-se observar que existe uma queda significativa da recuperação de cobre nas frações mais grosseiras. Esta menor recuperação não impacta de forma significativa

a recuperação média da etapa, tendo em vista que a quantidade de cobre presente nas frações mais grosseiras é muito baixa, de aproximadamente 10%, como também pode ser visto na Tabela 2. Como informação, a etapa *rougher* representa de 75 a 85% do rejeito final da usina, conforme resultados das amostragens industriais realizadas para o presente estudo.

Nas etapas *cleaner* e *scavenger* do *cleaner*, não se observou o mesmo comportamento da etapa *rougher* – as granulometrias das alimentações e dos concentrados possuem distribuições granulométricas semelhantes.

Os resultados dos ensaios laboratoriais indicam a mesma tendência observada industrialmente – o concentrado *rougher* é significativamente mais fino que a alimentação, conforme ilustrado na Tabela 3.

**Tabela 3 – resultados dos ensaios em escala laboratorial**

	P <sub>80</sub> (mm)	
	Amostragem 6	Amostragem 7
Concentrado <i>rougher</i> 1	0,044	0,060
Concentrado <i>rougher</i> 2	0,069	0,045
Média concentrado <i>rougher</i>	0,057	0,053
Rejeito <i>rougher</i>	0,114	0,100

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que existe uma significativa diferença entre a distribuição granulométrica da alimentação e do concentrado da etapa *rougher* de flotação da usina do Salobo, similar a observada em estudo anterior para a usina do Sossego. Uma significativa parcela da porção mais grosseira segue diretamente para o rejeito da etapa. Tal situação não impacta de forma significativa a recuperação metalúrgica do processo, tendo em vista que apenas aproximadamente 10% do cobre contido na alimentação da flotação se encontra nas frações mais grosseiras. Observa-se, no entanto, um impacto positivo significativo sobre a operação dos moinhos verticais, que recebem uma alimentação muito mais fina que a planejada em projeto. Tal característica pode ocorrer em outras usinas que processem minerais sulfetados e deve ser levada em conta no dimensionamento dos moinhos verticais.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Vale S.A. pela autorização para a publicação deste trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

Bergerman MG. Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2009.

Bergerman MG. Dimensionamento e simulação de moinhos verticais [tese de doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2013.

Godoy MLS, Bergerman, MG, Godoy PH, Rosa MAN. Development of the Salobo Project. In: 2010 CIM Conference and Exhibition, 2010, Vancouver. 2010 CIM Conference and Exhibition Proceedings, 2010.

Gy P. Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: theories of heterogeneity, sampling and homogenizing. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. 653 p.

Miranda A, Fonseca R, Olegario F, Souza M, Oliveira G, Bergerman MG, Delboni Junior H. avaliação da granulometria de alimentação e dos produtos da etapa *rougher* de flotação da usina do Sossego. HOLOS, [S.l.], v. 7, p. 88-93, dez. 2015. ISSN 1807-1600. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2015.3655>.

Rosa MAN, Bergerman MG, Miranda A, Oliveira JL, Souza M, Batista Filho J, Cardoso W. Controle operacional da usina do Sossego. In: Meeting of the southern hemisphere on mineral technology e Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. Proceedings do VII Meeting of the southern hemisphere on mineral technology e XXII Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2007. v. III. p. 505-512.

Rosa MAN, Rodrigues WJ. Flotação de cobre em Sossego e Salobo. In: Teoria e prática do Tratamento de Minérios, volume 4: A flotação no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 3 edição. 2013.

Vale, Form 20-F, 2016. Disponível em: [http://www.vale.com/EN/investors/information-market/annual-reports/20f/20FDocs/Vale\\_20-F\\_FY2016\\_-\\_i.pdf](http://www.vale.com/EN/investors/information-market/annual-reports/20f/20FDocs/Vale_20-F_FY2016_-_i.pdf)