

## **AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA EM CIRCUITOS DE MOAGEM ALIMENTADOS COM PRODUTOS DE PRÉ-CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS DE VANÁDIO E COBRE**

**MOREIRA, B.H.M.<sup>1</sup>, UEHARA, B.H.<sup>2</sup>, NETO, D.J.<sup>3</sup>, BERGERMAN, M.G.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo –. b.henrique111@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo –. bianca.uehara@usp.br

<sup>3</sup>Univesidade de São Paulo -. dimasnetosri@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade de São Paulo -. mbergerman@gmail.com

### **RESUMO**

O uso de operações mais complexas de cominuição e concentração de minerais na indústria mineral tem crescido em função da queda dos teores e maior complexidade dos minérios disponíveis. Uma alternativa para enfrentar a alta dos custos com a instalação e operação de usinas de beneficiamento mineral é a pré-concentração. Com isso, descarta-se, antes da alimentação da usina de beneficiamento, quantidade significativa de massa com pouca ou nenhuma quantidade do mineral de interesse, reduzindo assim a massa a ser processada nas operações seguintes. A diminuição da massa a ser processada pode levar a uma diminuição da recuperação metalúrgica do mineral de interesse, contudo, ela também induz a uma diminuição de custos durante a moagem, etapa esta que corresponde à uma parcela significativa do consumo de energia em uma planta de beneficiamento, sendo necessário dessa forma, uma avaliação da sua viabilidade. Para testar a viabilidade da pré-concentração em circuitos de moagem, deve-se levar em consideração as características do minério, bem como o método de concentração a ser empregado. O presente trabalho realiza essa avaliação através do método de Bond, utilizando-se de uma comparação entre as amostras que foram pré-concentradas e as que não foram pré-concentradas quanto à variação do Índice de Trabalho (WI) entre as mesmas, seguido por uma validação dos resultados através do método alternativo de Jauregui. Foram realizados ensaios com dois tipos de minérios: Vanádio, pré-concentrado com um método de Separação Magnética e Cobre, em que foi realizado uma Jigagem. Os resultados indicam essa tendência na diminuição dos custos quando a pré-concentração é eficiente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pré-concentração, Método de Bond, Tratamento de Minérios

### **ABSTRACT**

The use of more complex comminution operations and mineral concentration in the mineral industry has increased due to the drop in the contents and greater complexity of the available ores. An alternative to face the cost increase with the installation and operation of mineral processing plants is preconcentration. Thus, a significant amount of mass with little or no quantity of the mineral of interest is discarded prior to feeding to the mill, thus reducing the mass to be processed in the subsequent operations. The decrease in the mass to be processed may lead to a decrease of the metallurgical recovery of the ore of interest, however, it also induces a decrease in cost during milling, which corresponds to a significant portion of the energy consumption in a mill. In order to test the feasibility of preconcentration in grinding

circuits, one must take into account the characteristics of the ore as well as the concentration method to be employed. The present work makes this evaluation through the Bond method, using a comparison between the samples that were pre-concentrated and those that were not pre-concentrated as to the variation of the Working Index (WI) between them, followed by validation of results by an alternative method - Jauregui. Tests were carried out with two types of ores: Vanadium, pre-concentrated with a method of Magnetic Separation and Copper, in which a Jigging was carried out. The results show this tendency in decreasing the costs when the preconcentration is efficient.

**KEYWORDS:** Preconcentration, Bond Method, Ore Treatment

## 1. INTRODUÇÃO

Uma alternativa para enfrentar a alta dos custos com a instalação e operação de usinas de beneficiamento mineral é a pré-concentração. A pré-concentração é realizada antes da alimentação da usina de beneficiamento, reduzindo quantidade significativa de massa com pouca ou nenhuma quantidade do mineral de interesse, reduzindo assim a massa a ser processada nas operações seguintes.

Cresswell (2001) cita o grande potencial de aplicação desta tecnologia e ilustra uma série de resultados positivos em minas da África, México e China. O autor apresenta recuperações metalúrgicas da ordem de 90 a 95% dos metais de interesse com o descarte de 15 a 30% da massa que alimentaria a usina e estudos realizados por (BERGERMAN et al., 2013) em uma amostra de minério de cobre indicam uma pequena redução do WI no produto da pré-concentração. Esses resultados indicam benefícios, por exemplo, o aumento da produção de metal contido de uma usina sem necessidade de se recorrer a uma extensão da capacidade de moagem ou flotação e a extensão da vida útil da mina.

Esta ocorre devido à redução do teor de corte e ao aumento das reservas minerais uma vez que permite o aproveitamento de minérios de baixo teor e menores gastos com a disposição de rejeitos finos em barragens, já que os rejeitos da pré-concentração são grosseiros e podem ser dispostos em pilhas, uma destinação mais simples e econômica que os rejeitos finos que necessitam de barragens de grandes dimensões (minimização de impacto ambiental). Até o momento, no entanto, poucos estudos avaliaram os impactos sobre a resistência do minério à moagem e a sua abrasividade após a exclusão da ganga por operações de pré-concentração

O objetivo desse trabalho é a avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem cuja alimentação tenha passado por uma etapa de pré-concentração.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, as amostras recebidas foram preparadas para a execução dos ensaios. A amostra de Vanádio já foi enviada pela mineração Maracás separada em alimentação, concentrado e rejeito da pré-concentração, já que eles possuem um circuito de pré-concentração com separadores magnéticos em operação. A amostra

de cobre sulfetado, por sua vez, foi pré-concentrada por um processo de Jigagem no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Os produtos foram enviados para análise química no Laboratório da Mineração Caraíba.

Para a avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem da amostra recebida, foi utilizada a metodologia proposta por Bond (1960). O procedimento adotado seguiu os parâmetros contidos na norma NBR-11376. Trata-se de um processo iterativo, sendo necessário diversos ciclos para se obter uma convergência nos resultados. Essa convergência ocorre quando o Produto Ideal - obtido matematicamente - é igual ao Produto produzido em um ciclo, com uma confiança de 5%, essa situação deve acontecer pelo menos em três ciclos consecutivos para que se chegue no término de ensaio.

Além disso, foi realizado um ensaio alternativo ao de Bond proposto por Jauregui et al. (1982) com o objetivo de validar esses resultados obtidos do Índice de Trabalho. Esse ensaio, utiliza moagem a úmido e o WI é obtido através de uma constante derivada de uma comparação com o método de Bond. O objetivo de se utilizar este método é que ele pode ser realizado com menor massa, o que facilita o trabalho em circuitos com concentração, como o caso, onde muitas vezes é difícil gerar massa suficiente para um ensaio de WI.

Pode-se, portanto, realizar uma avaliação econômica com os índices calculados, calculando a energia que será consumida pelo circuito com e sem pré-concentração com a equação de Bond. A Tabela 1 ilustra os parâmetros adotados para a avaliação econômica.

Tabela 1. Parâmetros considerados para a estimativa econômica do impacto da pré-concentração no circuito de moagem

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| <b>Vazão Mássica</b>      | <b>1000 t/h</b>    |
| <b>Período</b>            | <b>8000 h/ ano</b> |
| <b>Custo de Energia *</b> | <b>329 R\$/Mwh</b> |
| <b>F<sub>80</sub></b>     | <b>10000 mm</b>    |
| <b>P<sub>80</sub></b>     | <b>100 mm</b>      |

\* Fonte: HRJAN, 2011

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 ilustra os resultados de análise química e recuperações no processo de pré-concentração das amostras estudadas.

Tabela 2. Análise química das amostras

| Cobre            | Cu (%) | Fe (%) | S (%)  |
|------------------|--------|--------|--------|
| Não-concentrado  | 0,75%  | 13,19% | 5,37%  |
| Rejeito          | 0,20%  | 5,52%  | 0,63%  |
| Concentrado      | 1,45%  | 26,18% | 11,88% |
| Rec. Metalúrgica | 85,04% |        |        |
| Rec. Mássica     | 44,27% |        |        |

  

| Vanádio          | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | Fe (%) |
|------------------|-----------------------------------|--------|
| Não-concentrado  | 1,26%                             | 34,15% |
| Rejeito          | 0,88%                             | 24,93% |
| Concentrado      | 1,96%                             | 41,67% |
| Rec. Metalúrgica | 55,00%                            | 42,70% |
| Rec. Mássica     | 35,00%                            |        |

Em relação ao minério de Cobre, de acordo com os dados da Tabela 3, conforme esperado obteve-se uma significativa concentração dos sulfetos no concentrado, com uma recuperação metalúrgica de 85% e uma recuperação em massa de apenas 44%, o que mostra a boa eficiência da operação de pré-concentração.

A amostra de Vanádio analisada passou por um processo de separação magnética para a pré-concentração (Costa, 2014). A separação magnética, neste caso, seleciona o material ferromagnético, resultando em um concentrado rico em magnetita e um rejeito rico em sílica, como mostrado na análise química. A recuperação mássica foi de 35% e a recuperação metalúrgica de 55% do Vanádio contido, resultando em uma recuperação abaixo do esperado. Deve-se ressaltar, no entanto, que esta amostra foi coletada no circuito industrial e pode representar um momento de menor eficiência do circuito, já que normalmente a recuperação em massa média da planta de acordo com Costa (2014) é de 68% e a metalúrgica de aproximadamente 80%. Essa baixa recuperação de vanádio é percebida pelo alto teor desse minério no rejeito, indicando que o WI da amostra pode não variar significativamente.

A Tabela 3 ilustra os resultados obtidos com os ensaios de WI de Bond e Jauregui com a alimentação, concentrado e rejeito da pré-concentração das duas amostras estudadas.

Tabela 3. Resultados do Índice de Trabalho calculados pelo método de Bond e pelo método alternativo

| <b>Cobre</b>         | <b>P<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>F<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>WI BOND (kwh/t)</b> |   | <b>WI Simplificado (Kwh/t)</b> | <b>Erro [%]</b> |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|---|--------------------------------|-----------------|
| Não Concentrado      | 293                        | 2009                       | 17,57                  | ✓ | 16,94                          | 3,6             |
| Concentrado          | 278                        | 1415                       | 15,64                  | ✓ | 18,32                          | 17,1            |
| Rejeito              | 332                        | 2029                       | 20,76                  | ✓ | 18,71                          | 9,9             |
| <b>Constante (k)</b> |                            |                            |                        |   |                                | <b>0,61</b>     |
| <b>Vanádio</b>       | <b>P<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>F<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>WI BOND (kwh/t)</b> |   | <b>WI Simplificado (Kwh/t)</b> | <b>Erro [%]</b> |
| Não Concentrado      | 193                        | 1284                       | 14,57                  | ✓ | 14,36                          | 1,4             |
| Concentrado          | 179                        | 1065                       | 14,63                  |   | 14,36                          | 1,9             |
| Rejeito              | 177                        | 1180                       | 13,25                  |   | 13,75                          | 3,8             |
| <b>Constante (k)</b> |                            |                            |                        |   |                                | <b>0,63</b>     |

Pode-se verificar que o método alternativo conseguiu aproximar o WI obtido com o método de Bond para a amostra de cobre, contudo, para a amostra de vanádio, os erros se mostraram mais expressivos. Esta informação é importante para mostrar que o uso do método do Jauregui deve ser sempre previamente validado e então usado para um maior número de amostras de um mesmo tipo de material.

Quanto aos resultados de WI, no caso do cobre os resultados ficaram dentro do esperado, com um WI para o concentrado significativamente menor, já que o concentrado possui maior quantidade de sulfetos e menor quantidade de silicatos. Já para o Vanádio o WI das três amostras ficou muito próximo, o que pode ser explicado pela baixa recuperação metalúrgica do circuito no momento da amostragem, o que significa que as três amostras possuem características parecidas.

A Tabela 4 ilustra os resultados da avaliação econômica considerando o circuito de moagem com e sem pré-concentração.

Tabela 4. Análise Econômica de um circuito de moagem hipotético com e sem pré-concentração

| <b>Cobre</b>                | <b>WI (kwh/t)</b> | <b>Vazão Mássica (t/h)</b> | <b>F<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>P<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>Potência (kW)</b> | <b>Energia (MWh)</b> | <b>Custo (R\$)</b>       |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| Alimentação                 | 17,57             | 1000                       | 100                        | 1000                       | 15813                | 126504               | R\$ 41.619.816,00        |
| Alimentação Pré-Concentrada | 15,64             | 450                        | 100                        | 1000                       | 6334                 | 50672                | R\$ 16.671.088,00        |
| <b>Economia</b>             |                   |                            |                            |                            |                      |                      | <b>R\$ 24.948.728,00</b> |
| <b>Vanádio</b>              | <b>WI (kwh/t)</b> | <b>Vazão Mássica (t/h)</b> | <b>F<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>P<sub>80</sub> (µm)</b> | <b>Potência (kW)</b> | <b>Energia (MWh)</b> | <b>Custo (R\$)</b>       |
| Não Concentrado             | 14,57             | 1000,00                    | 100,00                     | 1000,00                    | 13113                | 104904               | R\$ 34.513.416,00        |
| Concentrado                 | 14,63             | 680,00                     | 100,00                     | 1000,00                    | 8954                 | 71628                | R\$ 23.565.769,92        |
| <b>Economia</b>             |                   |                            |                            |                            |                      |                      | <b>R\$ 10.947.646,08</b> |

Para o caso do cobre, os ganhos obtidos foram muito significativos, já que além da pré-concentração descartar 55% da massa que iria ser alimentada ao moinho, esta

operação permitiu uma redução do WI que alimenta a usina. Assim, o custo total de moagem da situação hipotética foi reduzido em mais de 50%.

Para o caso do Vanádio, apesar de não haver variação de WI entre a alimentação com e sem a pré-concentração, observou-se uma economia significativa, da ordem de 30%, já que a pré-concentração permitiu o descarte de 32% da massa que seria alimentada ao moinho. Para a análise dessa amostra, foi considerada a recuperação mássica média da planta de acordo com Costa, 2004.

#### **4. CONCLUSÕES**

A pré-concentração pode se mostrar de extrema relevância para a indústria mineira, tendo em vista o elevado custo operacional de uma usina de beneficiamento. Para que esse tipo de processo seja viável, é preciso ter condições adequadas como apontadas neste trabalho. É preciso que a concentração realizada seja eficiente de modo que o minério processado tenha máximo aproveitamento.

Os resultados obtidos no ensaio de Bond e posteriormente validados pelo método alternativo mostraram-se confiáveis para as duas amostras quando analisados sob o ponto de vista da recuperação e da minerologia das amostras.

A análise econômica se mais positiva no caso da amostra de cobre, pois além da diminuição da massa a ser processada e a redução do WI, a concentração resultou em uma recuperação adequada. Em relação a amostra de Vanádio, apesar do pouco impacto em relação ao WI, os ganhos também foram significativos já que a usina deixaria de processar aproximadamente 32% da massa da alimentação, que seria descartada diretamente como rejeito.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade de São Paulo, pelo financiamento do trabalho; ao Prof. Dr. Maurício Bergerman que me orientou durante o período da pesquisa; ao Dimas Neto pelo auxílio durante os ensaios no LTM/USP e às empresas: Maracás e Caraíba, pelo fornecimento do material. 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**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR11376: Moinho de Bolas – Determinação do Índice de Trabalho, 1990.

BERGERMAN, M. G. ; NETO, D. ; TOMASELLI, B. Y. ; MACIEL, B. F. ; ROVERI, C. ; NAVARRO, F. C. . Redução do consumo de energia de circuitos de moagem com a utilização de pré-concentração de minerais sulfetados. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, 2013, Goiania. Anais do XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern

Hemisphereon Mineral Technology. Pires do Rio: Gráfica e Editora Pires do Rio Ltda-ME, 2013. v. 2. p. 499-506.

BOND, F.C. The Third Theory of Comminution, Trans.AIME, Vol.193, pp. 484-494. 1952.

COSTA, I.A. Pré-concentração magnética do magnetita-piroxenito da Vanádio de Maracás S/A.[Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

CRESWELL, G.M. Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation. In: SAIMM COOPER, COBALT, NICKEL AND ZINC RECOVERY CONFERENCE, 2001, Cidade. **Proceedings**.Joanesburgo: SAIMM, 2001. P. 1-10.

FIRJAN, Estudos para o Desenvolvimento do Estado do Rio de Janeiro. Nº8 - Agosto/2011

YAP, R.F.; SEPULVEDA, J.L. ; JAUREGUI, R. Determination of the Bond Work Index using an ordinary laboratory batch ball mill, 1982.