

**Bruno Henrique Mota Moreira**

**Avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem  
alimentados com produtos de pré-concentração de minério  
sulfetado de cobre**

**São Paulo  
2018**

**Bruno Henrique Mota Moreira**

**Avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem alimentados com produtos de pré-concentração de minério sulfetado de cobre**

Trabalho de Formatura em Engenharia de Minas do curso de graduação do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman

São Paulo

2018

TF-2018  
M1813a  
Lynno 29290/2

M2018o



Escola Politécnica - EPMI



31700000814

Ficha Catalográfica

**Moreira, Bruno Henrique Mota**

**Avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem alimentados com produtos de pré-concentração de minério sulfetado de cobre / B. H. M. Moreira -- São Paulo, 2018.**

**42 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.**

**1.Pré-Concentração 2.Método de Bond 3.Tratamento de Minérios 4.Cobre 5.Jigue I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Mineração Caraíba pelo fornecimento das amostras e também pela realização das análises químicas, ao Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) e seus técnicos que ajudaram durante a preparação e realização dos ensaios, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pelo apoio para a realização da jigagem e ao professor Maurício Guimarães Bergerman pela tutoria durante todo o trabalho.

## RESUMO

Em função da queda de teores e maior complexidade dos minérios disponíveis, tem surgido o uso crescente de operações alternativas para lidar com esta questão. Uma destas alternativas para lidar com a alta dos custos com a instalação e operação de usinas de beneficiamento mineral é a pré-concentração. Com este processo, descarta-se, antes da alimentação da usina, quantidade significativa de massa com pouca ou nenhuma quantidade do mineral de interesse, reduzindo a massa a ser processada nas operações seguintes. Ainda que essa diminuição de massa diminua a recuperação metalúrgica do mineral de interesse, ela também pode significar uma redução nos custos durante a moagem, etapa esta que corresponde a uma parcela significativa do consumo de energia em um circuito industrial. 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 uma amostra de minério sulfetado que foi pré-concentrada com um método densitário e uma que não foi pré-concentrada quanto à variação do Índice de Trabalho (WI), seguido por uma validação dos resultados através do método alternativo de Jauregui. Os resultados indicam essa tendência na diminuição dos custos quando a pré-concentração é significativa.

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

## **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 a Copper ore from Bahia/Brazil, in which a Jigging was carried out. The results show this tendency in decreasing the costs when the preconcentration is significant.

**KEYWORDS:** Preconcentration, Bond Method, Ore Treatment, Copper, Jig.

## **Lista de Ilustrações**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Processo de Pré-Concentração .....              | 10 |
| Figura 2 - Separação Magnética: Tipos e Intensidades ..... | 14 |
| Figura 3 - Equipamento de Jigagem - IPT.....               | 17 |
| Figura 4 - Preparação das Amostras .....                   | 19 |
| Figura 5 - Ensaio de Bond: Moinho de bolas .....           | 20 |
| Figura 6 - Fluxogramas dos Processos.....                  | 28 |

## **Lista de Tabelas**

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Ore Sorting: Tipos de sensores e aplicações ..... | 15 |
| Tabela 2 - Ensaio alternativo: Carga de Bolas .....          | 22 |
| Tabela 3 - Resultados: Análise Química pós-Jigagem .....     | 23 |
| Tabela 4 - Resultados: WI de Bond .....                      | 24 |
| Tabela 5 - Resultados: Ensaio alternativo.....               | 25 |
| Tabela 6 - Análise Econômica: Parâmetros .....               | 26 |
| Tabela 7 - Análise Econômica - WI.....                       | 26 |
| Tabela 8 - Análise Econômica - Massa e WI.....               | 27 |

## **Sumário**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução.....                              | 9  |
| 2. Objetivo .....                               | 10 |
| 3. Revisão Bibliográfica .....                  | 11 |
| 3.1. Pré-Concentração .....                     | 11 |
| 3.2. Separação Magnética.....                   | 12 |
| 3.3. Ore-Sorting.....                           | 14 |
| 3.4. Métodos Densitários.....                   | 16 |
| 3.5. Escolha do método de pré-concentração..... | 17 |
| 4. Método.....                                  | 17 |
| 4.1. Preparação das amostras.....               | 17 |
| 4.2. Ensaio de Bond .....                       | 19 |
| 4.3. Ensaio de Jauregui.....                    | 21 |
| 5. Resultados.....                              | 23 |
| 5.1. Jigagem – Resultados .....                 | 23 |
| 5.2. WI - Resultados .....                      | 24 |
| 5.3. Ensaio Alternativo - Resultados.....       | 25 |
| 6. Discussões .....                             | 25 |
| 7. Conclusões.....                              | 29 |

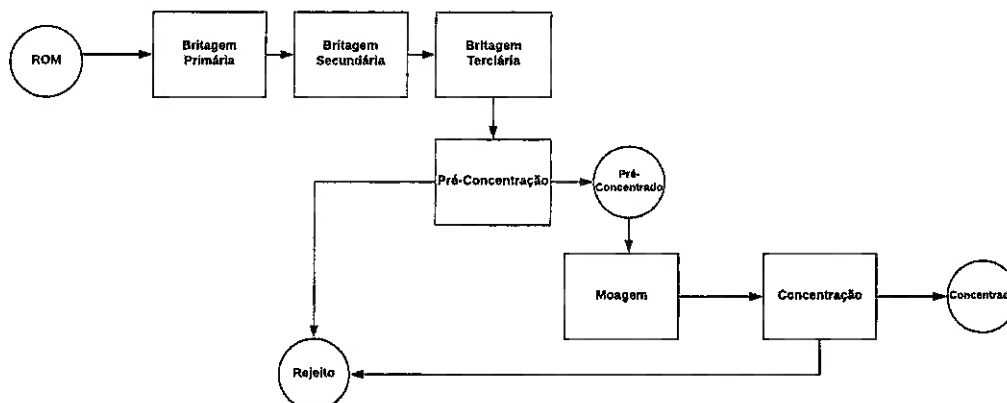
## 1. Introdução

Tem crescido na indústria mineral, em função da queda de teores e maior complexidade dos minérios disponíveis, o uso cada vez mais diverso de operações de cominuição e concentração de minerais.

De acordo com Bergerman et al. (2014), uma alternativa para enfrentar a alta dos custos com a instalação e operação de usinas de beneficiamento mineral é a pré-concentração. Com isto, 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. Os benefícios gerados pelo uso da pré-concentração são significativos, garantindo, por exemplo, o aumento da produção de metal contido de uma usina sem a necessidade de se recorrer a uma extensão da capacidade de moagem ou flotação e o aumento 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. Observa-se ainda menores gastos com a disposição de rejeitos finos em barragens, já que os rejeitos da pré-concentração são grossos 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 fluxograma a seguir representa um circuito típico onde a pré-concentração é aplicada, em uma etapa anterior à moagem.

Figura 1 - Processo de Pré-Concentração



Fonte: Elaboração própria.

Ainda que geralmente a pré-concentração seja feita após a última etapa de britagem, esta não é necessariamente a regra, de forma que a pré-concentração pode acontecer até mesmo anterior às etapas finais de britagem. A escolha do melhor ponto para ser realizada a pré-concentração depende também da escolha do método que será aplicado, tendo em vista que a eficiência de cada método está relacionada também à faixa granulométrica em que este é realizado.

## 2. Objetivo

O presente estudo tem por objetivo avaliar o consumo de energia em circuito de moagem cuja alimentação tenha passado por uma etapa de pré-concentração. A avaliação será realizada em amostras de minério sulfetado de cobre através da método proposto por Bond. Além disto, o trabalho propõe-se estudar o método alternativo de Jauregui, que utiliza menos massa e é mais fácil de ser aplicado em comparação ao tradicional método de Bond.

### **3. Revisão Bibliográfica**

Esta revisão bibliográfica apresenta os processos de pré-concentração mais utilizados, os equipamentos e seus fornecedores, além de detalhes sobre a metodologia e os ensaios que foram realizados posteriormente.

#### **3.1. Pré-Concentração**

As operações de concentração (ou pré-concentração) de minerais, se baseiam em diferenças entre o mineral de interesse e os minerais de ganga, dessa forma, pode-se separar o mineral de interesse do mineral de ganga através dessa propriedade diferenciadora. Dentre os diversos métodos utilizados para a concentração (ou pré-concentração) podemos citar como propriedades diferenciadoras: peso específico (densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, hidrofiliabilidade/hidrofobicidade, cor, radioatividade e forma. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse. (Luz et al., 2002).

A vantagem encontrada em um processo de pré-concentração está sobretudo relacionada à diminuição da massa a ser processada na usina de beneficiamento. Morgan (2009), ao utilizar um ensaio de concentração por meio denso mostra potencial de redução de 60% da massa processada e mantendo 85% de recuperação de níquel da empresa Tati Nickel Phoenix Mine em Botsuana, conseguindo aumentar a quantidade de ROM produzido e diminuindo o teor de corte da mina.

Fourie et al. (2007) ao avaliarem a pré-concentração de minério de zinco com o uso do DMS na mina Rosh Pinah Zinc Corporation na Namíbia, obteve concentrado com teor de 9% de zinco, com recuperações metalúrgicas de 90% e recuperação mássica de 30%.

Cresswell (2001), por sua vez, cita o grande potencial deste tipo de processo e ressalta uma série de resultados positivos em minas da África, México e China, com recuperações metalúrgicas da ordem de 90 a 95 %.

No Brasil, esta tecnologia é utilizada em poucas operações. A mineração Maracás (BA), no entanto, é um exemplo na utilização de pré-concentração através de separação magnética em uma mina de vanádio, recuperando 70% da massa e 94% de recuperação metalúrgica (Costa et al., 2017).

Bergerman et al. (2013) realizaram diversas avaliações em escala laboratorial em depósitos brasileiros para diferentes minérios sulfetados. Tais avaliações apresentam ganhos significativos em relação ao aumento do teor com altas recuperações metalúrgicas.

Sabendo-se do contexto em que a tecnologia da pré-concentração se encontra foram estudados a princípio alguns tipos de métodos de concentração a fim de se definir qual seria o método apropriado para a realização do trabalho, tendo em visto o minério em questão. Foram estudados três tipos diferentes de concentração mineral: separação magnética, separação densitária e *ore-sorting*.

### 3.2. Separação Magnética

De acordo com Luz et al. (2002), a separação magnética pode ser utilizada dependendo das diferentes respostas ao campo magnético que as espécies individualmente possuem, essas diferentes respostas denomina-se suscetibilidade magnética.

Segundo Luz et al. (2002) os minerais se dividem em três grupos no que tange à suscetibilidade magnética:

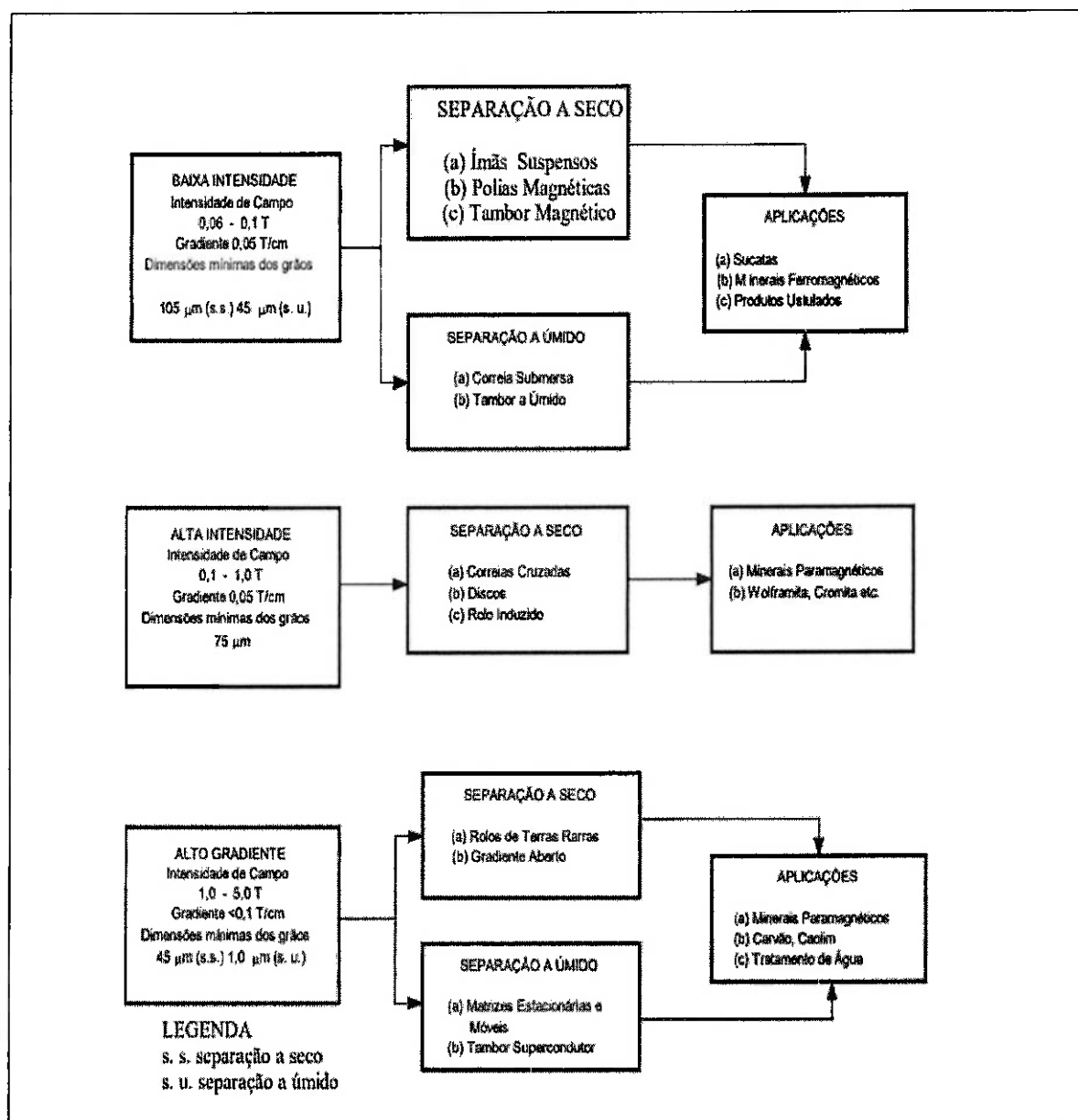
1. Ferromagnéticos: fortemente atraídos por um ímã comum. Exemplo: magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

2. Paramagnéticos: média ou pouca intensidade magnética. A permeabilidade magnética maior que a do meio circundante (água ou ar). Também concentram um elevado número de linhas de indução vindas do campo externo. Exemplo: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
3. Diamagnéticos: não são atraídos. Esses minerais possuem susceptibilidade nula e podem ser repelidos quando submetidos a um campo magnético. A permeabilidade magnética desses minerais é mais baixa que a do meio circundante. Exemplo: quartzo

Há uma grande variedade de separadores magnéticos, que podem ser classificados, de acordo com o uso. Há uma série de separados diferentes e estes são classificados de acordo com seu uso e intensidade. A separação magnética pode ser classificada em quatro categorias, dependendo do meio utilizado e da intensidade de campo. Assim, tem-se a separação magnética, a seco, de baixa e alta intensidade e, a úmido, de alta e baixa intensidade.

A figura a seguir, mostra os tipos de separadores magnético existentes e suas aplicações.

Figura 2 - Separação Magnética: Tipos e Intensidades



Fonte: Luz et al. (2002)

### 3.3. Ore-Sorting

O Ore-Sorting é um método de separação por sensores, apesar do alto investimento necessário para a utilização desses sensores, o uso desse método tem se mostrado eficiente para a pré-concentração e se consolidado como uma alternativa aos métodos mais tradicionais como separação magnética ou gravimetria

É baseado na separação através de alguma propriedade física do material através de sistemas de detecção e ejeção capaz de reconhecer diversas propriedades, separando cada partícula individualmente.

Como uma das limitações, esse procedimento requer que as partículas sejam mais grossas, variando de 1 mm até 300mm (Duffy et al., 2015). Apesar dessa limitação, há fornecedores que alegam expressiva eficiência no uso de partículas mais finas, chegando em uma ordem de até 0,1 mm (Comex, 2018).

A Tabela 1, extraída do trabalho de Duffy et al. (2015) mostra alguns dos tipos de sensores utilizados, as propriedades de separação medidas e suas respectivas áreas de aplicação.

**Tabela 1 - Ore Sorting: Tipos de sensores e aplicações**

| Sensores                                          | Propriedade de Separação                                                 | Áreas de Aplicação                                                        | Aplicação Atual/Estado de Desenvolvimento | Velocidade | Grau de Penetração      |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|-------------------------|
| Ressonância Magnética (MR)                        | Excitação e detecção de linhas espectrais específicas de radiofrequência | Calcopirita                                                               | Classificação a granel (bulk sorting)     | Segundos   | Penetrante              |
| Radiométrico (RM)                                 | Radiação gama natural                                                    | Urânio, metais preciosos                                                  | Classificação de partículas               | Tempo real | Penetrante              |
| Transmissão de Raio X de dupla energia (XRT)      | Absorção de raios-x (densidade atômica)                                  | Metais de base e preciosos, minerais industriais, combustíveis, diamantes | Classificação de partículas               | Tempo real | Parcialmente Penetrante |
| Fluorescência de Raios x (XRF)                    | Emissão secundária de raios x                                            | Diamantes                                                                 | Classificação de partículas               | Tempo real | Superfície              |
| Cor (Câmaras CCD - Dispositivo de Carga Acoplada) | Reflexão, absorção, transmissão                                          | Metais de base e preciosos, minerais industriais, combustíveis, diamantes | Classificação de partículas               | Tempo real | Superfície              |
| Fotométrico (PM)                                  | Reflexão, absorção monocromática                                         | Minerais industriais, diamantes                                           | Classificação de partículas               | Tempo real | Superfície              |
| Eletromagnético (EM)                              | Condutividade, permeabilidade                                            | Metais de base                                                            | Classificação de partículas               | Tempo real | Penetrante              |
| PGNAA                                             | Análise de raios gama resultantes de ativação neutrônica                 | Calcário, Fe, Al, Pb, Mn, Cu, Zn                                          | Somente medição                           | Minutos    | Penetrante              |
| PFTNA                                             | Análise de ativação de nêutrons pulsados e térmicos                      | Ni, Fe, Co, Mg, Si, Al, Mn, Cr, C, H, O                                   | Somente medição                           | Minutos    | Penetrante              |
| Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)     | Reflexão, Absorção                                                       | Metais de base e minerais de industriais                                  | Operações de reciclagem                   | Tempo real | Superfície              |
| Infravermelho (IR)                                | Condutividade térmica, dissipação de calor                               | Metais de base e minerais de industriais                                  | Em desenvolvimento                        | Tempo real | Superfície              |

Fonte: Duffy et al.(2015)

### 3.4. Métodos Densitários

A separação densitária, por sua vez, consiste na concentração de minerais utilizando como propriedade diferenciadora os pesos específicos de diferentes materiais. São processos de baixo custo operacional e baixo investimento de instalação, ainda que requeiram um consumo elevado de água.

Dentre os métodos gravíticos mais utilizados para partículas grossas estão a Jigagem e a Separação por meio denso.

A separação por meio denso é um processo onde as partículas com densidade inferior ao meio flutuam e as partículas com densidade superior afundam, resultando em dois produtos (flutuado e afundado).

Em escala laboratorial, o estudo da separação por meio denso não serve apenas para avaliar a possibilidade da implementação de um processo de concentração gravítica, mas também pode ser realizado para o estudo do grau de liberação dos minerais a serem separados e levantamentos de curvas de partição.

Há duas grandes áreas de aplicação industrial de separação em meio denso: obtenção de um produto final para o mercado, como no caso do beneficiamento de carvões; e na obtenção de um pré-concentrado, como nos casos das concentrações de diamantes, sulfetos e óxidos metálicos. (Luz et al., 2002).

O processo de jigagem é um processo de contínuas variações hidrodinâmicas. Neste processo, a separação dos minerais de densidades diferentes é realizada em um leito dilatado por uma corrente pulsante de água, produzindo a estratificação dos minerais. Há vários tipos de jigues (Luz et al., 2002).

A Figura 3 ilustra o jigue de prateleiras pertencente ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas da marca AllJig utilizado no presente estudo.

**Figura 3 - Equipamento de Jigagem - IPT**



Fonte: Arquivo Pessoal

### ***3.5. Escolha do método de pré-concentração***

Como visto, a escolha de um método de pré-concentração depende de diversas questões que devem ser ponderadas para o minério que se quer concentrar.

Como o minério de cobre neste estudo, formado principalmente por sulfetos como calcopirita, possui uma grande diferença de densidade em relação ao mineral de ganga, isto é, quartzo e feldspato, decidiu-se pela jigagem.

## **4. Método**

### ***4.1. Preparação das amostras***

Foi recebida uma amostra proveniente da mineração Caraíba, denominada "Brecha", indicando a natureza mineralógica da amostra em questão. Foi retirada, então, uma alíquota para análise química dessa amostra.

Em seguida, foi utilizada uma peneira de 3,35 mm para escalpe, onde as partículas mais grossas foram separadas e as mais finas foram juntadas para o produto da concentração. Seguiu-se esse procedimento devido à limitação do jigge em concentrar as partículas mais grossas.

A jigagem foi então realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas. A jigagem gerou um produto estratificado, separado em quatro divisões, aqui chamadas de "gavetas", de forma que cada gaveta apresentou teores diferentes para cada elemento. As gavetas inferiores apresentaram maiores teores de cobre, enquanto que as superiores, menores teores de cobre.

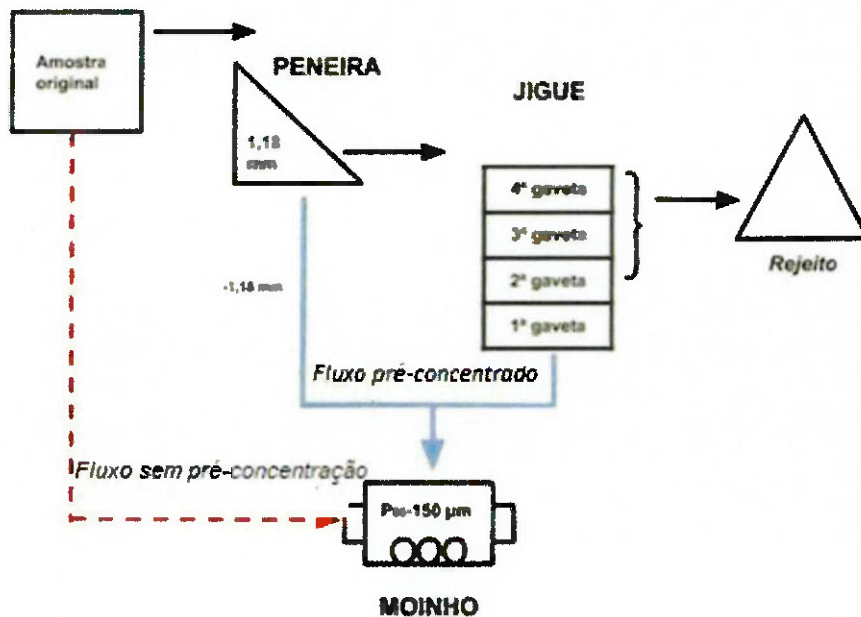
É importante ressaltar também que a jigagem foi realizada em duas bateladas, tendo em vista a quantidade de material que foi utilizado para a realização da jigagem, sendo possível dessa forma, recuperar uma maior quantidade de massa.

Após a jigagem de ambas as amostras, estas seguiram para o Laboratório de Tratamento de Minérios para o início dos ensaios de Bond. Contudo, apenas a amostra denominada "Brecha" que foi estudada neste trabalho.

Alíquotas para análise química foram novamente separadas para as amostras de concentrado e rejeito. A análise química foi realizada pelo laboratório da mineração Caraíba. Os métodos analíticos utilizados foram: Absorção Atômica (Cu, Ni) ; Gravimetria (S, Si) e Volumetria (Fe).

A definição de quais divisões, isto é, quais gavetas compuseram o concentrado, foi decidida após os resultados de análise química. Com as amostras de alimentação (sem pré-concentração), concentrado e rejeito em mãos, estas passaram por um processo de cominuição para chegar à granulometria adequada para a realização do método de Bond. Para isso, foi utilizado o britador de rolos do Laboratório de Tratamento de Minérios, também com uma peneira de escalpe de 3,35 mm, tamanho máximo para a realização do ensaio de Bond. A figura 4 representa as etapas de preparação das amostras.

Figura 4 - Preparação das Amostras



Fonte: Elaboração Própria

#### 4.2. Ensaio de Bond

Para a avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem da amostra recebida, foi utilizada a metodologia proposta por Bond (1960). O resultado obtido neste ensaio é o Índice de Trabalho ou *Work Index* (WI), que corresponde, numericamente ao trabalho necessário para reduzir uma tonelada de minério desde um tamanho infinito, até 80% passante na malha do teste, normalmente da massa passante em 106 µm. A Figura 5 representa o moinho de bolas do Laboratório de Tratamento de Minérios.

**Figura 5 - Ensaio de Bond: Moinho de bolas**



Fonte: Arquivo Pessoal

O procedimento adotado seguiu os parâmetros contidos na norma NBR-11376, com a única ressalva de que a malha utilizada nos testes foi de 150 µm, ao contrário de 106 µm, recomendado pela norma, pois a malha escolhida é mais próxima da malha de liberação do material estudado.

Trata-se de um processo iterativo, sendo necessários diversos ciclos para se obter convergência nos resultados. Esta 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 ao término do ensaio. O cálculo final do índice de trabalho depende de variáveis obtidas durante os ciclos e segue a equação (1) abaixo (Bond, 1960).

$$WI = \frac{44,5}{M^{0,23} \times Y^{0,82} \times \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \quad (1)$$

Onde:

M: Tamanho da Malha Teste

Y: Média dos três últimos números de gramas por rotação de produto líquido formado em um único ciclo

P: Abertura da peneira onde 80% do produto é passante

F: Abertura da peneira onde 80% da alimentação é passante

Através do índice de trabalho, pode-se realizar uma análise econômica de um projeto, tendo em vista a definição adotada por Bond, pode-se calcular o consumo de energia, sabendo-se a potência do moinho utilizado na planta, através da relação (2) representada abaixo.

$$\frac{P}{Q} = 10 \times WI \times \left( \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right) \quad (2)$$

Onde:

P: Potência, em kwh

Q: Vazão, em t/h

WI: Work Index, em kwh/t

P: Tamanho da malha onde é 80% do produto passante, em  $\mu\text{m}$

F: Tamanho da malha onde 80% da alimentação, em  $\mu\text{m}$

Dessa forma, obtém-se a potência que será consumida e portanto, consegue-se estimar o consumo de toda a energia gasta num determinado período de tempo, tornando possível a avaliação do impacto do aumento ou diminuição do work index em determinado processo.

#### 4.3. Ensaio de Jauregui

Jauregui (1982) propôs um método alternativo ao de Bond, utilizando moagem via úmida em um ensaio de jarro. Tal método se relaciona com a de Bond através

de uma constante, porém, ao contrário do método de Bond, o ensaio é feito em um único ciclo.

Neste método, utiliza-se a seguinte carga de bolas para o moinho de jarro de acordo com Bergerman et al.( 2013) :

**Tabela 2 - Ensaio alternativo: Carga de Bolas**

| Ø Diâmetro (mm) | Quantidade de bolas |
|-----------------|---------------------|
| 38              | 11                  |
| 33              | 17                  |
| 30              | 13                  |
| 26              | 10                  |
| 24              | 7                   |
| 23              | 30                  |

Fonte: Bergerman et al.(2013)

A amostra analisada deve estar abaixo de 1,18 mm e acima de 0,150 mm. Antes do início do ensaio, deve-se calcular o F 80. Após o ciclo de moagem de 10 minutos em um moinho do tipo jarro 8x10", com velocidade de rotação de 81 rpm , calcula-se o P80. Com isso, consegue-se calcular o WI simplificado, de acordo com a relação (3) abaixo (Jauregui, 1982):

$$WI = k * \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad (3)$$

Onde:

WI: Work Index, em kwh/t

P: Tamanho da malha onde é 80% do produto passante, em µm

F: Tamanho da malha onde 80% da alimentação, em µm

k: constante de calibração

A constante k é calculada através de uma média com os resultados do ensaio. Pode-se também utilizar diferentes minérios para o cálculo da constante assim como demonstrado no trabalho de Figueira et al. (1985), de acordo com a equação (4) abaixo.

$$k = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} * \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-1}_j}{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)^{-2}_j} \quad (4)$$

Onde:

WI: Work Index, em kwh/t

P: Tamanho da malha onde é 80% do produto passante, em  $\mu\text{m}$

F: Tamanho da malha onde 80% da alimentação, em  $\mu\text{m}$

Considerando as três amostras estudadas, isto é, alimentação, concentrado e rejeito, o resultado obtido para a constante foi de  $k = 0,61$ .

## 5. Resultados

### 5.1. Jigagem – Resultados

O produto da jigagem estava estratificado em quatro divisões, aqui definidas como “gavetas”. A tabela abaixo, mostra a análise química dessas quatro gavetas realizada pelo Laboratório Químico da Mineração Caraíba.

**Tabela 3 - Resultados: Análise Química pós-Jigagem**

| Produto         | Massa (kg) | Massa (%) | Teores (%) |          |          |           | Distribuição (%) |       |       |       |
|-----------------|------------|-----------|------------|----------|----------|-----------|------------------|-------|-------|-------|
|                 |            |           | Cu<br>AA   | Fe<br>VU | S<br>GRA | Si<br>GRA | Cu               | Fe    | S     | Si    |
| 1ª gaveta       | 35,16      | 44,27     | 1,45       | 26,18    | 11,88    | 42,56     | 85,04            | 79,04 | 93,78 | 38,88 |
| 2ª gaveta       | 19,76      | 24,88     | 0,28       | 6,23     | 0,76     | 65,70     | 9,23             | 10,57 | 3,37  | 33,73 |
| 3ª gaveta       | 16,64      | 20,95     | 0,15       | 5,19     | 0,56     | 30,52     | 4,16             | 7,42  | 2,09  | 13,19 |
| 4ª gaveta       | 7,86       | 9,90      | 0,12       | 4,41     | 0,43     | 69,52     | 1,57             | 2,98  | 0,76  | 14,20 |
| Alim. Calculada | 79,42      | 100,00    | 0,75       | 14,66    | 5,61     | 48,46     | 100,0            | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| Alim. Analisada |            |           | 0,75       | 13,19    | 5,37     | 59,64     |                  |       |       |       |

A Tabela 3 mostra a distribuição em cada gaveta do Jigue. Para a amostra do concentrado, foi utilizada a primeira gaveta e para a amostra do rejeito foram utilizadas a segunda, terceira e quarta gaveta. Os dados do minério que não foi concentrado também estão tabulados na linha Alim. Analisada.

## 5.2. WI - Resultados

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com o ensaio de Bond, os resultados detalhados dos ensaios estão contidos no apêndice. A amostra nomeada de concentrado refere-se ao produto da jigagem obtido na primeira e segunda gaveta do jigue. A amostra de rejeito apresenta um índice maior quando comparada às amostras de alimentação e concentrado, esta última apresentando um valor menor que a amostra de alimentação.

Tabela 4 - Resultados: WI de Bond

| Amostra     | F 80 ( $\mu\text{m}$ ) | P 80 ( $\mu\text{m}$ ) | WI (kwh/t) |
|-------------|------------------------|------------------------|------------|
| Alimentação | 2159                   | 126                    | 17,57      |
| Concentrado | 1733                   | 116                    | 15,64      |
| Rejeito     | 2452                   | 134                    | 20,76      |

Pode-se notar em um primeiro momento, a diferença da granulometria entre as amostras estudadas. A amostra concentrada, por exemplo, apresenta uma granulometria menor, efeito este causado pela jigagem, onde as partículas menores e mais densas tendem a descer e as partículas maiores e mais leves tendem a subir, também indicado no valor de F 80 para o Rejeito.

Os resultados de WI, indicam a tendência esperada, tendo em vista o conhecimento prévio da minerologia da amostra estudada, em relação a amostra de alimentação do jigue, isto é, da diminuição do WI para amostra concentrada (rica em sulfetos) e o aumento para a amostra de rejeito (rica em quartzo e feldspatos).

### 5.3. Ensaio Alternativo - Resultados

Tabela 5 - Resultados: Ensaio alternativo

| Cobre         | P 80 (µm) | F 80 (µm) | WI BOND (kwh/t) | WI Simplificado (Kwh/t) | Erro [%] |
|---------------|-----------|-----------|-----------------|-------------------------|----------|
| Alimentação   | 293       | 2009      | 17,6            | 16,9                    | 3,6      |
| Concentrado   | 278       | 1415      | 15,6            | 18,3                    | 17,1     |
| Rejeito       | 332       | 2029      | 20,8            | 18,7                    | 9,9      |
| Constante (k) |           |           |                 |                         | 0,61     |

O resultado obtido com o ensaio alternativo apresenta boa aproximação para a amostra da alimentação do jig. Contudo, apesar de mostrar a tendência de aumento do WI para a amostra de rejeito em relação a amostra inicial, o ensaio não conseguiu boa margem de erro para a amostra de rejeito e para a amostra concentrada.

## 6. Discussões

Os resultados demonstraram que obteve-se uma significativa concentração dos sulfetos no pré-concentrado, com recuperação metalúrgica de 85% e recuperação em massa de apenas 44%, o que mostra a boa eficiência da operação de pré-concentração. Pode-se perceber que o teor de cobre e de enxofre na amostra de concentrado chegam a ser 100% maior que o teor na amostra não concentrada.

Os resultados do ensaio de Bond mostram um WI maior para a amostra do rejeito. Este valor maior também está implícito no maior número de rotações necessárias nos últimos ciclos quando comparada às rotações para as outras amostras, vide Apêndice. Esses resultados já eram esperados tendo em vista que o rejeito é formado majoritariamente por quartzo e feldspato enquanto o concentrado, por sulfetos.

O ensaio alternativo, por sua vez, não foi totalmente satisfatório tendo atingido uma margem de erro bastante alta com relação ao ensaio de Bond. Porém, em um artigo publicado pelo mesmo autor deste trabalho (Moreira et al., 2017), o ensaio alternativo mostrou-se como uma excelente alternativa para uma amostra de vanádio, com erros menores que 3% em relação ao ensaio de Bond.

Para a realização da análise dos possíveis impactos da pré-concentração na amostra estudada, foi proposto um circuito hipotético com a finalidade de mensurar o impacto da pré-concentração em termos econômicos, seguindo a equação de Bond para o consumo de energia durante a moagem.

A Tabela 6 mostra os parâmetros considerados para a realização da análise econômica pelo método de Bond.

**Tabela 6 - Análise Econômica: Parâmetros**

| Vazão<br>Mássica<br>(t/h) | Período<br>(h/ano) | Custo de<br>Energia<br>(R\$/Mwh) | F80<br>( $\mu$ m) | P80<br>( $\mu$ m) |
|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|
| 1000 t/h                  | 8000 h             | R\$ 387,00                       | 10000             | 100               |

O custo de energia foi obtido com dados retirados no site da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Para a análise econômica do processo, foi considerado em um primeiro momento, apenas o impacto da mudança do WI para as amostras, de forma que a usina onde houve pré-concentração tenha permanecido com a mesma vazão mássica na moagem e o aumento do consumo do processo de britagem. A Tabela 7 ilustra os resultados alcançados.

**Tabela 7 - Análise Econômica - WI**

| Cobre                | WI (kwh/t) | Vazão Mássica (t/h) | P 80 ( $\mu$ m) | F 80 ( $\mu$ m) | Potência (kW) | Energia (Mwh) | Custo                   |
|----------------------|------------|---------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------------|
| Sem Pré-Concentração | 17,57      | 1000                | 100             | 10000           | 15813         | 126504        | R\$ 48.957.048,00       |
| Com Pré-Concentração | 15,64      | 1000                | 100             | 10000           | 6334,2        | 112608        | R\$ 43.579.296,00       |
| <b>Economia</b>      |            |                     |                 |                 |               | <b>13896</b>  | <b>R\$ 5.377.752,00</b> |

Percebe-se que a mudança do WI tem um impacto em relação ao consumo de energia da amostra. Chegou-se em uma economia de energia da ordem de 14 000 Mwh, o consumo equivalente ao consumo residencial da cidade de Viradouro/SP\*, com uma população de 18 mil habitantes, de acordo com o Anuário Estatístico de Energéticos do estado de São Paulo (São Paulo, 2017).

No entanto, sendo possível a diminuição da vazão mássica da planta, pode-se estimar o quanto isso diminuiria em custo energético da moagem de acordo com a tabela abaixo, levando-se em consideração a recuperação mássica de aproximadamente 45% obtida com a Jigagem.

A tabela 8 mostra o impacto que a diminuição da vazão mássica terá neste circuito hipotético.

**Tabela 8 - Análise Econômica - Massa e WI**

| <b>Cobre</b>         | <b>WI (kwh/t)</b> | <b>Vazão Mássica (t/h)</b> | <b>P 80 (µm)</b> | <b>F 80 (µm)</b> | <b>Potência (kW)</b> | <b>Energia (Mwh)</b> | <b>Custo</b>             |
|----------------------|-------------------|----------------------------|------------------|------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| Sem Pré-Concentração | 17,57             | 1000                       | 100              | 10000            | 15813                | 126504               | R\$ 48.957.048,00        |
| Com Pré-Concentração | 15,64             | 450                        | 100              | 10000            | 6334,2               | 50674                | R\$ 19.610.683,20        |
| <b>Economia</b>      |                   |                            |                  |                  |                      | <b>75830</b>         | <b>R\$ 29.346.364,80</b> |

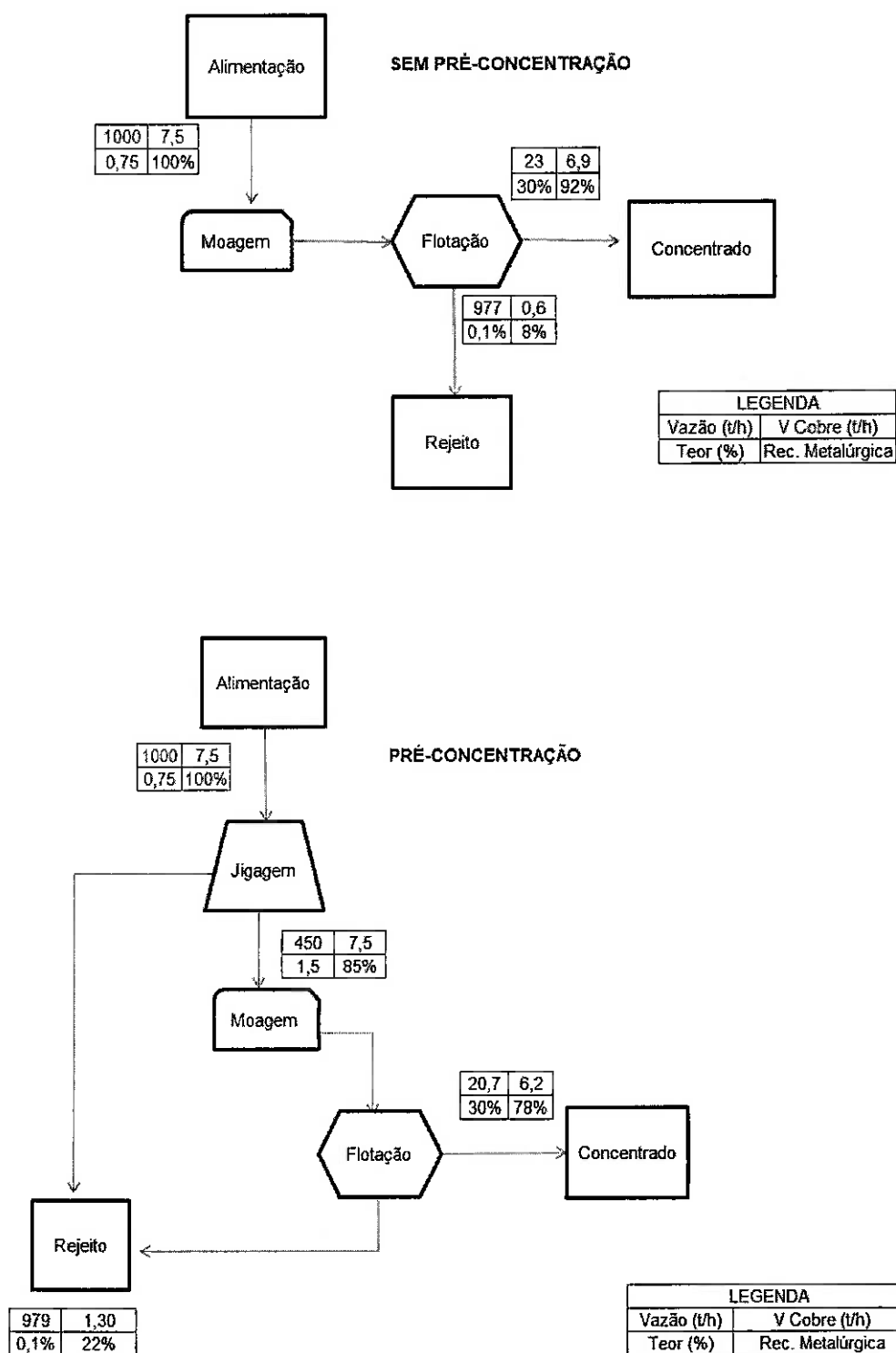
Chegou-se em um valor de aproximadamente seis vezes maior do que quando é considerado apenas o WI. A economia de energia, é o equivalente ao consumo residencial da cidade de Votuporanga/SP, com uma população de quase 100 mil habitantes, também de acordo com o Anuário Estatístico de Energéticos do estado de São Paulo (São Paulo, 2017).

Os resultados econômicos foram muito expressivos para quando a massa é considerada junto com a mudança do WI, com os ganhos econômicos anuais chegando a R\$ 30 milhões apenas em consumo de energia da moagem.

Por fim, propôs-se analisar os dois cenários quanto às perdas de mineral de minério, isto é, sabendo-se que a pré-concentração irá diminuir a recuperação metalúrgica no concentrado, estimou-se o impacto financeiro que essa perda representa. Para efeito de cálculo, foi considerado um concentrado final com teor de 30% de cobre e o rendimento da flotação foi considerado 92% tendo como base o trabalho de Neto et al. (2017) que estudaram a recuperação da flotação em um mineral de mesma natureza. Ainda que possam ocorrer diferenças quanto ao rendimento da flotação para a amostra que foi pré-concentrada e a amostra original, para efeito de estimativa, o rendimento foi considerado igual nos dois cenários.

A seguir, estão representados os fluxogramas que representam ambos os processos parcialmente.

Figura 6 - Fluxogramas dos Processos



De acordo com o balanço realizado, a vazão de cobre que seria direcionada ao rejeito é 0,7 t/h maior quando a pré-concentração é realizada. No período de um ano, essa perda significaria 5600t de cobre perdida.

O preço do cobre, de acordo com LME (2018), está cotado por volta de U\$ 6060,00 no mês de novembro de 2018. Considerando esse valor, perde-se por volta de U\$33.936.000,00 ou R\$126.581.280,00 anuais.

O resultado acima pode parecer completamente desfavorável para a aplicação de um processo de pré-concentração. Contudo, deve-se ressaltar que os ganhos da pré-concentração não são apenas no consumo de energia da moagem. Há também outras questões que não foram mensuradas como o desgaste da carga de bolas e revestimento do moinho e a própria barragem de rejeitos. Além disso, também há fatores que não foram considerados nessa estimativa, como o F80 da alimentação do moinho (que foi considerado igual para ambos os casos) e a própria eficiência da flotação, que tenderia a ser maior com o minério já pré-concentrado e com uma vazão mássica menor sendo processada.

## **7. Conclusões**

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a pré-concentração de minérios de baixo teor pode ser uma boa opção para a otimização do processo de beneficiamento. Na amostra de cobre estudada, foi obtida recuperação metalúrgica de 85% enquanto que apenas 44% da massa foi aproveitada.

Estes valores de recuperação resultaram em diminuição do índice de trabalho entre a amostra pré-concentrada e a amostra sem pré-concentração, resultando em uma diminuição do consumo de energia na moagem, como indicado nos cálculos da análise econômica realizada.

Quanto ao ensaio alternativo, apesar de ter se apresentado como uma alternativa interessante em estudos anteriores, para esta amostra de cobre aqui estudada, não foi possível chegar em uma boa aproximação para as amostras de concentrado e rejeito, que apresentaram um erro muito alto em relação ao WI obtido pelo ensaio de Bond. Ainda assim, o ensaio alternativo é uma boa opção para quando não houver condições de realização do ensaio de Bond, como pode ser observado em trabalhos feitos por Bergerman et al. ( 2013).

Deve-se ressaltar, no entanto, que a decisão final da implementação de um processo de pré-concentração trata-se de um *trade-off*, ou seja, sua escolha deve ser feita após um processo de decisão minucioso que leve em consideração outras questões além do consumo de energia da moagem, como os possíveis ganhos com a diminuição do desgaste do moinho, aumento da eficiência do processo de concentração posterior, barragem de rejeitos e as perdas oriundas da diminuição da recuperação metálica.

## Referências Bibliográficas

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Custo de energia elétrica industrial no Brasil**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/dados/tarifas>>. Acesso em 15 Set. 2018
- 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. , DEL ROVERI, C. , NAVARRO, F.C. **Redução do consumo de energia de circuitos de moagem com a utilização de pré-concentração de minerais sulfetados**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, 2013.
- BERGERMAN, M.B.; NETO, D.; TOMASELLI, B.Y. ; Maciel, B.F.; DEL ROVERILL, C.; NAVARRO, F.C. **Redução do consumo de energia de circuitos de moagem com a utilização de pré-concentração de minerais sulfetados**, 2014.
- BOND, F.C. **New Equation for Calculating the Work Index from A-C Closed Circuit Ball Mill Grindability Tests** , Allis Chalmers Publication. 1960.
- BOND, F.C. **The Third Theory of Comminution**, Trans.AIME, Vol.193, pp. 484-494. 1952.
- COMEX. **Sorting Technology**. Disponível em: < <http://www.comex-group.com/products-and-solutions/sorting-technology>>. Acesso em 10 Nov. 2018.
- COSTA, I. A., ALMEIDA, C. P., MARQUES, C. V. P., COSTA, L. R. C. R., JESUS, E. B. **Estudo de pré-concentração magnética do magnetita-piroxenito da Vanádio de Maracás S/A**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017.
- CRESWELL, G.M. **Pre-concentration of base metal ores by dense medium separation**. In: SAIMM COOPER, COBALT, NICKEL AND ZINC RECOVERY CONFERENCE, 2001, Joanesburgo: SAIMM, 2001. P. 1-10.
- DUFFY, K, VALERY, W, JANKOVIC, A and Holtham. **Integrating bulk ore sorting into a mining operation to maximise profitability**, 2015.
- FIGUEIRA, H.V., PRETTI, L.A., VALLE, L.R.M. **Estudo de um método simplificado para determinação do "índice de trabalho" e sua aplicação à remoagem**. CETEM, 1985.

FOURIE, H.; ROOYEN, P.H.V.; RUPPRECHT, S.; LUND, T.; VEGTER, N.M. **Exploitation of a massive low grade zinc-lead resource at Rosh Pinah Zinc Corporation, Namibia.** In: THE FOURTH SOUTHERN AFRICAN CONFERENCE ON BASE METALS, 2007, Swakopmund. Proceedings. Joanesburgo: SAIMM, 2007. P. 109-118.

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

LME – London Metal Exchange. **Copper historical Price Graph.** . Disponível em: <<https://www.lme.com/en-GB/Metals/Non-ferrous/Copper#tabIndex=2>>. Acesso em 01 Nov. 2018

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J.A. ; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

MOREIRA, B. H. M., UEHARA, B. H., JOSÉ NETO, D., & BERGERMAN, M. G. **Avaliação do consumo de energia em circuitos de moagem alimentados com produtos de pré-concentração de minérios de vanádio e cobre.** XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017.

MORGAN, P. **The impact of a crushing plant upgrade and DMS preconcentration on the processing capability of the Tati Nickel Concentrator.** The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Base Metals Conference, 2009.

NETO, F.R.; NETO, A.L.; NETO, D.J.; HORTA, D.G.; BERGERMAN, M.G. **Avaliação da cinética de flotação em circuitos de concentração mineral alimentados com produtos de pré-concentração de minério de cobre sulfetado.** XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017.

SÃO PAULO. Secretaria de Energia e Mineração. **Anuário estatístico de energéticos por município do estado de São Paulo, ano base 2016,** 2017.

## Apêndice

### Teste de Moabilidade de Bond – Alimentação



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



#### Teste de Moabilidade de Bond - Moinho de Bolas

Amostra: **Caraíba - Alimentação**  
Data: **20/05/2016**

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Malha do Teste                    | 0,15 mm       |
| Densidade Aparente                | 129,45 lb/ft³ |
| Fração Passante na Malha do Teste | 9,60%         |
| Carga do Moinho (g)               | 1452,22       |
| IPP (g)                           | 414,9         |

| Período | Número de Rotações | A<br>Complemento da Carga | B<br>-M na carga | C<br>Massa retida | D<br>Produto | E<br>Produto Líquido | F<br>Gramas por revolução<br>(E / revs) |
|---------|--------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------|----------------------|-----------------------------------------|
|         | (revs)             | (g)                       | (g)              | (g)               | (g)          | (g)                  | (g)                                     |
| Inicial | -                  | -                         | -                | -                 | -            | -                    | -                                       |
| 1       | 30                 | 1452,22                   | 139,4            | 1252,60           | 199,62       | 60,21                | 2,007                                   |
| 2       | 197                | 199,62                    | 19,2             | 1149,10           | 303,12       | 284,0                | 1,440                                   |
| 3       | 268                | 303,12                    | 29,1             | 1041,50           | 410,72       | 381,62               | 1,424                                   |
| 4       | 264                | 410,72                    | 39,4             | 1046,50           | 405,72       | 366,29               | 1,389                                   |
| 5       | 271                | 405,72                    | 38,9             | 1038,80           | 413,42       | 374,47               | 1,384                                   |
| 6       | 271                | 413,42                    | 39,7             | 1042,00           | 410,22       | 370,53               | 1,367                                   |

#### Cálculo do Valor do WI

Amostra: **Caraíba - Alimentação**  
Data: **20/05/2016**

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Malha do Teste (#)       | 150,0 |
| F-80 da Alimentação (µm) | 2150  |
| P-80 do Produto (µm)     | 126   |
| Gramas por revolução     | 1,380 |

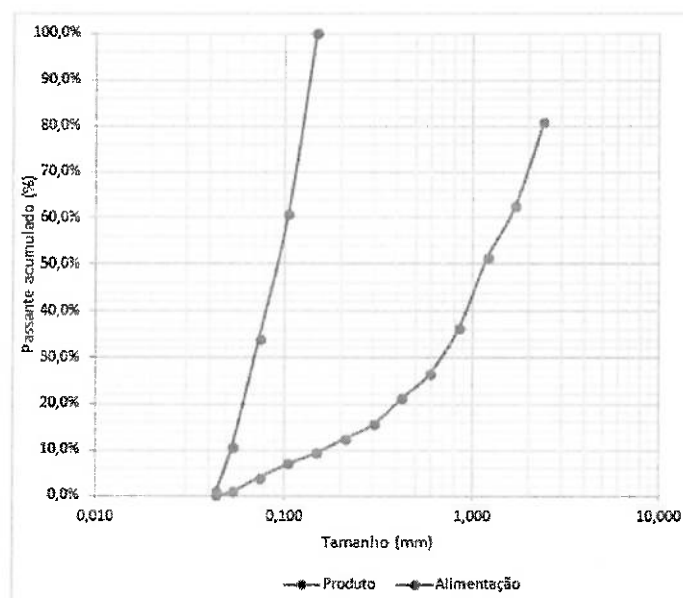
WI = **15,99 kWh/sht**  
**17,57 kWh/t**

## Distribuições Granulométricas

**Amostra: Caraíba - Alimentação**

**Data: 31/01/2016**

| Malha |       | Alimentação          |                     |                        | Produto              |                      |                        |
|-------|-------|----------------------|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Mesh  | (mm)  | Retido acumulado (g) | Retido acumulado(%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante Acumulado (%) |
| 8     | 2,38  | 189,3                | 19,17%              | 80,83%                 |                      |                      |                        |
| 12    | 1,68  | 368,8                | 37,35%              | 62,65%                 |                      |                      |                        |
| 16    | 1,19  | 478,7                | 48,48%              | 51,52%                 |                      |                      |                        |
| 20    | 0,84  | 628,4                | 63,64%              | 36,36%                 |                      |                      |                        |
| 30    | 0,59  | 724,8                | 73,40%              | 26,60%                 |                      |                      |                        |
| 40    | 0,42  | 777,4                | 78,73%              | 21,27%                 |                      |                      |                        |
| 50    | 0,297 | 832,9                | 84,35%              | 15,65%                 |                      |                      |                        |
| 70    | 0,210 | 862,7                | 87,37%              | 12,63%                 |                      |                      |                        |
| 100   | 0,149 | 893,7                | 90,51%              | 9,49%                  | 0                    | 0,0%                 | 100,0%                 |
| 140   | 0,105 | 917,7                | 92,94%              | 7,06%                  | 160,3                | 39,2%                | 60,8%                  |
| 200   | 0,074 | 947,4                | 95,95%              | 4,05%                  | 269,5                | 65,8%                | 34,2%                  |
| 270   | 0,053 | 978,7                | 99,12%              | 0,88%                  | 366                  | 89,4%                | 10,6%                  |
| 325   | 0,044 | 986,4                | 99,90%              | 0,10%                  | 405,8                | 99,1%                | 0,9%                   |
| Total |       | 987,4                |                     |                        | 409,4                |                      |                        |



## Teste de Moabilidade de Bond – Rejeito



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



### Teste de Moabilidade de Bond - Moinho de Bolas

**Amostra:** Caraíba - Rejeito  
**Data:** 20/06/2016

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| Malha do Teste      | 0,15 mm                   |
| Densidade Aparente  | 118,54 lb/ft <sup>3</sup> |
| Fração Passante na  |                           |
| Malha do Teste      | 7,40%                     |
| Carga do Moinho (g) | 1329,8                    |
| IPP (g)             | 379,9                     |

| Período | Número de Rotações | A<br>Complemento da Carga | B<br>-M na carga | C<br>Massa retida | D<br>Produto | E<br>Produto Líquido | F<br>Gramas por revolução<br>(E / revs) |
|---------|--------------------|---------------------------|------------------|-------------------|--------------|----------------------|-----------------------------------------|
|         | (revs)             | (g)                       | (g)              | (g)               | (g)          | (g)                  | (g)                                     |
| 1       | 30                 | 1329,80                   | 98,4             | 1180,00           | 149,80       | 51,39                | 1,713                                   |
| 2       | 215                | 149,80                    | 11,1             | 1030,00           | 299,80       | 288,7                | 1,341                                   |
| 3       | 267                | 299,80                    | 22,2             | 990,00            | 339,80       | 317,61               | 1,190                                   |
| 4       | 298                | 339,80                    | 25,1             | 960,00            | 369,80       | 344,65               | 1,156                                   |
| 5       | 305                | 369,80                    | 27,4             | 949,30            | 380,50       | 353,13               | 1,158                                   |
| 6       | 304                | 380,50                    | 28,2             | 952,20            | 377,60       | 349,44               | 1,151                                   |

### Cálculo do Valor do WI

**Amostra:** Caraíba - Rejeito  
**Data:** 20/06/2016

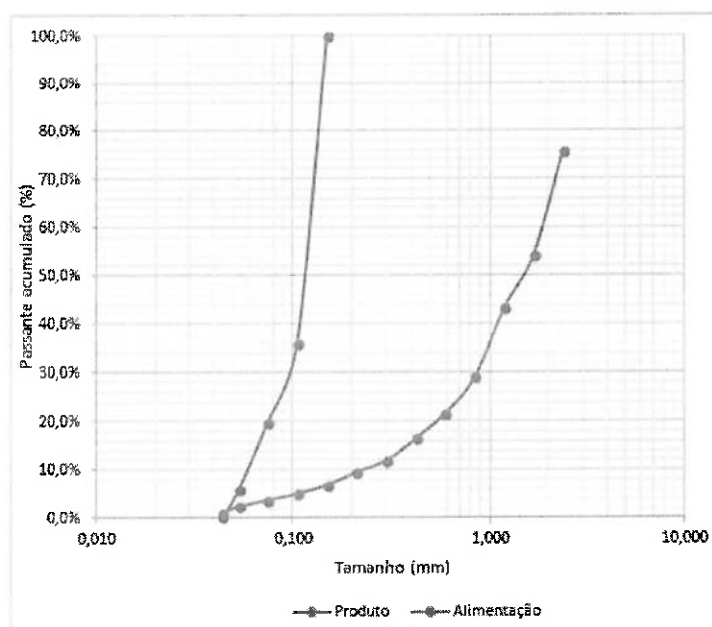
|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Malha do Teste (#)       | 150   |
| F-80 da Alimentação (µm) | 2452  |
| P-80 do Produto (µm)     | 134   |
| Gramas por revolução     | 1,155 |

|      |                              |
|------|------------------------------|
| WI = | 18,90 kWh/sht<br>20,76 kWh/t |
|------|------------------------------|

## Distribuições Granulométricas

**Amostra: Caraíba- Rejeito**  
**Data: 31/01/2016**

| Malha    |            | Alimentação          |                      |                        | Produto              |                      |                        |
|----------|------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Mesh     | Tyler (mm) | Retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante Acumulado (%) |
| 8        | 2,38       | 238,9                | 24,19%               | 75,81%                 |                      |                      |                        |
| 12       | 1,68       | 451,9                | 45,77%               | 54,23%                 |                      |                      |                        |
| 16       | 1,19       | 559,6                | 56,67%               | 43,33%                 |                      |                      |                        |
| 20       | 0,84       | 698,8                | 70,77%               | 29,23%                 |                      |                      |                        |
| 30       | 0,59       | 773,5                | 78,34%               | 21,66%                 |                      |                      |                        |
| 40       | 0,42       | 824,2                | 83,47%               | 16,53%                 |                      |                      |                        |
| 50       | 0,297      | 869,5                | 88,06%               | 11,94%                 |                      |                      |                        |
| 70       | 0,210      | 893,5                | 90,49%               | 9,51%                  |                      |                      |                        |
| 100      | 0,149      | 918,7                | 93,04%               | 6,96%                  | 0                    | 0,0%                 | 100,0%                 |
| 140      | 0,105      | 937,2                | 94,92%               | 5,08%                  | 237,5                | 64,2%                | 35,8%                  |
| 200      | 0,074      | 950,2                | 96,23%               | 3,77%                  | 297,7                | 80,4%                | 19,6%                  |
| 270      | 0,053      | 963,7                | 97,60%               | 2,40%                  | 348,5                | 94,1%                | 5,9%                   |
| 325      | 0,044      | 976,2                | 98,87%               | 1,13%                  | 369,5                | 99,8%                | 0,2%                   |
| Total    |            | 987,4                |                      |                        | 370,2                |                      |                        |
| d80 (mm) |            |                      | 2,452254329          |                        |                      | 0,134310637          |                        |



## Teste de Moabilidade de Bond – Concentrado



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



### Teste de Moabilidade de Bond - Moinho de Bolas

**Amostra:** Caraíba - Concentrado  
**Data:** 20/04/2016

|                     |               |
|---------------------|---------------|
| Malha do Teste      | 0,15 mm       |
| Densidade Aparente  | 148,48 lb/ft³ |
| Fração Passante na  |               |
| Malha do Teste      | 13,55%        |
| Carga do Moinho (g) | 1665,6        |
| IPP (g)             | 475,9         |

| Período | Número de Rotações<br>(revs) | A<br>Complemento da Carga<br>(g) | B<br>-M na carga<br>(g) | C<br>Massa retida<br>(g) | D<br>Produto<br>(g) | E<br>Produto Líquido<br>(g) | F<br>Gramas por revolução<br>(E / revs)<br>(g) |
|---------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|
| Inicial | -                            | -                                | -                       | -                        | -                   | -                           | -                                              |
| 1       | 30                           | 1665,60                          | 225,7                   | 1347,40                  | 318,20              | 92,51                       | 3,084                                          |
| 2       | 140                          | 318,20                           | 43,1                    | 1338,40                  | 327,20              | 284,1                       | 2,024                                          |
| 3       | 213                          | 327,20                           | 44,3                    | 1266,60                  | 399,00              | 354,66                      | 1,664                                          |
| 4       | 254                          | 399,00                           | 54,1                    | 1210,80                  | 454,80              | 400,74                      | 1,580                                          |
| 5       | 262                          | 454,80                           | 61,6                    | 1196,80                  | 468,80              | 407,17                      | 1,553                                          |
| 6       | 265                          | 468,80                           | 63,5                    | 1192,60                  | 473,00              | 409,48                      | 1,543                                          |

### Cálculo do Valor do WI

**Amostra:** Caraíba - Concentrado  
**Data:** 20/04/2016

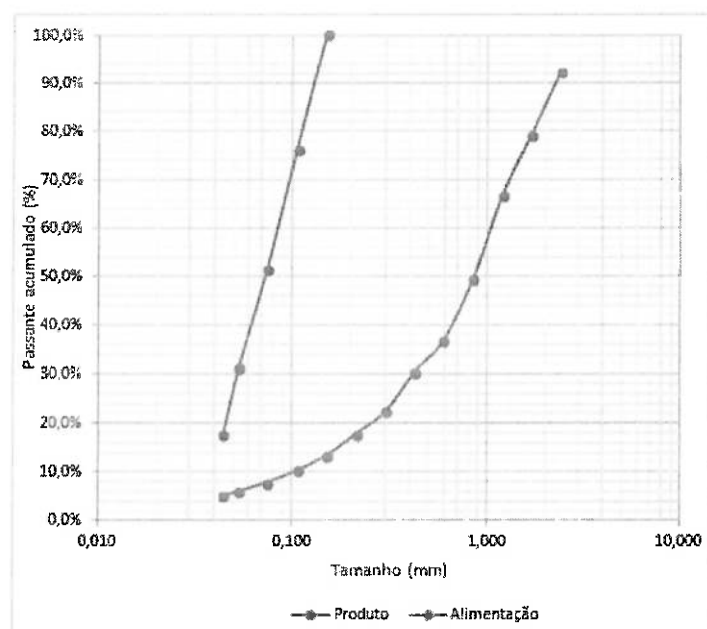
|                      |       |
|----------------------|-------|
| Malha do Teste       | 150   |
| F-80 da Alimentação  | 1733  |
| P-80 do Produto      | 116   |
| Gramas por revolução | 1,559 |

|      |                              |
|------|------------------------------|
| WI = | 14,23 kWh/shf<br>15,64 kWh/t |
|------|------------------------------|

## Distribuições Granulométricas

**Amostra: Caraiba - Concentrado**  
**Data: 31/01/2016**

| Malha    |            | Alimentação          |                      |                        | Produto              |                      |                        |
|----------|------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Mesh     | Tyler (mm) | Retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante Acumulado (%) |
| 8        | 2,38       | 75,4                 | 7,65%                | 92,35%                 |                      |                      |                        |
| 12       | 1,68       | 203,4                | 20,64%               | 79,36%                 |                      |                      |                        |
| 16       | 1,19       | 326,1                | 33,09%               | 66,91%                 |                      |                      |                        |
| 20       | 0,84       | 497,6                | 50,49%               | 49,51%                 |                      |                      |                        |
| 30       | 0,59       | 621,5                | 63,06%               | 36,94%                 |                      |                      |                        |
| 40       | 0,42       | 684,6                | 69,46%               | 30,54%                 |                      |                      |                        |
| 50       | 0,297      | 764,3                | 77,55%               | 22,45%                 |                      |                      |                        |
| 70       | 0,210      | 808,6                | 82,04%               | 17,96%                 |                      |                      |                        |
| 100      | 0,149      | 852,1                | 86,45%               | 13,55%                 | 0                    | 0,0%                 | 100,0%                 |
| 140      | 0,105      | 883,3                | 89,62%               | 10,38%                 | 133,7                | 24,1%                | 75,9%                  |
| 200      | 0,074      | 906,6                | 91,98%               | 8,02%                  | 270,9                | 48,7%                | 51,3%                  |
| 270      | 0,053      | 925,2                | 93,87%               | 6,13%                  | 382,4                | 68,8%                | 31,2%                  |
| 325      | 0,044      | 933,7                | 94,73%               | 5,27%                  | 458,9                | 82,6%                | 17,4%                  |
| Total    |            | 985,6                |                      |                        | 555,9                |                      |                        |
| d80 (mm) |            | 1,732764122          |                      |                        | 0,116442333          |                      |                        |



## Ensaio Alternativo – Alimentação



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



### Ensaio de moabilidade Jauregui

Responsável: Maurício Bergeman / Dimas Neto/Bruno Moreira (LTM-USP)  
Local e Data: Laboratório de Tratamento de Minério / PMI-USP - 22/02/2016  
Projeto: Caraiíba - Alimentação  
Amostra: Não-Concentrado  
Jarro: 8x10", revestimento liso de aço inox  
Diâmetro do jarro (m): 0,2032  
Carga de bolas:  
11 de Ø = 38 mm  
17 de Ø = 33 mm  
13 de Ø = 30 mm  
27 de Ø = 25 mm  
20 de Ø = 20 mm  
Massa de sólidos (g): 1 kg (-1,68 +0,150 mm)  
Massa de água (g): 1 kg  
Sólidos (%): 50  
Velocidade de rotação (rpm): 61,0  
Velocidade de rotação (% Vc): 77,8  
Tempo (min): 10  
Observações:

### Alimentação

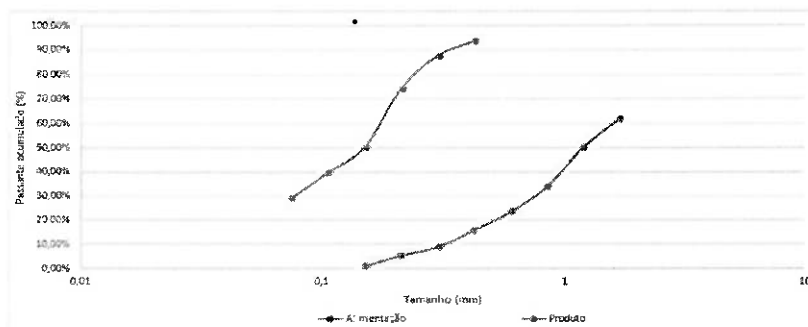
Tipo de peneiramento: A seco  
Peso inicial (g): 1001,5  
Peso final (g): 996,7  
Perdas (%): 0,5

| Malha (Tyler)              | Abertura (mm) | Peso retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante acumulado (%) |
|----------------------------|---------------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| 10                         | 1,68          | 381,4                     | 38,27%               | 61,73%                 |
| 14                         | 1,19          | 498,5                     | 50,02%               | 49,98%                 |
| 20                         | 0,84          | 660,6                     | 66,28%               | 33,72%                 |
| 28                         | 0,6           | 760,6                     | 76,33%               | 23,67%                 |
| 35                         | 0,42          | 838,7                     | 84,25%               | 15,75%                 |
| 48                         | 0,3           | 905,9                     | 90,89%               | 9,11%                  |
| 65                         | 0,21          | 942,6                     | 94,57%               | 5,43%                  |
| 100                        | 0,15          | 985,6                     | 98,91%               | 1,09%                  |
| <b>Total</b>               | -0,15         | 996,7                     | 100,00%              | 0,00%                  |
| <b>P<sub>80</sub> (mm)</b> |               |                           |                      | <b>2009</b>            |

### Produto

Tipo de peneiramento: Úmido  
Peso inicial (g): 99,5  
Peso final (g): 95,0  
Perdas (%): 4,5

| Malha (Tyler)              | Abertura (mm) | Peso retido acumulado (g) | Peso retido acumulado (%) | Passante acumulado (%) |
|----------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 35                         | 0,425         | 6                         | 6,32%                     | 93,68%                 |
| 48                         | 0,3           | 11,6                      | 12,21%                    | 87,79%                 |
| 65                         | 0,212         | 24,2                      | 25,47%                    | 74,53%                 |
| 100                        | 0,15          | 47,1                      | 49,58%                    | 50,42%                 |
| 150                        | 0,106         | 57,2                      | 60,21%                    | 39,79%                 |
| 200                        | 0,075         | 67                        | 70,53%                    | 29,47%                 |
| <b>Total</b>               | -0,075        | 95,0                      | 100,00%                   | 0,00%                  |
| <b>P<sub>80</sub> (mm)</b> |               |                           |                           | <b>283</b>             |



## Ensaio Alternativo – Concentrado



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



### Ensaio de moabilidade Jauregui

Responsável: Maurício Bergerman / Dimas Neto/Bruno Moreira (LTM-USP)  
Local e Data: Laboratório de Tratamento de Minério / PMI-USP - 22/02/2016  
Projeto: Caraiíba - Concentrado  
Amostra: Concentrado  
Jarro: 8x10", revestimento liso de aço inox  
Diâmetro do jarro (m): 0,2032  
Carga de bolas  
11 de Ø = 38 mm  
17 de Ø = 33 mm  
13 de Ø = 30 mm  
27 de Ø = 25 mm  
20 de Ø = 20 mm  
Massa de sólidos (g): 1 kg (-1,68 +0,150 mm)  
Massa de água (g): 1 kg  
Sólidos (%): 50  
Velocidade de rotação (rpm): 61,0  
Velocidade de rotação (% Vc): 77,8  
Tempo (min): 10  
Observações:

### Alimentação

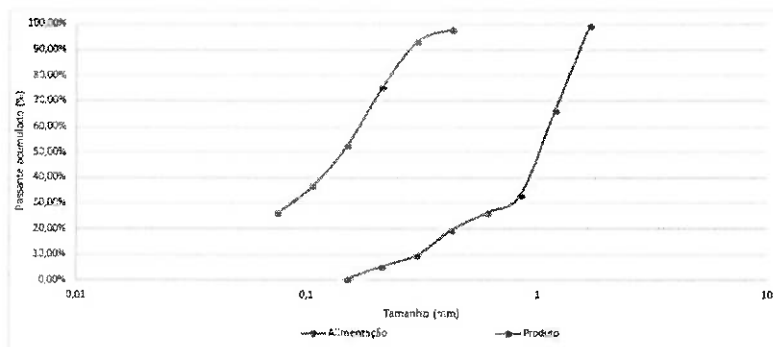
Tipo de peneiramento: A seco  
Peso inicial (g): 1005,0  
Peso final (g): 1000,5  
Perdas (%): 0,4

| Malha (Tyler)        | Abertura (mm) | Peso retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Passante acumulado (%) |
|----------------------|---------------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| 10                   | 1,68          | 7,1                       | 0,71%                | 99,29%                 |
| 14                   | 1,19          | 335,8                     | 33,56%               | 66,44%                 |
| 20                   | 0,84          | 668,8                     | 66,85%               | 33,15%                 |
| 28                   | 0,6           | 737,5                     | 73,71%               | 26,29%                 |
| 35                   | 0,42          | 806,4                     | 80,60%               | 19,40%                 |
| 48                   | 0,3           | 903,1                     | 90,26%               | 9,74%                  |
| 65                   | 0,21          | 946,6                     | 94,61%               | 5,39%                  |
| 100                  | 0,15          | 993,1                     | 99,26%               | 0,74%                  |
| Total                | -0,15         | 1000,5                    | 100,00%              | 0,00%                  |
| P <sub>80</sub> (mm) |               |                           |                      | 1415                   |

### Produto

Tipo de peneiramento: Úmido  
Peso inicial (g): 100,0  
Peso final (g): 96,0  
Perdas (%): 4,0

| Malha (Tyler)        | Abertura (mm) | Peso retido acumulado (g) | Peso retido acumulado (%) | Passante acumulado (%) |
|----------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 35                   | 0,425         | 2                         | 2,08%                     | 97,92%                 |
| 48                   | 0,3           | 6,6                       | 6,88%                     | 93,13%                 |
| 65                   | 0,212         | 23,5                      | 24,48%                    | 75,52%                 |
| 100                  | 0,15          | 45,4                      | 47,29%                    | 52,71%                 |
| 150                  | 0,106         | 60,8                      | 63,33%                    | 36,67%                 |
| 200                  | 0,075         | 70,9                      | 73,85%                    | 26,15%                 |
|                      | -0,075        | 96                        | 100,00%                   | 0,00%                  |
| Total                |               | 96,0                      |                           |                        |
| P <sub>80</sub> (mm) |               |                           |                           | 278                    |



## Ensaio Alternativo - Rejeito



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo  
Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais



### Ensaio de moabilidade Jauregui

|                              |                                                                                                                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Responsável                  | Maurício Bergerman / Dimas Neto/Bruno Moreira (LTM-USP)                                                                                                 |
| Local e Data                 | Laboratório de Tratamento de Minério / PMI-USP - 22/02/2018                                                                                             |
| Projeto                      | Caraíba - Rejeito                                                                                                                                       |
| Amostra                      | Rejeito                                                                                                                                                 |
| Jarro                        | 8x10", revestimento liso de aço inox                                                                                                                    |
| Diâmetro do jarro (m)        | 0,2032                                                                                                                                                  |
| Carga de bolas:              | 11 de $\varnothing = 38$ mm<br>17 de $\varnothing = 33$ mm<br>13 de $\varnothing = 30$ mm<br>27 de $\varnothing = 25$ mm<br>20 de $\varnothing = 20$ mm |
| Massa de sólidos (g)         | 1 kg (-1,68 +0,150 mm)                                                                                                                                  |
| Massa de água (g)            | 1 kg                                                                                                                                                    |
| Sólidos (%)                  | 50                                                                                                                                                      |
| Velocidade de rotação (rpm)  | 81,0                                                                                                                                                    |
| Velocidade de rotação (% Vc) | 77,8                                                                                                                                                    |
| Tempo (min)                  | 10                                                                                                                                                      |
| Observações:                 |                                                                                                                                                         |

### Alimentação

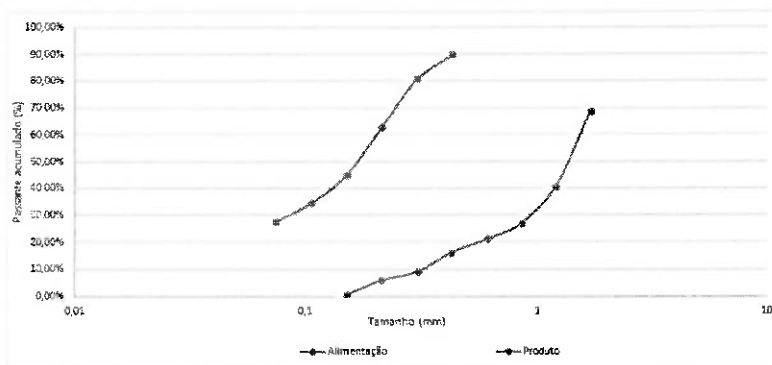
|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Tipo de peneiramento: | A seco |
| Peso inicial (g)      | 1003,0 |
| Peso final (g)        | 1000,0 |
| Perdas (%)            | 0,3    |

| Malha (Tyler)              | Abertura (mm) | Peso retido acumulado (g) | Retido acumulado (%) | Possante acumulado (%) |
|----------------------------|---------------|---------------------------|----------------------|------------------------|
| 10                         | 1,68          | 315,7                     | 31,57%               | 68,43%                 |
| 14                         | 1,19          | 595,1                     | 59,51%               | 40,49%                 |
| 20                         | 0,84          | 732,0                     | 73,20%               | 26,80%                 |
| 28                         | 0,6           | 788,8                     | 78,88%               | 21,12%                 |
| 35                         | 0,42          | 839,1                     | 83,91%               | 16,09%                 |
| 48                         | 0,3           | 910,3                     | 91,03%               | 8,97%                  |
| 65                         | 0,21          | 942,4                     | 94,24%               | 5,76%                  |
| 100                        | 0,15          | 993,1                     | 99,31%               | 0,69%                  |
| Total                      | -0,15         | 1000,0                    | 100,00%              | 0,00%                  |
| <b>F<sub>80</sub> (mm)</b> |               |                           |                      | <b>2029</b>            |

### Produto

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| Tipo de peneiramento: | Úmido |
| Peso inicial (g)      | 99,8  |
| Peso final (g)        | 95,0  |
| Perdas (%)            | 4,8   |

| Malha (Tyler)              | Abertura (mm) | Peso retido acumulado (g) | Peso retido acumulado (%) | Possante acumulado (%) |
|----------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| 35                         | 0,425         | 9,9                       | 10,42%                    | 89,58%                 |
| 48                         | 0,3           | 18,5                      | 19,47%                    | 80,53%                 |
| 65                         | 0,212         | 35,4                      | 37,28%                    | 62,74%                 |
| 100                        | 0,15          | 52,4                      | 55,16%                    | 44,84%                 |
| 150                        | 0,106         | 62,5                      | 65,79%                    | 34,21%                 |
| 200                        | 0,075         | 68,9                      | 72,53%                    | 0,3                    |
| Total                      | -0,075        | 95,0                      | 100,00%                   | 0,0                    |
| <b>P<sub>80</sub> (mm)</b> |               |                           |                           | <b>332</b>             |



## Anexo

### Resultados de Análise Química

| Mineração<br>Caraiíba S/A                    | REGISTRO DE RESULTADOS DE ANÁLISES<br>MINERAÇÃO CARAÍBA - LABORATÓRIO QUÍMICO |               |               |                | CÓDIGO:RG-BEM-001 |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| CLIENTE                                      | Escola Politécnica - SP                                                       |               |               |                |                   |
| MÉTODOS:                                     | Cu,Ni (AA: Absorção Atômica); S,Si (Gravimetria);Fe (volumetria).             |               |               |                |                   |
| DATE DE INÍCIO:                              | 17/02/2016                                                                    |               |               |                |                   |
| DATA RESULTADO:                              | 18/03/2016                                                                    |               |               |                |                   |
| IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA                     | Cu<br>%<br>AA                                                                 | Fe<br>%<br>VU | S<br>%<br>GRA | Si<br>%<br>GRA |                   |
| Brecha - A (alimentação)                     | 0,75                                                                          | 13,19         | 5,37          | 59,64          |                   |
| Brecha - 1 G (Primeira gaveta do jigue)      | 1,45                                                                          | 26,18         | 11,88         | 42,56          |                   |
| Brecha - 2 G (Segunda gaveta do jigue)       | 0,28                                                                          | 6,23          | 0,76          | 65,70          |                   |
| Brecha - 3 G (Terceira gaveta do jigue)      | 0,15                                                                          | 5,19          | 0,56          | 30,52          |                   |
| Brecha - 4 G (Quarta gaveta do jigue)        | 0,12                                                                          | 4,41          | 0,43          | 69,52          |                   |
| Disseminado - A (alimentação)                | 0,33                                                                          | 9,92          | 2,50          | 63,38          |                   |
| Disseminado - 1 G (Primeira gaveta do jigue) | 0,51                                                                          | 20,29         | 6,77          | 45,16          |                   |
| Disseminado - 2 G (Segunda gaveta do jigue)  | 0,23                                                                          | 7,72          | 0,74          | 62,96          |                   |
| Disseminado - 3 G (Terceira gaveta do jigue) | 0,17                                                                          | 5,03          | 0,47          | 69,12          |                   |
| Disseminado - 4 G (Quarta gaveta do jigue)   | 0,09                                                                          | 4,21          | 0,28          | 70,52          |                   |