



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



JADE OSTI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NA MOAGEM E FLOTAÇÃO DE DIFERENTES  
TIPOLOGIAS DO MINÉRIO DE FOSFATO

OURO PRETO

2018

JADE OSTI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NA MOAGEM E FLOTAÇÃO DE DIFERENTES  
TIPOLOGIAS DO MINÉRIO DE FOSFATO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Tratamento de minérios.

Orientadora: Ma. Francielle Câmara Nogueira

OURO PRETO

2018

O855a Osti, Jade.  
Avaliação do comportamento na moagem e flotação de diferentes tipologias do minério de fosfato [manuscrito] / Jade Osti. - 2018.

45f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientadora: Profª. MScª. Francielle Câmara Nogueira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Fosfato. 2. Flotação. 3. Moagem (Beneficiamento de minério) . I. Nogueira, Francielle Câmara . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.765



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

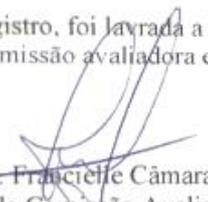
Aos 26 dias do mês de março de 2018, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa da monografia de final de curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, pela aluna **Jade Osti**, intitulado: "**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO NA MOAGEM E FLOTAÇÃO DE DIFERENTES TIPOLOGIAS DE MINÉRIO DE FOSFATO**", sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. M.Sc. Francielle Câmara Nogueira** (orientadora), **Eng.º de Minas Carlos Eduardo Domingos da Mata** e **Eng.º de Minas Isabela dos Santos Stopa**.

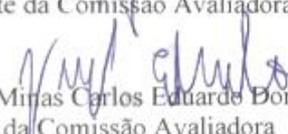
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela ~~aprovada~~... da candidata, com a nota 9,3, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

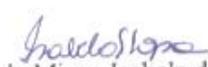
A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

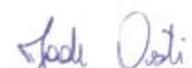
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pela discente.

Ouro Preto, 26 de março de 2018.

  
Prof.ª M.Sc. Francielle Câmara Nogueira  
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

  
Eng.º de Minas Carlos Eduardo Domingos da Mata  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Eng.º de Minas Isabela dos Santos Stopa  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Jade Osti

  
Prof. Ms José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Dedico esse trabalho aos meus queridos pais e aos meus amigos e mestres Luiz, Carlos e Francielle.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por sempre ter guiado meus caminhos e iluminado minhas escolhas;

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado durante todas os momentos de felicidades e de dificuldades;

À minha orientadora, Francielle Câmara Nogueira, por toda dedicação ao longo do curso, carinho e por ser sempre solícita e atenciosa no desenvolvimento deste trabalho;

Ao amigo e mestre Carlos Alberto Pereira por toda a atenção dedicada e por não medir esforços em me ajudar. Obrigada também por todas as oportunidades ao longo do curso;

Ao meu mentor, Luiz Antônio Fonseca de Barros, por todos os ensinamentos e estímulos profissionais e pessoais;

À toda equipe envolvida nos testes, obrigada pela colaboração e empenho para que o trabalho fosse satisfatório;

Aos meus amigos e colegas de curso.

*“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher.”*

**Cora Coralina**

## RESUMO

O fósforo é um elemento essencial para a fabricação dos fertilizantes, que são compostos que permitem o desenvolvimento das culturas agrícolas em larga escala. Esse elemento contido nesses insumos agrícolas é obtido através do processo de concentração da rocha fosfática composta por minerais do grupo da apatita. O processo de concentração é complexo e depende de composição das tipologias minerais beneficiadas. Este fato motivou o desenvolvimento deste estudo, cujos objetivos foram realizar a classificação das tipologias existentes em uma mina de fosfato em fase de *start up* e entender o comportamento deste minério com testes preliminares de moagem e flotação em escala de bancada. Primeiramente foi feita uma classificação das tipologias identificadas na mina, com subdivisões de acordo com profundidades e teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$ . Em seguida foi preparada uma amostra blendada com as tipologias, para ser usada nos testes de moagem e flotação. Nos testes de moagem foram analisados os seguintes parâmetros: tempo de moagem, porcentagem de sólidos e rotação do moinho (velocidade crítica). Nos testes de flotação foram usadas amostras já moídas, a variável desses testes foi o tempo que cada amostra havia sido moída. Na flotação foi usado 200 g/t de óleo de soja saponificado como coletor e 750 g/t de amido de milho gelatinizado, como depressor. Os resultados demonstraram que o parâmetro de maior influência na distribuição granulométrica foi o tempo de moagem. Os testes realizados com maiores tempos (10, 12 e 15 minutos) de moagem geraram maior quantidade de finos. Na flotação, o teste realizado com 15 minutos de moagem apresentou o melhor resultado, com recuperação 5% de massa e 27% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , indicando que houve maior grau de liberação de apatita.

**Palavras-chave:** Fosfato. Tipologias. Parâmetros de moagem. Flotação de fosfato.

## ABSTRACT

Phosphorus is an essential element for the manufacture of fertilizers which are compounds that allow the development of large-scale agricultural crops. This element contained in these agricultural inputs is obtained through the process of concentration of the phosphate rock composed of minerals of the apatite group. The concentration process is complex and depends on the composition of the mineral typologies benefited. This fact motivated the development of this study, whose goals were to perform the classification of existing typologies in a phosphate mine in the startup phase, and also understand the behavior of this ore with preliminary milling and flotation bench scale tests. First of all was made a new classification of the typologies identified in the mine, with subdivisions according to the depths and contents of SiO<sub>2</sub> and MgO. Afterwards a sample was prepared, blended with the typologies, to be used in the grinding and flotation tests. In the milling tests, were analyzed the following parameters: milling time, solids percentage and mill rotation (critical speed). The samples used in the flotation tests were already ground, what varied in these tests was the time that each sample had been milled. In the flotation it was used 200 g / t of saponified soybean oil as the collector and 750 g / t of gelatinized maize starch as the depressant. Tests carried out with longer milling times (10, 12 and 15 minutes) generated more fines. In the flotation, the test performed with 15 minutes of milling presented the best result, with a recovery of 5% of mass and 27% of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, indicating that there was a higher degree of release of apatite.

**Keywords:** Phosphate. Typologies. Grinding Parameters. Phosphate Flotation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Situação mundial de consumo e produção, em milhões de toneladas, de fosfato. ..	13
Figura 2 - Fluxograma do circuito granulado de beneficiamento da Fosfertil .....	16
Figura 3 – Moinho de bolas usado nos testes .....	22
Figura 4 - Distribuição granulométrica dos subgrupos ARG A, ARG B e ARG C. ....	29
Figura 5 - Distribuição granulométrica do subgrupo MIC A, MIC B e MIC C. ....	30
Figura 6 - Distribuição granulométrica para os tempos de 6, 8, 1, 12 e 15 minutos .....	33
Figura 7 - Distribuição de $P_2O_5$ de acordo com a variação de tempo .....	34
Figura 8 - Distribuição granulométrica para as diferentes rotações 27, 33 e 42 rpm .....	35
Figura 9 - Distribuição de $P_2O_5$ de acordo com a variação de rotação .....	36
Figura 10 - Distribuição granulométrica para as diferentes porcentagens de sólidos 45 e 50% .....	37
Figura 11 - Distribuição de $P_2O_5$ de acordo com a porcentagem de sólidos .....	38
Figura 12 - Resultados dos ensaios de flotação .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coletores e depressores utilizados nos processos de flotação de fosfato no Brasil .	19
Tabela 2- Critérios de divisão dos subgrupos das tipologias argilo mineral e micáceo .....	20
Tabela 3 - Massas de cada subgrupo para composição da amostra blendada .....	21
Tabela 4 - Testes de moagem com as alíquotas individuais de cada subgrupo.....	22
Tabela 5 - Testes de moagem com a amostra blendada .....	24
Tabela 6 - Condições dos ensaios de flotação .....	26
Tabela 7 - Reagentes usados nos testes de flotação de bancada.....	26
Tabela 8 - Comparação do d80 entre os subgrupos ARG A, B e C .....	30
Tabela 9 - Comparação do d80 entre os subgrupos MIC A, B e C .....	30
Tabela 10 - Resultados da caracterização química dos subgrupos de cada tipologia.....	32
Tabela 11 - Distribuição granulométrica de acordo com os tempos de 6, 8, 10, 12 e 15 minutos .....	33
Tabela 12 - Distribuição granulométrica de acordo com as variações da rotação do moinho de 27, 33 e 42 rpm .....	35
Tabela 13 - Distribuição granulométrica de acordo com as porcentagens de sólidos de 45 e 50% .....	37

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	10
<b>2. OBJETIVOS</b>	11
2.1 Objetivos específicos	11
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	12
3.1 Características e aplicações do fósforo	12
3.2 Mineralogia do fosfato	12
3.3 Produção e mercado do fosfato	13
3.4 Uso de fosfato em fertilizantes	14
3.5 Mineração e beneficiamento de rocha fosfática	15
3.5.1 Moagem de rocha fosfática	16
3.5.2 Flotação de minério fosfatado	17
<b>4. METODOLOGIA</b>	20
4.1 Classificação das tipologias	20
4.2 Seleção e preparação das amostras	20
4.3 Testes preliminares de moagem com amostras dos subgrupos	21
4.4 Testes preliminares de moagem com amostra blendada	23
4.4.1 Análise de resultados	25
4.5 Testes preliminares de flotação	25
4.5.1 Reagentes utilizados	26
4.5.2 Flotação em bancada	27
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	29
5.1 Caracterização tecnológica das amostras individuais	29
5.1.1 Análise granulométrica	29
5.1.2 Caracterização química	31
5.2 Testes preliminares de moagem com a amostra blendada	32
5.2.1 Tempo de moagem	32

5.2.2 <i>Rotação de moagem</i> .....	34
5.2.3 <i>Porcentagem de sólidos</i> .....	36
5.3 <b>Testes de flotação em bancada</b> .....	38
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	40
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	41

## 1. INTRODUÇÃO

O fósforo é um elemento essencial para os processos metabólicos dos diversos seres vivos, atuando na fotossíntese, divisão celular, qualidade dos produtos agrícolas e formação de ossos e dentes dos animais. O fósforo requerido nos organismos vivos é transmitido pela cadeia alimentar, sendo que primeiramente as plantas assimilam esse elemento do solo, e através do consumo de produtos de origem vegetais são absorvidos pelos animais (STRATEN, 2005).

Para assegurar a grande demanda da produção de alimentos e o progressivo rendimento das culturas agrícolas é preciso garantir que o solo disponha da correta quantidade de nutrientes. Naturalmente a quantia de fósforo que um solo apresenta não é suficiente para potencializar a produção agrícola, devendo então ser aplicadas substâncias naturais ou sintéticas que satisfaçam essa escassez, como os fertilizantes (CASTRO; MELGAR, 2005).

Segundo Kulaif (1999), os fertilizantes fornecem soluções com fósforo solubilizado que é capaz de ser absorvido pelas plantas, melhorando assim o crescimento e qualidade dessas culturas. Alguns dos fertilizantes usados são os fosfatos naturais, superfosfato simples, superfosfato triplo ou concentrado, termofosfatos, fosfatos de amônio, fosfatodiamônio e nitrofosfato.

Para produção dos fertilizantes, ainda de acordo com Kulaif (1999), é usado na maioria das vezes o concentrado de rocha fosfática como matéria prima, que fornece o elemento P através do mineral apatita. Conforme citado por Loureiro, Monte e Nascimento (2008), a obtenção desse concentrado se dá pela mineração e beneficiamento de minerais do grupo da apatita, que são os formadores de depósitos de rochas fosfáticas. Os minérios fosfatados são muito complexos, devido à grande variedade de elementos que podem se associar com o radical  $PO_4^{-3}$  para compor os minerais fosfatados.

O beneficiamento de fosfato ainda é muito desafiador, devido à complexidade dos minérios fosfatados e a origem geológica das jazidas. O minério precisa ser submetido a etapas de fragmentação, como britagem e moagem, para ser posteriormente concentrado, principalmente, por flotação (NUNES; PERES, 2011). Neste contexto, desenvolveu-se esse trabalho cujo propósito foi estudar a influência da tipologia nos processos de concentração de um minério fosfático de uma mina do estado de Minas Gerais.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi realizar a classificação das tipologias existentes em uma mina de fosfato em fase de *start up*, localizada em Minas Gerais, bem como realizar testes preliminares de moagem e flotação em escala de bancada com as tipologias estudadas.

### 2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- I. Analisar resultados químicos de furos de sonda, notadamente os compostos  $P_2O_5$ ,  $SiO_2$  e  $MgO$  e as relações entre estes elementos;
- II. Classificar as tipologias de acordo com a variação da composição e profundidade;
- III. Analisar parâmetros de moagem: % de sólidos, velocidade de rotação do moinho e tempo de moagem;
- IV. Investigar a influência da granulometria no processo de flotação;
- V. Avaliar recuperação metalúrgica e mássica das etapas de concentração;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão baseada na literatura, contextualizando os temas pertinentes a este trabalho.

#### 3.1 Características e aplicações do fósforo

O fósforo (símbolo P), que foi descoberto em 1669 é um elemento químico não metálico, pertencente ao grupo dos nitrogenóides do sistema periódico, e apresenta como características ser inflamável e brilhar no escuro. Na natureza, o fósforo é encontrado como forma combinada de fosfatos e alguns sais (GENERALIC, 2016).

De acordo com Straten (2005), nos organismos vivos o fósforo desempenha um papel fundamental, como componente das células este elemento é responsável por várias funções, como a formação dos ácidos nucleicos do material genético, enzimas e proteínas. Esse elemento é primeiro assimilado do solo pelas plantas, sendo posteriormente transmitido pela cadeia alimentar até os animais.

Além das funções desempenhadas nos organismos vivos, o fósforo possui aplicações em sua forma elementar, em combinações de sais de fosfato ou como ácido fosfórico podendo ser usado como componente de produtos cosméticos, em processos metalúrgicos, em inseticidas, aditivos de bebidas. Na forma de sais de fosfatos encontram maior aplicabilidade na agricultura, na produção de detergentes e na nutrição animal (SANTIN, 2013).

#### 3.2 Mineralogia do fosfato

Os minerais da série da apatita (fórmula geral  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$ ) são os principais minerais minério com teores de fósforo significantes (em torno de 18,43% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e características adequadas para exploração mineral. A fluorapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3, \text{OH})_3(\text{F}, \text{OH})$ ], a hidroxiapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$ ] e a cloroapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{OH})$ ] são variações da apatita que estão presentes nas rochas fosfáticas de origem ígnea, como os carbonatitos. Os depósitos de origem sedimentar, diferente dos ígneos, apresentam as seguintes variedades: carbonato-fluorapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH})$ ] e carbonatoapatita [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{OH}, \text{F})$ ] (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

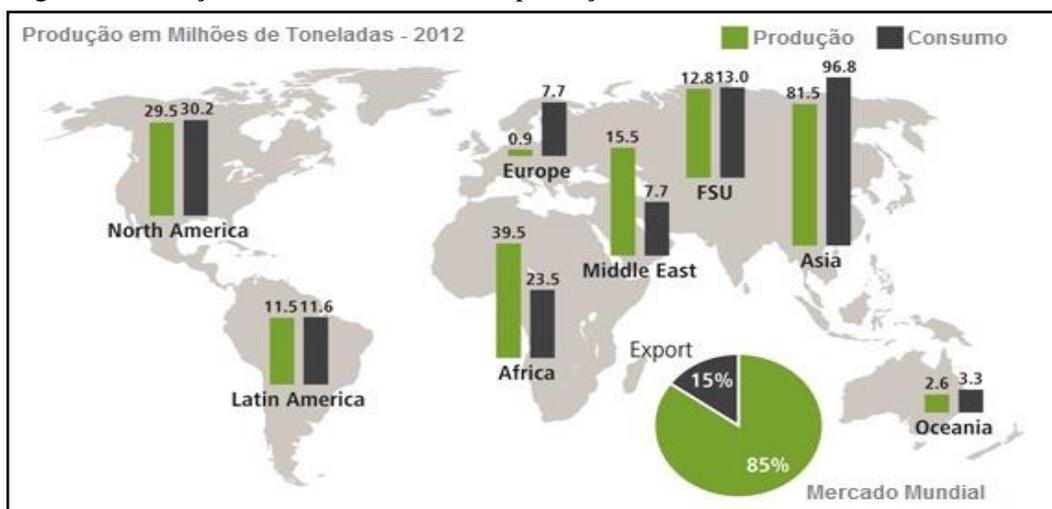
De acordo com Manning (1995), nas rochas fosfáticas, os contaminantes mais facilmente encontradas entre os silicatos são quartzo, chert, feldspato, argila e micas, já dentre os carbonatos freqüentemente é encontrado dolomita e calcita.

Os minérios fosfatados são muito complexos, devido à grande variedade de elementos que podem se associar com o radical  $\text{PO}_4^{3-}$  para compor os minerais fosfatados. Além da variação de elementos, podem ocorrer substituições entre íons similares, P-As-P e substituições entre fosfatos e silicatos, dificultando o estabelecimento de uma fórmula ideal para os minerais fosfatados (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

### 3.3 Produção e mercado do fosfato

A Figura 1 ilustra a relação entre a produção e o consumo mundial de fosfato no ano de 2012. Segundo Kulaif (1999) a extração e produção de fosfato estão diretamente ligadas ao mercado consumidor de fertilizantes, que depende do mercado agroprodutor. Analisando essa relação de produção e consumo, em 2012 a América Latina e os EUA mantiveram um equilíbrio entre consumo e produção, o que indica que o concentrado fosfático produzido nesses locais foi destinado para o próprio uso agrícola. Já a África e o Oriente Médio chegaram a produzir o dobro do que consumiram, exportando a quantidade excedente para outros consumidores, como países europeus que não produzem nem 12% do que consomem.

Figura 1 - Situação mundial de consumo e produção, em milhões de toneladas, de fosfato.



Fonte: Produção de Fosfato - GEO<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Produção de Fosfato - GEO. Disponível em: <https://geobancodedados.wordpress.com/2014/05/29/fosfato/>

Conforme relata Fonseca (2014), 70% da produção mundial de rocha fosfática concentra-se na China, Estados Unidos e Marrocos, sendo que o Marrocos é o país que possui a maior reserva mundial (50.000.000  $10^3$ t  $P_2O_5$ ). Em 2013, no Brasil foram extraídas 39 milhões de toneladas de ROM, com teor médio de 9,6% de  $P_2O_5$ , que após beneficiadas se destinaram ao mercado agro, aplicados na geração de ácido fosfórico, produtos intermediários para fertilizantes e outros insumos da indústria de fertilizantes.

O minério brasileiro é extraído de 10 minas localizadas em Minas Gerais (Tapira, Araxá, Patos de Minas e Lagamar), São Paulo (Cajati), Goiás (Catalão e Ouvidor) e Bahia (Campo Grande de Loudes). Essas minas apresentam em sua maioria rochas ígneas carbonatíticas, diferente das reservas mundiais em que ocorrem predominantemente em rochas sedimentares (FONSECA, 2014).

Além dessas minas em operação algumas empresas apresentam projetos em fase de *start up* e início de operação. Fonseca (2014) cita que em 2013 a MBAC inaugurou sua usina de beneficiamento em Arraias - TO. Segundo informações retiradas do site da empresa Galvani, há um projeto em desenvolvimento em Serra do Salitre - MG com previsão de iniciar as operações ainda em 2018, com capacidade de produzir aproximadamente 1,2 milhão de toneladas de concentrado fosfático por ano.

### **3.4 Uso de fosfato em fertilizantes**

A utilização de minerais fosfatados na produção de fertilizantes é muito antiga, já que o fósforo é um macronutriente, que junto com potássio e nitrogênio, é essencial para que uma planta possa converter energia solar em alimentos e fibras para seu próprio desenvolvimento (LOUREIRO; MONTE; NASCIMENTO, 2008).

A função dos fertilizantes no cultivo agrícola é complementar a oferta natural de nutrientes do solo, aumentando a fertilidade deste. O cultivo de culturas com alto potencial de produção (por exemplo: trigo, soja, arroz e milho) só é possível devido a aplicação de fertilizantes, que além de manter o solo fértil compensam os nutrientes necessários as plantas (LOPES; GUILHERME, 2000).

A produção de fertilizantes do tipo fosfatados usa o concentrado de rocha fosfática como principal matéria prima para sua fabricação. Outras matérias básicas do processo são: enxofre, gás natural, subprodutos de refinarias de petróleo e rochas potássicas. Nesse processo o concentrado de rocha é atacado por ácidos fortes (processo de acidulação), o que permite que fosforo seja solúvel em água e aproveitado para a produção de fertilizantes e outros produtos (KULAIF, 1999).

A acidulação do concentrado fosfático permite a produção de: ácido fosfórico, ácido superfosfórico, superfosfato simples, superfosfato triplo, superfosfato amoniados, fosfatos de amônia, fosfatos parcialmente acidulados, fosfatos naturais reativos, termofosfatos e fertilizantes líquidos (BRAGA, 2010).

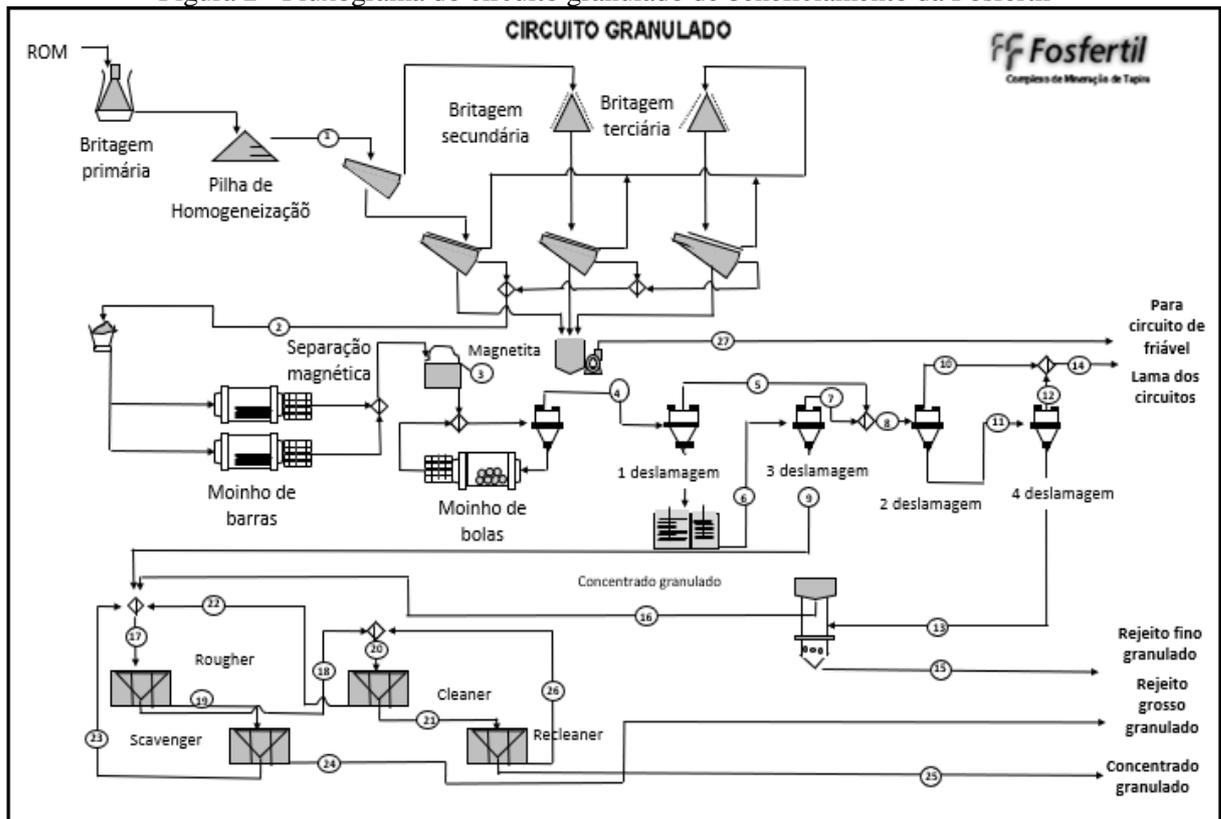
### **3.5 Mineração e beneficiamento de rocha fosfática**

Uma grande variedade de técnicas e equipamentos são utilizados para a lavra e beneficiamento de fosfato, sendo que muitos dos equipamentos e métodos de lavra de fosfato são similares ao de minerações de carvão. Nas minas de fosfato de produção em larga escala, o minério pode ser transportado por caminhões, correias transportadoras, minerodutos e por trem. Os métodos de lavra dependem da forma individual do depósito, das distâncias envolvidas, viabilidade de água e outros fatores (KAUWENBERGH, 2010).

O processo de concentração de fosfato começa pela etapa de cominuição, que pode incluir britagem e moagem. Após a diminuição da granulometria é realizado a deslamagem em hidrociclones, para retirada do material fino que pode atrapalhar a etapa de flotação (*slime coating*). Quando existe material magnético na polpa torna-se necessário uma etapa de separação magnética. Logo depois a polpa é condicionada e em seguida flotada (PERES *et al.*, 2007).

A Figura 2 mostra o fluxograma da planta de beneficiamento Fosfertil, composta por etapas de britagem, moagem de barras e bolas, classificação por peneiramento, separação magnética de baixo campo, quatro etapas de deslamagem, condicionamento de reagentes, flotação e espessamento.

Figura 2 - Fluxograma do circuito granulado de beneficiamento da Fosfertil



Fonte: Adaptado de SANTOS; SOBRAL; ARAÚJO (2002)

Podem, ainda, ser aplicados outros métodos de concentração para rocha fosfática, como calcinação e lixiviação ácida. Esses métodos apresentam algumas limitações e desvantagens quanto a flotação, como: alto custo das plantas de calcinação, dificuldades técnicas na calcinação, qualidade inferior dos produtos calcinados, alto consumo de energia e alto custo dos ácidos usados na lixiviação. Em contrapartida, a flotação encontra limitações de uso em regiões onde há escassez de água (SIS; CHANDER, 2003).

### 3.5.1 Moagem de rocha fosfática

A moagem, seguida da operação de desmonte e britagem, constitui uma das etapas de fragmentação. A relevância da fragmentação em todo processo de concentração pode ser expressa pelo custo energético, pois é nessa etapa que a maior parte da energia é absorvida. O desmonte da rocha ocorre na lavra com uso de explosivos e constitui o primeiro estágio da fragmentação. A etapa seguinte é a britagem, que adequa o tamanho dos blocos vindos da lavra para alimentar a moagem. Já na operação de moagem é feita uma fragmentação fina que prepara o minério para alimentar a usina de concentração (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Segundo Beraldo (1987), a etapa de moagem no beneficiamento de minérios se faz necessária para obter a liberação dos minerais de interesse e assim alcançar uma granulometria adequada aos processos seguintes de concentração, é essencial que as partículas minerais estejam totalmente individualizadas para que a concentração seja eficiente.

Para o minério fosfatado geralmente se consegue a liberação satisfatória da apatita em granulometrias menores que 250  $\mu\text{m}$ . As frações abaixo de 20  $\mu\text{m}$ , geradas na moagem ou de origem natural, são retiradas do circuito por processos conhecidos como deslamagens. Essas determinações da granulometria adequada podem variar de um processo para outro (PERES *et al.*, 2007).

Figueira, Luz e Almeida (2010) consideram como fatores importantes para avaliação da eficiência da moagem e consumo energético desta etapa:

- Velocidade de rotação;
- Fator de enchimento (volume do moinho ocupado pela carga);
- Percentagem de sólidos na polpa;
- Tamanho do meio moedor;
- Tempo de residência;
- Carga circulante.

### ***3.5.2 Flotação de minério fosfatado***

A concentração de rocha fosfática por flotação é um processo bastante complexo e desafiador, pois alguns dos minerais de ganga (como quartzo, chert, argilas, feldspatos, micas, calcita e dolomita) apresentam comportamento e características semelhantes a apatita, que é o mineral de interesse. Além disso, os reagentes são muito ativos e os íons dissolvidos podem ser deletérios. O processo de concentração de fosfato possui peculiaridades relacionadas a superfície, rede cristalina e substituições isomórficas (NUNES; PERES, 2011).

A apatita é um oximineral, sendo considerada como mineral naturalmente hidrofílico (pertence à família dos sais semi-solúveis). Para alterar essa característica da apatita é preciso que ocorra

a adsorção de agentes coletores de longas cadeias na sua superfície, assim a apatita deixa de ser hidrofílica e torna-se hidrofóbica (LEAL FILHO, 2010, *apud* ULIANA, 2010).

Diferentes tipos e estruturas de reagentes podem ser usados na flotação de fosfato, como coletores, depressores e reagentes auxiliares. A flotação de fosfatos ocorre normalmente de forma direta, sendo que os minerais de interesse adquirem comportamento hidrofóbico e os minerais de ganga se tornam hidrofílicos sendo arrastados para o rejeito (SIS, CHANDER, 2003).

Tanto para a flotação direta como a reversa os coletores são os mesmos. No Brasil os processos de concentração de fosfato costumam fazer uso de sabões de ácido graxo derivados de diferentes espécies vegetais como coletores. Esses sabões são normalmente óleo de casca de arroz e óleo de soja hidrogenado, também são aplicadas misturas de óleo de arroz e sulfossucinato ou sulfossucinamato e sarcosinato (GUIMARÃES *et al.*, 2005).

Segundo Oliveira (2007), outro coletor, o *tall oil* importado dos EUA (mistura de ácidos graxos e ácidos resinosos) foi utilizado no Brasil até a década de 80, quando seu custo de importação inviabilizou seu uso. O *tall oil* brasileiro prejudicava a flotação devido aos ácidos resinosos que faziam parte de sua composição, por isso não foi mais aplicado.

Barcelos *et al.* (2013) utilizaram em seu estudo sobre efeito de depressores na microflotação o carboximetilcelulose (CMC) e amido de milho. Guimarães, Araújo e Peres (2005) cita o amido de milho com diferentes graus de pureza como depressor mais usado para deprimir os minerais de ganga

A Tabela 1 mostra os coletores e depressores mais comuns utilizados nos processos de flotação da apatita em algumas empresas de mineração do Brasil.

Tabela 1- Coletores e depressores utilizados nos processos de flotação de fosfato no Brasil

<b>Empresa</b>	<b>Coletor</b>	<b>Depressor</b>
Bunge (Araxá)	Óleo de casca de arroz	Amido de milho não convencional
Bunge (Cajati)	Sarcosinato	Amido de milho convencional e não convencional
Fosfertil (Tapira)	Óleo de soja hidrogenado e mistura de óleo de soja hidrogenado + sulfossucinato	Amido de milho convencional e não convencional
Fosfertil (Catalão)	Óleo de soja hidrogenado	Amido de milho não convencional
Copebrás (Catalão)	Óleo de casca de arroz/soja	Amido de milho convencional e não convencional

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES; ARAUJO; PERES (2005)

A flotação de fosfato que usa óleos vegetais como coletores é feita em pH alcalino (9-12). Segundo resultados obtidos por Oliveira e Peres (2010) na flotação de fosfato do Complexo Alcalino Carbonatítico de Catalão - GO, a flotabilidade da apatita com oleato de sódio foi mínima para o pH 10, enquanto os pHs 9 e 11 foi máxima.

## 4. METODOLOGIA

Todos os processos de preparação e seleção das amostras, assim como os testes de moagem e flotação, foram realizados na planta piloto e laboratório de pesquisa de empresa que forneceu o minério para estudo.

### 4.1 Classificação das tipologias

Para classificar as tipologias em subgrupos foram utilizados os resultados de análises químicas realizadas pela empresa SGS Geosol em 395 testemunhos de furos de sonda. Foi feita uma pesquisa de sondagem em toda extensão da mina e os testemunhos dos furos foram enviados para análise química.

A partir dessa análise foi criado um banco de dados que contém informações sobre a localização dos furos, profundidade, intemperismo, litologia, tipologia, teores de  $P_2O_5$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $MnO_2$ .

Dentre as 5 tipologias identificadas foram estudadas somente a argilo mineral (ARG) e micáceo (MIC). Essas amostras foram divididas em quatro subgrupos (A, B, C e D) de acordo com a profundidade e com a variação dos minerais,  $SiO_2$  e  $MgO$  respectivamente. A Tabela 2 mostra a subdivisão das tipologias.

Tabela 2- Critérios de divisão dos subgrupos das tipologias argilo mineral e micáceo

Subgrupo	Profundidade (m)	Teor $SiO_2$	Subgrupo	Profundidade (m)	Teor $MgO$
ARG A	0-10	Até 25%	MIC A	0-10	Até 8%
ARG B	0-10	Maior 25%	MIC B	0-10	Maior 8%
ARG C	10-20	Até 25%	MIC C	10-20	Até 8%
ARG D	10-20	Maior 25%	MIC D	10-20	Maior 8%

### 4.2 Seleção e preparação das amostras

Para a realização dos testes preliminares foram utilizadas as amostras dos subgrupos determinados, que retornaram da empresa SGS Geosol após a análise química. Essas amostras

já haviam sido previamente homogeneizadas e britadas abaixo de 2mm para possibilitar o manuseio e quarteamento das mesmas.

As amostras de cada subgrupo (ARG A, ARG B, ARG C, ARG D, MIC A, MIC B, MIC C e MIC D) foram homogeneizadas separadamente em pilhas longitudinais e posteriormente quarteadas em quarteador Jones. No quarteamento formaram-se alíquotas de aproximadamente 1kg e estas foram identificadas de acordo com o subgrupo a que pertenciam.

Após a preparação das amostras de cada subgrupo foi preciso também formar um *blend* das alíquotas para simular a alimentação da usina, que deve ser composta de 30% de argilo mineral e 70% de micáceo. Para compor o *blend* tomou-se parte das alíquotas para formar uma pilha longitudinal composta pelas duas tipologias. Em seguida, essa pilha foi quarteada em alíquotas de aproximadamente 1kg. Essas alíquotas blendadas foram denominadas de amostra X. A Tabela 3 indica como foi composta a pilha de acordo com a porcentagem e massa em kg de cada subgrupo utilizada.

Tabela 3 - Massas de cada subgrupo para composição da amostra blendada

Subgrupo	Massa (kg)	% em massa
ARG A	10	10
ARG B	10	10
ARG C	10	10
MIC A	24	24
MIC B	23	23
MIC C	23	23
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Os grupos de alíquotas ARG D e MIC D não foram utilizados na formação do *blend* e nem nas etapas seguintes de moagem e flotação, pois não estavam no planejamento de lavra de curto e médio prazo. Porém esses dois subgrupos já foram homogeneizados e separados em alíquotas de 1kg para possíveis testes futuros.

#### 4.3 Testes preliminares de moagem com amostras dos subgrupos

Para determinação das características de fragmentação do minério foram feitos testes de moagem. Nessa etapa utilizou-se um moinho de jarros com 25cm de diâmetro e 30cm de

comprimento. Em todos os testes foram usados 10kg de bolas de 30mm. A Figura 3 mostra o moinho utilizado nos testes.

Figura 3 – Moinho de bolas usado nos testes



Para essa primeira etapa de testes foram usadas as alíquotas individuais de cada subgrupo. As condições operacionais básicas, para estes testes foram: rotação de 33 rpm (40% da velocidade crítica), considerando um tempo de moagem de 15 minutos e uma porcentagem de sólidos de 50%. A Tabela 4 mostra a sequência dos testes realizados e os parâmetros variados em cada um desses testes.

Tabela 4 - Testes de moagem com as alíquotas individuais de cada subgrupo

Identificação	Subgrupo	Tempo de moagem (min)	Rotação (rpm)	% de sólidos
A	ARG A	15	33	50
A1	ARG A	15	33	50
B	ARG B	15	33	50
B1	ARG B	15	33	50
C	ARG C	15	33	50
C1	ARG C	15	33	50
D	MIC A	15	33	50
D1	MIC A	15	33	50
E	MIC B	15	33	50
E1	MIC B	15	33	50
F	MIC C	15	33	50
F1	MIC C	15	33	50

Cada teste de moagem foi realizado com uma alíquota de aproximadamente 1kg de cada subgrupo e 1 litro de água. Foram realizados 2 testes de moagem para cada subgrupo e calculado a média dos resultados.

Para analisar a eficiência da moagem foi feito o peneiramento a úmido da amostra antes e após a moagem. As peneiras utilizadas seguem a série Tyler e foram as seguintes: 16, 32, 65, 100, 200, 400, 500#. O material retido em cada peneira e o material passante de #500 foi seco em uma estufa e pesado para se obter a distribuição granulométrica. Além disso analisou-se também o teor de  $P_2O_5$ .

#### **4.4 Testes preliminares de moagem com amostra blendada**

Nessa etapa foi usada a amostra blendada X para a realização dos testes de moagem. Em cada teste foi utilizada uma alíquota de 1kg e adicionava-se a quantidade de água de acordo com cada a porcentagem de sólidos do teste. Nesses testes também foi empregado o moinho de jarros. Para todas as avaliações foram realizados 2 ensaios nas mesmas condições e calculado a média dos resultados. Em todos os testes foi usado 10kg de bolas de 30mm.

Os parâmetros variados nos ensaios foram: tempo de moagem, porcentagem de sólidos e rotação do moinho (velocidade crítica).

A tempo de moagem foi variado em 6, 8, 10, 12 e 15 minutos. Nesses ensaios foi fixado a rotação de 33 rpm (40% de velocidade crítica) e 50% de sólidos.

A influência da rotação do moinho foi avaliada nos valores 27, 33 e 42 rpm, que correspondem respectivamente as seguintes velocidades críticas: 32, 40 e 50%. Para esses ensaios foi fixado o tempo de moagem de 10 minutos e 50% de sólidos.

Para avaliar a ação da porcentagem de sólidos no grau de fragmentação foram realizados testes com 50 e 45% de sólidos. Nesses testes os outros parâmetros foram: carga de bolas com 10kg, 10 minutos de moagem e rotação de 33 rpm (40% de velocidade crítica). Para os testes com 50% de sólidos foi misturado 1kg da amostra X com 1 litro de água, já para os testes de 45% de sólidos foi usado 1kg da amostra X com 1,22 litros de água.

A Tabela 5 mostra a sequência dos testes realizados e os parâmetros variados em cada um desses testes.

Tabela 5 - Testes de moagem com a amostra blendada

Variável	Identificação	Tempo de moagem (min)	Rotação (rpm)	% de sólidos
<b>Tempo</b>	A	6	33	50
	A1	6	33	50
	B	8	33	50
	B1	8	33	50
	C	10	33	50
	C1	10	33	50
	D	12	33	50
	D1	12	33	50
<b>Rotação</b>	E	15	33	50
	E1	15	33	50
	F	10	27	50
	F1	10	27	50
	G	10	33	50
	G1	10	33	50
<b>% sólidos</b>	H	10	42	50
	H1	10	42	50
	I	10	33	50
	I1	10	33	50
	J	10	33	45
	J1	10	33	45

Os ensaios seguiram as seguintes etapas:

- Pesou-se 10kg de corpos moedores e colocou-os no moinho;
- Colocou-se uma alíquota de 1kg da amostra X dentro do moinho;
- Adicionou-se a quantidade de água no moinho de acordo com o estabelecido com cada teste;
- O painel de controle de rotação foi ligado até a velocidade desejada para cada teste;
- Cronometrou-se o tempo de moagem de acordo com o estabelecido para cada teste;
- Após decorrido o tempo determinado desligou-se o painel de controle da rotação;

- Colocou-se um balde de 10L embaixo da tampa do moinho;
- Abriu-se a tampa e com uma mangueira de água retirou-se a polpa do interior do moinho para o balde.

#### ***4.4.1 Análise de resultados***

Para analisar os resultados da moagem foi feito peneiramento a úmido da amostra X tal qual (antes da moagem) e das amostras após a moagem. As peneiras utilizadas seguem a série Tyler e foram selecionadas as seguintes: 65, 100, 200, 400, 500#. O material retido em cada peneira e o material passante de 500# foi enviado para o laboratório da empresa em estudo.

As amostras foram secas em estufas e pesadas para se obter a distribuição granulométrica. Foi analisado por espectrofotometria o teor de  $P_2O_5$  em cada faixa granulométrica. Os resultados granuloquímicos dos testes possibilitaram que fosse feita uma análise crítica da influência dos parâmetros estudados no desempenho da moagem.

#### **4.5 Testes preliminares de flotação**

Para a realização dos testes de flotação foram utilizadas as amostras provenientes dos testes de moagem cujo parâmetro variado foi o tempo. Ao todo foram realizados 10 testes conforme ilustrado na Tabela 6.

Para realizar essa etapa de testes a polpa retirada do moinho ficou por 24h dentro do balde para que o material sólido pudesse decantar e assim o excesso de água fosse retirado, ficando no máximo 2L de polpa para os testes de flotação.

Tabela 6 - Condições dos ensaios de flotação

Identificação	Tempo de moagem (min)	Depressor (g/ton)	Coletor (g/ton)	Etapas
A	15	750	200	Rougher Cleaner
A1	15	750	200	Rougher Cleaner
B	12	750	200	Rougher Cleaner
B1	12	750	200	Rougher Cleaner
C	10	750	200	Rougher Cleaner
C1	10	750	200	Rougher Cleaner
D	8	750	200	Rougher Cleaner
D1	8	750	200	Rougher Cleaner
E	6	750	200	Rougher Cleaner
E1	6	750	200	Rougher Cleaner

#### 4.5.1 Reagentes utilizados

A Tabela 7 apresenta os reagentes usados nos ensaios de flotação que foram concedidos pela empresa viabilizadora do estudo.

Tabela 7 - Reagentes usados nos testes de flotação de bancada

Reagente	Função
Hidróxido de sódio (NaOH)	Modificador de pH
Óleo de soja saponificado	Coletor
Amido de milho gelatinizado	Depressor

O óleo de soja da empresa JBS é utilizado para a preparação do ácido graxo, usado como coletor de apatita na flotação. Para a preparação desse coletor seguiu as seguintes etapas:

- Pesou-se 30g de óleo de soja concentrado;

- Pesou-se 42,9g de NaOH com concentração de 10%;
- Pesou-se 47,1g de H<sub>2</sub>O;
- Misturou-se o óleo e a água em um béquer e colocou sobre um agitador magnético com aquecimento a 70 °C por 5 minutos;
- Após 5 minutos acrescentou a quantidade de NaOH e deixou por mais 5 minutos no agitador;
- Desligou-se o aquecedor e pesou-se 180g de água.
- Em seguida acrescentou o restante de H<sub>2</sub>O no béquer e agitou-se a solução por mais 5 minutos.

Para a preparação do depressor foi feita a gelatinização do amido de milho na proporção entre amido e NaOH de 4:1. O procedimento cumpriu os seguintes passos:

- Pesou-se 7,5g de amido de milho;
- Pesou-se 3,8g de NaOH com concentração de 50%;
- Pesou-se 63,8g de H<sub>2</sub>O;
- Em um béquer sobre um agitador magnético misturou-se lentamente o amido de milho com a água;
- Em seguida acrescentou-se NaOH aos poucos e o aquecedor foi ligado até 70 °C
- O aquecedor ficou ligado por 7 minutos;
- Pesou-se 425g de água e acrescentou no béquer;
- O agitador ficou ligado até dissolver completamente a solução.

#### ***4.5.2 Flotação em bancada***

Os ensaios de flotação em bancada foram realizados em dois estágios: Rougher e Cleaner. O objetivo desses ensaios foi avaliar a eficiência da flotação das amostras X comparando com o tempo de moagem.

Foi utilizada uma célula de flotação CDC, modelo CFB – 1000 – EEPN e duas cubas metálicas com capacidade de 4 e 2,5 litros. O equipamento possui um sistema de raspagem automática da espuma nas laterais da cuba e possui um impelidor de disco central e pás verticais. A polpa foi

condicionada com velocidade de rotação de 1200 rpm. A dosagem de depressor (amido gelatinizado) foi de 750 g/t e a de coletor (ácido graxo de óleo de soja) foi igual a 200 g/t.

Os testes seguiram a sequência de etapas:

- A polpa decantada após a moagem foi transferida para a cuba de 4 litros;
- A velocidade de rotação do disco central foi ajustada para 1200 rpm
- O pH foi ajustado com hidróxido de sódio até estabilizar em 8,5;
- O depressor amido de milho foi condicionado por 3 minutos com dosagem de 750 g/t;
- Na sequência foi acrescentado o coletor (ácido graxo de óleo de soja) dosado em 200 g/t e condicionado por 5 minutos;
- Foi adicionado água até completar a capacidade da cuba;
- A válvula de ar foi aberta até 4 atm e a espuma foi coletada até a exaustão da flotação;
- A polpa que ficou na cuba, o rejeito rougher, foi retirado e armazenado para posterior análise;
- O flotado foi transferido para a cuba menor de 2,5 litros, para etapa de flotação cleaner;
- A velocidade de rotação do disco central foi ajustada para 1200 rpm;
- Foi adicionado água até completar a capacidade da cuba;
- O pH foi ajustado novamente com hidróxido de sódio para 9,5;
- A válvula de ar foi aberta até 4 atm e a espuma foi coletada até a exaustão da flotação;
- Após a exaustão foram coletados o rejeito e o concentrado cleaner e foram armazenados separadamente para posterior análise.

Os três produtos resultantes de cada teste foram secos e pesados, e em seguida foi feita a análise de teor de  $P_2O_5$  de uma alíquota de cada produto. Assim foi possível fazer o balanço de massa e metalúrgico de cada teste.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo foi feita a análise e discussão dos resultados obtidos nesse estudo.

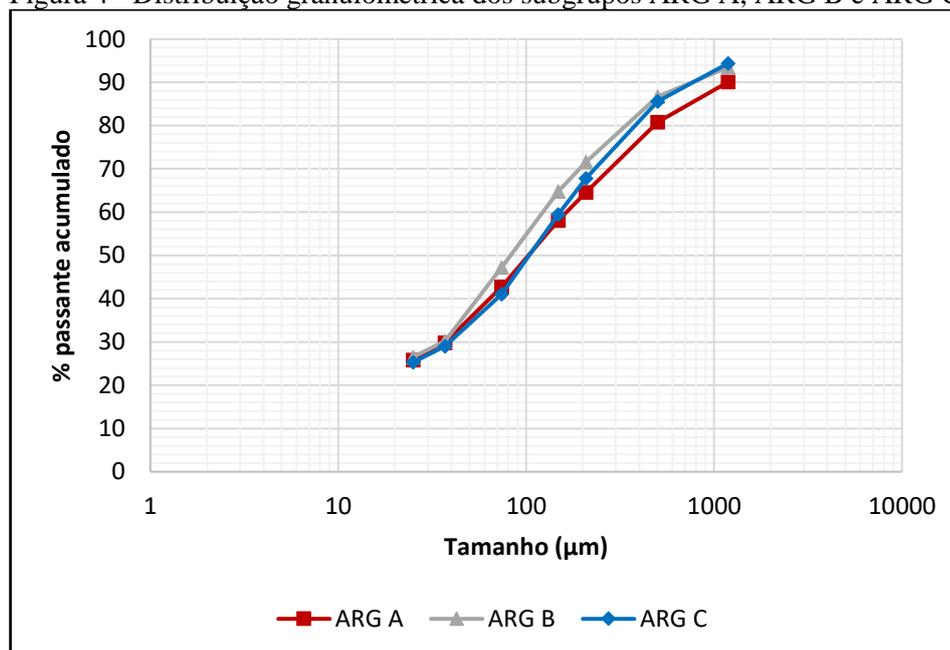
### 5.1 Caracterização tecnológica das amostras individuais

Os tópicos 5.1.1 e 5.1.2 apresentam os resultados da análise granulométrica e química dos subgrupos de argilo minerais e micáceos.

#### 5.1.1 Análise granulométrica

A Figura 4 mostra o gráfico as distribuições granulométricas das amostras ARG A, ARG B e ARG C antes da moagem.

Figura 4 - Distribuição granulométrica dos subgrupos ARG A, ARG B e ARG C.



Nota-se no gráfico que os três subgrupos apresentam distribuições granulométricas muito semelhantes até o  $d_{40}$ , em torno de 60  $\mu\text{m}$ , a partir desse valor as curvas indicam um comportamento diferente. O subgrupo ARG B apresenta maior quantidade de finos, seguido do ARG C e por último do ARG A.

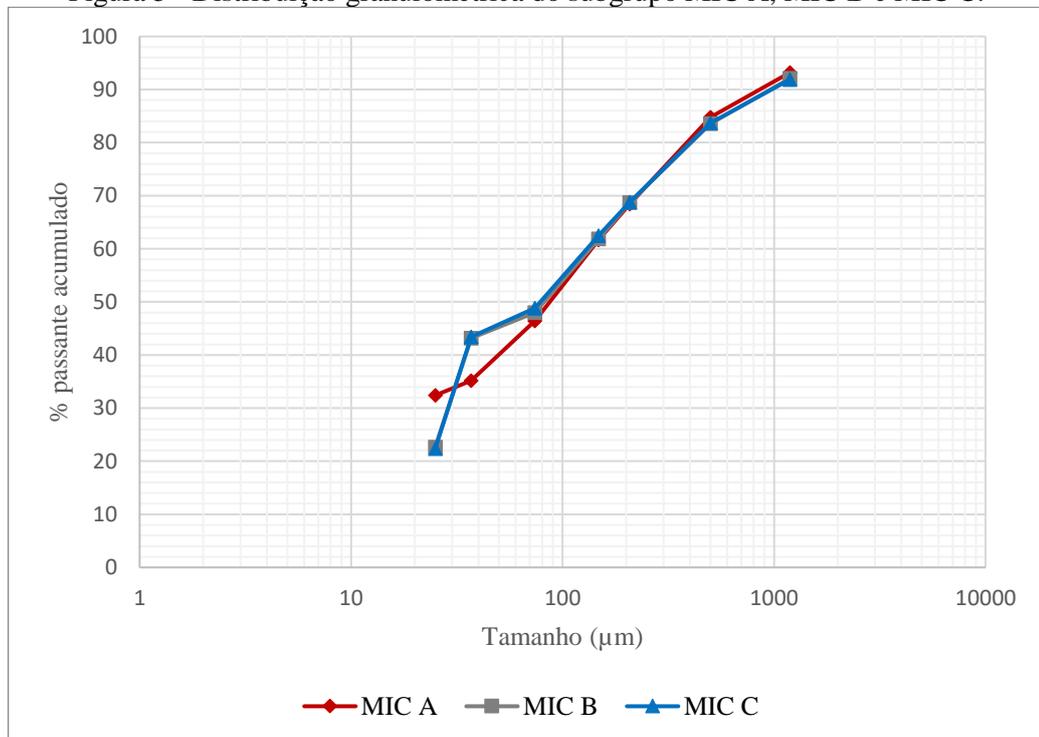
A Tabela 8 compara o d80 dos 3 subgrupos da tipologia argilo mineral e comprova que o grupo ARG B tem maior quantidade de finos.

Tabela 8 - Comparação do d80 entre os subgrupos ARG A, B e C

Amostra	d80	d90
ARG A	485,6	1182,6
ARG B	370,4	834,9
ARG C	408,1	845,0

A Figura 5 aponta como a granulometria das amostras MIC A, MIC B e MIC C se distribui antes da moagem.

Figura 5 - Distribuição granulométrica do subgrupo MIC A, MIC B e MIC C.



A Tabela 9 compara o d80 e o d90 dos 3 subgrupos da tipologia micáceo.

Tabela 9 - Comparação do d80 entre os subgrupos MIC A, B e C

Amostra	d80	d90
MIC A	414,5	927,1
MIC B	429,4	1019,5
MIC C	427,5	1030,1

Analisando o gráfico e os d80 e d90 fornecidos pode-se afirmar que os subgrupos MIC B e MIC C apresentam a mesma distribuição granulométrica e que os dois minérios só diferem da MIC A nas frações menores que 100  $\mu\text{m}$ . O d40 indica que o MIC B e o MIC C possuem maior quantidade de finos que o MIC A.

Como as distribuições, tanto dos argilo minerais como nos micáceos, foram semelhantes pode-se afirmar que a profundidade e a variação dos óxidos não tiveram relevante influência na granulometria desses materiais.

Com esses resultados também é possível afirmar que parte do material ainda não está liberado (abaixo de 250  $\mu\text{m}$ ), sendo necessário, portanto etapas de moagem para fragmentar o material na granulometria adequada.

### ***5.1.2 Caracterização química***

Analisando os dados foi possível identificar a existência de cinco tipologias: argilo mineral, micáceo, foscorito, magnetito e rocha alterada. As tipologias foscorito, magnetito e rocha alterada não são consideradas como minério no momento presente devido a inviabilidade dos processos de concentração e por isso não foram abordadas nesse trabalho. Somente o argilo mineral e o micáceo serão considerados ao longo deste trabalho

A Tabela 10 mostra os teores médios dos óxidos  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}_2$  nos subgrupos das tipologias argilo mineral e micáceo. Pôde-se observar que as amostras do grupo argilo minerais apresentou um teor médio de  $\text{P}_2\text{O}_5$  de 5,78%, superior ao valor médio das amostras no grupo do micáceo (5,12%). Os teores mais elevados foram encontrados nos subgrupos ARG A e MIC A

Tabela 10 - Resultados da caracterização química dos subgrupos de cada tipologia

Tipologia	Subgrupo	Profundidade (m)	P2O5 (%)	CaO (%)	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MgO (%)	TiO2 (%)	Na2O (%)	K2O (%)	MnO2 (%)
Argilo Mineral	ARG A	0-10	6,8	11,34	17,13	6,69	30,78	3,05	14,34	0,18	0,93	0,44
	ARG B	0-10	4,97	11,36	29,76	6,64	21,97	6,02	9,39	0,35	2,1	0,33
	ARG C	10-20	6,44	15,34	22,34	4,1	27,09	4,76	11,86	0,26	1,07	0,43
	ARG D	10-20	4,92	13,3	30,95	5,54	20,5	6,8	8,77	0,53	2,11	0,34
Micáceo	MIC A	0-10	5,98	11,74	25,27	6,57	24,96	4,73	11,19	0,33	1,69	0,37
	MIC B	0-10	4,79	13,57	32,47	4,99	18,47	8,69	8,15	0,98	1,49	0,28
	MIC C	10-20	5,48	13,7	30,05	5,14	21,75	5,88	9,52	0,51	1,86	0,34
	MIC D	10-20	4,22	16,53	33,05	3,93	17,67	10,1	7,97	0,74	1,2	0,26

Para a tipologia argilo mineral foi selecionado a variação do óxido SiO<sub>2</sub> como parâmetro pois é de grande influência no processo de flotação e apresentou variância de  $\sigma^2=57,81$  e desvio padrão de  $\sigma=7,60$ . O teor de 25% de SiO<sub>2</sub> foi estipulado como padrão para o agrupamento das amostras, pois foi a média encontrada de todos os valores.

Da mesma forma foi determinado o óxido MgO como parâmetro para subdivisão da tipologia micáceo (variância de  $\sigma^2=6,67$  e desvio padrão de  $\sigma=2,58$ ), sendo o valor de 8% a média do teor desse óxido para as amostras analisadas. Os outros óxidos apresentaram comportamentos similares para as duas tipologias e por isso não foram usados como parâmetro para as subdivisões.

## 5.2 Testes preliminares de moagem com a amostra blendada

Os tópicos 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 apresentam os resultados da análise granulométrica e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para os testes preliminares de moagem com variação nos parâmetros: tempo de moagem, velocidade de rotação e porcentagem de sólidos.

### 5.2.1 Tempo de moagem

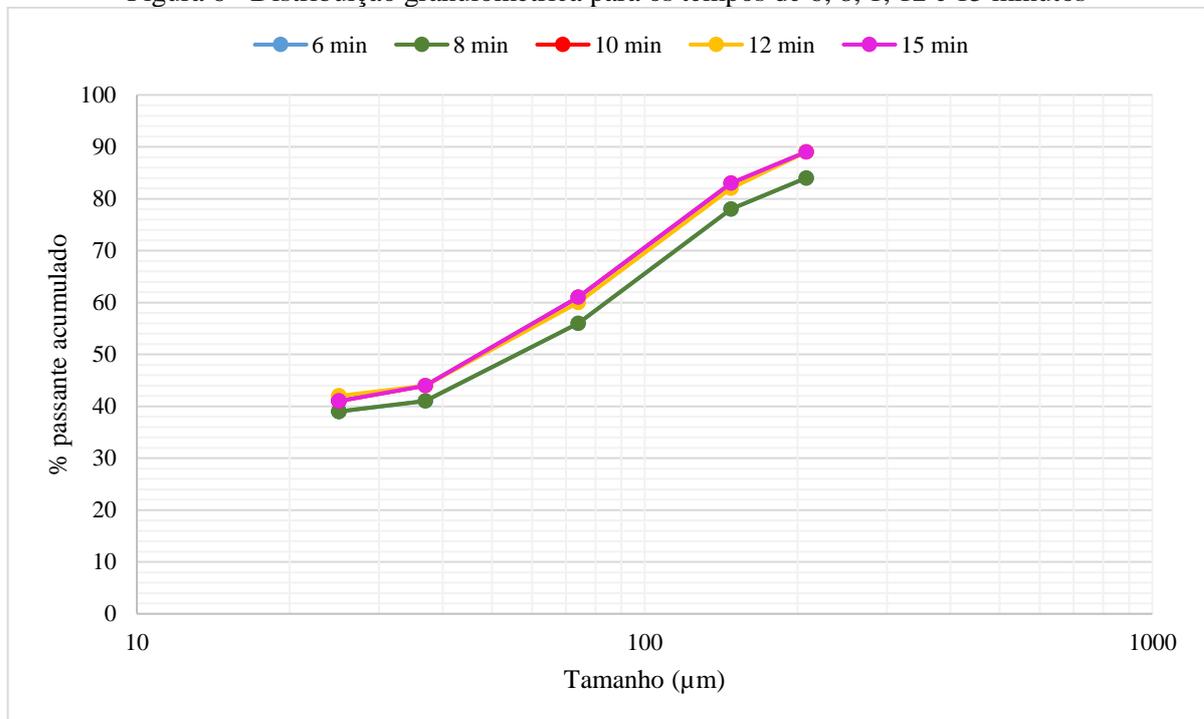
A Tabela 11 mostra a diferença das distribuições granuloquímicas do parâmetro tempo de moagem, que foi variado em 6, 8, 10, 12 e 15 minutos. Após a moagem foi feito o peneiramento a úmido de cada amostra e a análise do teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por faixa granulométrica.

No Figura 6 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica para as moagens com tempos diferentes.

Tabela 11 - Distribuição granuloquímica de acordo com os tempos de 6, 8, 10, 12 e 15 minutos

Malha	% Retido acumulado					% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> simples					% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> acumulado				
	6	8	10	12	15	6	8	10	12	15	6	8	10	12	15
65	16	16	11	11	11	4	3,4	3,3	3,5	3,3	2,8	2,6	3,6	4,6	2,4
100	22	22	17	18	17	5,5	5,3	5,2	5,2	5,1	3,5	3,3	4,2	4,8	3,4
200	44	44	39	40	39	6,5	6,5	6,7	6,5	6,7	5,0	4,9	5,6	5,8	4,9
400	59	59	56	56	56	6,8	6,5	6,7	6,5	6,7	5,5	5,3	5,9	6,0	5,4
500	61	61	59	58	59	6,6	6,7	6,5	6,6	6,5	5,5	5,4	6,0	6,0	5,5
-500	100	100	100	100	100	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,0	4,9	5,2	5,2	5,0

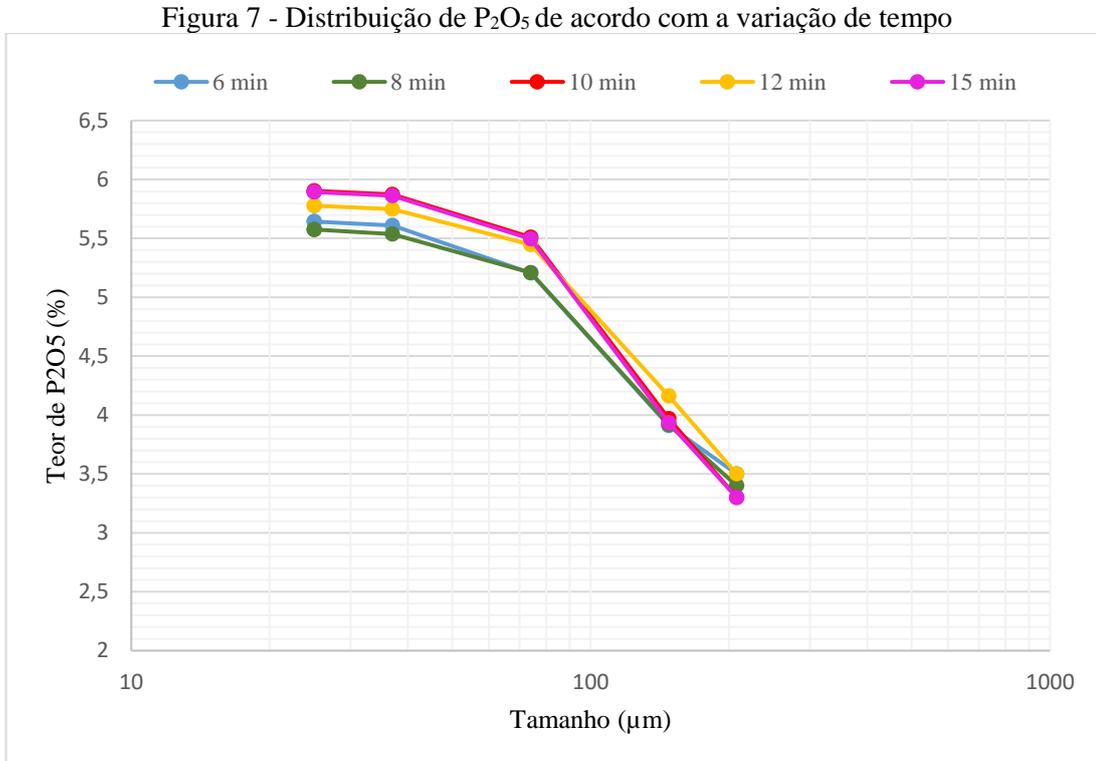
Figura 6 - Distribuição granulométrica para os tempos de 6, 8, 1, 12 e 15 minutos



A curva de 8 e 6 minutos coincidem, assim como as curvas de 10, 12 e 15 minutos, o que indica que não houve grande variação no grau de fragmentação entre 6 e 8 minutos e nem entre 10, 12 e 15 minutos. Para os dois menores tempos o material apresenta maior quantidade de partículas grossas, enquanto os três maiores tempos geraram maior quantidade de finos.

Como pode-se comparar, para 6 e 8 minutos 84% do material moído está abaixo de 208  $\mu\text{m}$ , já para 10, 12 e 15 minutos 90% da amostra moída apresenta granulometria menor que 208  $\mu\text{m}$ . Isso se deve ao fato de maior tempo de fragmentação e contato entre minério e carga moedora.

A Figura 7 mostra como ficou a distribuição acumulada de  $P_2O_5$  de acordo com o tamanho em  $\mu m$  das partículas.



Da mesma forma que na distribuição granulométrica, as curvas de distribuição de  $P_2O_5$  de acordo com o tamanho das partículas seguiram duas tendências, uma para os menores tempos (6 e 8 minutos) e uma para os maiores tempos (10,12 e 15 minutos). Para todos os testes os maiores teores estão nas frações mais finas, entre 25 e 35  $\mu m$ .

### 5.2.2 Rotação de moagem

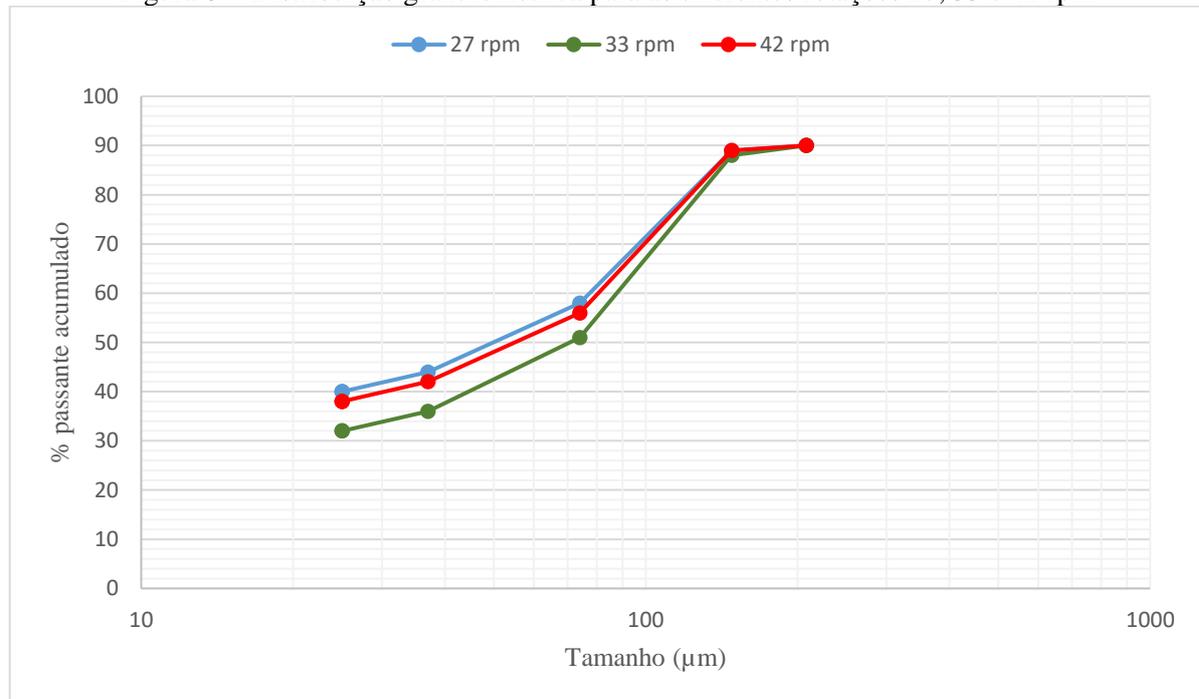
Na Tabela 12 é evidenciado a diferença das distribuições granuloquímicas devido a variação da rotação do moinho (27, 33 e 42 rpm), que correspondem respectivamente as seguintes velocidades críticas: 32, 40 e 50%.

Tabela 12 - Distribuição granulométrica de acordo com as variações da rotação do moinho de 27, 33 e 42 rpm

Malha	% Retido acumulado			% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> simples			% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> acumulado		
	27	33	42	27	33	42	27	33	42
65	10	10	10	2,8	2,6	2,4	2,8	2,6	2,4
100	11	12	11	3,9	4	4,2	2,9	2,8	2,6
200	42	49	44	5,2	5,5	5,6	4,6	4,8	4,9
400	56	64	58	6,4	6,6	6,4	5,0	5,3	5,3
500	60	68	62	5,1	5,1	5,2	5,1	5,2	5,3
-500	100	100	100	5	4,8	4,2	5,0	5,1	4,9

Na Figura 8 é apresentada as curvas da distribuição granulométrica para as três velocidades de rotação diferentes (27,33 e 42 rpm).

Figura 8 - Distribuição granulométrica para as diferentes rotações 27, 33 e 42 rpm

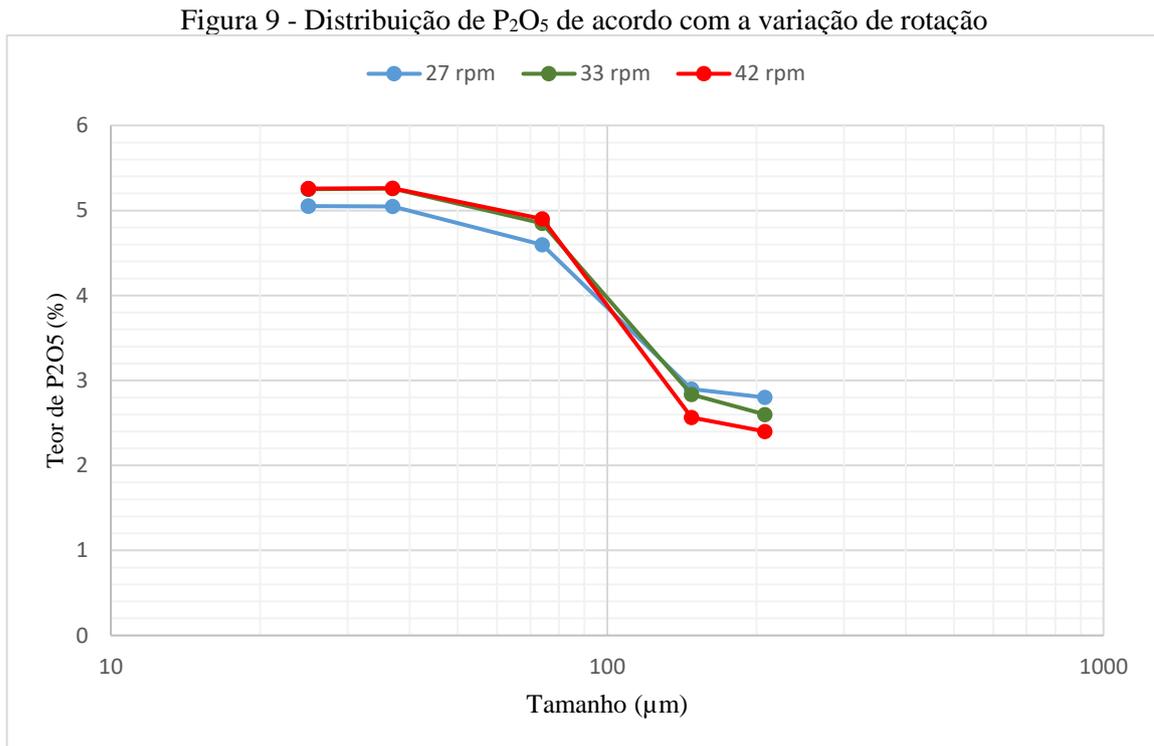


As três curvas são próximas para frações maiores que o d<sub>70</sub>, ou seja, apresentam distribuições granulométricas das faixas mais grossas semelhantes. A partir do d<sub>70</sub> as curvas demonstram distintos comportamentos. A rotação de 27rpm foi a que gerou maior quantidade de partículas finas, seguida de 42rpm e a de 33rpm que teve menor quantidade de finos.

O fato da menor velocidade de rotação ter gerado maior quantidade de finos pode ser explicado pelo mecanismo de fragmentação denominado abrasão ou cisalhamento. Nesse tipo de

mecanismo o consumo de energia é alto e há uma produção de superfinos, pois as forças aplicadas são insuficientes para provocar fraturas ao longo de toda a partícula.

A Figura 9 mostra como ficou a distribuição acumulada de  $P_2O_5$  de acordo com o tamanho ( $\mu m$ ) das partículas para as três variadas rotações.



Pela distribuição de  $P_2O_5$  nota-se que os teores mais elevados estão nas frações entre 25 e 35  $\mu m$  e que não houveram grandes diferenças entre as curvas de 33 e 42 rpm para a distribuição de  $P_2O_5$ .

### 5.2.3 Porcentagem de sólidos

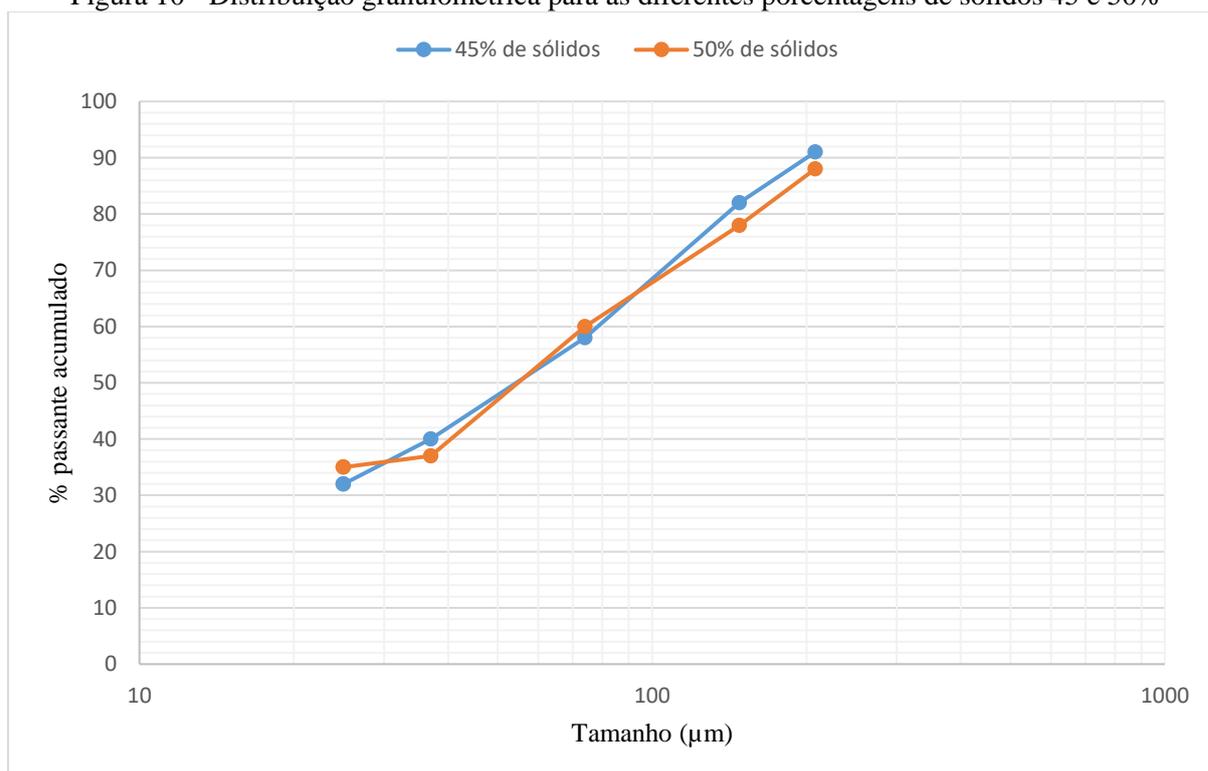
A Tabela 13 indica a diferença da distribuição granulométrica, em função da % de retido acumulado, do parâmetro porcentagem de sólidos que foi variado em 45 e 50%

Tabela 13 - Distribuição granulométrica de acordo com as porcentagens de sólidos de 45 e 50%

Malha	% Retido acumulado		% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> simples		% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> acumulado	
	45%	50%	45%	50%	45%	50%
65	9	12	2,8	2,6	2,8	2,6
100	18	22	3,8	4,8	3,3	3,6
200	42	40	4,5	5,3	4,0	4,4
400	60	63	6,5	5,7	4,7	4,9
500	68	65	5,5	4,6	4,8	4,8
-500	100	100	5	4,9	4,9	4,9

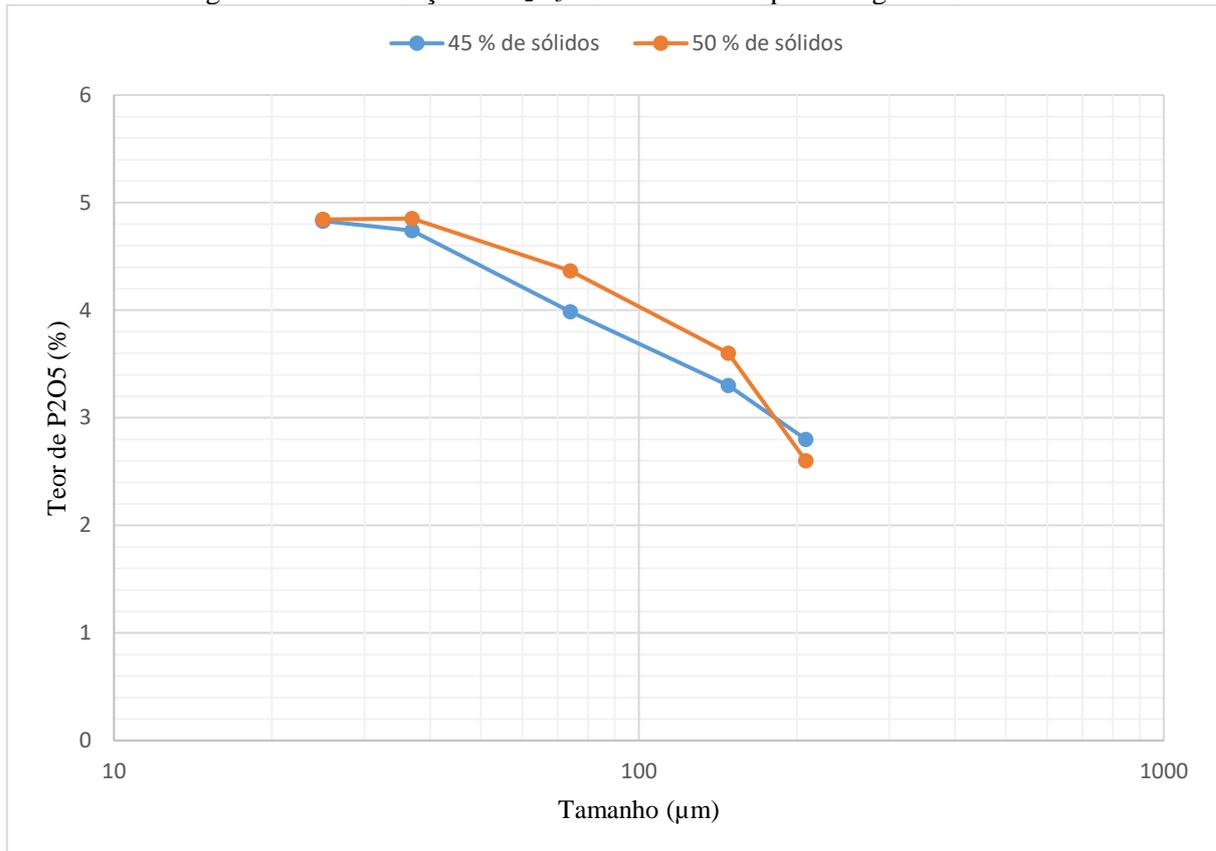
A Figura 10 mostra as curvas da distribuição granulométrica para os dois níveis de % de sólidos testados (45 e 50%). Ambas as curvas possuem distribuições semelhantes, o que indicou que a mudança nesse parâmetro de 45 para 50% não foi uma alteração significativa para afetar a distribuição granulométrica.

Figura 10 - Distribuição granulométrica para as diferentes porcentagens de sólidos 45 e 50%



Para estudos futuros é interessante analisar valores de porcentagens de sólidos com um maior intervalo entre si, como por exemplo 40 e 60%.

A Figura 11 indica como ficou a distribuição acumulada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para os ensaios com 45 e 50% de sólidos.

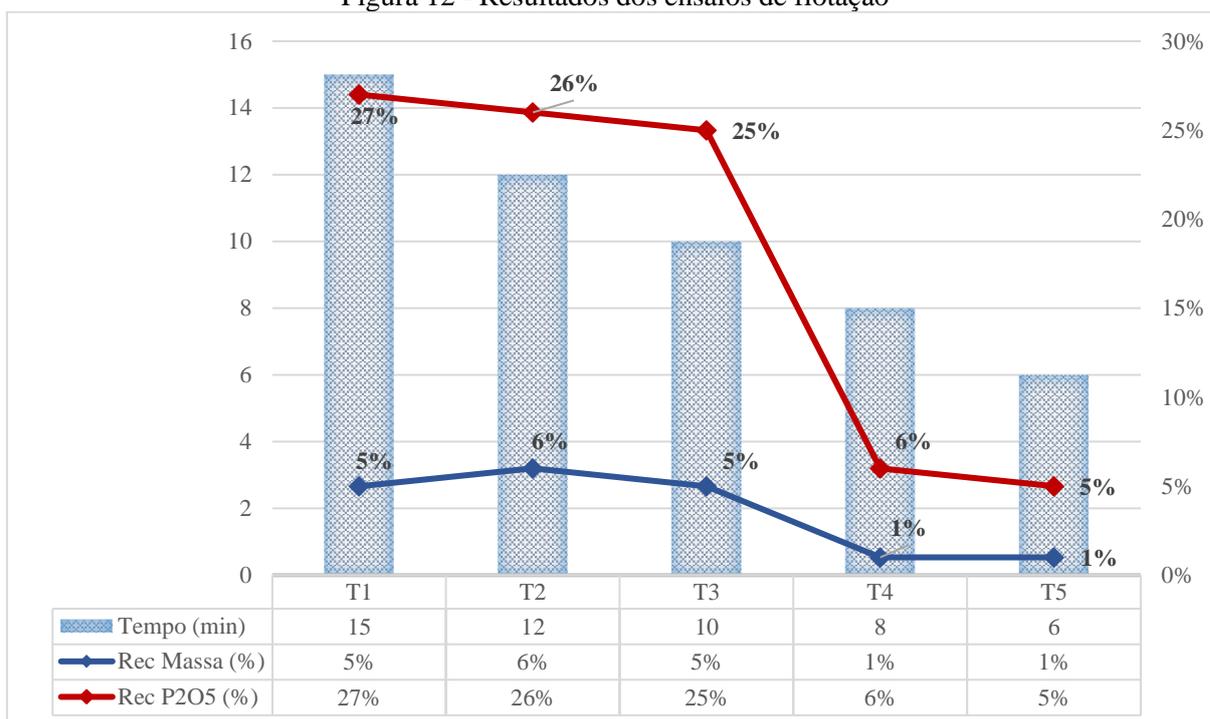
Figura 11 - Distribuição de  $P_2O_5$  de acordo com a percentagem de sólidos

A distribuição de  $P_2O_5$  indica que os teores mais elevados estão nas frações entre 25 e 35  $\mu\text{m}$  e que não houveram grandes diferenças entre as curvas de 45 e 50% de sólidos.

### 5.3 Testes de flotação em bancada

A Figura 12 apresenta os resultados de recuperação mássica e de  $P_2O_5$  para cada teste de flotação.

Figura 12 - Resultados dos ensaios de flotação



Os testes preliminares de flotação mostraram que para os menores tempos de moagem, 6 e 8 minutos, foram obtidas as menores recuperações de massa e de  $P_2O_5$ , respectivamente 1% e 5-6%. Isso se explica pelo fato de que os menores tempos de moagem não foram suficientes para liberar a apatita e, portanto, obteve tão baixa eficiência na flotação.

Os maiores valores de recuperações foram observados para os testes de flotação provenientes dos maiores tempos de moagens. Para esses tempos de moagem a recuperação de massa ficou entre 5 e 6% e a de  $P_2O_5$  obteve valores entre 25 e 27%. Isso se deve ao fato de que com os tempos de 10, 12 e 15 minutos o grau de liberação entre a apatita e os minerais de ganga provavelmente foi maior que nos tempos de 6 e 8 minutos.

Em escala industrial, os valores esperados de recuperação mássica são em torno de 10% e a de  $P_2O_5$  é de 73%. Os resultados desse estudo ficaram abaixo desses valores, indicando que é pertinente para futuros testes aplicar etapas de deslamagem antes da flotação e variar a dosagem dos reagentes, para analisar a influência das faixas mais finas na flotação e se quantidade de reagentes pode ser um parâmetro influenciador.

## 6. CONCLUSÕES

Através das análises químicas foi possível subdividir os grupos de argilo minerais e micáceos em outros 8 sub tipologias de acordo com a profundidade e teores de óxidos. Estes subgrupos foram denominados ARG A, ARG B, ARG C, ARG D, MIC A, MIC B, MIC C e MIC D.

A profundidade e a variação dos óxidos não influenciaram a distribuição granulométrica nos subgrupos do argilo mineral e do micáceo.

Na moagem da amostra blendada a variação do tempo mostrou que os maiores tempos (10, 12 e 15 minutos) obtiveram maior redução na granulometria da amostra e também geraram maior quantidade de finos.

As distribuições para as três velocidades de rotação foram muito semelhantes, somente para as frações menores que 80  $\mu\text{m}$  o comportamento das curvas se diferenciou, sendo que velocidade de 33 rpm foi a que gerou menor quantidade de finos.

Os níveis de porcentagem de sólidos avaliados foram próximos (45 e 50%), portanto as distribuições granulométricas foram muito semelhantes.

Os melhores resultados da flotação de bancada (maiores recuperações de massa e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) foram obtidos com as amostras provenientes dos testes com os três maiores tempos de moagem.

## REFERÊNCIAS

BARCELOS, A. C. C., SOUZA, M. F., LOPES, G. M., PEREIRA, C.A., *O efeito de depressores na microflotação de apatita*. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2013, pag. 267-273.

BERALDO, J. L., Moagem de minérios em moinhos tubulares. In: BERALDO, J. L., *Projeto e Construção de Moinho de Barras e Bolas*. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 1987. cap. 3, pag. 20-47.

BRAGA, G. N. M., *Tipos e obtenção dos fertilizantes fosfatados*. 2010. Disponível em: <<http://agronomiacomgismonti.blogspot.com.br/2010/05/tipos-e-obtencao-dos-fertilizantes.html>>. Acesso em: 05 mar. 2017.

CASTRO, L. N., MELGAR, R. J. Fosfatos. In: NIELSON, H.; SARUDIANSKY, R. (Ed.). *Minerales para la agricultura en Latinoamérica*. Argentina: Unsam, 2005. p. 39-40.

FIGUEIRA, H. V. O.; LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M, Britagem e Moagem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de Minérios*. 5ª edição, Ed. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2010, p. 143-297.

FONSECA, D. S., *Fosfato - Sumário Mineral 2014*. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. 2014.

GALVANI, Disponível em: <<http://www.galvani.ind.br/noticias-e-eventos/galvani-lanca-hot-site-sobre-projeto-serra-salitre.html>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

GENERALIC, E., Fósforo. GENERALIC, E. *Tabla periódica de los elementos*. 2016. Disponível em: <<http://www.periodni.com/es/p.html>>. Acesso em: 29 jan. 2017.

GUIMARÃES, R.C.; ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C. *Reagents in Igneous Phosphate Ores Flotation*. Minerals Engineering, v. 18, 2005, p. 199-204.

KAUWENBERGH, S. J. V., Mining and Beneficiation of Phosphate rock. In: KAUWENBERGH, S. J. V. *World Phosphate Rock Reserves and Resources*. Alabama: International Fertilizer Development Center (IFDC), 2010. p 3-4.

KULAIIF, Y., Indústria de fertilizantes – Conceituação. In: KULAIIF, Y. *A nova configuração da indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1999. cap. 2, pag. 4–19.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G., *Boletim técnico nº4 - Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agrônômicos*. 3ª Ed. São Paulo: ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2000. cap. 2,3 e 4, p. 2-39.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais – Fosfato. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F., *Rochas e minerais industriais: usos e aplicações*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. cap. 7, p. 141-176.

MANNING D. A.C., Minerals for agriculture and the chemical industry. In: MANNING D. A.C. *Introduction to Industrial Mineral*. Department of Geology, University of Manchester. London: Chapman & Hall, 1995. p. 83-87.

NUNES, A. P. L.; PERES, A. E. C., *Reagentes depressores de carbonatos: uma revisão*. Série Tecnologia Mineral, Número 89, Ed. CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2011. p. 1- 42. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/series/serie-tecnologia-mineral>> . Acesso em: 07 mar. 2017

OLIVEIRA, M. S. *Minério fosfático sílico-carbonatado: estudo fundamental*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2007, pag. 9-53.

OLIVEIRA, M. S.; PERES, A. E. C., *Flotabilidade da apatita e minerais de ganga provenientes de minério sílico-carbonatado com oleato de sódio*. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 63(3): pag. 551-557, set. 2010.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C., A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: PINTO, A. C. *Flotação: o estado da arte no Brasil*. São Paulo: Signus Editora. Coleção teoria e prática do tratamento de minérios. 2006. Vol. 4, p. 1-29.

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A.C.; EL-SHALL, H.; ZHANG, P.; ABDEL-KHALEK, N. A., *Part 5- Plant Practice: Nonsulfite Minerals*. In: FUERSTENAU, M. C.; JAMESON, G.; YOON, R. H., *FROTH FLOTATION: A Century of Innovation*. Ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Colorado, USA, 2007. p.845-857.

SANTOS, R.L.C.; SOBRAL, L.G.S.; ARAÚJO, R.V.V.; Equipe Técnica Fosfertil/CMT. *Produção de fosfato no brasil: Complexo de Mineração de Tapira/FOSFERTIL*. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2002, pag. 431-439.

SANTIN, J. C., Fósforo: história e aplicação. *NFT Alliance*. 2013. Disponível em: <<http://nftalliance.com.br/artigos/bovinos-de-corte/fsforo-histria-e-aplicao>>. Acesso em: 29 jan. 2017.

SIS, H.; CHANDER, S., *Reagents used in the flotation of phosphate ores: a critical review*. Minerals Engineering, 2003, pag. 577-585.

STRATEN, P. V. Los minerales y la agricultura. In: NIELSON, H.; SARUDIANSKY, R. (Ed.). *Minerales para la agricultura en Latinoamérica*. Argentina: Unsam, 2005. p. 19-36.

ULIANA, D., *Caracterização tecnológica do minério de fosfato do complexo alcalino de Serra do Salitre, MG - Área Fosfertil*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, USP, São Paulo, 2010, p. 210.