

**MARCOS PAULO HOLANDA**

**Avaliação da influência do tipo de britagem na liberação mineral  
em circuitos com pré-concentração**

Orientador:  
Prof. Dr. Maurício Bergerman

**São Paulo, 2021**

**MARCOS PAULO HOLANDA**

**Avaliação da influência do tipo de britagem na liberação mineral  
em circuitos com pré-concentração**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Engenheiro de Minas.

Orientador:  
Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman

**São Paulo, 2021**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Holanda, Marcos Paulo  
Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração / M. P. Holanda – São Paulo, 2021.  
60 p.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1 Britagem 2. Equipamentos de mineração 3. Pré-concentração de minerais. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Nome: HOLANDA, Marcos Paulo

Título: Avaliação da influência do tipo de britagem na liberação de minerais em circuitos com pré-concentração.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por darem todo suporte necessário durante minha graduação.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade oferecida, aos amigos e colegas da Escola pelo apoio e motivação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman pela paciência e disposição para dúvidas e preparação do meu trabalho.

Aos técnicos e técnicas do LCT-USP e LTM-USP pela ajuda na realização dos ensaios laboratoriais durante a pandemia da covid-19.

Ao André Hiroshi Asakawa pela parceria na realização dos trabalhos experimentais.

À Metso:Outotec pela disponibilização da utilização do HPGR HRC-1000®.

À Mineração Caraíba S/A pelo fornecimento do minério de cobre.

À Vale S/A pela realização de análises químicas.

## RESUMO

A pré-concentração tem se tornado cada vez mais utilizada no setor mineral, com técnicas tais como separação magnética, gravimétrica e sensores de alta tecnologia (*ore sorting*). Com isso, descarta-se antes da alimentação da etapa de moagem, quantidade significativa de massa com pouca ou nenhuma quantidade do mineral de interesse, reduzindo assim a massa a ser processada nas operações posteriores. Os benefícios são muitos, desde o aumento do teor de metal contido no minério a ser processado em uma usina até a extensão da vida útil da mina. Destaca-se ainda a possibilidade de se gerar um rejeito grosso, que não precisa ser disposto em barragens. Apesar dos significativos ganhos que a pré-concentração pode trazer, alguma perda de metal sempre irá ocorrer. A fim de minimizar tal perda, a cominuição seletiva através dos tipos de britagem, busca aumentar a liberação mineral da alimentação da pré-concentração com o uso de equipamentos com diferentes mecanismos de britagem. O presente estudo avaliou a influência de diferentes tipos de britagem, usando-se britadores do tipo: HPGR, mandíbulas ou de impacto como etapa de britagem secundária e/ou terciária na liberação mineral. A avaliação foi realizada em uma amostra de minério de cobre sulfetado proveniente de um empreendimento mineiro localizado na Bahia. Em uma primeira etapa a amostra foi britada nos diferentes equipamentos de britagem até estar passante em 12,7 mm. O produto foi separado em três faixas granulométricas (-12,7 +6,35 mm; -6,35+3,35 mm e -3,35+1,18 mm). Para avaliar a liberação mineral, cada fração granulométrica foi separada em três diferentes densidades (2,95 g/cm<sup>3</sup>, 2,85 g/cm<sup>3</sup> e 2,75 g/cm<sup>3</sup>) usando-se líquidos densos. Em seguida, foi realizada a análise química dos materiais afundados nas três densidades e flutuado na densidade de 2,75 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados indicaram que é possível se obter um pré-concentrado com pequena perda de metal, isto é, aproximadamente, 70 % da massa pode ser concentrada com 93 % do cobre contido. O britador de mandíbulas foi o tipo de britagem que apresentou melhor resultado de liberação na faixa estudada (-6,35+3,35 mm).

**Palavras chaves:** pré-concentração, cominuição seletiva, liberação mineral, tipos de britagem.

## ABSTRACT

Pre-concentration has become increasingly applicable in the mineral sector, with techniques such as magnetic separation, gravimetric and high-tech sensors (ore sorting). This involves a significant amount of mass with little or no amount of mineral of interest being discarded before feeding the milling step, thus reducing the mass to be processed in subsequent operations. The benefits are many, ranging from the increase in the metal content contained in the ore to be processed to the extension of the mine's useful life. The possibility of generating thick tailings, which does not need to be disposed of in dams, is also noteworthy. Despite the significant gains that pre-concentration can bring, some metal loss will always occur. In order to minimize such loss, selective comminution through crushing increases mineral liberation from the pre-concentration feed through the use of equipment with different crushing mechanisms. This study evaluated the influence of different types of crushing, using crushers such as: HPGR, jaws, or impact crushers as a secondary and/or tertiary crushing step in mineral liberation. The evaluation was carried out on a sample of sulphide copper ore from a mining project located in the Brazilian state of Bahia. First, the sample was crushed in different crushing equipment until passing a 12.7 mm mesh. Next, the product was separated into three granulometric bands (-12.7 +6.35 mm, -6.35+3.35, mm and -3.35+1.18 mm). Each particle size fraction was separated into three different densities (2.95 g/cm<sup>3</sup>, 2.85 g/cm<sup>3</sup> and 2.75 g/cm<sup>3</sup>) by dense liquids to assess mineral liberation. Then, a chemical analysis was performed on the sunken materials at the three densities and floated at the density of 2.75 g/cm<sup>3</sup>. The results indicated that's possible, indeed, to obtain a pre-concentrate with very little metal loss, that is to say, approximately 70 % of the mass can be concentrated with 93% of the contained copper. The jaw crusher presented the best result in the studied range (-6,35+3,35mm).

**Keywords:** pre-concentration, selective comminution, mineral liberation, types of crushing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> - Representação esquemática da quebra preferencial em uma partícula. .   | 16 |
| <b>Figura 2</b> - Comportamento da partícula quando submetida aos esforços solicitantes.<br>.....                              | 17 |
| <b>Figura 3</b> - Esquema representativo de britador de mandíbula.....   | 18 |
| <b>Figura 4</b> - Esquema representativo de britadores de impacto. ....  | 19 |
| <b>Figura 5</b> - Vista interna do Nordberg Série NP. ....   | 20 |
| <b>Figura 6</b> - Corte de um britador de impacto VSI Barmac Série VI. ....  | 22 |
| <b>Figura 7</b> - Configurações de rotores do EDS.....   | 23 |
| <b>Figura 8</b> - Exemplos de HPGRs. ....  | 24 |
| <b>Figura 9</b> - Resultados da liberação mineral. ....  | 26 |
| <b>Figura 10</b> - Grau de liberação para diferentes mecanismos de britagem. ....  | 26 |
| <b>Figura 11</b> - Mapa geológico do Vale do rio Curaçá que mostra os quatro depósitos de empreendimentos da Erro Copper. .... | 27 |
| <b>Figura 12</b> - Testemunhos de sondagem do furo do depósito de Vermelhos. ....  | 29 |
| <b>Figura 13</b> - Fluxograma de processos.....  | 31 |
| <b>Figura 14</b> - Fluxograma de circuito fechado direto. ....   | 32 |
| <b>Figura 15</b> - Série de vasos com diferentes líquidos densos. ....   | 35 |
| <b>Figura 16</b> - Distribuições granulométricas para o produto do mandíbulas em três ensaios.....                             | 36 |
| <b>Figura 17</b> - Distribuição granulométrica para os diferentes ensaios no britador de impacto.....                          | 37 |
| <b>Figura 18</b> - Distribuição granulométrica do produto do HPGR, Mandíbulas e Impacto.<br>.....                              | 38 |
| <b>Figura 19</b> - Imagens no estereoscópio dos produtos afundados em três densidades.<br>.....                                | 39 |
| <b>Figura 20</b> - Imagens no estereoscópio dos materiais flutuados em líquido de 2,75 g/cm <sup>3</sup> . ....                | 39 |
| <b>Figura 21</b> - Recuperação em massa acumulada vs recuperação de metal acumulada.<br>.....                                  | 43 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Grau de liberação e porcentagem de $\text{Cr}_2\text{O}_3$ para os respectivos mecanismos de quebra. .... | 25 |
| <b>Tabela 2</b> - Minério sulfetado de Vermelhos.....   | 29 |
| <b>Tabela 3</b> - Resultado da análise química do ensaio 2 realizado no britador de mandíbulas.....                         | 40 |
| <b>Tabela 4</b> - Resultado da análise química do ensaio 3 do britador de impacto. ....                                     | 41 |
| <b>Tabela 5</b> - Resultado da análise química do ensaio 3 realizado no HPGR.....   | 42 |
| <b>Tabela 6</b> - Análises químicas para faixa granulométrica intermediária. ....   | 42 |

## ÍNDICE

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>  | <b>12</b> |
| <b>1.1</b>   | <b>OBJETIVO</b>  | <b>13</b> |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                               | <b>14</b> |
| <b>2.4</b>   | <b>BRITADORES</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.4.1</b> | <b>Britador de mandíbulas</b>                              | <b>17</b> |
| <b>2.4.2</b> | <b>Britador de impacto</b>                                 | <b>19</b> |
| 2.4.2.1      | Nordberg Série NP  | 20        |
| 2.4.2.2      | VSI Barmac   | 21        |
| 2.4.2.3      | VeRo Liberator   | 22        |
| 2.4.2.3      | Britador EDS   | 23        |
| <b>2.4.3</b> | <b>HPGR</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.4</b>   | <b>INFLUÊNCIA DO TIPO DE BRITAGEM NA LIBERAÇÃO MINERAL</b> | <b>24</b> |
| <b>2.5</b>   | <b>MINA DE VERMELHOS</b>                                   | <b>27</b> |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                 | <b>30</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>BRITADOR DE MANDÍBULAS</b>                              | <b>31</b> |
| <b>3.2</b>   | <b>BRITADOR DE IMPACTO</b>                                 | <b>32</b> |
| <b>3.3</b>   | <b>PRENSA DE ROLOS (HPGR)</b>                              | <b>33</b> |
| <b>3.4</b>   | <b>AMOSTRAGEM PARA ENSAIO EM LÍQUIDO DENSO</b>             | <b>33</b> |
| <b>3.5</b>   | <b>ENSAIO EM LÍQUIDO DENSO</b>                             | <b>34</b> |
| <b>3.5.1</b> | <b>Procedimento laboratorial</b>                           | <b>34</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                             | <b>36</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>BRITADOR DE MANDÍBULAS</b>                              | <b>36</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>BRITADOR DE IMPACTO</b>                                 | <b>36</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>PRENSA DE ROLOS (HPGR)</b>                              | <b>38</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>LÍQUIDO DENSO</b>                                       | <b>38</b> |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>  | <b>44</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>45</b> |
|          | <b>ANEXOS</b>  | <b>47</b> |
|          | <b>ANEXO A – Análise química da amostra do técnico realizada na Mineração Caraíba S/A.</b>           | <b>47</b> |
|          | <b>ANEXO B – Análise química da amostra dos alunos realizada na Mineração Caraíba S/A.</b>           | <b>48</b> |
|          | <b>ANEXO C – Análise química da amostra do técnico realizada na mina de Salobo da Vale S/A.</b>      | <b>49</b> |
|          | <b>ANEXO D – Análise química realizada na mina de Salobo da Vale S/A da amostra britada no HPGR.</b> | <b>50</b> |
|          | <b>APÊNDICES</b>   | <b>51</b> |
|          | <b>APÊNDICE A - Peneiramento do ensaio 1 de britagem por mandíbula</b>                               | <b>51</b> |
|          | <b>APÊNDICE B - Peneiramento do ensaio 2 de britagem por mandíbula</b>                               | <b>52</b> |
|          | <b>APÊNDICE C - Peneiramento do ensaio 3 de britagem por mandíbula</b>                               | <b>53</b> |
|          | <b>APÊNDICE D - Peneiramento do ensaio 1a de britagem por impacto.</b>                               | <b>54</b> |
|          | <b>APÊNDICE E - Peneiramento do ensaio 1b de britagem por impacto.</b>                               | <b>55</b> |
|          | <b>APÊNDICE F - Peneiramento do ensaio 1c de britagem por impacto.</b>                               | <b>56</b> |
|          | <b>APÊNDICE G - Peneiramento do ensaio 2 de britagem por impacto.</b>                                | <b>57</b> |
|          | <b>APÊNDICE H - Peneiramento do ensaio 3 de britagem por impacto.</b>                                | <b>58</b> |
|          | <b>APÊNDICE I – Peneiramento do ensaio 1 da britagem pelo HPGR.</b>                                  | <b>59</b> |
|          | <b>APÊNDICE J – Peneiramento do ensaio 2 da britagem pelo HPGR.</b>                                  | <b>60</b> |
|          | <b>APÊNDICE K – Peneiramento do ensaio 3 da britagem pelo HPGR.</b>                                  | <b>61</b> |
|          | <b>APÊNDICE L - Análise química do ensaio 1 no britador de mandíbulas.</b>                           | <b>62</b> |
|          | <b>APÊNDICE M - Análise química do ensaio 2 no britador de mandíbulas</b>                            | <b>63</b> |
|          | <b>APÊNDICE N - Análise química do ensaio 3 no britador de mandíbulas.</b>                           | <b>64</b> |
|          | <b>APÊNDICE O - Análise química do ensaio 2 realizado britador de impacto.</b>                       | <b>65</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>APÊNDICE P - Análise química do ensaio 3 realizado no britador de impacto.</b> | <b>66</b> |
| <b>APÊNDICE Q - Análise química do produto britado no HPGR.</b>                   | <b>67</b> |
| <b>APÊNDICE R – Cálculo da massa amostral pela fórmula do Pierre Gy</b>           | <b>68</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, a demanda por bens minerais é cada vez maior, mas as jazidas minerais nem sempre são abundantes como antigamente, uma vez que os recursos vão se esgotando. Teores cada vez menores fazem com que as mineradoras processem cada vez mais o minério para se obter uma produção desejada. Novos projetos frequentemente enfrentam problemas como textura mineral mais complexa ou liberação mais fina, sendo necessário etapas adicionais de moagem e britagem para liberação mineral, o que aumenta até 4 vezes mais o consumo energético (NORGATE; HAQUE, 2010). Além disso, segundo Peuker (2012 apud HESSE; POPOV; LIEBERWIRTH, 2017) novos depósitos encontrados são cada vez menores, mais remotos e de pobre teor mineral.

Para diminuir os custos de operação e consumo energético, há o desenvolvimento de pesquisas para aumentar a liberação e recuperação metalúrgica dos minerais. Essas pesquisas são aplicadas em diferentes processos do beneficiamento, sejam eles micro-processos como técnicas de físico-químicas na flotação ou macro-processos como a pré-concentração que ocorre em sequência à britagem primária e secundária. Na pré-concentração, também chamada de concentração primária, há o descarte prévio de material com baixo teor do mineral de interesse. Segundo Sousa (2019), a pré-concentração se baseia em técnicas como separação magnética, densitária, peneiramento ou *ore sorting* para separar os minerais de minério dos minerais de ganga assim como na própria concentração, porém em granulometria grossa (normalmente acima de 1 mm).

A tecnologia da pré-concentração já vem sendo aplicada em minas de sulfetos de cobre, níquel, chumbo e zinco da África, da América do Norte e da Austrália. A exemplo, uma mina em Botswana reportou um descarte de até 60% mineral de ganga e aumento de até 40% na capacidade da moagem utilizando-se a pré-concentração (MORGAN, 2009).

Em circuitos com pré-concentração a britagem se torna importante no contexto da cominuição seletiva, pois a liberação mineral dependerá do tipo de mecanismo de quebra aplicado ao minério. Dependendo do mecanismo de britagem, há uma melhor

liberação entre as partículas de mineral de minério e as de ganga (HESSE; POPOV; LIEBERWIRTH, 2017).

Apesar dos possíveis resultados positivos que a literatura ilustra para a cominuição seletiva e sua influência na liberação mineral grossa, os resultados irão variar muito conforme o minério, conforme demonstrado por Hesse, Popov e Liber (2017). Sendo assim, é importante que o impacto da cominuição seletiva seja avaliado para cada minério em que se deseja aplicar a pré-concentração.

## **1.1 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar a influência de diferentes tipos de britagem na liberação de minerais, visando a concentração primária de um minério de cobre.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão bibliográfica são apresentados os conceitos básicos sobre liberação mineral, cominuição seletiva, o princípio de funcionamento dos tipos de britagem que serão usados e dados de outros autores sobre a influência do tipo de britagem na liberação de minerais. Por fim, são apresentadas informações disponíveis na literatura sobre o minério da mina foco do presente estudo, mostrando resultados da pré-concentração de um estudo realizado pela mineradora.

### 2.1 LIBERAÇÃO MINERAL

Segundo Luz, Sampaio e França (2010) a liberação de um minério é definida como a porcentagem de um determinado mineral valioso que se apresenta numa faixa granulométrica sob a forma de partículas livres. Os parâmetros que influenciam na liberação são: dimensões, formas e intercrescimentos dos grãos, coesões internas e entre os grãos, tipos de associações minerais, proporção dos minerais presentes.

Segundo King (1982) a liberação de um mineral valioso de sua ganga está relacionada à textura original da rocha mineralizada. A porcentagem de liberação de um mineral do minério pode ser determinada de diferentes formas através de ensaios com líquidos densos, dosagens químicas do elemento principal, ou estudos sistemáticos em lupa binocular e/ou em microscópio segundo Henley (1983, apud LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O método desenvolvido por Gaudin (1975), consiste no exame minucioso dos produtos em faixas granulométricas estreitas. Devem ser contados, em média, 200 grãos minerais, anotando-se os índices de liberação das partículas livres e das mistas. O índice de liberação é um valor estimado que se dá aos grãos que contêm somente o mineral de minério e grãos que contêm partes do mineral de minério e do mineral de ganga (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Os percentuais da liberação são determinados pela seguinte fórmula:

$$\text{Grau de liberação} = \frac{\text{índice de liberação das partículas livres}}{\text{índice de liberação das partículas livres} + \text{mistas}} \times 100$$

Outra forma de se determinar o grau de liberação mineral, de forma indireta, é usando a separação em líquido denso. Segundo Muller (1971, p. 67 apud LUZ;

SAMPAIO; FRANÇA, 2010), o cálculo da liberação utilizando líquidos densos é um método físico tal que o gradiente de densidade obtido a partir de diferentes líquidos permite estabelecer a liberação dos minerais de forma qualitativa. Comumente após o ensaio de líquido denso faz-se análise química para determinar a recuperação metalúrgica do mineral de interesse em cada densidade.

No presente trabalho foram utilizados a separação em líquidos densos como análise qualitativa da liberação mineral seguida da análise química nos produtos das diferentes densidades como análise quantitativa.

## **2.2 COMINUIÇÃO SELETIVA**

As operações de concentração envolvem a separação seletiva dos minerais baseando-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério e os minerais de ganga. Essas propriedades são, por exemplo, a massa específica, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, forma, cor, textura, dentre outras. Para se obter a liberação do mineral, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho chamado cominuição, isto é, britagem e/ou moagem (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

De forma a obter-se quebras preferenciais no contato do minério/ganga para que haja boa separação das partículas de mineral-minério dos de ganga é realizada a cominuição seletiva. A cominuição seletiva tem como objetivo controlar a qualidade e granulometria dos produtos por diferentes mecanismos de quebra como impacto, compressão e abrasão aplicados pelos britadores e moinhos. Dependendo das características dos minerais (e.g. formato e textura), um mecanismo ou outro será melhor para cominuição seletiva e liberação mineral (SIRKECI, 2018).



A Figura 1 ilustra formatos de partículas com suas respectivas fraturas preferenciais.

**Figura 1** - Representação esquemática da quebra preferencial em uma partícula.

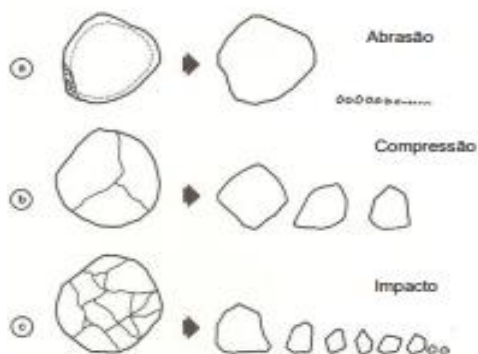
| Caso  | Objetivo | Ilustração   | Literatura   |
|---|----------|--|--|
| Fraturas na fronteiras dos grãos (quebra interfacial) | A        | Alto grau de liberação   | (Fandrich, 1997; Gaudin, 1939)                             |
|   | B        | Remoção de componentes aderidos superficialmente               | (Fandrich, 1997; Puffe, 1960; Sutherland & Fandrich, 1996) |
|   | C        | Cominuição em fragmentos com diferentes formatos de partículas | (Stöhr, 1976; Puffe, 1955; Andreas & Torlach, 1956)        |
|   | D        | Cominuição seletiva com enriquecimento por classificação       | (Schmidlapp, 1957; Schmidlapp, 1965)                       |
|   | E        | Liberação do mineral de interesse na superfície                | (Miller, 2003)   |
|   | F        | Cominuição seletiva com alteração de formato                   | (Müller, 2011; Gründer, 1957)                              |

Fonte: Editado de Lieberwirth, 2017.

## 2.3 MECANISMOS DE QUEBRA

Beraldo (1987), apresenta a seguinte definição para os diferentes mecanismos de quebra, classificados por ele em impacto, compressão e abrasão. O impacto é quando a força aplicada sobre a partícula é rápida e de intensidade muito superior à resistência da partícula. A compressão ocorre quando a força aplicada é de forma lenta e que permite que o esforço seja aliviado com o aparecimento da fratura, sendo assim a força pouco superior à resistência da partícula. Por fim, a abrasão ocorre quando existe uma força insuficiente para provocar uma fratura em toda partícula, produzindo apenas um desgaste superficial na mesma. Na prática os mecanismos de quebra ocorrem simultaneamente (KELLY; SPOTWOOD, 1982). A Figura 2 ilustra o comportamento da partícula conforme o mecanismo de quebra aplicado.

**Figura 2** - Comportamento da partícula quando submetida aos esforços solicitantes.



Fonte: Editado de Kelly e Spottswood (1982).

## 2.4 BRITADORES

Como a pré-concentração é feita com materiais de tamanho, aproximadamente, entre 5 e 50 mm e no presente estudo a britagem foi realizada com *topsize* de 12,7 mm, que corresponde a granulometria de etapas de britagem terciária, normalmente utilizam-se britadores de impacto, cônico e HPGR (NORGATE e HAQUE, 2010). Todavia o britador cônico é de difícil acesso e possui baixa fabricação em escala laboratorial, logo foi utilizado o britador de mandíbulas no lugar do cônico visto que seus mecanismos de quebra são iguais, isto é, compressão e abrasão. Apenas alguns parâmetros operacionais influenciam o produto da britagem nesses dois britadores como o tempo que o material fica na câmara de britagem, que no caso do britador cônico esse tempo é maior.

Em seguida é apresentado então a revisão bibliográfica desses três britadores utilizados no presente trabalho (mandíbulas, impacto e HPGR).

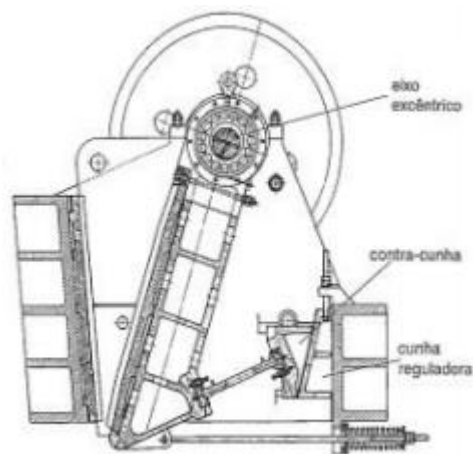
### 2.4.1 Britador de mandíbulas

O britador de mandíbula é um dos equipamentos mais utilizados em laboratório e industrialmente pela sua boa eficiência em cominuir diferentes tipos de minérios. O equipamento consiste em elementos mecânicos ativos que são uma placa metálica móvel (mandíbula móvel), que se move em movimento recessivo (aproxima-se e afasta-se) de uma placa metálica fixa (mandíbula fixa importante e chamada de "gap"). A partícula introduzida entre as duas mandíbulas é fraturada ao longo de seu plano principal de cisalhamento durante o movimento de aproximação. Durante o movimento

de afastamento, os fragmentos resultantes escoam para baixo até ficarem contidos pelas mandíbulas e serem esmagados no próximo movimento de aproximação (CHAVES, 2003).

A Figura 3 ilustra o corte transversal do britador de mandíbulas com seus principais componentes.

**Figura 3** - Esquema representativo de britador de mandíbula



Fonte: Chaves, 2003.

Tal britador possui dimensões de sua câmara de britagem com tamanhos variáveis. O fabricante Metso Minerals Ltd, por exemplo, produz a Série C de equipamentos com câmaras de britagem de dimensões entre 630 mm x 440 e 2.000 mm x 1.500 mm. Sua potência varia entre 45 e 400 kW e a rotação do eixo excêntrico de 200 a 340 rotações por minuto (rpm). Tal britador brita materiais com diferentes tenacidades e características como granito e calcário (METSO, 2005).

Conforme Metso (2005), o equipamento possui ampla faixa de aplicações. Os britadores da série C, por exemplo, possuem faixa de abertura na posição fechada (APF) de 40 até 300 mm e capacidade de processamento de 40 até 1.225 t/h, e são usados em circuitos de britagem primária e secundária.

Em britagens terciárias costuma-se utilizar britadores cônicos, todavia devido a indisponibilidade de tal britador foi utilizado o britador de mandíbulas como equipamento de britagem terciária no presente trabalho.

### 2.4.2 Britador de impacto

O britador de impacto, como o nome já sugere, tem como princípio de cominuição o impacto. De tal forma que aplicada velocidade rotacional ao eixo, a fragmentação do material ocorre devido ao choque das partículas minerais contra a parede de revestimento do britador projetado pelos martelos, pelo choque entre a partícula mineral contra o próprio martelo do britador ou até mesmo pela colisão entre as partículas (METSO, 2005).

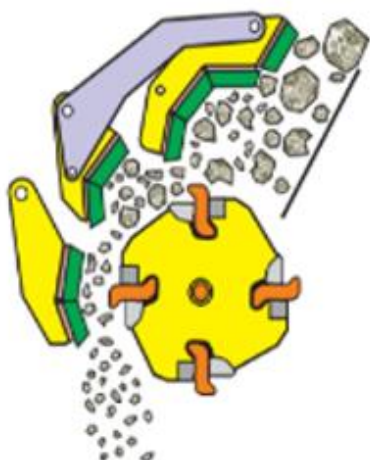
O eixo do britador por ser vertical ou horizontal, em que há os chamados martelos ou lançadores em volta desse eixo. Os martelos são basicamente hastes prismáticas presas ao eixo de rotação do britador (CHAVES, 2003, p. 498).

A britagem através da colisão entre duas partículas é a chamada britagem autógena e essa componente de britagem é mais expressiva nos britadores de eixo vertical (VSI). Segundo Metso (2005), os britadores VSI permitem atingir maiores reduções com menos estágios de britagem, resultando em menores investimentos de capital e economia de energia. A robustez dos impactores VSI torna-os ideais para todo tipo de aplicações em muitas configurações diferentes.

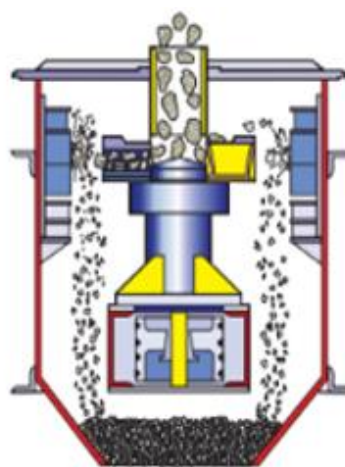
A Figura 4 ilustra da esquerda para direita a visão transversal de um britador de eixo horizontal e um de eixo vertical.

**Figura 4** - Esquema representativo de britadores de impacto.

a-) Eixo horizontal



b-) Eixo vertical



Fonte: Metso, 2005.

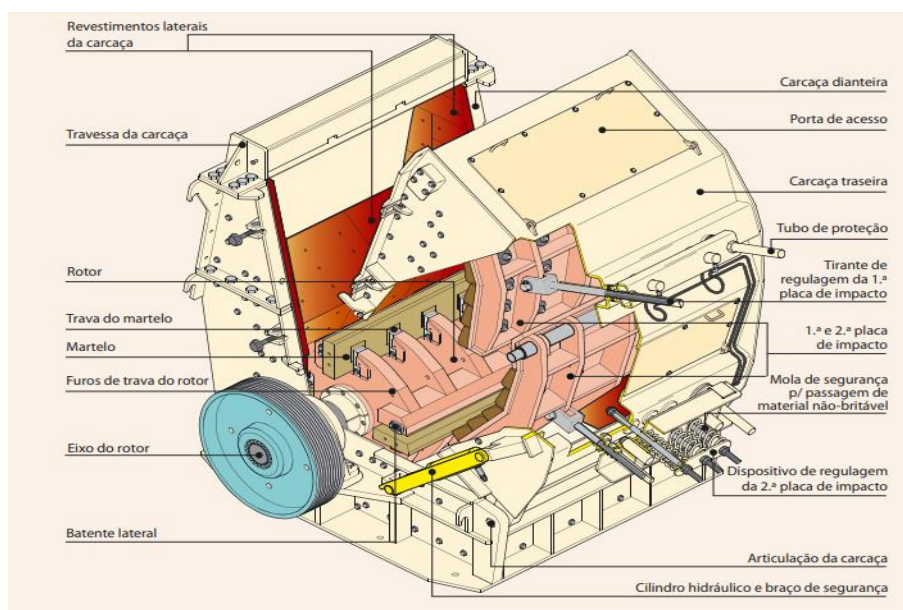
A seguir são descritos dois modelos de britadores de impacto, um de eixo horizontal e outro vertical, muito utilizados na indústria. Também são descritos equipamentos de impacto desenvolvidos recentemente, e que, segundo os fabricantes, geram ganhos na liberação.

#### 2.4.2.1 Nordberg Série NP

Os britadores Nordberg Série NP são do tipo horizontal tal que em seu eixo são fixados martelos por um conjunto de cunha simples que confere um torque de aperto superior ao de qualquer outro britador HSI (*Horizontal Shaft Impactor*) e velocidade de rotação do eixo de até 800 rpm. A velocidade tangencial nesses britadores é elevada, o Nordberg NP2023®, por exemplo, atinge mais de 50 m/s com velocidade rotacional máxima de 500 rpm e raio do rotor igual a 1000 mm (METSO, 2005).

Segundo Metso (2005), tais britadores se destacam pela combinação de rotor, material de desgaste e câmara de britagem robustos, o que garante melhor capacidade, qualidade do produtor, redução dos custos operacionais e com material de desgaste podendo ser aplicado em operações de britagem primária, secundária, terciária e de reciclagem (METSO, 2005). A Figura 5 ilustra a vista em perspectiva de um britador de impacto Nordberg Série NP.

**Figura 5** - Vista interna do Nordberg Série NP.



Fonte: Metso, 2005.

#### 2.4.2.2 VSI Barmac

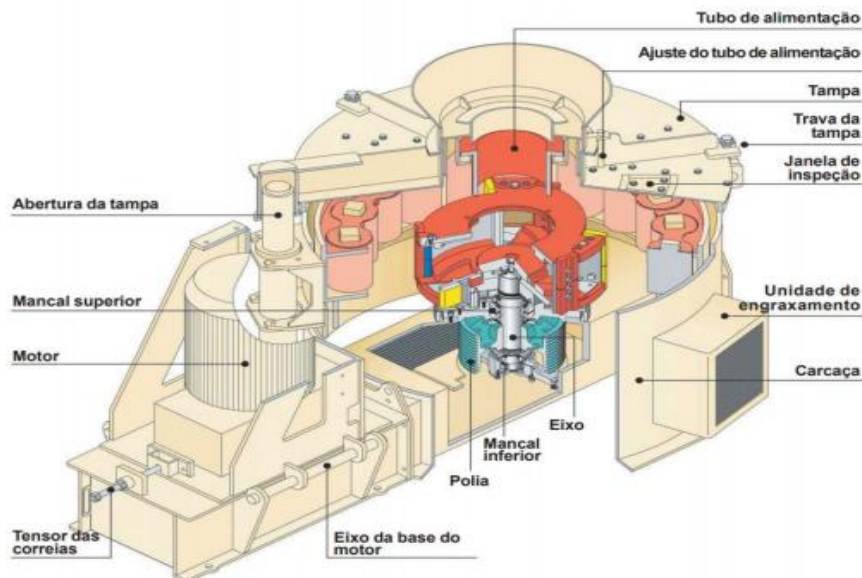
Para os britadores de rotor vertical (*Vertical Shaft Impactor*), como a própria etimologia do seu nome diz, possuem seu eixo de rotação na vertical e os mais conhecidos e utilizados na indústria da mineração são os britadores VSI Barmac Série B e Série VI da Metso. Tais britadores podem atingir velocidade tangencial elevada, por exemplo, o Barmac B3100SE atingir mais de 80 m/s com raio do rotor e velocidade rotacional máxima iguais a 150 mm e 5300 rpm, respectivamente (METSO, 2005).

Segundo Metso (2005), tais britadores são recomendados para britagens finas, abaixo de 10 mm e recebem uma alimentação de até 76 mm, possuindo capacidade de processar material abrasivo ou friável.

Destaque dos britadores VSI's é que eles possuem componente expressiva de britagem autógena (rocha-contra-rocha); dependendo do ajuste que é feito no tubo de alimentação da câmara de britagem ocorre o chamado efeito cascata, em que parte do material tende a cair pela periferia da câmara sofrendo a colisão com as partículas lançadas pelo rotor (METSO, 2005).

Sobre a geometria da câmara do britador, os VSI's Barmac série VI são extremamente modulares, os arranjos nos impactores podem, dentro da mesma carcaça, ser trocados sem grandes modificações, quer por arranjos de rotor aberto e anteparos metálicos quer por soluções de rotor fechado e paredes revestidas com camada de pedras (METSO, 2005). A Figura 6 mostra em perspectiva o britador VSI Barmac da série VI.

**Figura 6** - Corte de um britador de impacto VSI Barmac Série VI.



Fonte: Metso, 2005.

#### 2.4.2.3 *VeRo Liberator*

A empresa PMS Hamburg inventou e produziu um britador de impacto de alta velocidade, o VeRo Liberator. Tal britador consiste em três níveis diferentes de martelos de 100 cm de comprimento fixos no eixo vertical que giram em sentidos opostos (horário e anti-horário) em altíssimas velocidades (BORG; SCHARFE; KAMRADT, 2015).

Segundo Borg, Scharfe e Kamradt (2015), a tecnologia do VeRo proporciona uma ótima relação de redução do minério e liberação mineral. Isso ocorre devido à alta-frequência, alta-velocidade de rotação de até 1800 rpm e velocidade tangencial de 188,5 m/s, consequentemente, alta energia cinética promovida pelo eixo vertical do britador. Devido a sua enorme relação de redução é possível substituir de dois ou três britadores e moinhos em circuitos de concentração, economizando substancialmente em CAPEX e OPEX, assim como em energia.

Segundo Borg, Scharfe e Kamradt (2015), o britador VeRo tem capacidade de alimentação de 100 t/h e já foi testado em minérios sulfetados da Rio Tinto na mina da faixa piritosa ibérica na Espanha. O minério tem sido reduzido numa razão de 480 e teve alto grau de liberação mineral.



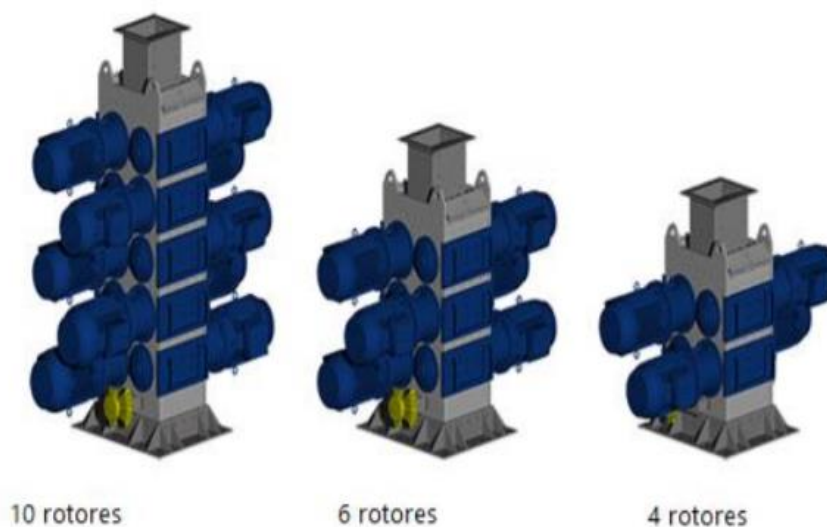
#### 2.4.2.3 Britador EDS

O britador EDS, pertencente à empresa Energy and Densification Systems Ltd, é um britador de impacto com câmara de britagem de 2 m<sup>2</sup> de seção transversal e 2,5 m de altura onde possui diversos rotores na horizontal com acessórios defletores reforçados que são usados para agitar o produto à medida que ele passa pela câmara de britagem (ENERGY AND DENSIFICATION SYSTEMS, 2014).

Segundo Energy and Densification Systems (2014), a quebra do minério ocorre pelo choque contra a parede do britador, pelo impacto das partículas contra os lançadores que giram com velocidades de até 1200 rpm e pela componente autógena de britagem (partícula contra partícula).

As configurações do britador EDS são ajustáveis tanto em seus softwares, as quais são controladas velocidades de rotação do rotor, quanto em seus hardwares onde é possível modificar a quantidade de rotores e lançadores. Atualmente, o EDS está disponível em suas versões com 10, 6 e 4 rotores como ilustrado na Figura 7.

**Figura 7** - Configurações de rotores do EDS.



Fonte: EDS, 2014.



### 2.4.3 HPGR

Os britadores HPGRs, também chamados de prensas de rolos de alta pressão, cominuem as partículas em um leito confinado onde ocorre a quebra inter-partículas, definidos por Schoenert (apud WANG, 2021) como uma das mais eficientes técnicas de cominuição.

Segundo Morley (2006), o HPGR é composto por um par de rolos que giram em sentidos opostos, tal qual um dos rolos é fixo à estrutura e o outro está sobre trilhos com posicionamento controlado por pistões pneumo-hidráulicos, permitindo ajustes no vão entre os rolos, pelo qual a alimentação é submetida.

Segundo Metso (2005), os HPGRs são mais utilizados quando o material processado é rocha dura. No entanto, eles também podem refinar materiais mais macios, como fosfatos e calcários. Os modelos menores dos HPGRs são particularmente produtivos na produção de areia manufaturada para produção de asfalto e concreto.

A Figura 8 apresenta duas ilustrações de HPGR, sendo à esquerda a prensa de rolos da FLSmidth, e à direita da Metso.

**Figura 8** - Exemplos de HPGRs.



Fonte: FLSmidth A/S, 2014 e Brian, Herman e Whalen, 2015.

## 2.4 INFLUÊNCIA DO TIPO DE BRITAGEM NA LIBERAÇÃO MINERAL

Nesse item são descritos alguns estudos que foram usados como base para o desenvolvimento deste trabalho, como se segue.

O primeiro estudo utilizado para revisão bibliográfica foi o do Sirkeci *et al.* (2018), nesse estudo houve a comparação entre os mecanismos de impacto e compressão para avaliação do melhor mecanismo na liberação mineral de minério de cromita, para o mecanismo de impacto foi utilizado um britador de impacto e para compressão foram utilizados, em sequência, os britadores de mandíbulas, cone e de rolos. Segundo Sirkeci *et al.* (2018), considerando a maior quantidade de metal em granulometrias mais finas, conforme Tabela 1, a britagem por impacto foi a que apresentou melhor liberação mineral.

**Tabela 1** - Grau de liberação e porcentagem de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para os respectivos mecanismos de quebra.

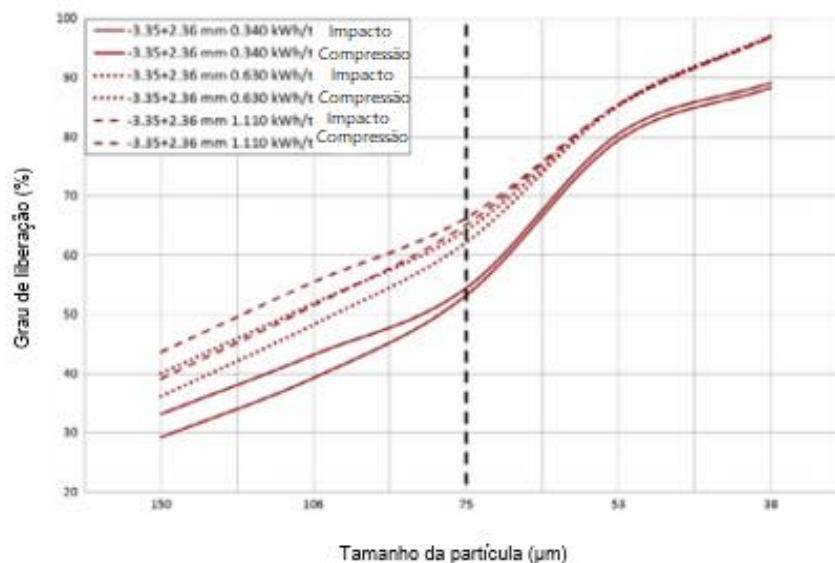
| Fração granulométrica | Compressão                         |           | Impacto                            |           |
|-----------------------|------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|
|                       | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Grau Lib. | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Grau Lib. |
| -1+0,5                | 43,75                              | 47,26     | 43,65                              | 53,89     |
| -0,5+0,2              | 50,29                              | 71,97     | 51,44                              | 72,37     |
| -0,2                  | 51,68                              | 82,11     | 53,30                              | 83,80     |

Fonte: Editado de Sirkeci et al., 2018.

Outro estudo realizado, desta vez com minério de cobre, é apresentado por Ozcan e Benzer (2013). Neste trabalho comparou-se a liberação mineral e a distribuição do tamanho de partículas em relação ao mecanismo de compressão e de impacto em diferentes granulometrias para o minério de calcopirita. Para o mecanismo de compressão foi utilizado leito de partículas, tal que um pistão hidráulico as pressiona até a ruptura, já para o mecanismo de impacto a partícula é deixada sobre uma bigorna de aço e um pistão de 5,87 kg é deixado cair sobre a partícula por força da gravidade.

Foi observado que a liberação mineral não teve mudanças significativas para granulometrias abaixo de 75 µm, todavia houve maior liberação mineral na britagem por compressão em frações maiores que 75 µm como mostra a Figura 9.

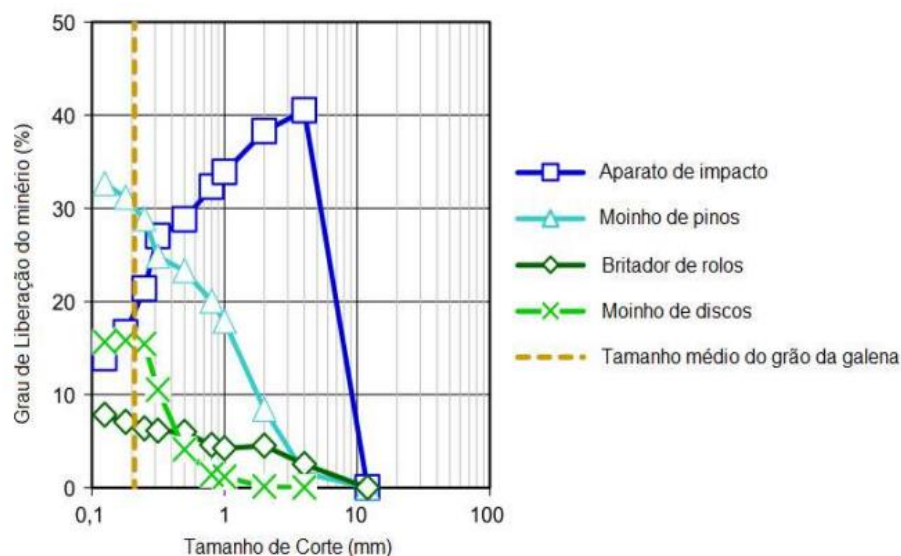
**Figura 9** - Resultados da liberação mineral.



Fonte: Editado de Ozcan, O.; Benzer, H, 2013.

Já para o estudo de Hesse, Popov e Lieberwirth (2017), com minérios sulfetados houve ganhos significativos de liberação mineral com o mecanismo de impacto quando comparado com mecanismo de compressão. Para o mecanismo de impacto foi utilizado britador de impacto do tipo *pin mill* e para o mecanismo de compressão foi utilizado britador de rolos. Conforme ilustra Figura 10, houve 40 % de grau de liberação do mineral para partículas de 4 mm de tamanho com a utilização do aparato de impacto.

**Figura 10** - Grau de liberação para diferentes mecanismos de britagem.



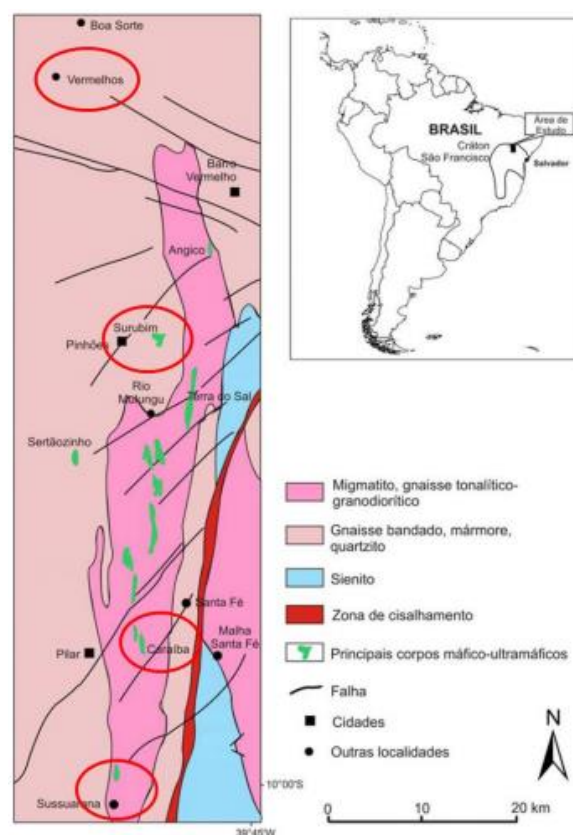
Fonte: Editado de Hesse; Popov; Lieberwirth, 2017.

Pode-se concluir então que, conforme a literatura mostra, não há definição absoluta de qual mecanismo é melhor e mais efetivo para liberação mineral em diferentes faixas granulométricas. Uns apontam o mecanismo de compressão sendo melhor em faixas granulométricas muito finas (da ordem de micrômetros), outros apontam o impacto como mais efetivo em faixas de 0,1, até, aproximadamente, 10 mm e há ainda outros estudos que relatam que não houve diferença entre os mecanismos de quebra.

## 2.5 MINA DE VERMELHOS

O minério utilizado no presente estudo é da mina de Vermelhos, sendo a Ero Copper a detentora da mina, que é uma empresa de produção de cobre com sede em Vancouver (CA) e com filial brasileira no Vale do Curaçá (BA). A empresa detém a produção de cobre em diversas regiões como na mina de Vermelhos com localização mostrada na Figura 11.

**Figura 11** - Mapa geológico do Vale do rio Curaçá que mostra os quatro depósitos de empreendimentos da Ero Copper.



Fonte: Garcia, 2013.

Em setembro de 2020, a empresa anunciou resultados de estudo *ore sorting* (uma das técnicas de pré-concentração) feito com mais de 29.000 toneladas de material, tais resultados foram positivos para pré-concentração e se tornou motivo de escolha do minério para o presente trabalho. O minério é de fase mineralógica mais comum do cobre que são os sulfetos, especificamente a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) (GARCIA, 2013).

O depósito de Vermelhos, assim como o de Caraíba e Surubim, ocorre sob uma capa de minério oxidado. Tal depósito apresenta bolsões de minério maciço ocorrendo de forma mais frequente do que nos demais, fazendo com que os teores sejam mais elevados e bom para pré-concentração.

Em Vermelhos as principais formações rochosas são: piroxenitos, metanoritos, quartzo-microclinitos, andesina-microclinitos, além de corpos intrusivos de granitóides. Os metanoritos, denominados pelos geólogos da Mineração Caraíba S.A. de matabásicas, são rochas maciças compostas por plagioclásio, hiperstênio, hornblenda, magnetita, quartzo e microlinha, com concentrações locais de flogopita. Com coloração acinzentada, e granulação média a grossa, também são importantes hospedeiros de mineralizações cupríferas (GARCIA, 2013).

Em um dos furos do depósito de Vermelhos foi descrita a ocorrência de níveis ricos em barita, quartzo e pirita com densidade de  $4,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $2,6 \text{ g/cm}^3$  e  $5,0 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. A principal forma de ocorrência das mineralizações é como bolsões de bornita e calcopirita, com magnetita associada conforme mostra a Figura 12.

**Figura 12** - Testemunhos de sondagem do furo do depósito de Vermelhos.



Fonte: Garcia, 2013.

Deste o começo da exploração desses corpos mineralizados, diversos estudos vêm sendo realizados e alguns modelos foram propostos para explicar a gênese dos depósitos do vale do Curaçá. Para o presente trabalho destaca-se o modelo hidrotermal de Teixeira *et al* (2010) que estima mais 5.000 toneladas de cobre presente no depósito de Vermelhos como mostra Tabela 2.

**Tabela 2** - Minério sulfetado de Vermelhos

| Recursos  | Massa (t) | Teor (% Cu) | Cu Contido (t) |
|-----------|-----------|-------------|----------------|
| Medido    | 789       | 0,64        | 5011           |
| Indicado  | 7575      | 0,54        | 41             |
| Sub-total | 796642    | 0,63        | 5052           |
| TOTAL     | 796642    | 0,63        | 5052           |

Fonte: Editado de Garcia, 2013.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado com uma amostra de minério cobre proveniente de um empreendimento mineiro localizado na Bahia. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Sólidos Industriais da USP, com exceção das análises químicas que foram realizadas no Laboratório da Mineração Caraíba S/A, Laboratório da Mina Salobo da Vale S/A e Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP.

O minério utilizado foi um sulfeto de cobre e ferro, cujo mineral de interesse é a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) de densidade  $3,1 \text{ t/m}^3$ , teor aproximado de 0,5 % e Índice de Abrasão de Bond (Ai) igual a 0,25. A amostra do minério foi homogeneizada pelo método de pilhas alongadas e quarteada em sacos de 20 kg. Como o material era homogêneo e composto basicamente de fragmentos de 50,8 a 76,2 mm, não foi feita a distribuição granulométrica da alimentação da britagem.

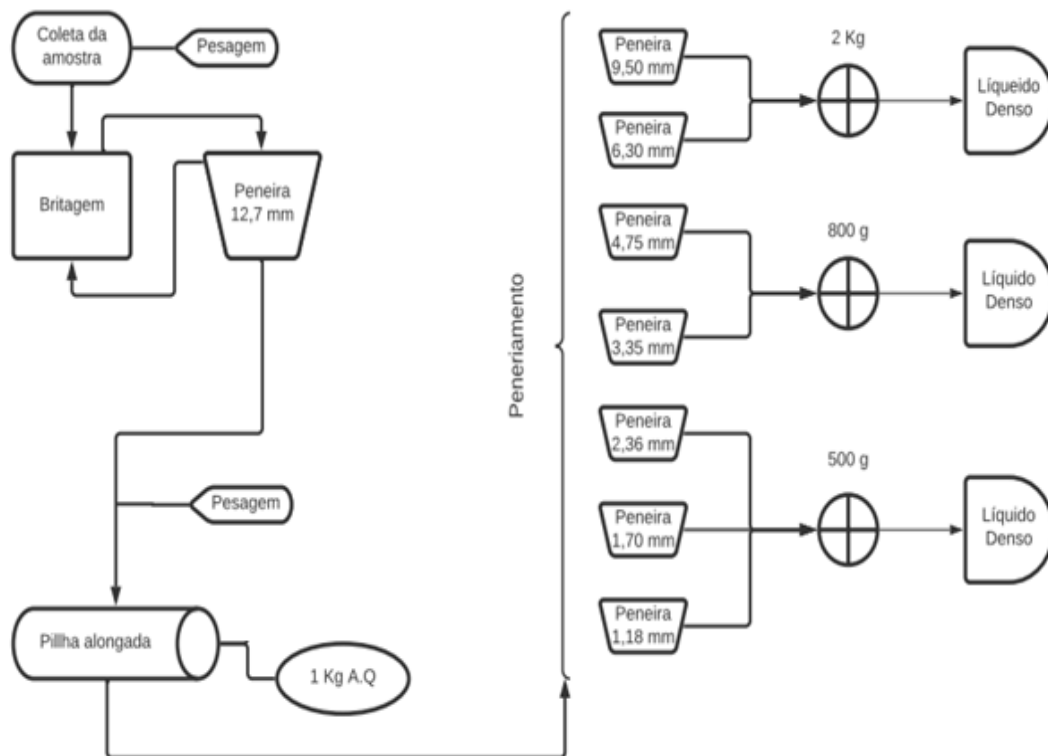
Diferentes alíquotas do material foram britadas de forma estagiada em circuito fechado direto para obter o *top size* de 12,7 mm, minimizando a geração de finos nos britadores de impacto, mandíbula e HPGR, conforme condições operacionais detalhadas mais adiante. O material fino corresponde ao produto da britagem abaixo de 1,18 mm, pois na pré-concentração proposta do presente estudo poderia ser utilizado, por exemplo, um jigue para a separação gravimétrica do material entre 12,7 e 1,18 mm, sendo que o abaixo de 1,18 mm iria direto para o moinho.

Foram realizados 3 ensaios no britador de mandíbulas e no HPGR, e 5 ensaios no britador de impacto. O primeiro ensaio no britador de mandíbulas foi realizado para analisar a viabilidade e aplicação da concentração primária no minério de cobre disponível, enquanto os três primeiros ensaios no britador de impacto foram realizados com diferentes rotações (como detalhado mais adiante) com o intuito de se obter o *topsize* de 12,7 mm em função da rotação imposta ao eixo do britador. Os três ensaios no HPGR foram realizados para analisar a britagem em função da pressão exercida pela prensa. Nos últimos ensaios, tanto no britador de impacto como no de mandíbulas, a amostra foi britada previamente abaixo de 40 mm e homogeneizada.

Após a britagem, o material foi homogeneizado e uma alíquota de 1 kg foi retirada para análise química. O restante foi peneirado nas malhas de 12,7; 9,5; 6,35;

4,75; 3,35 e 1,18 mm. Posteriormente, foram feitas as composições das seguintes frações granulométricas: -12,7+6,35; -6,35+3,35 e -3,35+1,18 mm para também serem quarteadas e levadas ao ensaio de líquido denso conforme fluxograma da Figura 13.

**Figura 13** - Fluxograma de processos.



Fonte: Autoral, 2020.

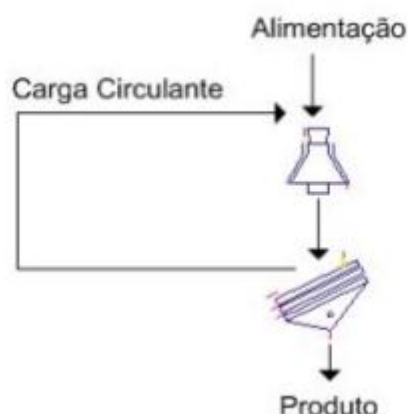
Os materiais do ensaio de líquido denso foram analisados qualitativamente no estereoscópio (lupa) para visualização da separação do mineral-minério do mineral de ganga.

### 3.1 BRITADOR DE MANDÍBULAS

A câmara do britador foi alimentada com o material e a britagem ocorreu em circuito fechado direto. A cada britagem realizada o material foi peneirado e o retido britado novamente (recirculação do *oversize*) como mostrado na Figura 14.



**Figura 14** - Fluxograma de circuito fechado direto.



Fonte: Felipe, 2019.

Inicialmente o material foi britado no britador com APF de 38,1 mm, e em seguida foi peneirado na peneira de 12,7 mm. Depois foram feitas 2 recirculações do *oversize* com APF de 25,4 mm e 12,7 mm, respectivamente. Com essa última abertura, o material foi britado em circuito fechado direto até não haver mais *oversize* no peneiramento.

A massa britada (18,2 kg) após o quarteamento, foi submetida ao peneiramento a úmido nas malhas de aberturas mostradas no fluxograma da Figura 13 anterior, e em seguida foram submetidas à secagem em estufa a 100 ° C.

### **3.2 BRITADOR DE IMPACTO**

Para o britador de impacto, três alíquotas foram quarteadas da massa total de 41,80 kg e britadas em três diferentes rotações, respectivamente, de 300, 600 e 900 rpm, essa última sendo a máxima rotação possível do equipamento. No presente trabalho esses primeiros ensaios foram sub-nomeados de ensaios 1a, 1b e 1c com as respectivas massas descritas como se segue:

a - 10,58 kg com 300 rpm

b - 10,76 kg com 600 rpm

c - 10,54 kg com 900 rpm

d - 9,88 kg, reservada

Para as três diferentes configurações de rotação estabeleceu-se 5 ciclos de recirculação do *oversize* e muito material grosso (acima de 12,7 mm) foi gerado como produto da britagem. Como não foi possível britar todo material abaixo 12,7 mm, selecionou-se 4 malhas de peneiras mais grossas sendo elas: 19,1; 25,4; 37,5 e 50,0 mm. Com tais malhas foi realizado o peneiramento a seco seguido do peneiramento a úmido para o material abaixo de 12,7 mm.

### 3.3 PRENSA DE ROLOS (HPGR)

Para a britagem no HPGR foram utilizadas 39 kg do minério de cobre. O material foi quarteado em massas de, aproximadamente, 13 kg e britados na prensa HRC-1000® da Metso, com APF inicial de 10 mm, e em três diferentes pressões de 2, 3 e 4 N/mm<sup>2</sup>. Para as três diferentes pressões, os ensaios no presente trabalho foram denominados de “Ensaio 1”, “Ensaio 2” e “Ensaio 3”, respectivamente.

### 3.4 AMOSTRAGEM PARA ENSAIO EM LÍQUIDO DENSO

Após a britagem e o peneiramento houve a junção dos retidos nas peneiras para composição das seguintes faixas granulométricas: -12,7 + 6,35 mm; -6,35 + 3,35 mm e -3,35 + 1,18 mm. Para cada faixa granulométrica foi utilizado o método de Pierre Gy (KAWATRA; HASELHUHN, 2021, p. 147) para o cálculo da massa representativa, conforme ilustra a Equação 1.

$$(EQ1) M = C \cdot d^3 / s^2$$

Tal que **M** é a massa amostrada, **C** o fator mineralógico do material, **d** o diâmetro de partícula do *top size* e **s** desvio padrão<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Os demais parâmetros estão descritos na planilha anexa de apêndice R para faixa granulométrica -6,35 mm +3,35 mm.

Para as faixas granulométricas de -12,7+6,35 mm; -6,35+3,35 mm e -3,35+1,18 mm foram retiradas alíquotas de 2 kg, 800 g e 500 g, respectivamente, com o método descrito acima.

### **3.5 ENSAIO EM LÍQUIDO DENSO**

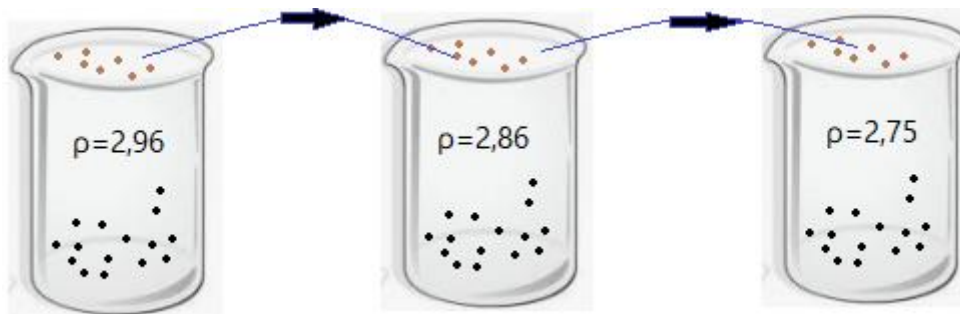
O ensaio em líquido denso consiste na separação das partículas segundo suas densidades tal que a amostra passa por diferentes béqueres contendo líquidos com diferentes densidades. O material menos denso (flutuado) foi então separado do mais denso (afundado) em relação a uma certa densidade. Os líquidos utilizados são geralmente tóxicos e corrosivos, por isso, para tal ensaio, é indispensável o uso de EPI's como luvas, máscara de gás e avental apropriado, sempre manipulando os materiais na capela.

#### **3.5.1 Procedimento laboratorial**

A amostra foi despejada no líquido denso e a solução foi então agitada para mistura e adequada dispersão das partículas no líquido. Depois de alguns minutos, com a solução em repouso, retirou-se a massa flutuada com uma escumadeira. O material foi filtrado em um funil de kitassato plugado em válvula de vácuo e, na sequência, lavado com o solvente do líquido denso em um funil com papel filtro conectado a outro kitassato. Tal procedimento foi realizado em ambiente ventilado e sempre na capela para que houvesse evaporação do restante do solvente. Em seguida, secou-se o material em estufa a 110 °C; depois da secagem o mesmo procedimento se repetiu para um líquido de diferente densidade.

No presente trabalho utilizou-se, inicialmente, um volume de 1.300 ml de tetrabromoetano com densidade de 2,96 g/cm<sup>3</sup>. A massa flutuada em tal líquido foi então levada a outro béquer com bromofórmio de densidade igual a 2,86 g/cm<sup>3</sup>, e finalmente a massa flutuada foi levada a outro béquer também com bromofórmio, desta vez diluído à densidade de 2,75 g/cm<sup>3</sup> a partir do seu solvente (álcool etílico). A Figura 15 ilustra o procedimento descrito.

**Figura 15** - Série de vasos com diferentes líquidos densos.



Fonte: Autoral, 2020.

Para a redução da densidade do bromofórmio a Equação 2 ilustra os parâmetros de cálculo:

$$(EQ2) \quad V_2 = \frac{V_1 \times (\rho_1 - \rho)}{(\rho - \rho_2)}$$

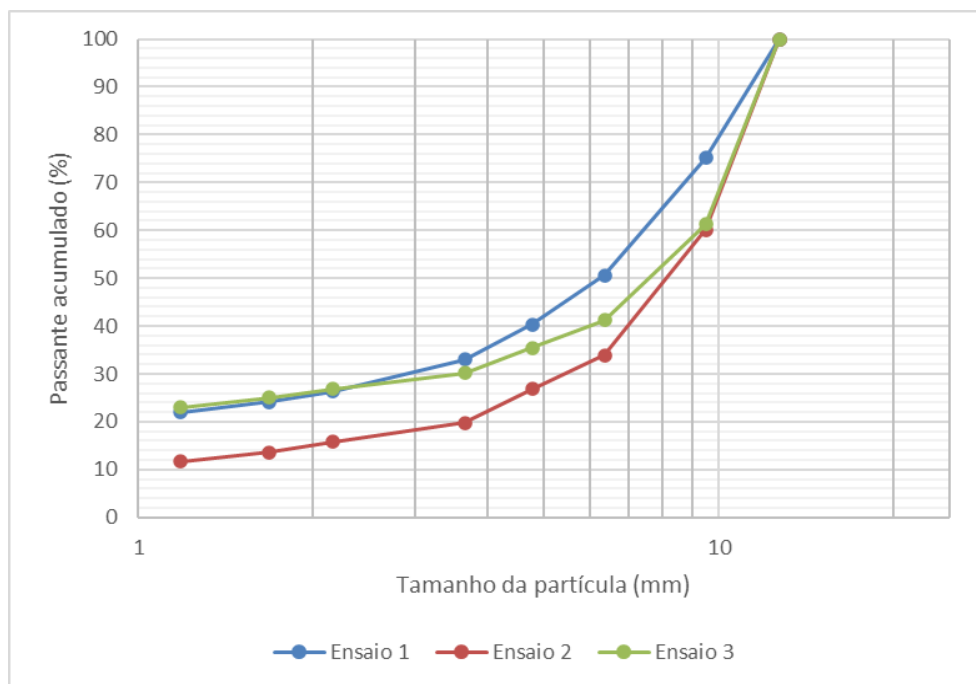
Onde  $V_2$  é o volume necessário do solvente com densidade  $\rho_2$  que deve ser adicionado ao volume  $V_1$  de densidade  $\rho_1$  para alcançar a densidade  $\rho$  desejada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 BRITADOR DE MANDÍBULAS

A Figura 16 mostra as distribuições granulométricas<sup>2</sup> para os três ensaios realizados com o britador de mandíbulas.

**Figura 16** - Distribuições granulométricas para o produto do mandíbulas em três ensaios.



Fonte: Autoral, 2021.

O primeiro ensaio realizado no britador de mandíbulas gerou muito material fino abaixo de 1,18 mm, já para o segundo ensaio houve maior controle na geração desses finos devido ao fechamento gradual da câmara do britador, com aberturas de 38,1, 25,4 e 12,7 mm conforme recirculações do *oversize*. Finalmente, para o terceiro ensaio notou-se aspecto intermediário entre o ensaio 1 e o 2, visto que já havia sido realizado uma britagem primária de *topsize* igual a 40 mm seguida de uma homogeneização.

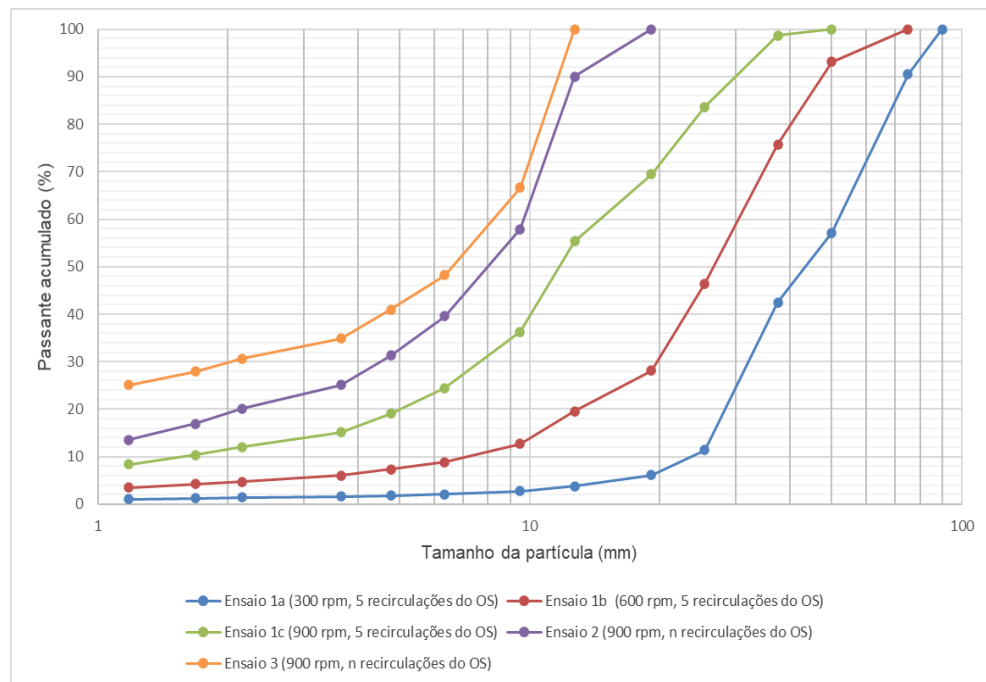
### 4.2 BRITADOR DE IMPACTO

Para todos os ensaios realizados no britador de impacto as distribuições granulométricas<sup>3</sup> dos produtos são mostradas na Figura 17.

<sup>2</sup> As tabelas com as distribuições granulométricas se encontram nos apêndices A, B e C.

<sup>3</sup> As tabelas com as distribuições granulométricas se encontram nos apêndices D, E, F, G e H.

**Figura 17** - Distribuição granulométrica para os diferentes ensaios no britador de impacto.



Fonte: Autoral, 2021.

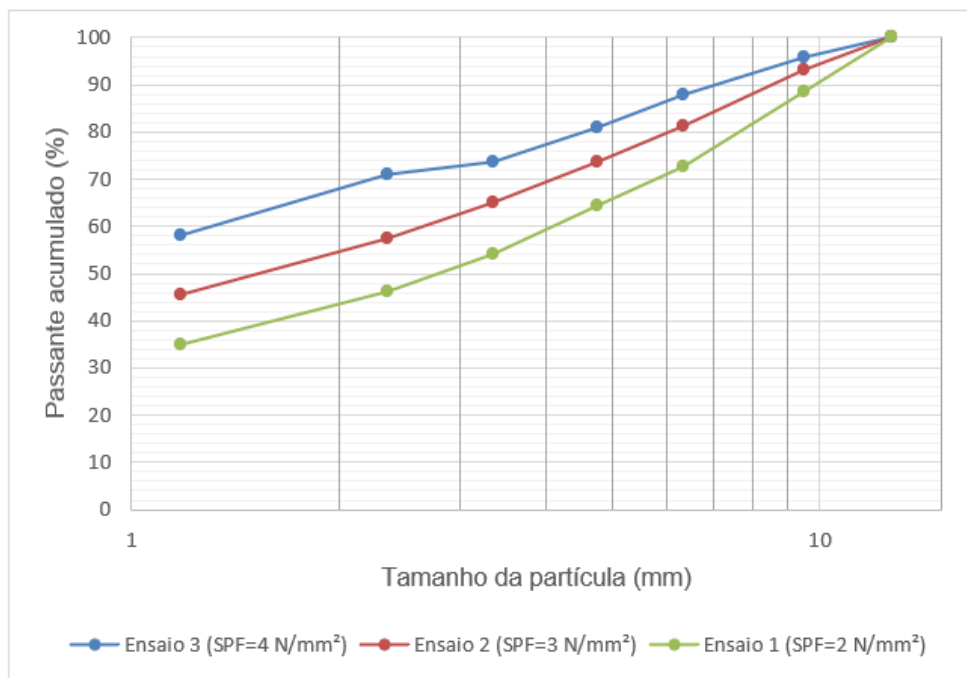
Nos três primeiros ensaios (Ensaio 1a, Ensaio 1b e Ensaio 1c) foi observado que quanto maior a rotação imposta no eixo do britador mais significativa foi a cominuição, visto que a velocidade tangencial imposta às partículas é proporcional à velocidade de rotação e ao raio do rotor, conferindo-lhes mais energia cinética. O raio do rotor medido foi de 18,5 cm e, com rotação máxima possível de 900 rpm, a velocidade tangencial máxima observada foi de 17,4 m/s, muito menor quando comparado à escala industrial de britadores como os da Metso e do VeRo Liberator® que atinge até 188 m/s.

No ensaio 2 foi realizado a britagem apenas à 900 rpm, mas desta vez com várias recirculações do *oversize*. Apesar do material passante em 12,7 mm ter sido maior quando comparado ao ensaio 1, também não foi possível atingir o *topsize* de 12,7 mm. Finalmente, no ensaio 3, dessa vez com o material britado e homogeneizado abaixo de 40 mm, foi possível obter 100 % passante na malha de 12,7 mm.

### 4.3 PRENSA DE ROLOS (HPGR)

A Figura 18 ilustra as distribuições granulométricas<sup>4</sup> dos produtos da britagem na prensa de rolos com três diferentes pressões.

**Figura 18** - Distribuição granulométrica do produto do HPGR, Mandíbulas e Impacto.



Fonte: Autoral, 2021.

Observa-se que para britagem no HPGR, quão maior a pressão exercida sobre o minério mais material fino - abaixo de 1,18 mm - foi gerado como produto, demonstrando que o britador perde potencial para ser utilizado na concentração primária, pois boa parte do produto iria direto para o moinho.

Durante a britagem foi observado os chamados *flakes*, tal que o material britado era ao mesmo tempo compactado pela prensa no momento da compressão. Esses materiais aglomerados (*flakes*) tinham entre 20 e 25 mm de espessura.

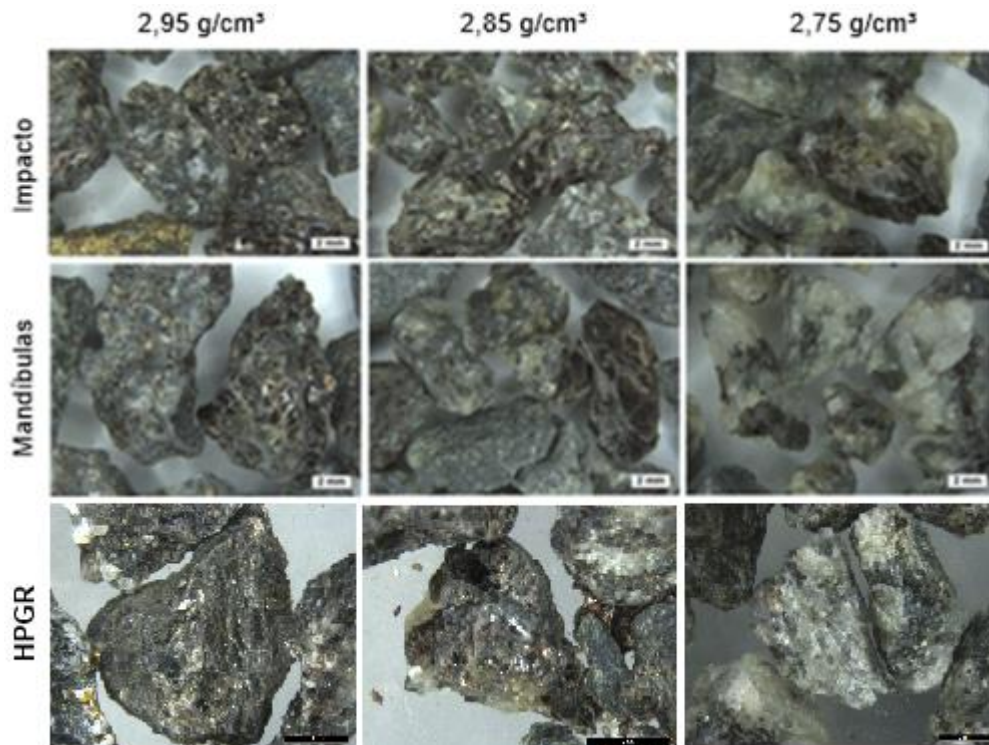
### 4.4 LÍQUIDO DENSO

Após a execução do ensaio de líquido denso com os produtos dos diferentes tipos de britagem, foram tiradas fotos no estereoscópio para análise qualitativa desses produtos na faixa granulométrica de -6,35+3,35 mm.

<sup>4</sup> As tabelas com as distribuições granulométricas se encontram nos apêndices I, J e K.

A Figura 19 ilustra a diferença da separação do material rico em mineral-minério nos materiais afundados de densidades maiores que 2,95, 2,85 e 2,75 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

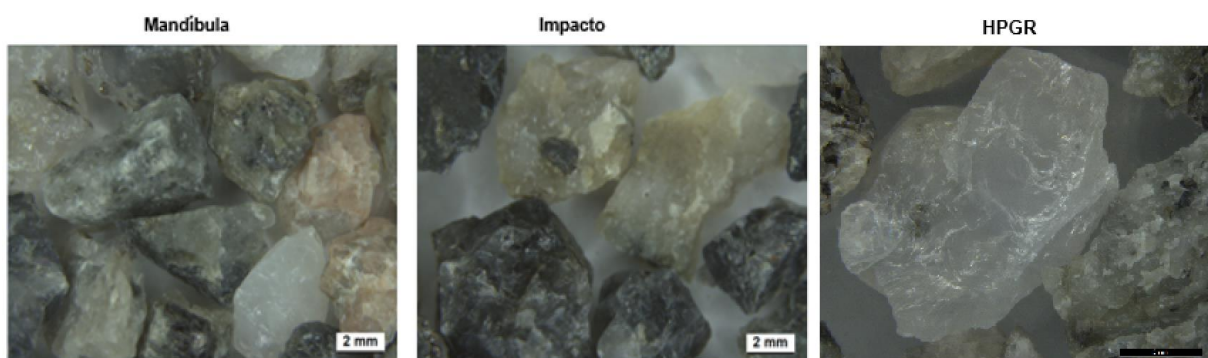
**Figura 19** - Imagens no estereoscópio dos produtos afundados em três densidades.



Fonte: Autoral, 2020.

A Figura 20 ilustra o material flutuado de densidade menor que 2,75 g/cm<sup>3</sup>, tal que é notável os minerais de ganga (quartzo e feldspato).

**Figura 20** - Imagens no estereoscópio dos materiais flutuados em líquido de 2,75 g/cm<sup>3</sup>.



Fonte: Autoral, 2020.



Para quantificação da recuperação metalúrgica do cobre, presente na calcopirita, foi realizado a análise química para os produtos afundados e flutuados em diferentes densidades das diferentes faixas granulométricas.

A Tabela 3 ilustra o resultado da análise química do ensaio 2 realizado no britador de mandíbulas.

**Tabela 3** - Resultado da análise química do ensaio 2 realizado no britador de mandíbulas.

| Fração (mm) | Produto          | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores |      | Distribuição ensaio (%) |       | Distribuição amostra (%) |      |
|-------------|------------------|-----------|-----------|---------|--------|------|-------------------------|-------|--------------------------|------|
|             |                  |           | Ensaio    | Amostra | Cu %   | Fe % | Cu %                    | Fe %  | Cu %                     | Fe % |
| -12.7+6.35  | d>2,95           | 1125,3    | 55,8      | 36,9    | 0,8    | 12,7 | 82,5                    | 75,5  | 54,8                     | 47,8 |
|             | 2,85<d<2,95      | 289,4     | 14,3      | 9,5     | 0,4    | 9,1  | 9,9                     | 13,9  | 6,6                      | 8,8  |
|             | 2,75<d<2,85      | 175,9     | 8,7       | 5,8     | 0,2    | 7,4  | 3,6                     | 6,9   | 2,4                      | 4,4  |
|             | d<2,75           | 427,2     | 21,2      | 14,0    | 0,1    | 1,6  | 4,0                     | 3,7   | 2,6                      | 2,3  |
|             | Total calculado* | 2017,7    | 100,0     | 66,1    | 0,5    | 9,4  | 100,0                   | 100,0 | 66,4                     | 63,4 |
| -6,35+3.35  | d>2,95           | 429,7     | 52,9      | 7,5     | 0,8    | 13,1 | 87,3                    | 75,6  | 11,8                     | 10,0 |
|             | 2,85<d<2,95      | 94,0      | 11,6      | 1,6     | 0,3    | 8,6  | 6,1                     | 10,8  | 0,8                      | 1,4  |
|             | 2,75<d<2,85      | 53,0      | 6,5       | 0,9     | 0,2    | 7,6  | 2,6                     | 5,4   | 0,3                      | 0,7  |
|             | d<2,75           | 235,1     | 29,0      | 4,1     | 0,1    | 2,6  | 4,0                     | 8,2   | 0,5                      | 1,1  |
|             | Total calculado* | 811,7     | 100,0     | 14,1    | 0,5    | 9,2  | 100,0                   | 100,0 | 13,5                     | 13,2 |
| -3.35+1,18  | d>2,95           | 263,8     | 52,0      | 4,2     | 0,8    | 15,5 | 88,3                    | 88,0  | 6,1                      | 6,7  |
|             | 2,85<d<2,95      | 50,8      | 10,0      | 0,8     | 0,3    | 0,5  | 5,5                     | 0,6   | 0,4                      | 0,0  |
|             | 2,75<d<2,85      | 30,0      | 5,9       | 0,5     | 0,2    | 7,7  | 2,6                     | 5,0   | 0,2                      | 0,4  |
|             | d<2,75           | 162,9     | 32,1      | 2,6     | 0,1    | 1,8  | 3,5                     | 6,5   | 0,2                      | 0,5  |
|             | Total calculado* | 507,6     | 100,0     | 8,2     | 0,5    | 9,1  | 100,0                   | 100,0 | 7,0                      | 7,6  |
| Total +1,18 | d>2,95           |           |           | 48,6    | 0,8    | 13,0 | 83,7                    | 67,7  | 72,7                     | 64,5 |
|             | 2,85<d<2,95      |           |           | 11,9    | 0,3    | 8,5  | 9,0                     | 10,8  | 7,8                      | 10,3 |
|             | 2,75<d<2,85      |           |           | 7,2     | 0,2    | 7,5  | 3,4                     | 5,7   | 2,9                      | 5,5  |
|             | d<2,75           |           |           | 20,7    | 0,1    | 1,9  | 3,9                     | 4,1   | 3,4                      | 3,9  |
|             | Total calculado  | 3.337,0   |           | 88,3    | 0,5    | 9,3  | 100,0                   | 88,3  | 86,8                     | 84,2 |
| -1,18       |                  |           |           | 11,7    | 0,6    | 10,5 |                         |       | 13,2                     |      |
| Cabeça      | Teor calculado   |           |           | 100,0   | 0,5    |      |                         |       | 100,0                    |      |
|             | Teor analisado   |           |           |         | 0,5    | 9,8  |                         |       |                          |      |

\* Calculado a partir da média ponderada de cada fração granulométrica

\*\* Valor da análise química da amostra cabeça.

Fonte: Autoral, 2021.

Os resultados indicam que existe um ótimo potencial para aplicação da pré-concentração no referido minério. Observa-se que é possível concentrar-se mais de 90 % do cobre em, aproximadamente, 60 % da massa, permitindo assim um descarte significativo de ganga com pouca perda do metal. Os resultados mostram ainda que as recuperações metalúrgicas nas diferentes densidades foram similares para as diferentes granulometrias analisadas. Por este motivo, os ensaios em líquido denso com os demais produtos dos demais tipos de britagem foram realizados apenas com a fração intermediária de -6,35+3,35 mm, de forma a reduzir os altos custos dos ensaios.

A Tabela 4 ilustra os resultados da análise química do produto do britador de impacto para o ensaio 3.

**Tabela 4** - Resultado da análise química do ensaio 3 do britador de impacto.

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores |      | Distribuição ensaio (%) |       |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|--------|------|-------------------------|-------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra | Cu %   | Fe % | Cu %                    | Fe %  |
| -6,35+3,35  | d>2,95            | 494,0     | 61,7      | 9,4     | 0,56   | 12,8 | 87,1                    | 80,9  |
|             | 2,85<d<2,95       | 66,6      | 8,3       | 1,3     | 0,30   | 8,8  | 6,3                     | 7,5   |
|             | 2,75<d<2,85       | 102,5     | 12,8      | 1,9     | 0,15   | 6,1  | 4,8                     | 8,0   |
|             | d<2,75            | 137,0     | 17,1      | 2,6     | 0,04   | 2,0  | 1,7                     | 3,5   |
|             | Total calculado*  | 800,1     | 100,0     | 15,2    | 0,40   | 9,8  | 100,0                   | 100,0 |
|             | Total analisado** | 801,0     |           |         |        |      |                         |       |

Fonte: Autoral, 2021.

A Tabela 5 ilustra o resultado do Ensaio 3 para faixa granulométrica intermediária realizado na prensa de rolos (HPGR).

**Tabela 5** - Resultado da análise química do ensaio 3 realizado no HPGR.

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores Cu % | Distribuição ensaio (%) Cu % | Distribuição amostra (%) Cu % |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra |             |                              |                               |
| -6,35+3.65  | d>2,95            | 345,3     | 45,2      | 4,2     | 1,1         | 63,6                         | 9,4                           |
|             | 2,85<d<2,95       | 118,4     | 15,5      | 1,4     | 0,9         | 17,9                         | 2,6                           |
|             | 2,75<d<2,85       | 120,5     | 15,8      | 1,5     | 0,6         | 12,1                         | 1,8                           |
|             | d<2,75            | 179,8     | 23,5      | 2,2     | 0,2         | 6,5                          | 1,0                           |
|             | Total calculado*  | 764,0     | 100,0     | 9,3     | 0,8         | 100,0                        | 14,8                          |
|             | Total analisado** | 800,5     |           |         |             |                              |                               |

Fonte: Autoral

A Tabela 6 ilustra os teores de cobre para os produtos dos três diferentes tipos de britagem na faixa intermediária de -6,35 +3,35 mm.

**Tabela 6** - Análises químicas para faixa granulométrica intermediária.

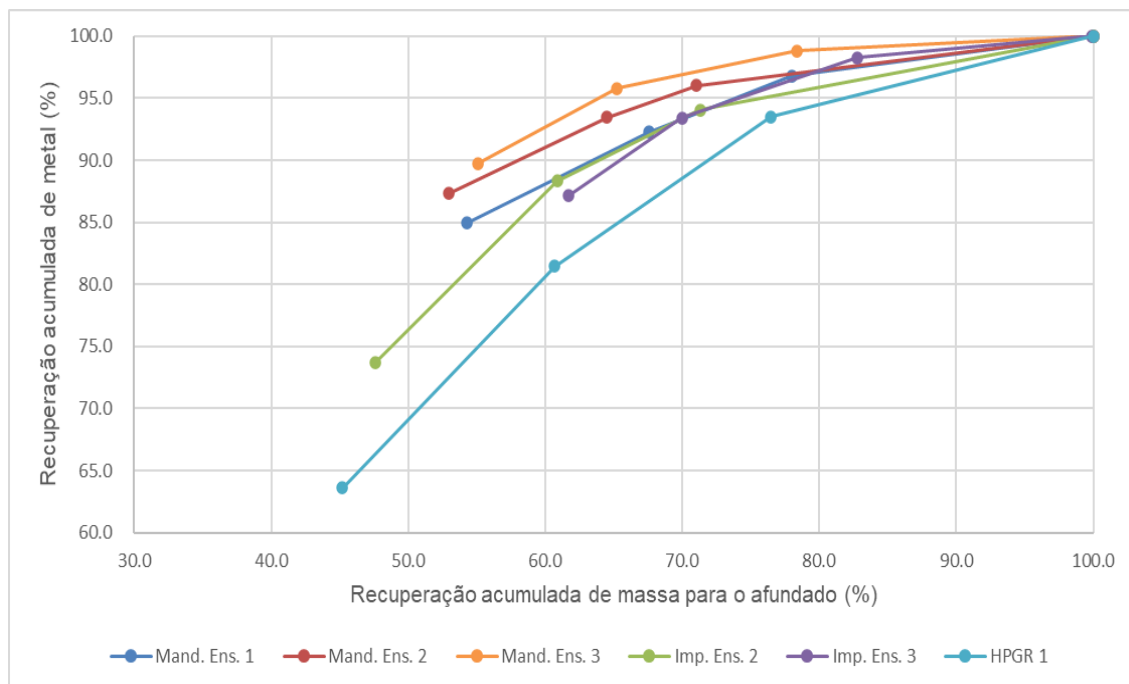
| Produto         | Mandíbula                |          |          | Impacto                  |          | HPGR                     |
|-----------------|--------------------------|----------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|
|                 | Ensaio 1                 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 2                 | Ensaio 3 | Ensaio 3                 |
|                 | Distrib. ensaio (%) Cu % |          |          | Distrib. ensaio (%) Cu % |          | Distrib. ensaio (%) Cu % |
| d>2,95          | 85,0                     | 87,3     | 89,7     | 73,7                     | 87,1     | 63,6                     |
| 2,85<d<2,95     | 7,3                      | 6,1      | 6,1      | 14,7                     | 6,3      | 17,9                     |
| 2,75<d<2,85     | 4,6                      | 2,6      | 3,0      | 5,7                      | 4,8      | 12,1                     |
| d<2,75          | 3,2                      | 4,0      | 1,2      | 5,9                      | 1,7      | 6,5                      |
| Total calculado | 100,0                    | 100,0    | 100,0    | 100,0                    | 100,0    | 100,0                    |

Fonte: Autoral, 2021.

Conforme resultados dos teores de cobre apresentados na Tabela 6, houve baixa quantidade de metal nos materiais flutuados de densidades menores que 2,75 e 2,85 g/cm<sup>3</sup>, tais materiais seriam o rejeito de um possível beneficiamento. Além disso, a britagem pelo britador de mandíbulas foi a que apresentou melhor liberação de minerais de calcopirita, visto que foi o britador que gerou produto com maior porcentagem de cobre nos afundados de densidades maiores que 2,85 e 2,95 g/cm<sup>3</sup>.

A recuperação metalúrgica acumulada de cobre pela recuperação mássica acumulada, conforme resultados das análises químicas dos produtos dos diferentes ensaios de britagem, é ilustrada na Figura 21.

**Figura 21** - Recuperação em massa acumulada vs recuperação de metal acumulada.



Fonte: Autoral, 2021.

Conforme gráfico apresentado na Figura 21, comprova-se a viabilidade da concentração primária para o minério de cobre. Para todos os produtos dos diferentes tipos de britagem a recuperação metalúrgica é maior que 80% para os afundados de densidades maiores que 2,85 e 2,95 g/cm<sup>3</sup>.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou comparar diferentes tipos de britagem em circuitos com pré-concentração para minério de cobre. Para os tipos de britagem utilizados (Mandíbulas, Impacto, HPGR) propõe-se a utilização dos britadores de mandíbulas ou de impacto para um possível circuito de beneficiamento com pré-concentração, visto que esses equipamentos apresentaram boa cominuição seletiva e a maior parte do material britado seria pré-concentrada. Os materiais flutuados, menos denso que 2,85 e 2,95 g/cm<sup>3</sup>, correspondem a, aproximadamente, 30% de toda massa com 6 % do metal em média, e seriam o rejeito do possível beneficiamento.

A britagem pelo HPGR não seria interessante para circuito de beneficiamento com a pré-concentração proposta, pois quase 60% do material britado ficou abaixo de 1,18 mm e que iria direto para o moinho, isto é, apenas uma pequena fração do minério seria pré-concentrada. Além disso, a cominuição seletiva não foi satisfatório, pois quase 40% do material pré-concentrado seria rejeito com pouco mais de 18% do metal de interesse.

Para a britagem por impacto, como a velocidade tangencial do rotor do britador esteve muito abaixo dos valores industriais, houve perda significativa de potencial de cominuição, isto é, faltou energia cinética suficiente às partículas, o que influenciou negativamente na liberação mineral.

No presente trabalho a britagem pelo britador de mandíbulas mostrou-se mais viável para pré-concentração, visto que teve melhor cominuição seletiva e liberação dos minerais de calcopirita como pôde ser visto pelos resultados de análise química que mostraram maior recuperação metalúrgica de cobre.

## REFERÊNCIAS

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo, São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1987, cap.2, p. 14.

BORG, G.; SCHARFE, O.; KAMRADT, A. Breaking down comminution barriers- new dimensions of particle size reduction and liberation by VeRo Liberator. **International Comminution and Classification Congress**, San Luis Potosí, p. 277-289, ago. 2015.

BRIAN, K.; HERMAN, V.; WHALEN, D. **A closer look at increasing HPGR efficiency via reductions in edge effect**. 2015. Disponível em: <<http://www.ceecthfuture.org/wp-content/uploads/2015/03/HRC-Edge-Effect-SME-2015-FINAL.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2005.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minério**: Britagem, peneiramento e moagem. 2. ed. Brasil: Signus, 2003. 129 p. v. 3.

ENERGY AND DENSIFICATION SYSTEMS LTD (África do sul). EDS Multishaft Mill. Johannesburg, 2014. Disponível em: <<https://eds.za.com/multishaft-mill/the-mill>>. Acesso em: 11 jun. 2021.

ERO COPPER. **Ero Copper** announces excellent results from comprehensive ore sorting trial campaign. Vancouver:British Columbia,2020. Disponível em <<https://www.ero-copper.com/news/2020/ero-copper-announces-excellent-results-from-comprehensive-ore-sorting-trial-campaign/>>

FELIPE, R. A. S. **Modelagem e simulação do circuito de britagem de córrego do sítio I com desenvolvimento de modelo para moinhos de martelos**. 2019. 129 p. Tese (Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

FLSmidth A/S. **HPGR – High Pressure Grinding Roll for the minerals industry**. Midvale, UT., 2014. Disponível em: [http://www.flsmidth.com/~media/PDF%20Files/Grinding/FLSmidth\\_HPGR\\_brochure\\_2014\\_email.ashx](http://www.flsmidth.com/~media/PDF%20Files/Grinding/FLSmidth_HPGR_brochure_2014_email.ashx). Acesso em: 27 jun. 2015.

GARCIA, P. M. P. **Metalogênese dos depósitos cupríferos de caraíba, surubim, vermelhos e sussuarana, Vale do curaçá, Bahia, Brasil**. Orientador: Prof. Dr. AROLDI MISI. 2013. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Geologia) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2013.

HESSE, Max; POPOV, Oleg; LIEBERWIRTH, Holger. Increasing efficiency by selective comminution. **Minerals Engineering**, Freiberg, p. 1-30, 1 Nov. 2017.

KAWATRA, S.; HASELHUHN, H. Sampling Practice and Considerations. *In*: DUNNE, R. C. **SME Mineral processing & Extractive Metallurgy Handbook**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2021. cap. 1.8, p. 147-160.

KELLY E.G., SPOTTISWOOD D.J. **Introduction to mineral processing**. John Wiley

& Sons; 1982.

KING, R.P., **The Prediction of Mineral Liberation from Mineralogical Texture**. Proc. XIV int. Mineral Processing Congress. Toronto, VIII:11 (1982).

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/476>. Acesso em: 30 ago. 2021.

METSO, **Manual de britagem**. 6. ed. Sorocaba: Grafilínea, 2005. 481 p.

MORGAN, P. The impact of a crushing plant upgrade and dms pre-concentration on the processing capability of the Tati Nickel Concentrator. In: BASE METALS CONFERENCE, 2009, Kasane. **Proceedings...** Joanesburgo: SAIMM, 2009. P. 231-244.

MORLEY, C. **High pressure grinding rolls**: a technology review. In: KAWATRA, S. K. (Ed.). *Advances in comminution*, Littleton: SME, 2006 p. 15-39. Disponível em: <[https://www.academia.edu/download/47638087/Advances\\_in\\_comminution\\_-\\_kowatra\\_1.pdf#page=19](https://www.academia.edu/download/47638087/Advances_in_comminution_-_kowatra_1.pdf#page=19)>.

NORGATE, T.; HAQUE, N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. **Journal of Cleaner Production**, Victoria, Austrália, p. 1-11, 16 jun. 2010.

OZCAN, O.; BENZER, H. Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation. **Minerals Engineering**, v. 49, 2013.

SOUSA, R.; FUTURO, A.; FIÚZA, A. Pre-concentration at crushing sizes for low-grade ores processing – Ore macro texture characterization and liberation assessment. **Minerals Engineering**, São Mamede de Infesta, v. 147, dez. 2019.

SIRKECI, A. A.; GUL, A.; BULUT, G.; OZNER, M.; GUVEN, O.; PEREK, K. T. Effect of crushing type on the efficiency of flowing film separation. **Journals System**, [S. l.], p. 601-608, 2018.

TEIXEIRA, J. B. G. *et al.*. Depósitos de Cobre da região do Vale do Rio Curaçá Bahia. In: BRITO, R. S. C. de; SILVA, M. G. da; KUYUMIJAN, R. M.. **Modelos de Depósitos de Cobre no Brasil e sua resposta ao intemperismo**. São, CPRM, 2010.

WANG, C. **Development of a Comprehensive HPGR Model Using Large Experimental Data Sets**. 2021. Tese (Pós-Doutorado) - Faculty of Graduate and PostDoctoral Studies, [S. l.], 2021.

## ANEXOS

ANEXO A – Análise química da amostra do técnico realizada na Mineração Caraíba S/A.

| RESULTADOS USP |                 |                    |          |          |
|----------------|-----------------|--------------------|----------|----------|
| Código         | Amostra Matriz  | Amostra Secundária | Teor Cu% | Teor Fe% |
| 210101 460     | MEIO DENSO 2,75 | FLUT + 3,35 MM     | 0,05     | 1,24     |
| 210101 461     | MEIO DENSO 2,75 | FLUT + 6,35 MM     | 0,06     | 1,58     |
| 210101 462     | MEIO DENSO 2,75 | FLUT + 1,18 MM     | 0,05     | 1,41     |
| 210101 463     | MEIO DENSO 2,75 | AFUN + 1,18 MM     | 0,14     | 5,62     |
| 210101 464     | MEIO DENSO 2,75 | AFUN + 3,35 MM     | 0,15     | 5,11     |
| 210101 465     | MEIO DENSO 2,75 | AFUN + 6,35 MM     | 0,13     | 5,26     |
| 210101 466     | MEIO DENSO 2,85 | AFUN + 1,18MM      | 0,21     | 7,79     |
| 210101 467     | MEIO DENSO 2,85 | AFUN + 3,35MM      | 0,19     | 7,29     |
| 210101 468     | MEIO DENSO 2,85 | AFUN + 6,35MM      | 0,18     | 7,12     |
| 210101 469     | MEIO DENSO 2,95 | AFUN + 6,35MM      | 0,38     | 10,42    |
| 210101 470     | MEIO DENSO 2,95 | AFUN + 1,18 MM     | 0,68     | 10,98    |
| 210101 471     | MEIO DENSO 2,95 | AFUN + 3,35MM      | 0,54     | 10,46    |
| 210101 472     | ALIMENTAÇÃO     | AQ                 | 0,11     | 5,57     |



ANEXO B – Análise química da amostra dos alunos realizada na Mineração Caraíba S/A.

| <b>Código Processo</b> | <b>Código</b> | <b>Cu</b>   | <b>Fe</b> | <b>S</b> |
|------------------------|---------------|-------------|-----------|----------|
| Mandíbula 01           | 210303 001    | <b>0.2</b>  | 7.71      | 0.05     |
| Mandíbula 02           | 210303 002    | <b>0.25</b> | 0.52      | 0.04     |
| Mandíbula 03           | 210303 003    | <b>0.77</b> | 15.45     | 0.53     |
| Mandíbula 04           | 210303 004    | <b>0.05</b> | 1.84      | 0.05     |
| Mandíbula 05           | 210303 005    | <b>0.2</b>  | 7.57      | 0.05     |
| Mandíbula 06           | 210303 006    | <b>0.27</b> | 8.57      | 0.05     |
| Mandíbula 07           | 210303 007    | <b>0.84</b> | 13.1      | 0.71     |
| Mandíbula 08           | 210303 008    | <b>0.07</b> | 2.59      | 0.02     |
| Mandíbula 09           | 210303 009    | <b>0.22</b> | 7.44      | 0.04     |
| Mandíbula 10           | 210303 010    | <b>0.37</b> | 9.12      | 0.03     |
| Mandíbula 11           | 210303 011    | <b>0.79</b> | 12.69     | 0.8      |
| Mandíbula 12           | 210303 012    | <b>0.1</b>  | 1.64      | 0.03     |
| Mandíbula 13           | 210303 013    | <b>0.6</b>  | 10.48     | 0.44     |
| Cabeça                 | 210303 014    | <b>0.49</b> | 9.78      | 0.37     |
| Impacto 01             | 210303 015    | <b>0.22</b> | 6.52      | 0.03     |
| Impacto 02             | 210303 016    | <b>0.29</b> | 10.53     | 0.05     |
| Impacto 03             | 210303 017    | <b>3.99</b> | 14.07     | 3.54     |
| Impacto 04             | 210303 018    | <b>0.06</b> | 1.87      | 0.03     |
| Impacto 05             | 210303 019    | <b>0.28</b> | 4.85      | 0.04     |
| Impacto 06             | 210303 020    | <b>0.34</b> | 8.56      | 0.07     |
| Impacto 07             | 210303 021    | <b>3.51</b> | 12.74     | 2.9      |
| Impacto 08             | 210303 022    | <b>0.12</b> | 2.09      | 0.02     |
| Impacto 09             | 210303 023    | <b>0.23</b> | 6.29      | 0.05     |
| Impacto 10             | 210303 024    | <b>0.32</b> | 8.24      | 0.04     |
| Impacto 11             | 210303 025    | <b>2.89</b> | 10.41     | 1.9      |
| Impacto 12             | 210303 026    | <b>0.05</b> | 1.44      | 0.02     |
| Impacto 13             | 210303 027    | <b>2.93</b> | 11.31     | 2.63     |
| Impacto 14             | 210303 028    | <b>0.73</b> | 7.16      | 0.36     |

ANEXO C – Análise química da amostra do técnico realizada na mina de Salobo da Vale S/A.

| Resultados quimicos amostras Mauricio Berguiman Projeto de IC |             |          |         |         |        |          |          |        |
|---|-------------|----------|---------|---------|--------|----------|----------|--------|
| Data  | Id Amostras | Teor CuT | Teor Au | Teor Ag | Teor C | Teor CL  | Teor F   | Teor U |
| 14/07/2021  | Salobo 1    | 0.449    | 0.131   | 21.95   | 0.063  | 2938.405 | 3160.111 | 0.476  |
| 14/07/2021  | salobo 2    | 0.323    | 0.051   | 6.16    | 0.144  | 3010.631 | 3112.206 | 0.654  |
| 14/07/2021  | salobo 3    | 0.161    | 0.011   | 4.85    | 0.142  | 2987.922 | 2912.883 | 0.675  |
| 14/07/2021  | salobo 4    | 0.063    | 0.011   | 2.46    | 0.146  | 2955.588 | 2543.058 | 0.278  |
| 14/07/2021  | salobo 5    | 0.794    | 0.068   | 12.79   | 0.108  | 2963.961 | 2928.750 | 0.420  |
| 14/07/2021  | salobo 6    | 0.384    | 0.165   | 11.00   | 0.194  | 2993.253 | 3087.427 | 0.338  |
| 14/07/2021  | salobo 7    | 0.294    | 0.039   | 11.69   | 0.095  | 2969.474 | 2988.178 | 0.540  |
| 14/07/2021  | salobo 8    | 0.304    | 0.023   | 9.51    | 0.082  | 2977.683 | 2999.175 | 0.438  |
| 14/07/2021  | salobo 9    | 0.299    | 0.040   | 11.69   | 0.087  | 2971.724 | 2988.994 | 0.357  |
| 14/07/2021  | salobo 10   | 0.359    | 0.074   | 13.70   | 0.065  | 2965.203 | 3075.865 | 0.317  |
| 14/07/2021  | salobo 11   | 0.501    | 0.027   | 12.80   | 0.077  | 2968.510 | 3054.062 | 0.576  |
| 14/07/2021  | salobo 12   | 2.503    | 0.023   | 46.86   | 0.210  | 2834.961 | 3014.087 | 0.297  |
| 14/07/2021  | salobo 13   | 2.462    | 0.038   | 45.11   | 0.060  | 2863.640 | 3090.004 | 0.757  |
| 14/07/2021  | salobo 14   | 0.336    | 0.011   | 5.01    | 0.079  | 2997.293 | 3057.655 | 0.437  |
| 14/07/2021  | salobo 15   | 0.247    | 0.011   | 4.72    | 0.146  | 2987.574 | 2919.728 | 0.219  |
| 14/07/2021  | salobo 16   | 0.091    | 0.011   | 4.16    | 0.112  | 2955.465 | 2577.323 | 0.898  |
| 14/07/2021  | salobo 17   | 4.171    | 0.041   | 57.06   | 0.071  | 2794.252 | 3009.418 | 0.698  |
| 14/07/2021  | salobo 29   | 0.226    |         | 6.42    | 0.163  | 2976.379 | 2941.070 | 0.714  |
| 14/07/2021  | salobo 20   | 0.055    |         | 3.67    | 0.110  | 2955.944 | 2569.145 | 0.676  |
| 14/07/2021  | salobo 21   | 3.812    | 0.027   | 68.91   | 0.064  | 2757.977 | 2932.109 | 0.560  |
| 14/07/2021  | salobo 25   | 0.624    | 0.076   | 14.51   | 0.097  | 2973.594 | 3064.838 | 0.657  |
| 14/07/2021  | salobo 26   | 0.718    | 0.023   | 22.39   | 0.084  | 2943.227 | 3159.992 | 0.558  |
| 14/07/2021  | salobo 27   | 0.195    | 0.011   | 4.45    | 0.103  | 2993.536 | 3052.695 | 0.456  |
| 14/07/2021  | salobo 28   | 0.270    | 0.011   | 5.83    | 0.112  | 2986.083 | 2960.314 | 0.753  |
| 14/07/2021  | salobo 29   | 0.088    | 0.011   | 5.13    | 0.089  | 2962.954 | 2629.705 | 0.598  |
| 14/07/2021  | salobo 30   | 0.758    | 0.043   | 16.83   | 0.066  | 2960.388 | 3204.444 | 0.640  |
| 14/07/2021  | salobo 33   | 0.054    | 0.011   | 2.85    | 0.080  | 2960.815 | 2623.276 | 0.499  |
| 14/07/2021  | salobo 34   | 0.786    | 0.069   | 17.71   | 0.053  | 2955.100 | 3215.585 | 0.499  |
| 14/07/2021  | salobo 37   | 0.055    | 0.011   | 3.31    | 0.077  | 2958.675 | 2615.759 | 0.440  |
| 14/07/2021  | salobo 38   | 0.593    | 0.011   | 17.86   | 0.078  | 2956.223 | 3011.814 | 0.280  |

ANEXO D – Análise química realizada na mina de Salobo da Vale S/A da amostra britada no HPGR.

| Resultados quimico amostras hpgr |             |          |         |         |        |          |          |        |        |
|----------------------------------|-------------|----------|---------|---------|--------|----------|----------|--------|--------|
| Data                             | Id Amostras | Teor CuT | Teor Au | Teor Ag | Teor C | Teor CL  | Teor F   | Teor U | Teor S |
| 25/08/2021                       | ALM 01      | 1.116    | 0.048   | 15.15   | 0.082  | 2957.611 | 3238.731 | 0.377  | 0.622  |
| 25/08/2021                       | ALM 02      | 0.917    | 0.066   | 8.616   | 0.112  | 2982.725 | 3052.719 | 0.439  | 0.388  |
| 25/08/2021                       | ALM 03      | 0.608    | 0.037   | 6.875   | 0.13   | 2977.611 | 2948.533 | 0.396  | 0.16   |
| 25/08/2021                       | ALM 04      | 0.219    | 0.1     | 3.052   | 0.119  | 2959.865 | 2636.251 | 0.317  | 0.077  |
| 25/08/2021                       | ALM 05      | 0.986    | 0.076   | 11.893  | 0.128  | 2973.706 | 3031.654 | 0.397  | 0.514  |
| 25/08/2021                       | ALM 06      | 0.667    | 0.074   | 9.576   | 0.099  | 2971.085 | 3027.215 | 0.456  | 0.382  |
| 25/08/2021                       | ALM 07      | 0.963    | 0.074   | 9.576   | 0.099  | 2971.085 | 3027.215 | 0.456  | 0.382  |
| 25/08/2021                       | ALM 08      | 0.969    | 0.031   | 11.57   | 0.096  | 2965.136 | 2959.135 | 0.297  | 0.441  |

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Peneiramento do ensaio 1 de britagem por mandíbula

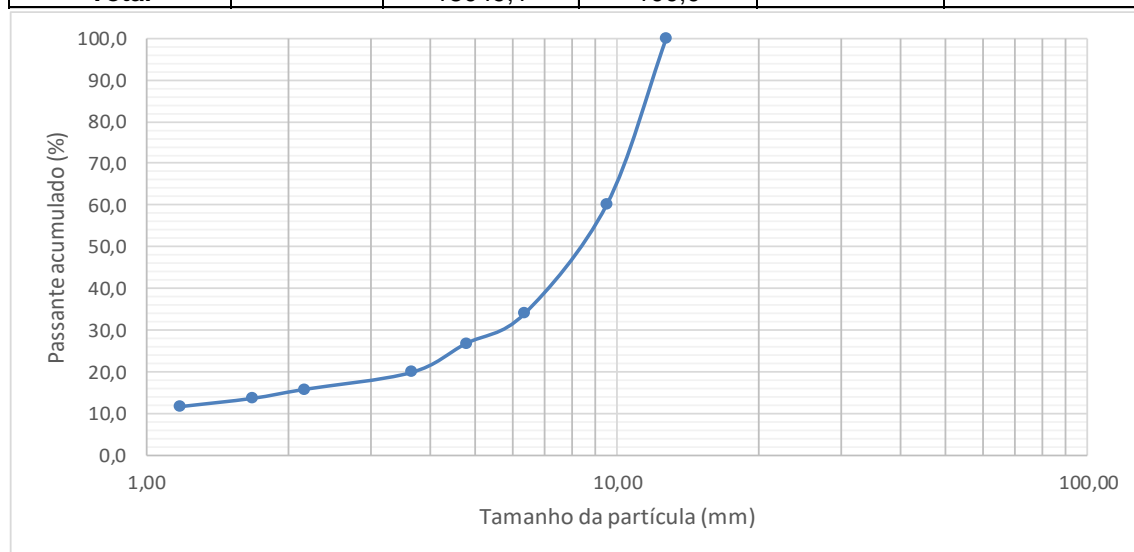


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda  |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 20/01/2021                               |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | A úmido, manual.  |
| Peso inicial (g):     | -   |
| Peso final (g):       | 18049,1   |
| Perdas (%):           | -   |
| Observações:          | Ensaio 1 - A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm em britador de mandíbulas                    |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 7193,0          | 39,9            | 60,1                   | 39,9                 |
| -             | 6,35          | 4730,8          | 26,2            | 33,9                   | 66,1                 |
| 4             | 4,77          | 1290,1          | 7,1             | 26,8                   | 73,2                 |
| 6             | 3,65          | 1253,7          | 6,9             | 19,8                   | 80,2                 |
| 9             | 2,16          | 731,9           | 4,1             | 15,8                   | 84,2                 |
| 10            | 1,68          | 385,3           | 2,1             | 13,7                   | 86,3                 |
| 14            | 1,18          | 359,4           | 2,0             | 11,7                   | 88,3                 |
|               |               | 2104,9          | 11,7            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 18049,1         | 100,0           |                        |                      |



## APÊNDICE B - Peneiramento do ensaio 2 de britagem por mandíbula

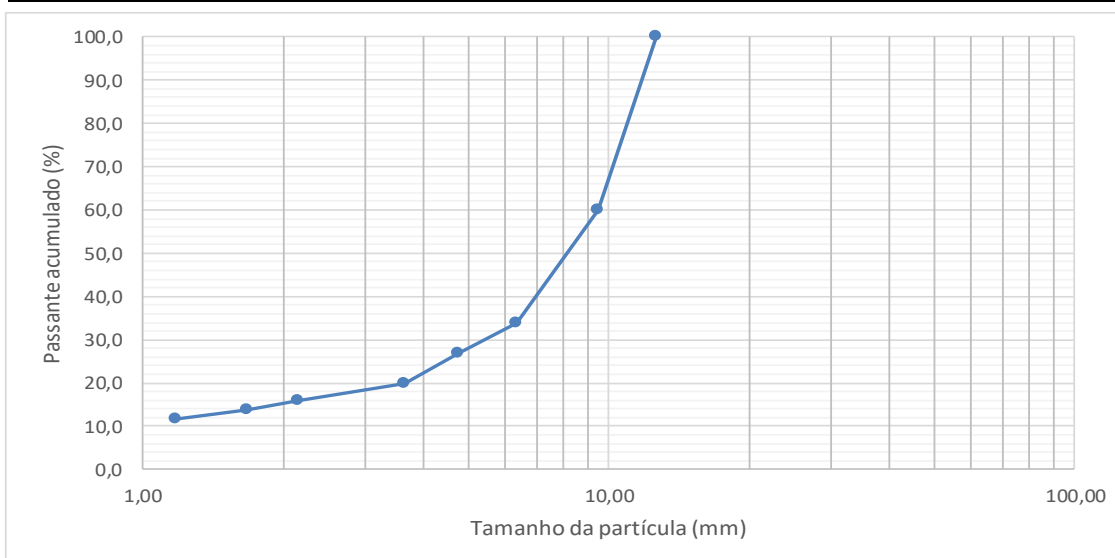


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda  |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 20/01/2021                               |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | A úmido, manual.  |
| Peso inicial (g):     | -   |
| Peso final (g):       | 18049,1   |
| Perdas (%)            | -   |
| Observações:          | Ensaio 2 - A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm em britador de mandíbulas                    |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 7193,0          | 39,9            | 60,1                   | 39,9                 |
| -             | 6,35          | 4730,8          | 26,2            | 33,9                   | 66,1                 |
| 4             | 4,77          | 1290,1          | 7,1             | 26,8                   | 73,2                 |
| 6             | 3,65          | 1253,7          | 6,9             | 19,8                   | 80,2                 |
| 9             | 2,16          | 731,9           | 4,1             | 15,8                   | 84,2                 |
| 10            | 1,68          | 385,3           | 2,1             | 13,7                   | 86,3                 |
| 14            | 1,18          | 359,4           | 2,0             | 11,7                   | 88,3                 |
|               |               | 2104,9          | 11,7            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 18049,1         | 100,0           |                        |                      |



## APÊNDICE C - Peneiramento do ensaio 3 de britagem por mandíbula

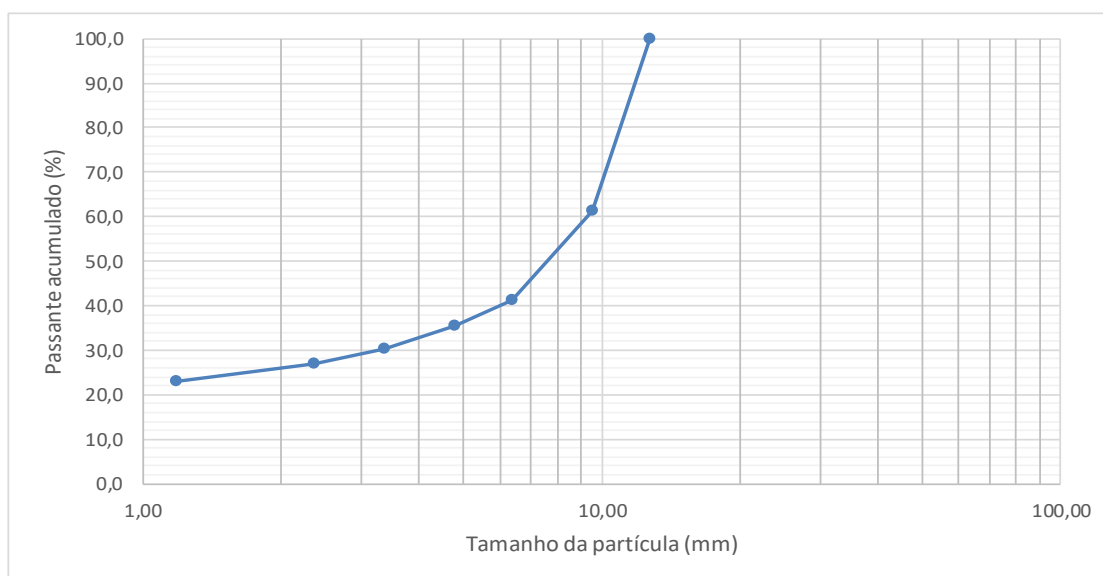


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |  |
|-----------------------|--|
| Responsável:          | Marcos Paulo Holanda   |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 01/10/2021            |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em             |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita  |
| Tipo de peneiramento: | A úmido, manual.   |
| Peso inicial (g):     | -  |
| Peso final (g):       | 9161,8   |
| Perdas (%)            | -  |
| Observações:          | Ensaio 3 - A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm em britador de mandíbulas |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 3549,6          | 38,7            | 61,3                   | 38,7                 |
| -             | 6,35          | 1828,9          | 20,0            | 41,3                   | 58,7                 |
| 4             | 4,77          | 537,1           | 5,9             | 35,4                   | 64,6                 |
| 6             | 3,35          | 485,8           | 5,3             | 30,1                   | 69,9                 |
| 9             | 2,36          | 294,8           | 3,2             | 26,9                   | 73,1                 |
| 14            | 1,18          | 360,7           | 3,9             | 23,0                   | 77,0                 |
|               |               | 2104,9          | 23,0            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 9161,8          | 100,0           |                        |                      |



# APÊNDICE D - Peneiramento do ensaio 1a de britagem por impacto.

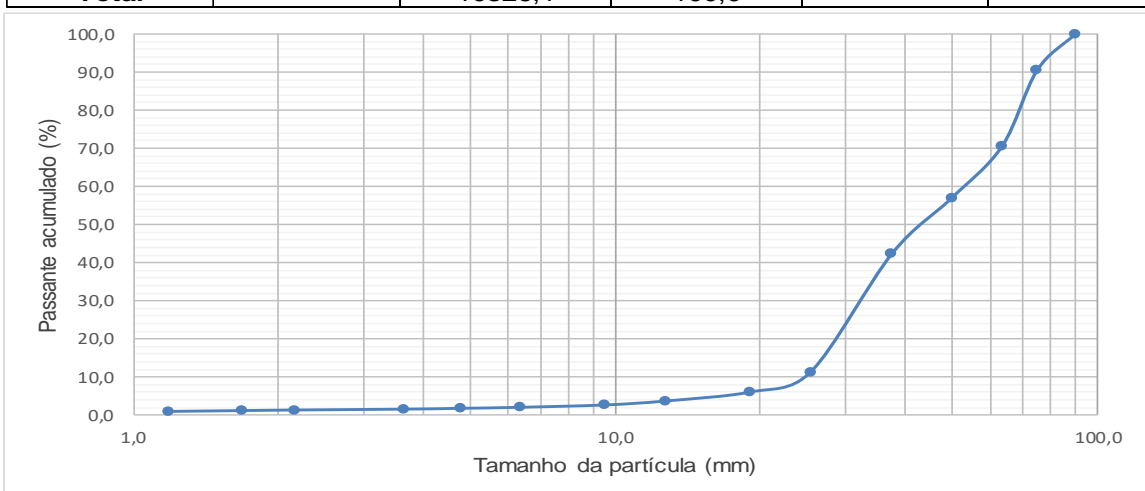


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda  |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 20/01/2021                               |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | Acima de 12,7 mm a seco, manual. Abaixo de 12,7 mm a úmido, manual.                             |
| Peso inicial (g):     | 10540,0   |
| Peso final (g):       | 10326,1   |
| Perdas (%)            | 2,0   |
| Observações:          | Ensaio 1a - A amostra foi britada abaixo de 75 mm em britador de impacto (300 RPM).             |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
|               | 90,0          | 0,0             | 0               | 100,0                  |                      |
| -             | 75,0          | 982,7           | 9,5             | 90,5                   | 9,5                  |
| -             | 63,5          | 2048,0          | 19,8            | 70,7                   | 29,3                 |
| -             | 50,0          | 1396,0          | 13,5            | 57,1                   | 42,9                 |
| -             | 37,5          | 1515,3          | 14,7            | 42,5                   | 57,5                 |
| -             | 25,4          | 3210,4          | 31,1            | 11,4                   | 88,6                 |
| -             | 19,1          | 539,4           | 5,2             | 6,1                    | 93,9                 |
| -             | 12,7          | 246,2           | 2,4             | 3,8                    | 96,2                 |
| -             | 9,5           | 107,5           | 1,0             | 2,7                    | 97,3                 |
| -             | 6,4           | 63,3            | 0,6             | 2,1                    | 97,9                 |
| 4             | 4,8           | 27,4            | 0,3             | 1,8                    | 98,2                 |
| 6             | 3,7           | 22,4            | 0,2             | 1,6                    | 98,4                 |
| 9             | 2,2           | 23,3            | 0,2             | 1,4                    | 98,6                 |
| 10            | 1,7           | 16,1            | 0,2             | 1,2                    | 98,8                 |
| 14            | 1,2           | 22,5            | 0,2             | 1,0                    | 99,0                 |
|               |               | 105,6           | 1,0             | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 10326,1         | 100,0           |                        |                      |



APÊNDICE E - Peneiramento do ensaio 1b de britagem por impacto.

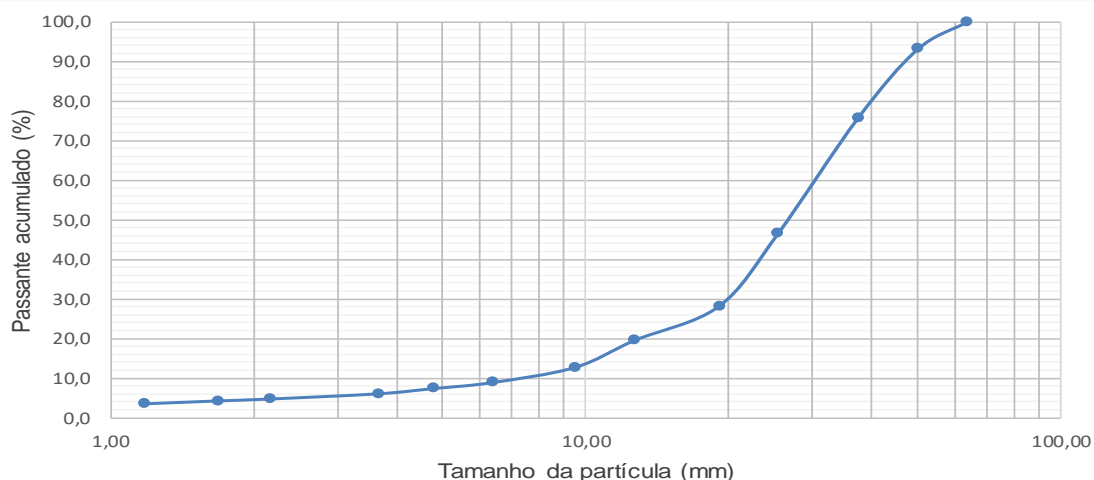


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda  |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 20/01/2021                               |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | Acima de 12,7 mm a seco, manual. Abaixo de 12,7 mm a úmido, manual.                             |
| Peso inicial (g):     | 10760,0   |
| Peso final (g):       | 10253,2   |
| Perdas (%):           | 4,7   |
| Observações:          | Ensaio 1b- A amostra foi britada abaixo de 50 mm em britador de impacto (600 RPM).              |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 63,50         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 50,00         | 709,3           | 6,9             | 93,1                   | 6,9                  |
| -             | 37,50         | 1777,2          | 17,3            | 75,7                   | 24,3                 |
| -             | 25,40         | 3008,6          | 29,3            | 46,4                   | 53,6                 |
| -             | 19,10         | 1872,9          | 18,3            | 28,1                   | 71,9                 |
| -             | 12,70         | 880,6           | 8,6             | 19,6                   | 80,4                 |
| -             | 9,50          | 703,2           | 6,9             | 12,7                   | 87,3                 |
| -             | 6,35          | 394,1           | 3,8             | 8,8                    | 91,2                 |
| 4             | 4,77          | 154,3           | 1,5             | 7,3                    | 92,7                 |
| 6             | 3,65          | 135,4           | 1,3             | 6,0                    | 94,0                 |
| 9             | 2,16          | 134,0           | 1,3             | 4,7                    | 95,3                 |
| 10            | 1,68          | 49,6            | 0,5             | 4,2                    | 95,8                 |
| 14            | 1,18          | 74,2            | 0,7             | 3,5                    | 96,5                 |
|               |               | 359,8           | 3,5             | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 10253,2         | 100,0           |                        |                      |





APÊNDICE F - Peneiramento do ensaio 1c de britagem por impacto.

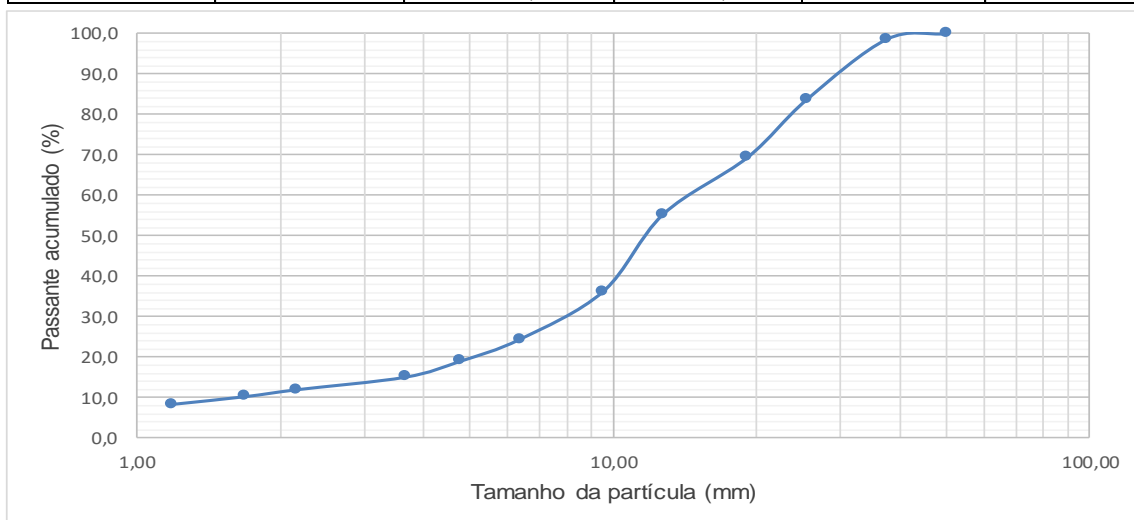


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda  |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 20/01/2021                               |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | Acima de 12,7 mm a seco, manual. Abaixo de 12,7 mm a úmido, manual.                             |
| Peso inicial (g):     | 10580,0   |
| Peso final (g):       | 9438,3  |
| Perdas (%)            | 10,8  |
| Observações:          | Ensaio 1c - A amostra foi britada abaixo de 50 mm em britador de impacto (900 RPM).             |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 50,00         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 37,50         | 126,2           | 1,3             | 98,7                   | 1,3                  |
| -             | 25,40         | 1415,9          | 15,0            | 83,7                   | 16,3                 |
| -             | 19,10         | 1341,8          | 14,2            | 69,4                   | 30,6                 |
| -             | 12,70         | 1327,9          | 14,1            | 55,4                   | 44,6                 |
| -             | 9,50          | 1801,6          | 19,1            | 36,3                   | 63,7                 |
| -             | 6,35          | 1115,0          | 11,8            | 24,5                   | 75,5                 |
| 4             | 4,77          | 507,6           | 5,4             | 19,1                   | 80,9                 |
| 6             | 3,65          | 374,2           | 4,0             | 15,1                   | 84,9                 |
| 9             | 2,16          | 292,2           | 3,1             | 12,0                   | 88,0                 |
| 10            | 1,68          | 162,1           | 1,7             | 10,3                   | 89,7                 |
| 14            | 1,18          | 180,8           | 1,9             | 8,4                    | 91,6                 |
|               |               | 793,0           | 8,4             | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 9438,3          | 100,0           |                        |                      |



APÊNDICE G - Peneiramento do ensaio 2 de britagem por impacto.

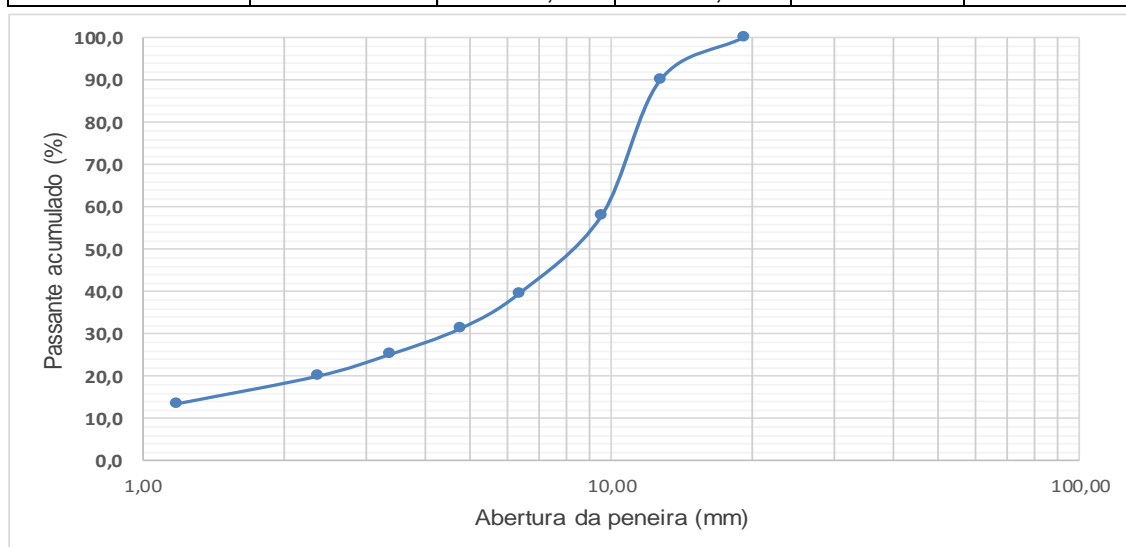


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa   |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 13/05/2021   |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em  |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | Peniramento a úmido, manual   |
| Peso inicial (g):     | 7435,6  |
| Peso final (g):       | 8228,0  |
| Perdas (%):           | -10,7   |
| Observações:          | Ensaio 2 - Ocorreu a perda de material (760 g) devido ao equipamento ter ejetado para fora do britador de impacto. Esse material não chegou a ser britado |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 19,10         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  |                      |
| -             | 12,70         | 822,5           | 10,0            | 90,0                   | 10,0                 |
| -             | 9,50          | 2645,7          | 32,2            | 57,8                   | 42,2                 |
| -             | 6,35          | 1500,5          | 18,2            | 39,6                   | 60,4                 |
| 4             | 4,75          | 684,4           | 8,3             | 31,3                   | 68,7                 |
| 6             | 3,35          | 505,7           | 6,1             | 25,1                   | 74,9                 |
| 9             | 2,36          | 415,9           | 5,1             | 20,1                   | 79,9                 |
| 14            | 1,18          | 537,7           | 6,5             | 13,6                   | 86,4                 |
|               |               | 1115,6          | 13,6            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 8228,0          | 100,0           |                        |                      |



APÊNDICE H - Peneiramento do ensaio 3 de britagem por impacto.

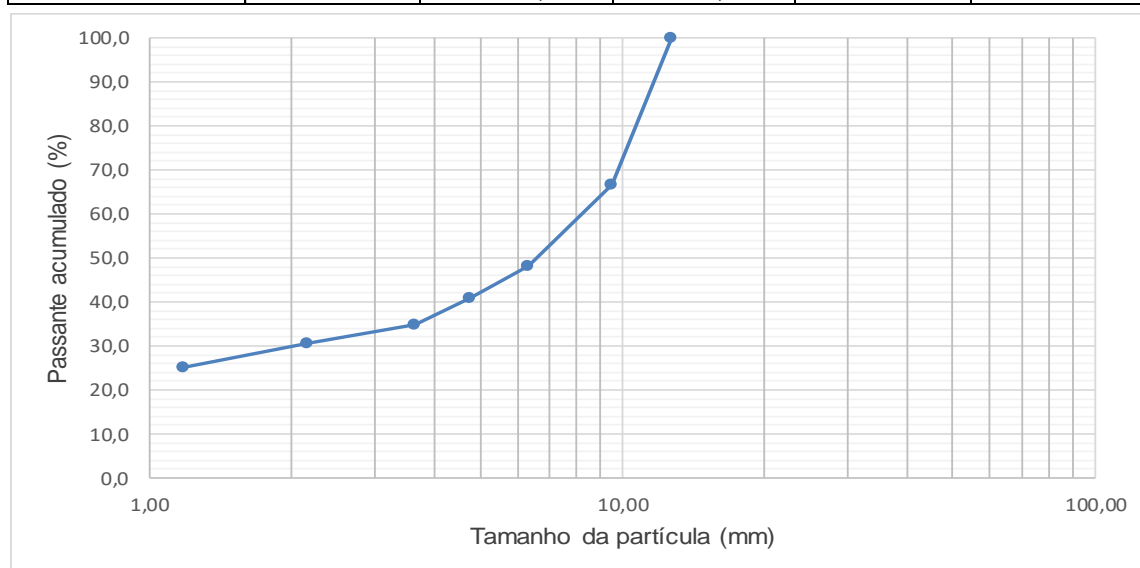


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |   |
|-----------------------|---|
| Responsável:          | Marcos Paulo Holanda  |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 01/10/2021                               |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com pré-concentração |
| Amostra:              | Caraíba - Calcopirita   |
| Tipo de peneiramento: | A úmido, manual.  |
| Peso inicial (g):     | -   |
| Peso final (g):       | 8374,4  |
| Perdas (%)            | -   |
| Observações:          | Ensaio 3 - A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm em britador de impacto                       |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 2790,7          | 33,3            | 66,7                   | 33,3                 |
| -             | 6,35          | 1545,6          | 18,5            | 48,2                   | 51,8                 |
| 4             | 4,77          | 604,4           | 7,2             | 41,0                   | 59,0                 |
| 6             | 3,65          | 512,6           | 6,1             | 34,9                   | 65,1                 |
| 9             | 2,16          | 353,4           | 4,2             | 30,7                   | 69,3                 |
| 14            | 1,18          | 462,8           | 5,5             | 25,1                   | 74,9                 |
|               |               | 2104,9          | 25,1            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 8374,4          | 100,0           |                        |                      |



# APÊNDICE I – Peneiramento do ensaio 1 da britagem pelo HPGR.

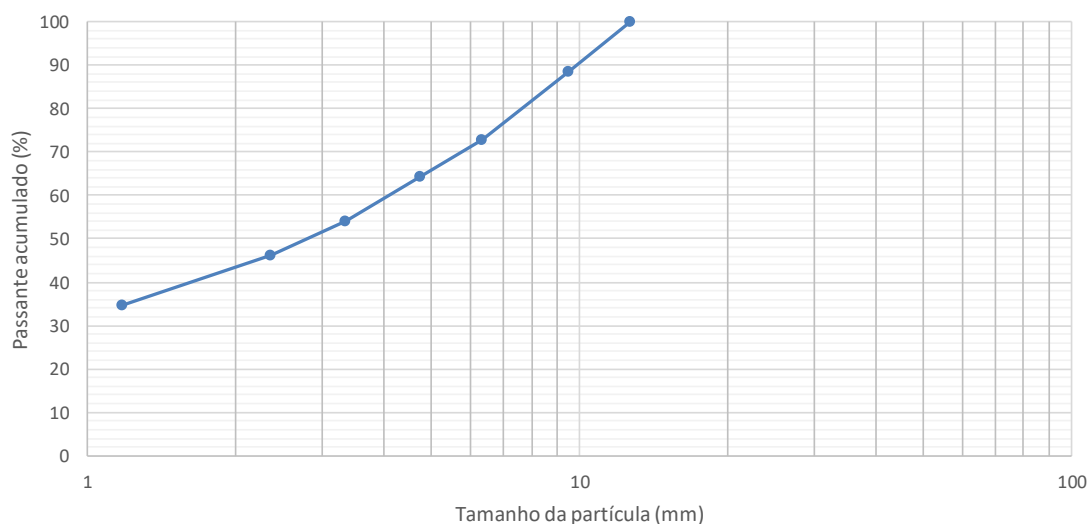


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |  |
|-----------------------|--|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda   |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 13/05/2021                                |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com                   |
| Amostra:              | Caraíba  |
| Tipo de peneiramento: | Peniramento a úmido, manual  |
| Peso inicial (g):     | 9200,0   |
| Peso final (g):       | 0,0  |
| Perdas (%)            | 100,0  |
| Observações:          | A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm no britador HRC 1000® com pressão de 2 N/mm <sup>2</sup> |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 1411,6          | 11,3            | 88,7                   | 11,3                 |
| -             | 6,35          | 1982,5          | 15,9            | 72,7                   | 27,3                 |
| 4             | 4,75          | 1053,5          | 8,5             | 64,3                   | 35,7                 |
| 6             | 3,35          | 1266,0          | 10,2            | 54,1                   | 45,9                 |
| 9             | 2,36          | 986,8           | 7,9             | 46,2                   | 53,8                 |
| 14            | 1,18          | 1414,5          | 11,4            | 34,8                   | 65,2                 |
|               | -1,18         | 4336,0          | 34,8            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 12450,8         | 100,0           |                        |                      |



# APÊNDICE J – Peneiramento do ensaio 2 da britagem pelo HPGR.

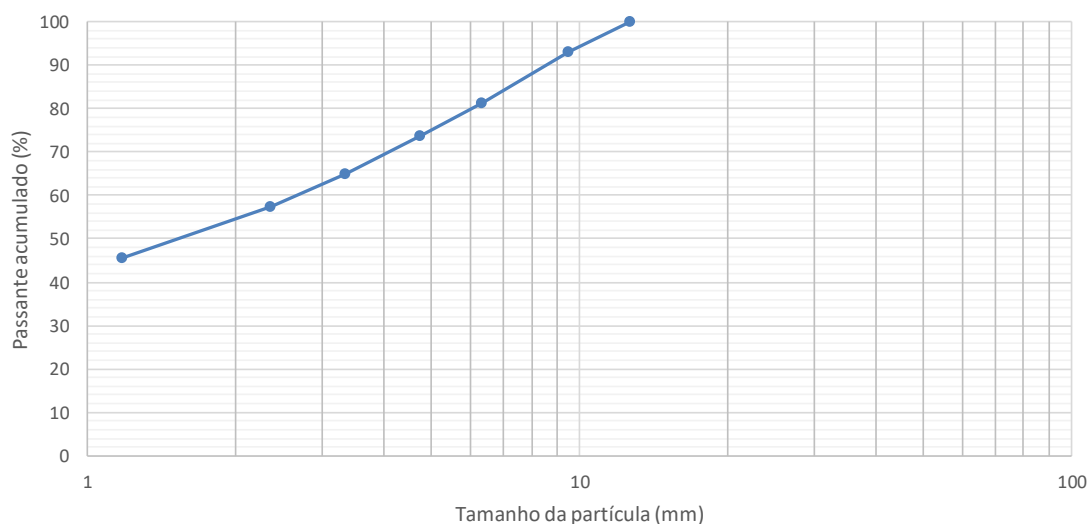


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |  |
|-----------------------|--|
| Responsável:          | André Hiroshi Asakawa/Marcos Paulo Holanda   |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 17/06/2021                                |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com                   |
| Amostra:              | Caraíba  |
| Tipo de peneiramento: | Peniramento a úmido, manual  |
| Peso inicial (g):     | 9200,0   |
| Peso final (g):       | 0,0  |
| Perdas (%)            | 100,0  |
| Observações:          | A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm no britador HRC 1000® com pressão de 3 N/mm <sup>2</sup> |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 820,9           | 7,0             | 93,0                   | 7,0                  |
| -             | 6,35          | 1397,3          | 11,8            | 81,2                   | 18,8                 |
| 4             | 4,75          | 893,9           | 7,6             | 73,6                   | 26,4                 |
| 6             | 3,35          | 1014,0          | 8,6             | 65,0                   | 35,0                 |
| 9             | 2,36          | 905,7           | 7,7             | 57,4                   | 42,6                 |
| 14            | 1,18          | 1388,3          | 11,8            | 45,6                   | 54,4                 |
|               | -1,18         | 5380,0          | 45,6            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | <b>11800,1</b>  | <b>100,0</b>    |                        |                      |



# APÊNDICE K – Peneiramento do ensaio 3 da britagem pelo HPGR.

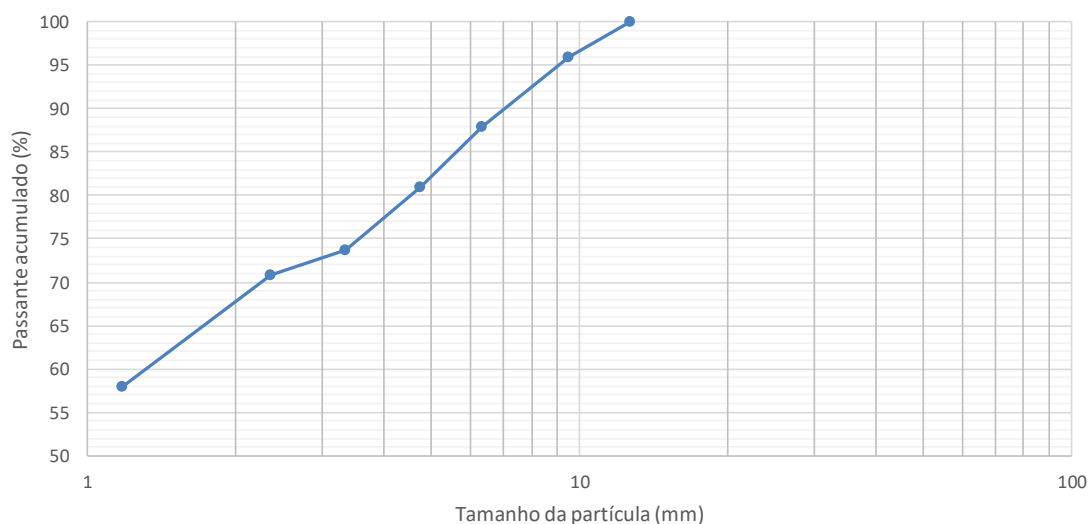


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**  
**Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**  
**Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais**



|                       |  |
|-----------------------|--|
| Responsável:          | Marcos Paulo Holanda   |
| Local e Data:         | Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) - USP-SP - 21/08/2021                                |
| Projeto:              | Avaliação do impacto do tipo de britagem na liberação mineral em circuitos com                   |
| Amostra:              | Caraíba  |
| Tipo de peneiramento: | Peniramento a úmido, manual  |
| Peso inicial (g):     | 17940,0  |
| Peso final (g):       | 12480,0  |
| Perdas (%):           | 30,4   |
| Observações:          | A amostra foi britada abaixo de 12,7 mm no britador HRC 1000® com pressão de 4 N/mm <sup>2</sup> |

| Malha (Tyler) | Abertura (mm) | Peso retido (g) | Peso retido (%) | Passante acumulado (%) | Retido acumulado (%) |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|----------------------|
| -             | 12,70         | 0,0             | 0,0             | 100,0                  | 0,0                  |
| -             | 9,50          | 510,1           | 4,1             | 95,9                   | 4,1                  |
| -             | 6,35          | 1003,1          | 8,0             | 87,9                   | 12,1                 |
| 4             | 4,75          | 856,8           | 6,9             | 81,0                   | 19,0                 |
| 6             | 3,35          | 903,2           | 7,2             | 73,8                   | 26,2                 |
| 9             | 2,36          | 361,3           | 2,9             | 70,9                   | 29,1                 |
| 14            | 1,18          | 1602,2          | 12,8            | 58,0                   | 42,0                 |
|               | -1,18         | 7243,3          | 58,0            | 0,0                    | 100,0                |
| <b>Total</b>  |               | 12480,0         | 100,0           |                        |                      |



APÊNDICE L - Análise química do ensaio 1 no britador de mandíbulas.



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



|               |   |
|---------------|---|
| Responsável:  | Técnico Fernando  |
| Local e Data: | USP-SP, LTM, 06 de fevereiro de 2021                    |
| Projeto:      | Avaliação de pré-concentração por métodos gravimétricos |
| Amostra:      | Caraíba - Cobre   |
| Ensaio:       | Separação em líquido denso                              |
| Observações:  | Ensaio 1 - Produto do britador de mandíbulas/Caraíba    |

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores |       | Distribuição ensaio |       |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|--------|-------|---------------------|-------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra | Cu %   | Fe %  | Cu %                | Fe %  |
| -12.7+6.35  | d>2,95            | 1.673,0   | 55,6      | 36,3    | 0,38   | 10,42 | 81,2                | 76,5  |
|             | 2,85<d<2,95       | 398,6     | 13,3      | 8,7     | 0,18   | 7,12  | 9,2                 | 12,5  |
|             | 2,75<d<2,85       | 280,8     | 9,3       | 6,1     | 0,13   | 5,26  | 4,7                 | 6,5   |
|             | d<2,75            | 654,6     | 21,8      | 14,2    | 0,06   | 1,58  | 5,0                 | 4,5   |
|             | Total calculado*  | 3.007,0   | 100,0     | 65,3    | 0,26   | 7,58  | 100,0               | 100,0 |
|             | Total analisado** |           |           |         |        |       |                     |       |
| -6,35+3.35  | d>2,95            | 593,8     | 54,3      | 12,9    | 0,54   | 10,46 | 84,9                | 76,2  |
|             | 2,85<d<2,95       | 145,2     | 13,3      | 3,2     | 0,19   | 7,29  | 7,3                 | 13,0  |
|             | 2,75<d<2,85       | 114,7     | 10,5      | 2,5     | 0,15   | 5,11  | 4,6                 | 7,2   |
|             | d<2,75            | 240,4     | 22,0      | 5,2     | 0,05   | 1,24  | 3,2                 | 3,7   |
|             | Total calculado*  | 1.094,0   | 100,0     | 23,8    | 0,35   | 7,45  | 100,0               | 100,0 |
|             | Total analisado** |           |           |         |        |       |                     |       |
| -3.35+1,18  | d>2,95            | 260,8     | 51,8      | 5,7     | 0,68   | 10,98 | 87,2                | 76,0  |
|             | 2,85<d<2,95       | 62,6      | 12,4      | 1,4     | 0,21   | 7,79  | 6,5                 | 12,9  |
|             | 2,75<d<2,85       | 44,3      | 8,8       | 1,0     | 0,14   | 5,62  | 3,0                 | 6,6   |
|             | d<2,75            | 135,9     | 27,0      | 3,0     | 0,05   | 1,24  | 3,3                 | 4,5   |
|             | Total calculado*  | 503,7     | 100,0     | 10,9    | 0,40   | 7,48  | 100,0               | 100,0 |
|             | Total analisado** |           |           |         |        |       |                     |       |

\* Calculado a partir da média ponderada de cada fração granulométrica

\*\* Valor da análise química da amostra cabeça.

# APÊNDICE M - Análise química do ensaio 2 no britador de mandíbulas



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



|               |  |
|---------------|--|
| Responsável:  | Marcos Paulo Holanda/ André Hiroshi Asakawa  |
| Local e Data: | USP-SP, LTM, 06 de fevereiro de 2021   |
| Projeto:      | Avaliação de pré-concentração por métodos gravimétricos  |
| Amostra:      | Caraíba - Cobre  |
| Ensaio:       | Separação em líquido denso   |
| Observações:  | Ensaio 2 - Análise química realizada na Mineração Caraíba S/A para o produto britado no britador de mandíbulas |

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores |       | Distribuição ensaio (%) |       | Distribuição amostra (%) |      |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|--------|-------|-------------------------|-------|--------------------------|------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra | Cu %   | Fe %  | Cu %                    | Fe %  | Cu %                     | Fe % |
| -12.7+6.35  | d>2,95            | 1125,3    | 55,8      | 36,9    | 0,79   | 12,69 | 82,5                    | 75,5  | 54,8                     | 47,8 |
|             | 2,85<d<2,95       | 289,4     | 14,3      | 9,5     | 0,37   | 9,12  | 9,9                     | 13,9  | 6,6                      | 8,8  |
|             | 2,75<d<2,85       | 175,9     | 8,7       | 5,8     | 0,22   | 7,44  | 3,6                     | 6,9   | 2,4                      | 4,4  |
|             | d<2,75            | 427,2     | 21,2      | 14,0    | 0,1    | 1,64  | 4,0                     | 3,7   | 2,6                      | 2,3  |
|             | Total calculado*  | 2017,7    | 100,0     | 66,1    | 0,53   | 9,38  | 100,0                   | 100,0 | 66,4                     | 63,4 |
|             | Total analisado** | 2021,4    |           |         |        |       |                         |       |                          |      |
| -6,35+3.35  | d>2,95            | 429,7     | 52,9      | 7,5     | 0,84   | 13,10 | 87,3                    | 75,6  | 11,8                     | 10,0 |
|             | 2,85<d<2,95       | 94,0      | 11,6      | 1,6     | 0,27   | 8,57  | 6,1                     | 10,8  | 0,8                      | 1,4  |
|             | 2,75<d<2,85       | 53,0      | 6,5       | 0,9     | 0,20   | 7,57  | 2,6                     | 5,4   | 0,3                      | 0,7  |
|             | d<2,75            | 235,1     | 29,0      | 4,1     | 0,07   | 2,59  | 4,0                     | 8,2   | 0,5                      | 1,1  |
|             | Total calculado*  | 811,7     | 100,0     | 14,1    | 0,51   | 9,17  | 100,0                   | 100,0 | 13,5                     | 13,2 |
|             | Total analisado** | 813,7     |           |         |        |       |                         |       |                          |      |
| -3.35+1,18  | d>2,95            | 263,8     | 52,0      | 4,2     | 0,77   | 15,45 | 88,3                    | 88,0  | 6,1                      | 6,7  |
|             | 2,85<d<2,95       | 50,8      | 10,0      | 0,8     | 0,25   | 0,52  | 5,5                     | 0,6   | 0,4                      | 0,0  |
|             | 2,75<d<2,85       | 30,0      | 5,9       | 0,5     | 0,20   | 7,71  | 2,6                     | 5,0   | 0,2                      | 0,4  |
|             | d<2,75            | 162,9     | 32,1      | 2,6     | 0,05   | 1,84  | 3,5                     | 6,5   | 0,2                      | 0,5  |
|             | Total calculado*  | 507,6     | 100,0     | 8,2     | 0,45   | 9,13  | 100,0                   | 100,0 | 7,0                      | 7,6  |
|             | Total analisado** | 508,5     |           |         |        |       |                         |       |                          |      |
| Total +1,18 | d>2,95            |           |           | 48,6    | 0,80   | 12,99 | 83,7                    | 67,7  | 72,7                     | 64,5 |
|             | 2,85<d<2,95       |           |           | 11,9    | 0,35   | 8,45  | 9,0                     | 10,8  | 7,8                      | 10,3 |
|             | 2,75<d<2,85       |           |           | 7,2     | 0,22   | 7,47  | 3,4                     | 5,7   | 2,9                      | 5,5  |
|             | d<2,75            |           |           | 20,7    | 0,09   | 1,85  | 3,9                     | 4,1   | 3,4                      | 3,9  |
|             | Total calculado   | 3.337,0   |           | 88,3    | 0,52   | 9,32  | 100,0                   | 88,3  | 86,8                     | 84,2 |
|             |                   |           |           |         |        |       |                         |       |                          |      |
| -1,18       |                   |           |           | 11,7    | 0,6    | 10,5  |                         |       | 13,2                     |      |
| Cabeça      | Teor calculado    |           |           | 100,0   | 0,53   | 9,78  |                         |       | 100,0                    |      |
|             | Teor analisado    |           |           |         | 0,49   |       |                         |       |                          |      |

\* Calculado a partir da média ponderada de cada fração granulométrica

\*\* Valor da análise química da amostra cabeça.



APÊNDICE N - Análise química do ensaio 3 no britador de mandíbulas.



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



|               |   |
|---------------|---|
| Responsável:  | Marcos Paulo Holanda/ André Hiroshi Asakawa   |
| Local e Data: | USP-SP, LTM, 06 de fevereiro de 2021  |
| Projeto:      | Avaliação de pré-concentração por métodos gravimétricos   |
| Amostra:      | Caraíba - Cobre   |
| Ensaio:       | Separação em líquido denso  |
| Observações:  | Ensaio 3 - Análise química realizada na mina de Saloba da Vale S/A para o produto britado no britador de mandíbulas |

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores |       | Distribuição ensaio (%) |      |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|--------|-------|-------------------------|------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra | Cu %   | Fe %  | Cu %                    | Fe % |
| -6,35+3.35  | d>2,95            | 441,2     | 55,1      | 7,1     | 1,20   | 12,80 | 89,7                    | 76,5 |
|             | 2,85<d<2,95       | 81,2      | 10,1      | 1,3     | 0,44   | 9,39  | 6,1                     | 10,3 |
|             | 2,75<d<2,85       | 105,2     | 13,1      | 1,7     | 0,17   | 6,14  | 3,0                     | 8,7  |
|             | d<2,75            | 173,1     | 21,6      | 2,8     | 0,04   | 1,91  | 1,2                     | 4,5  |
|             | Total calculado*  | 800,6     | 100,0     | 12,9    | 0,74   | 9,23  | 100                     | 100  |
|             | Total analisado** | 800,5     |           |         |        |       |                         |      |

\* Calculado a partir da média ponderada de cada fração granulométrica

\*\* Valor da análise química da amostra cabeça.

APÊNDICE O - Análise química do ensaio 2 realizado britador de impacto.



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



|               |  |
|---------------|--|
| Responsável:  | Técnico Rodrigo  |
| Local e Data: | USP-SP, LTM, 06 de fevereiro de 2021   |
| Projeto:      | Avaliação de pré-concentração por métodos gravimétricos  |
| Amostra:      | Salobo (Vale) - Cobre  |
| Ensaio:       | Separação em líquido denso   |
| Observações:  | Ensaio 2 - Análise química realizada na mina de Salobo da Vale S/A para o produto britado no britador de impacto a 900 RPM |

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores Cu % | Distribuição ensaio (%) Cu % |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|-------------|------------------------------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra |             |                              |
| +12,7       |                   |           |           | 64,9    |             |                              |
| -6,35+3,35  | d>2,95            | 381,0     | 47,6      | 6,4     | 0,45        | 73,67                        |
|             | 2,85<d<2,95       | 106,7     | 13,3      | 1,8     | 0,32        | 14,67                        |
|             | 2,75<d<2,85       | 83,4      | 10,4      | 1,4     | 0,16        | 5,73                         |
|             | d<2,75            | 229,9     | 28,7      | 3,9     | 0,06        | 5,93                         |
|             | Total calculado*  | 801       | 100,0     | 13,6    | 0,29        | 100,0                        |
|             | Total analisado** | 801,0     |           |         |             |                              |

APÊNDICE P - Análise química do ensaio 3 realizado no britador de impacto.



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



|               |  |
|---------------|--|
| Responsável:  | Técnico Rodrigo  |
| Local e Data: | USP-SP, LTM, 06 de fevereiro de 2021   |
| Projeto:      | Avaliação de pré-concentração por métodos gravimétricos  |
| Amostra:      | Salobo (Vale) - Cobre  |
| Ensaio:       | Separação em líquido denso   |
| Observações:  | Ensaio 3 - Análise química realizada no LCT-USP do produto do britado no britador de Impacto a 900 RPM |

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores |      | Distribuição ensaio (%) |      |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|--------|------|-------------------------|------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra | Cu %   | Fe % | Cu %                    | Fe % |
| -6,35+3.35  | d>2,95            | 494,0     | 61,7      | 9,4     | 0,56   | 12,8 | 87,1                    | 80,8 |
|             | 2,85<d<2,95       | 66,6      | 8,3       | 1,3     | 0,30   | 8,79 | 6,3                     | 7,5  |
|             | 2,75<d<2,85       | 102,5     | 12,8      | 1,9     | 0,15   | 6,12 | 4,8                     | 8,0  |
|             | d<2,75            | 137,0     | 17,1      | 2,6     | 0,04   | 2,02 | 1,7                     | 3,5  |
|             | Total calculado*  | 800       | 100       | 15,2    | 0,40   | 9,76 | 100                     | 100  |
|             | Total analisado** | 801,0     |           |         |        |      |                         |      |

APÊNDICE Q - Análise química do produto britado no HPGR.



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




|               |  |
|---------------|--|
| Responsável:  | André Hiroshi Asakawa /Marcos Paulo Holanda                                      |
| Local e Data: | USP-SP, LTM, 06 de fevereiro de 2021   |
| Projeto:      | Avaliação de pré-concentração por métodos gravimétricos                          |
| Amostra:      | Caraíba - Cobre  |
| Ensaio:       | Separação em líquido denso   |
| Observações:  | Ensaio 1 - Análise química realizada na Mineração Caraíba para o produto do HPGR |

| Fração (mm) | Produto           | Massa (g) | Massa (%) |         | Teores Cu % | Distribuição ensaio (%) Cu % | Distribuição amostra (%) Cu % |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|---------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
|             |                   |           | Ensaio    | Amostra |             |                              |                               |
| -6,35+3.65  | d>2,95            | 345,3     | 45,2      | 4,2     | 1,12        | 63,6                         | 9,4                           |
|             | 2,85<d<2,95       | 118,4     | 15,5      | 1,4     | 0,92        | 17,9                         | 2,6                           |
|             | 2,75<d<2,85       | 120,5     | 15,8      | 1,5     | 0,61        | 12,1                         | 1,8                           |
|             | d<2,75            | 179,8     | 23,5      | 2,2     | 0,22        | 6,5                          | 1,0                           |
|             | Total calculado*  | 764,0     | 100,0     | 9,3     | 0,80        | 100,0                        | 14,8                          |
|             | Total analisado** | 800,5     |           |         |             |                              |                               |
| -1,18       |                   |           |           | 8,4     | 2,50        |                              | 42,0                          |
| Cabeça      |                   |           |           | 100,0   | 0,50        |                              |                               |


\* Calculado a partir da média ponderada de cada fração granulométrica

\*\* Valor da análise química da amostra cabeça.

## APÊNDICE R – Cálculo da massa amostral pela fórmula do Pierre Gy



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



---

**cálculo da massa de amostragem para Análise Química**

$$M = C * d^3 / s^2$$

Onde:

M = massa de amostra requerida (g)

f = fator de forma do material (0<f<1)

g = fator de distribuição de tamanho

l = fator de liberação

m = fator de composição

d = top size (cm)

h=ordenada normal no nível de confiança escolhido

a = fractional average assay of the critical components

r = specific gravity of the critical components

t = specific gravity of the bulk material

onde  $C = f * g * l * m$

S = ( desired certainty range \* 1 ) /  
(mean probable assay value \* h )

$m = ((1-a)/a) * ((1-a)*r+a*t)$

**Fator de forma:**

0,1 para partículas alongadas

0,3 - 0,7 para maioria dos materiais e carvão

1 para partículas redondas

**Ordenadas normais (da distribuição normal)**

| Nível de confiança (%) | h      |
|------------------------|--------|
| 50                     | 0.6745 |
| 80                     | 1.2816 |
| 90                     | 1.6449 |
| 95                     | 1.9600 |
| 99                     | 2.5758 |
| 99.9                   | 3.2905 |

**Entrada de dados**

|                         |        |       |
|-------------------------|--------|-------|
| a                       | 1.4451 | %     |
| r                       | 4.2    | g/cm3 |
| t                       | 3      | g/cm3 |
| d                       | 0.635  | cm    |
| f                       | 0.5    |       |
| g                       | 0.75   |       |
| l                       | 0.1    |       |
| m                       | 285.26 | g/cm3 |
| Nível de confiança      | 80     |       |
| desired certainty range | 0.1000 | %     |

**Cálculo**

|          |               |          |          |             |           |  |  |
|----------|---------------|----------|----------|-------------|-----------|--|--|
| h        | 1.2816        |          |          |             |           |  |  |
| C        | 10.70         | g/cm3    | s        | 0.054       |           |  |  |
| <b>M</b> | <b>939.47</b> | <b>g</b> | <b>=</b> | <b>0.94</b> | <b>kg</b> |  |  |