



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**BIANCA LOUISE SOUSA OLIVEIRA**

**ESTUDO DO REJEITO MAGNÉTICO PROVENIENTE DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSFÁTICA, ATRAVÉS DA  
CARACTERIZAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS,  
QUÍMICAS E MINERALÓGICAS**

**ARAXÁ/MG**

**2019**

**BIANCA LOUISE SOUSA OLIVEIRA**

**ESTUDO DO REJEITO MAGNÉTICO PROVENIENTE DO  
BENEFICIAMENTO DE ROCHA FOSFÁTICA, ATRAVÉS DA  
CARACTERIZAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS,  
QUÍMICAS E MINERALÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva  
Coorientador: Prof. Dra. Delma Pereira Caixeta

**ARAXÁ/MG**

**2019**

BIANCA LOUISE SOUSA OLIVEIRA

**ESTUDO DO REJEITO MAGNÉTICO PROVENIENTE DO BENEFICIAMENTO DE  
ROCHA FOSFÁTICA, ATRAVÉS DA CARACTERIZAÇÃO DE SUAS  
PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E MINERALÓGICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
de Minas do Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais – CEFET/MG, como requisito  
parcial para a obtenção de grau de  
bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 04 de dezembro de 2019



**Presidente e Orientador: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Membro Titular e Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Delma Pereira Caixeta**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Membro Titular: Prof.ª Dr.ª Marcela Maira Nascimento de Souza Soares**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Membro Titular: Prof. Esp. Francisco de Castro Valente Neto**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, minhas tias Marinalvia, Marcia e Antônia, e a minha avó Dilú, pelo apoio para que eu pudesse realizar meu sonho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida, pela proteção à mim concedida. Aos meus pais, Eliana e Maurício, e a minha irmã Beatriz pelo apoio e carinho de sempre. Aos meus familiares e amigos que mesmo distantes fisicamente me deram forças para continuar nesse caminho. Aos meus queridos amigos Mario, Maria Virginia, Sócrates, Maria Luiza e Guilherme que me ajudaram ao longo dos anos de faculdade e durante o período de realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Fernando Brandão e à minha coorientadora Delma Pereira, pelo suporte e orientação durante a realização deste trabalho, e por terem contribuído para minha formação. Ao professor Francisco de Castro por me ajudar da forma mais competente na execução dos ensaios realizados no Laboratório de Mineralogia.

Aos técnicos João Victor, Matheus Vynicius, Tairony Ferreira e Ricardo Jerônimo pelo suporte prestado durante a execução dos ensaios no Laboratório de Tratamento de Minérios e a todos meus professores que foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

## RESUMO

Devido ao fato da geração de resíduos no beneficiamento mineral ainda ser uma realidade mundial, uma opção para a diminuição dos impactos sociais e ambientais causados pelos rejeitos minerais é o estudo de possíveis formas para o seu reaproveitamento. Para que se faça possível uma reutilização adequada destes produtos, é necessário a realização de uma caracterização tecnológica dos mesmos. As reservas de fosfato da região de Araxá – MG possuem minerais com média e alta susceptibilidade magnética, que são separados do produto final através de separação magnética. Estes minerais compõem o rejeito magnético proveniente do beneficiamento mineral de rocha fosfática. Com este intuito, o presente trabalho consiste no estudo do rejeito magnético da região, a fim de identificar os minerais presentes no mesmo, quantificar o grau de liberação por faixa granulométrica, avaliar os impactos causados no material quando submetido a um campo magnético externo, e sugerir possíveis aplicações na construção civil em função da sua granulometria. As análises granulométricas mostraram uma porcentagem de 11,10% de material pulverulento, e um módulo de finura de 1,48. Notou-se um aumento no grau de liberação e na relação de enriquecimento do óxido de ferro em função da diminuição da granulometria e na faixa de 150  $\mu\text{m}$ , mais de 90% das partículas de magnetita encontram-se liberadas. A análise mineralógica apontou a presença de minerais das classes de óxidos, silicatos e fosfatos na fração não magnética. Os resultados da separação magnética mostraram a alta recuperação mássica e metalúrgica, acima de 90%, além de uma maior razão de enriquecimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no concentrado magnético na faixa granulométrica de 150  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** Magnetita; Rejeito magnético; Caracterização tecnológica; Grau de liberação; Concentração magnética.

## ABSTRACT

Because to the fact the generation of tailings in mineral beneficiation still be a global reality, an option for the reduction of the social and environmental impacts caused by mineral tailings is the study of possible ways to enable their reuse. To make possible a proper reuse of these products, it is necessary to the achievement of a technological characterization. The reserves of phosphate in the region of Araxá – MG have minerals with medium and high magnetic susceptibility, which are separated from the final product through magnetic separation. These minerals make up the magnetic tailing from the mineral beneficiation of phosphate rock. Based on this, the present work consists of the study of magnetic tailing of the region, in order to identify the minerals present, determine its degree of liberation by particle size range, as well to know the impacts on the material when subjected to an external magnetic field, and suggest possible applications in civil construction in function of their size. The particle size analyzes showed a percentage of 11.10% of the material powdery, and a module of fineness of 1.48. It was noted an increase in the degree of liberation and the relationship of enrichment of iron oxide in function of the decrease of fineness. The mineralogical analysis showed the presence of minerals of classes of oxides, silicates and phosphates in the fraction no magnetic imaging. The results of the magnetic separation showed the high mass recovery and metallurgical, above 90%, plus a greater reason for enrichment of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  magnetic concentrate in the range of 150  $\mu\text{m}$  particle size.

**Key words:** Magnetite; Magnetic reject; Technological characterization; Degree of liberation; Magnetic concentration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da etapa de britagem do CMT. ....	15
Figura 2: Locais de disposição do rejeito magnético do CMT.....	16
Figura 3: Etapas de moagem e separação magnética do circuito granulado do CMT.....	17
Figura 4: Etapas de moagem e separação magnética do circuito friável do CMT. ....	17
Figura 5: Mineral de Magnetita. ....	18
Figura 6: Separador Eletromagnético de Carrossel modelo L-4. ....	20
Figura 7: Campo magnético uniforme (A) e convergente (B), apresentando o gradiente de campo. ....	21
Figura 8: Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas: (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas. ....	22
Figura 10: Vidraria utilizada para testes de picnometria. ....	24
Figura 11: Série de peneiras acopladas ao peneirador suspenso. ....	25
Figura 12: Partículas livres e mistas utilizadas para a obtenção do grau de liberação. ....	28
Figura 13: Espectro típico obtido para uma amostra aquosa de arsênio em forma de gota seca sobre o filme. ....	28
Figura 15: Pilha alongada, amostra inicial. ....	33
Figura 16: Pilha alongada para separação de alíquotas de 0,500kg. ....	33
Figura 17: Fluxograma etapa de preparação das amostras. ....	34
Figura 18: Picnômetros identificados conforme equação [3]. ....	35
Figura 19: Peneirador suspenso. ....	36
Figura 20: Lupa trinocular utilizada para determinação do grau de liberação. ....	37
Figura 21: Partículas de 1200 $\mu\text{m}$ dispostas em uma placa de Petri. ....	37
Figura 22: Esquematização de divisão realizada em uma partícula para classificação do grau de liberação.....	38
Figura 23: Curva granulométrica do segundo peneiramento.....	41
Figura 24: Grau de liberação por faixa granulométrica. ....	42
Figura 25: Imagem de lupa trinocular de partícula liberada de magnetita. ....	43
Figura 26: Imagem de lupa trinocular dos minerais flogopita, vermiculita e quartzo. ....	44
Figura 27: Imagem de lupa trinocular óptico dos minerais piroxênio, limonita, apatita e quartzo. ....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixa de Campo Necessária para Concentração Magnética.....	21
Tabela 2: Série Tyler de peneiras com aberturas em malhas com valores correspondentes em mm, $\mu$ m e polegadas.....	26
Tabela 3: Série de peneiras normal e intermediária.....	30
Tabela 4: Classificação da areia quanto ao módulo de finura.....	31
Tabela 5: Utilização de agregados em função da granulometria.....	31
Tabela 6: Resultados dos ensaios de picnometria.....	40
Tabela 7: Análise mineralógica, fração não magnética.....	43
Tabela 8: Teores de óxidos determinados em análise química (%).....	46
Tabela 9: Recuperação mássica, metalúrgica e relação de enriquecimento.....	47
Tabela 10: Análise granulométrica do primeiro peneiramento.....	52
Tabela 11: Análise granulométrica do segundo peneiramento.....	52
Tabela 12: Análise granulométrica do terceiro peneiramento.....	53
Tabela 13: Grau de liberação, fração retida na malha de 14#.....	54
Tabela 14: Grau de liberação, fração retida na malha de 28#.....	54
Tabela 15: Grau de liberação, fração retida na malha de 35#.....	54
Tabela 16: Grau de liberação, fração retida na malha de 48#.....	55
Tabela 17: Grau de liberação, fração retida na malha de 65#.....	55
Tabela 18: Grau de liberação, fração retida na malha de 100#.....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CMT	Complexo de Mineração de Tapira
GL	Grau de Liberação
HGMS	<i>High Gradient Magnetic Separation</i>
HIMS	<i>High Intensity Magnetic Separation</i>
MF	Módulo de Finura
ROM	<i>Run of Mine</i>
T	Tesla
LTM	Laboratório de Tratamento de Minérios
RMAS	Recuperação Mássica
RMET	Recuperação Metalúrgica
REN	Relação de Enriquecimento

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_2O_5$	Pentóxido de Fósforo
$Fe_2O_3$	Oxido de Ferro
$\vec{B}$	Densidade de fluxo magnético
$\vec{H}$	Intensidade de campo
$Fe_3O_4$	Magnetita
$CaTiO_3$	Perovskita
$FeTiO_3$	Ilmenita
$Fe(OH)_3.nH_2O$	Limonita
$KMg_3Si_3AlO_{10}(OH, F)_2$	Flogopita
$(Mg, Fe^{3+}, Al)_3(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2.4H_2O$	Vermiculita
$SiO_2$	Óxido de Silício
$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	Apatita
$MgO$	Óxido de Magnésio
$CaO$	Óxido de Cálcio
$Al_2O_3$	Óxido de Alumínio
$TiO_2$	Dióxido de Titânio

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	Considerações Gerais .....	14
2.2	Rejeito magnético proveniente do beneficiamento de rocha fosfática .....	16
2.3	Separadores magnéticos .....	19
2.3.1	Concentração Magnética .....	20
2.4	Técnicas de caracterização tecnológica de minérios .....	23
2.4.1	Picnometria.....	24
2.4.2	Análise granulométrica por peneiramento.....	25
2.4.3	Grau de liberação.....	27
2.4.4	Fluorescência de raios-X .....	28
2.5	Agregados para construção civil.....	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
3.1	Preparação da amostra .....	32
3.2	Caracterização das amostras .....	34
3.2.1	Ensaios para determinação da densidade.....	34
3.2.2	Análise granulométrica.....	35
3.2.3	Determinação do grau de liberação por faixa granulométrica.....	36
3.2.4	Ensaios de separação magnética.....	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
4.1	Análise de densidade .....	40
4.2	Análise Granulométrica.....	40
4.3	Grau de Liberação .....	42
4.4	Análise Mineralógica.....	43
4.5	Ensaios de separação magnética.....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>
	<b>APÊNDICE A.1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....</b>	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE A.2 – GRAU DE LIBERAÇÃO .....</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de grandes acidentes socioambientais envolvendo barragens de contenção de rejeitos da mineração e o aumento de custos operacionais com a manutenção de barragens, mostraram a importância de se estudar medidas alternativas para o reaproveitamento destes resíduos.

As reservas de fosfato e nióbio da região de Araxá possuem minerais com média e alta susceptibilidade magnética e que são separados do produto final através de separação magnética. Embora a magnetita seja o principal mineral, cujas propriedades tenham sido estudadas por diversos pesquisadores, o rejeito magnético da região de Araxá possui, além da magnetita, outros minerais compostos de óxidos de ferro, titânio e fósforo. Portanto, há margem para novos estudos de aplicação deste material.

Visto o fato de que a geração de resíduos no beneficiamento mineral ainda é uma realidade mundial, seu reaproveitamento é uma opção para diminuir os impactos sociais e ambientais causados pelos rejeitos minerais. Para que isso seja possível é necessária a caracterização destes produtos, de forma a possibilitar o melhor entendimento de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, e proporcionar uma reutilização adequada para os mesmos, além de diminuir os impactos e gerar receita para as empresas.

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar o rejeito magnético proveniente do beneficiamento de rocha fosfática, através da caracterização de suas propriedades físico-químicas e mineralógicas.

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em caracterizar o rejeito magnético de modo a: identificar os minerais presentes, conhecer a densidade, determinar a granulometria do material bem como o grau de liberação por faixa granulométrica, avaliar a capacidade de recuperação do rejeito quando for submetida a um campo magnético externo e, ao final, correlacionar as características para o pleno entendimento e sugerir possíveis aplicações para este rejeito.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Considerações Gerais

Os municípios de Araxá e Tapira, localizados na região oeste do Estado de Minas Gérias, são detentores de um dos maiores depósitos de fosfato do Brasil. Segundo Santos *et al.* (2002) apud Bezerra e Brod (2013), as reservas medidas de minério da região são da ordem de 265 milhões de toneladas, e apresentam uma produção de aproximadamente 2,0 milhões de toneladas/ano de rocha fosfática com 35% de  $P_2O_5$ .

No Complexo de Mineração de Tapira (CMT), por exemplo, há minerais como apatita, ilmenita, magnetita, hematita, minerais de terras raras, vermiculita e barita, que tiveram sua concentração econômica favorecida pelo intemperismo tropical predominante na região, por concentração residual. Porém, do ponto de vista mineralógico somente os membros da série da apatita são considerados minerais-minério de fósforo. Embora os minérios de fosfato e titânio sejam lavrados na região, o minério de titânio fica estocado no aguardo do desenvolvimento de um processo tecnológico para seu beneficiamento (BEZERRA; BROD, 2013).

No Brasil, ao contrário de outros países, a produção de concentrado fosfático se deve principalmente às jazidas de fosfato magmáticas que ocorrem em complexos alcalino-carbonatíticos no município de Tapira-MG. Para Bezerra e Brod (2013), a extração da apatita é essencial por se tratar de um dos principais insumos para a indústria de fertilizantes e, conseqüentemente, importante aliado para a produção de alimentos no país. Além das jazidas magmáticas, os depósitos de rochas fosfáticas também podem ser classificados em depósitos sedimentares e depósitos biogênicos.

Segundo Silva (2016), as reservas de fosfato de Tapira-MG, apresentam um teor médio de 8,4% de  $P_2O_5$ , com teor de corte de 5,0% de  $P_2O_5$ . Os principais minerais formadores do depósito são a apatita, magnetita, mica, quartzo, perovskita e anatásio, que juntos compõem cerca de 83% do R.O.M (*Run of mine*). A lavra do depósito é realizada a céu aberto, por meio de desmonte mecânico e com uso de explosivos. Após desmontado, o minério é transportado até um britador primário onde reduz-se sua granulometria até quatro polegadas de diâmetro.

O processo de beneficiamento é composto por etapas de britagem, concentração e expedição. A Figura 1 mostra a esquematização da etapa de britagem, realizada com o intuito de adequar a granulometria do material para etapas subsequentes.

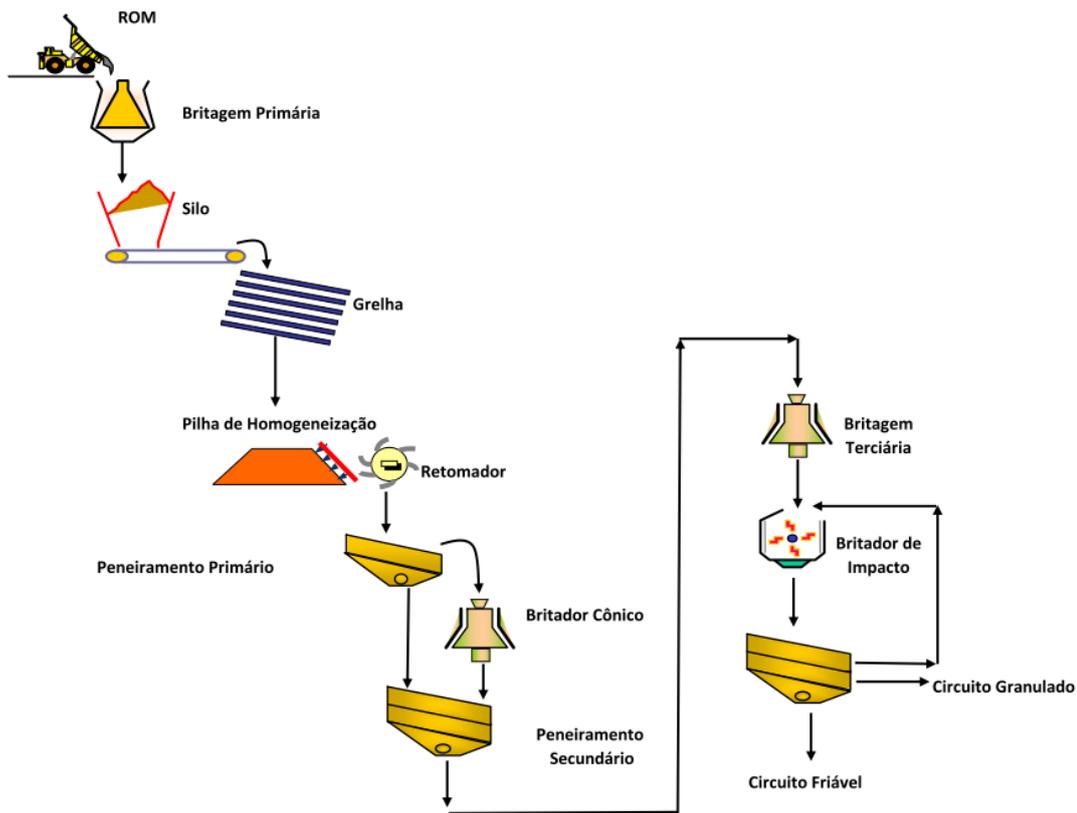


Figura 1: Fluxograma da etapa de britagem do CMT.

Fonte: Silva (2016).

Segundo Silva (2016), na etapa de concentração do CMT o tratamento do minério é dividido em circuito granulado, circuito friável, e circuito de ultrafinos, que são separados de acordo com a sua granulometria.

No Circuito Granulado, o produto da moagem alimenta a separação magnética de baixo campo (900 a 1.000 Gauss) em apenas uma etapa (*rougher*<sup>1</sup>), de onde é retirado o rejeito magnético e um concentrado não magnético que segue para etapas de classificação e, posteriormente, concentração.

O Circuito Friável é composto por linhas de moagem associadas a separadores magnéticos em dois estágios (*rougher* e *cleaner*<sup>2</sup>), de onde é descartado o rejeito magnético, e o não magnético segue para etapas de classificação e concentração. A Figura 2 mostra a disposição do rejeito magnético proveniente do circuito granulado e do circuito friável no CMT.

<sup>1</sup> *Rougher* é o nome dado a primeira etapa do processo de concentração na usina de beneficiamento mineral.

<sup>2</sup> *Cleaner* é o nome dado a etapa de recuperação do concentrado, onde o produto do concentrado da etapa Rougher passa por um novo processo de concentração.



Figura 2: Locais de disposição do rejeito magnético do CMT.

Fonte: Google Earth (2019).

## 2.2 Rejeito magnético proveniente do beneficiamento de rocha fosfática

O rejeito magnético é proveniente de etapas de desmagnetização, onde o material de interesse da concentração é o produto não magnético. De acordo com Silva (2016), para a etapa de desmagnetização a úmido é preparada uma suspensão com água e material moído, que é colocada em contato com um cilindro imantado que separa a magnetita, mineral ferromagnético, dos demais constituintes da rocha. A susceptibilidade magnética é a propriedade que indica se um mineral é atraído ou repelido quando submetido a um campo magnético (SAMPAIO *et al.*, 2018). De acordo com SILVA (2016), as Figura 3 e Figura 4 mostram exemplos de etapas de beneficiamento mineral que dão origem ao rejeito magnético.

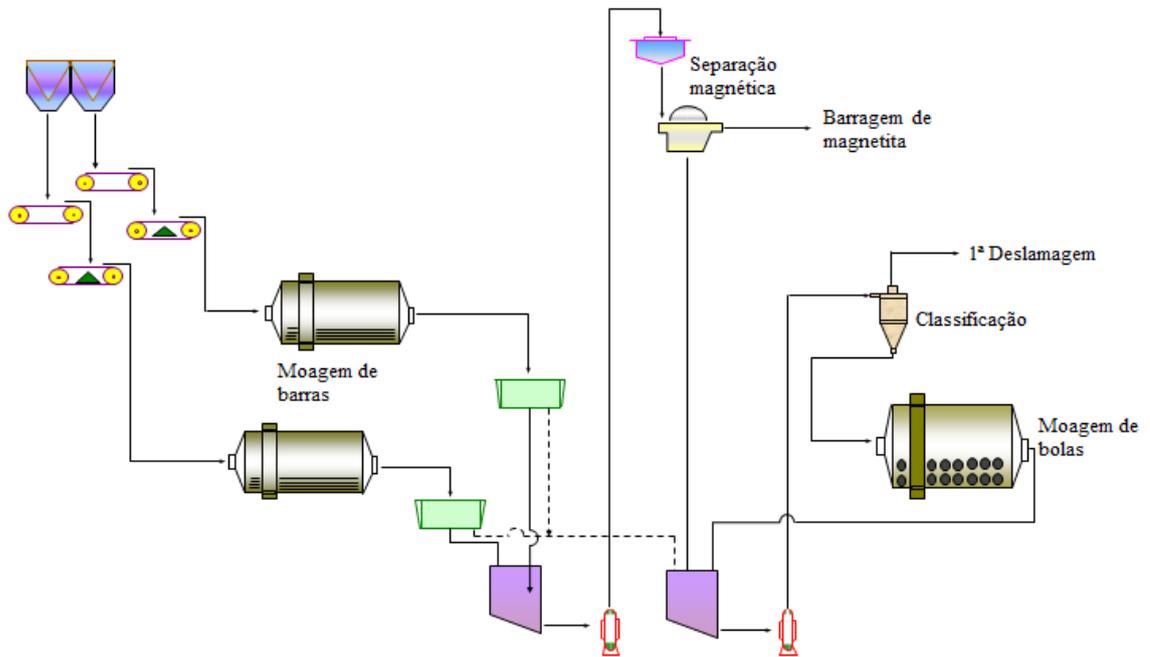


Figura 3: Etapas de moagem e separação magnética do circuito granulado do CMT.

Fonte: Silva (2016, p. 24).

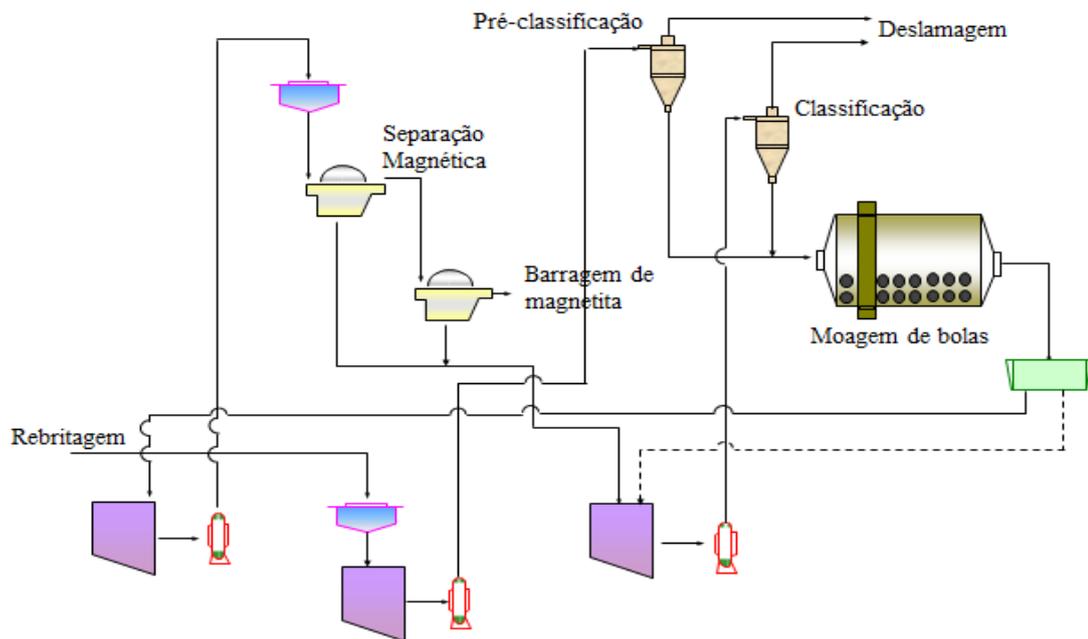


Figura 4: Etapas de moagem e separação magnética do circuito friável do CMT.

Fonte: Silva (2016, p. 27)

Dentre os minerais atraídos pelo campo magnético estão os minerais ferromagnéticos, e os paramagnéticos, visto que, os minerais ferromagnéticos são fortemente atraídos pelo campo,

enquanto os paramagnéticos não sofrem tão intensamente a força de atração, sendo fracamente atraídos. Já os minerais que são repelidos pelo campo são denominados de diamagnéticos ou não magnéticos. Um exemplo comum de minerais paramagnéticos é a hematita, e dentre os minerais repelidos pelo campo magnético estão minerais como quartzo, cerussita, magnesita, calcita e barita, que possuem uma susceptibilidade magnética negativa.

A Figura 5, mostra a magnetita, mineral ferromagnético, que é o principal constituinte do rejeito magnético do CMT, é um óxido magnético composto por íons de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , e tem a seguinte fórmula molecular,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Sua concentração é de extrema importância segundo Santana *et al.* (2007), visto que a mesma apresenta uma grande importância econômica na indústria eletrônica, e devido ao fato de ser um mineral acessório de várias rochas máficas como o basalto, anfíbolito e tufito, e não máficas, como esteatito.



Figura 5: Mineral de Magnetita.

Fonte: Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heiz Ebert (2017).

Segundo Arantes (2010), utiliza-se nanopartículas de magnetita para a preparação de ferrofluidos (mistura coloidal de um solvente, água ou algum solvente orgânico, com nanopartículas magnéticas) devido ao fato da magnetita apresentar uma magnetização espontânea e ter uma estabilidade química. Entre as aplicações do ferrofluido, segundo Garcia Cerda *et al.* (2003) pode-se citar sua utilização em selos magnéticos de motores, em lubrificantes de discos magnéticos, instrumentos para memória óptica, em tintas magnéticas para cheques bancários, em unidades de refrigeração, aplicações na medicina, dentre outros.

### 2.3 Separadores magnéticos

Com o avanço da tecnologia, os separadores magnéticos que inicialmente eram responsáveis pela separação de minerais em magnéticos e não magnéticos, já realizam a distinção entre minerais ferromagnéticos e paramagnéticos (SAMPAIO *et al.*, 2018). Os separadores magnéticos realizam a classificação por equipamentos de alta intensidade (*high intensity magnetic separation* - HIMS) ou por separadores de alto gradiente (*high gradiente magnetic sepatation* – HGMS), que podem utilizar eletromagnetos resistentes, supercondutores, magnetos permanentes, ou placas denominadas de matrizes que geram um gradiente magnético local, atenuando a força magnética que atua sobre a partícula no campo magnético dos separadores (SVOBODA; FUJITA, 2003). Segundo Sampaio *et al.* (2018), a escolha da matriz é realizada considerando-se as características do minério.

Na aplicação industrial, os separadores magnéticos podem se dividir em dois grupos (AUGUSTO *et al.*, 2006). O primeiro grupo é composto pelos que realizam a separação magnética de gradiente livre, ou seja, os separadores que desviam as partículas magnéticas da corrente principal. O segundo grupo é composto pelos separadores que realizam a separação magnética de alto gradiente, onde as partículas magnéticas ficam presas às matrizes ferromagnéticas.

A separação magnética é realizada pela ação de grandezas magnéticas que atuam sobre a partícula quando colocadas sobre a ação com campo magnético gerado pelo equipamento. Algumas das grandezas atuantes em um separador magnético são a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ , que se refere ao número de linhas de indução que passam pela partícula, e a intensidade de campo  $\vec{H}$ , que é a força de magnetização que proporciona a passagem das linhas de indução através da partícula. No caso da exposição de partículas minerais fracamente magnéticas à um campo, é observada a indução magnética do material, ou seja, a magnetização do mesmo (SAMPAIO *et al.*, 2018).

Um dos modelos de separador utilizados em laboratório é o separador de carrossel, mostrado na Figura 6, que se trata de um tipo de concentrador magnético a úmido de alta intensidade. O modelo utiliza um sistema de matrizes, e possui significativas vantagens em relação aos demais quanto a realização de separação de partículas finas, com granulometria menor que 75  $\mu\text{m}$ . Devido ao fato de ser um separador de alta intensidade, seu uso não é recomendado para minerais ferromagnéticos, pois, mesmo com o uso de altas pressões na água

de lavagem do equipamento, as partículas tendem a ficar presas nas matrizes devido a sua alta susceptibilidade magnética (SAMPAIO *et al.*, 2018).

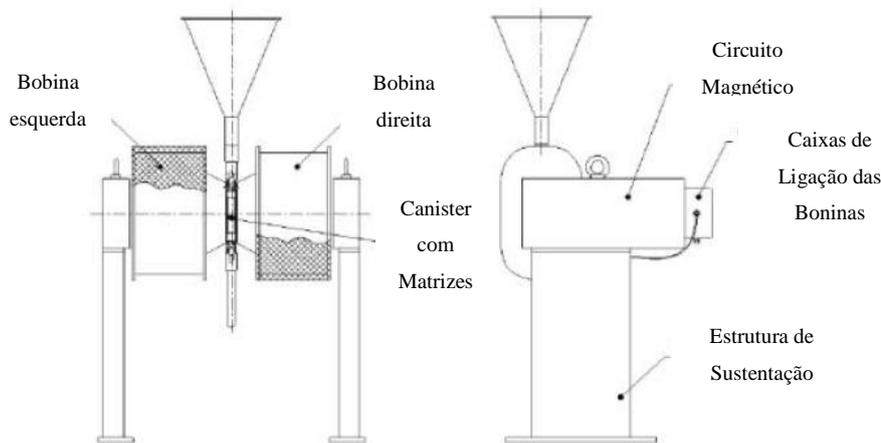


Figura 6: Separador Eletromagnético de Carrossel modelo L-4.

Fonte: INBRAS (2013).

Os separadores magnéticos apresentam uma ampla gama de utilização. Sua principal aplicação prática no Brasil é na concentração de minérios de ferro nos municípios de Itabira e Congonhas, onde a separação é realizada a úmido e com campo de alta intensidade (SAMPAIO *et al.*, 2018). A separação magnética a úmido com campo de alta intensidade também é utilizada no beneficiamento de caulim removendo minerais de ferro e titânio, na remoção de impurezas magnéticas de cassiterita, scheelita, cromita e de feldspato, na purificação do talco, e no beneficiamento de minérios de urânio e de minerais pesados presentes em areias de praia, dentre outras aplicações.

### 2.3.1 Concentração Magnética

A concentração magnética é baseada no comportamento adquirido pelas partículas minerais quando expostas a um campo magnético, e às forças magnéticas atuantes sobre as partículas (SAMPAIO *et al.*, 2018). A separação se dá pela atração ou repulsão das partículas quando submetidas ao campo e às forças magnéticas. Tal fato se dá pela força resultante gerada por uma variação de campo, que é chamada de gradiente.

Para a formação do gradiente, o campo aplicado nas extremidades do mineral deverá diferir em intensidade, uma vez que, um campo magnético uniforme resultaria em uma força nula. A produção do gradiente pode se dar pela construção de polos de eletroímã com áreas

diferentes, ou pelo uso de matrizes. A Figura 7 mostra a ação de um campo magnético uniforme em A, onde a força resultante é nula, e a ação de um campo magnético convergente em B, com um gradiente de campo.

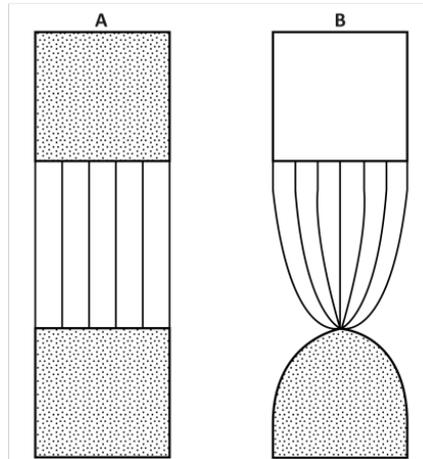


Figura 7: Campo magnético uniforme (A) e convergente (B), apresentando o gradiente de campo.

Fonte: Sampaio *et al.* (2018).

Para uma separação das partículas de maneira seletiva é necessário o controle do campo magnético, visto que, o campo tem influência direta na separação. Minerais com alta susceptibilidade magnética podem ser separados com o uso de baixas intensidades de campo magnético, enquanto que, para as partículas com baixa susceptibilidade magnética, campos de alta intensidade se fazem necessário (SAMPAIO *et al.*, 2018).

A Tabela 1 mostra as faixas de campo necessárias para a separação de diferentes grupos de minerais magnéticos. A Figura 8 mostra a indução magnética para diferentes partículas quando submetidas a um campo magnético.

Tabela 1: Faixa de Campo Necessária para Concentração Magnética.

<b>GRUPO</b>	<b>Faixa de Campo (T)</b>
<b>Ferromagnéticos</b>	0,05 a 0,5
<b>Magnéticos</b>	0,5 a 1
<b>Fracamente magnéticos</b>	1 a 1,8
<b>Muito fracamente magnéticos</b>	Acima de 1,8

Fonte: Sampaio *et al.* (2018).

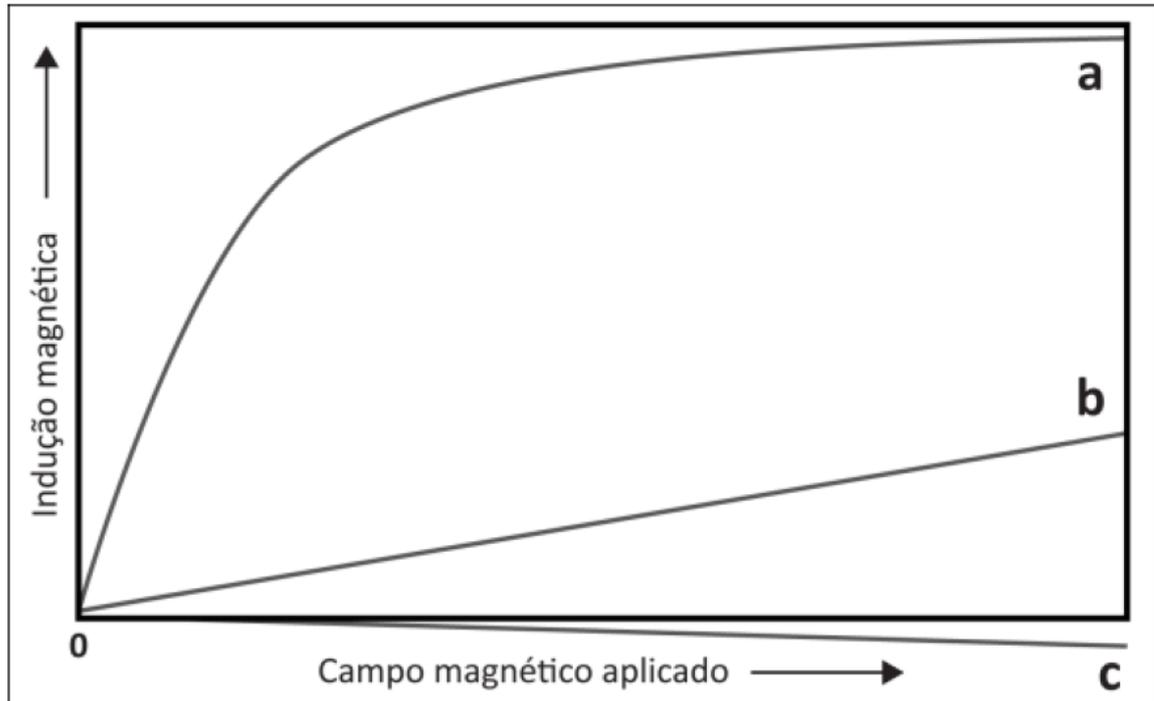


Figura 8: Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas: (a) ferromagnéticas, (b) paramagnéticas e (c) diamagnéticas.

Fonte: Sampaio *et al.* (2018).

Os concentradores magnéticos podem ser divididos em separadores a seco e a úmido, podendo variar seu campo de indução, apresentando alta ou baixa intensidade. Esses separadores podem ser ainda subdivididos de acordo com a forma dos elementos que executam o trabalho de separação. Para os trabalhos de caracterização mineral são usados os concentradores magnéticos de laboratório. A Figura 9 mostra um diagrama de concentradores magnéticos, com sua intensidade, forma de separação, a seco ou a úmido, e suas respectivas aplicações.

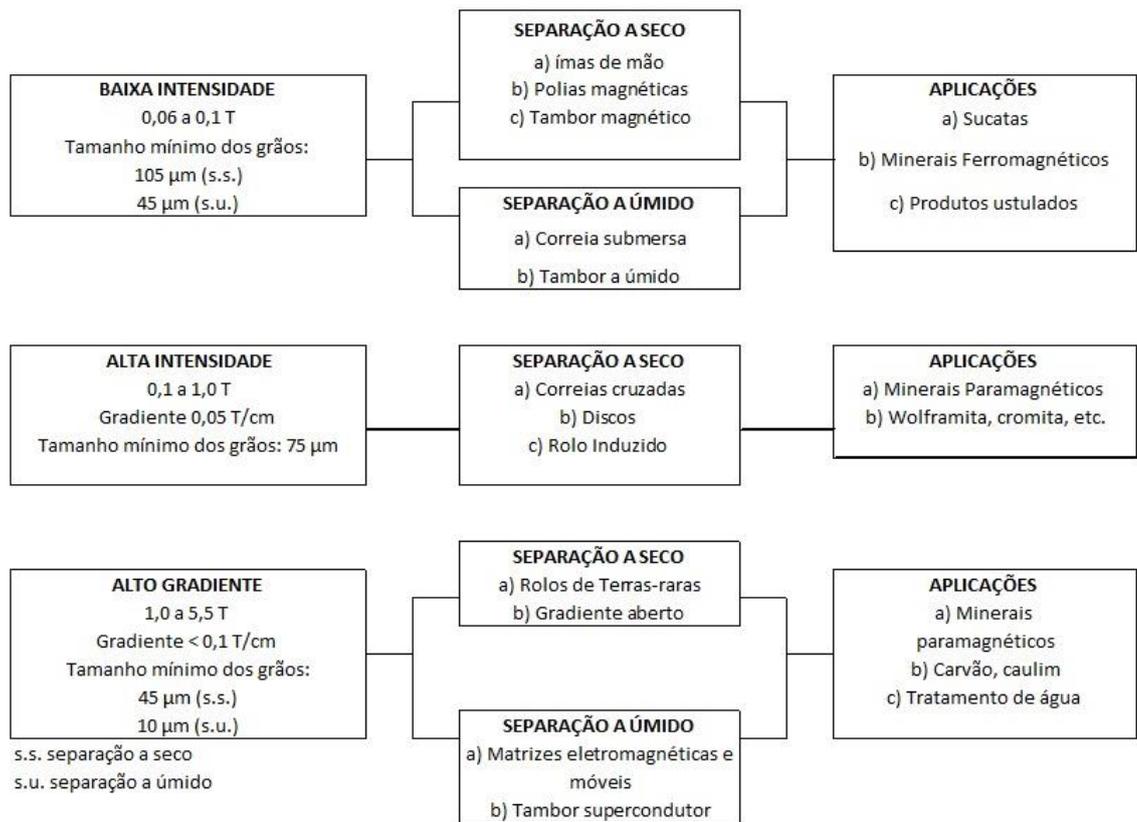


Figura 9: Diagrama contendo as características, classificação e aplicações dos separadores magnéticos.

Fonte: Adaptado de Sampaio *et al.* (2018).

Ao contrário de outros equipamentos utilizados no beneficiamento mineral, os concentradores magnéticos não seguem um conjunto rígido quanto aos efeitos das variáveis utilizadas no processo. Algumas das variáveis utilizadas para a otimização do processo são a intensidade de campo magnético, que varia de acordo com a susceptibilidade magnética das partículas, e a alimentação que deve ser feita de forma a evitar o arraste de partículas não magnéticas pelo fluxo de partículas magnéticas. Nos concentradores a seco, a alimentação deve ser feita de forma que uma única camada de partículas entre no equipamento por vez. Nos concentradores a úmido segundo Sampaio *et al.* (2018), a resistência oferecida pela água da alimentação impede esse efeito.

## 2.4 Técnicas de caracterização tecnológica de minérios

A caracterização tecnológica tem sido amplamente utilizada para o pleno conhecimento das características físicas, químicas e mineralógicas de minérios. Sua realização é de extrema importância para que o recurso mineral estudado tenha seu aproveitamento otimizado de acordo

com suas características. A caracterização de rejeitos provenientes da mineração vem crescendo cada vez mais, com o intuito de proporcionar um aproveitamento econômico para o mesmo, devido ao aumento da preocupação com os impactos ambientais gerados pelo seu descarte. Para a realização da caracterização tecnológica de minérios são utilizadas diversas técnicas, como picnometria, análise granulométrica, análise de grau de liberação, difração de raios-X, Microscopia quantitativa eletrônica (MQE) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), fluorescência de raios-X e análise termogravimétrica (TGA), entre outras.

#### 2.4.1 Picnometria

A picnometria consiste na determinação da densidade real de um sólido, utilizando uma vidraria especial denominada de picnômetro. De acordo com Macedo e Teixeira (2004), a relação entre a massa de uma amostra e o volume ocupado pelas partículas sólidas, desconsiderando-se a porosidade, é considerada a densidade real da partícula.

O método do picnômetro é um dos mais seguros para a determinação da densidade real dos sólidos. Segundo Macedo e Teixeira (2004), ele se baseia no fato de que, ao ser adicionada à vidraria, a amostra de solo irá ocupar um volume dado pela massa de água deslocada, conhecida previamente.

O picnômetro, apresentado na Figura 10, consiste em um balão de vidro contendo fundo chato, equipado com uma rolha de vidro por meio da qual passa um canal capilar, responsável por retirar possíveis bolhas formadas durante o preenchimento do mesmo. Por se tratar de um teste de extrema sensibilidade, a picnometria deve ser realizada de maneira a evitar a formação de bolhas no interior da vidraria, pois, caso formadas, as bolhas afetarão diretamente os resultados.



Figura 10: Vidraria utilizada para testes de picnometria.

### 2.4.2 Análise granulométrica por peneiramento

A análise granulométrica por peneiramento, consiste na classificação de amostras sólidas em duas frações, passante ou *undersize*, e retido ou *oversize*. O *undersize* consiste nas partículas de menor granulometria que passam pela malha de abertura de uma peneira. O *oversize* consiste nas partículas de maior granulometria, que ficam retidas em uma determinada malha de abertura da peneira. De acordo com Sampaio e Silva (2018), o peneiramento é uma das mais antigas e mais utilizadas técnicas para se realizar uma análise granulométrica. A Figura 11 mostra uma série de peneiras acopladas ao peneirador suspenso do Laboratório de Tratamento de Minérios, do CEFET-MG, Campus Araxá.



Figura 11: Série de peneiras acopladas ao peneirador suspenso.

Devido ao grande uso dessa técnica, surgiu-se a necessidade de uma padronização para o peneiramento de minérios. Uma das séries de peneiras mais utilizadas como padrão é a série

Tyler. Para a sua construção segundo Sampaio e Silva (2018), é utilizada como referência a peneira com abertura de 0,074 mm, e a peneira superior é obtida multiplicando-se esse valor por  $\sqrt{2}$ , a peneira inferior é obtida dividindo-se por  $\sqrt{2}$  a peneira de referência. A Tabela 2 mostra a série de peneiras Tyler relacionando sua abertura com valores em mm,  $\mu\text{m}$  e polegadas.

Tabela 2: Série Tyler de peneiras com aberturas em malhas com valores correspondentes em mm,  $\mu\text{m}$  e polegadas.

Série Tyler	Aberturas		
	Abertura (Malha) (mm)	$\mu\text{m}$	Polegada
2 ½	8,000	8000	5/16
3	6,730	6730	0,265
3 ½	5,613	5613	0,221
4	4,800	4800	0,185
5	4,000	4000	0,157
6	3,400	3400	0,131
7	2,840	2840	0,110
8	2,400	2400	0,093
9	2,000	2000	0,079
10	1,700	1700	0,065
12	1,420	1420	0,055
14	1,200	1200	0,046
16	1,000	1000	0,039
20	0,850	850	0,0331
24	0,710	710	0,0278
28	0,600	600	0,0234
32	0,500	500	0,0197
35	0,425	425	0,0165
42	0,355	355	0,0139
48	0,300	300	0,0117
60	0,250	250	0,0098
65	0,212	212	0,0083
80	0,180	180	0,0069
100	0,150	150	0,0058
115	0,125	125	0,0049
150	0,104	104	0,0041
170	0,090	90	0,0035
200	0,074	74	0,0029
250	0,063	63	0,0025
270	0,053	53	0,0021
325	0,045	45	0,0017
400	0,037	37	0,0014
635	0,020	20	0,00079

Fonte: Tabela Krebs Engineers.

O processo de peneiramento em laboratório pode ser realizado de três formas: a seco, quando o material é peneirado apenas com sua umidade natural, a úmido, quando o peneiramento é realizado com uma polpa composta por minério e água, ou ainda o peneiramento combinado, onde são combinadas as técnicas de peneiramento a seco e a úmido.

Segundo Valadão e Araújo (2007), ao final do peneiramento, a massa retida em cada peneira não deve ultrapassar três camadas de partículas. Gaudin expressa pela Equação 1 a massa máxima que deve ficar retida na peneira:

$$M = \left( \frac{d_i + d_s}{2} \right) \cdot \rho \cdot A \cdot n \quad [1]$$

Onde:

$d_i$ : abertura da peneira em questão (cm);

$d_s$ : abertura da peneira imediatamente acima da estudada (cm);

$\rho$ : densidade da amostra a ser ensaiada ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

A: área da malha da peneira ( $\text{cm}^2$ );

n: número de camadas de partículas.

### 2.4.3 Grau de liberação

De acordo com Malvik (1982), o grau de liberação de uma partícula, GL, é a porcentagem de mineral de interesse presente sob forma de partículas livres em determinada faixa granulométrica. Sua determinação é de fundamental importância para a indústria mineral, uma vez que determinada a faixa ótima para liberação das partículas, evita-se a cominuição excessiva do material, evitando assim a geração excessiva de finos e o alto gasto energético com etapas de moagem.

Para a determinação do grau de liberação, utiliza-se uma amostra representativa em diferentes faixas granulométricas. A liberação pode ser determinada por diferentes métodos, como o método dos líquidos densos, por análise química, e utilizando métodos ópticos.

Na liberação por meio denso, são utilizados líquidos densos e as partículas são separadas pela sua densidade, podendo flutuar ou afundar no líquido. Na liberação por análise química a porcentagem de liberação é determinada pela dosagem do teor do principal elemento químico do mineral ou do elemento existente no material de interesse. Na liberação por métodos ópticos é realizada uma estimativa visual das partículas, como mostrado na Figura 12, onde os grãos estudados são divididos em faixas de partículas livres de minerais de interesse, partículas mistas

e partículas contendo apenas ganga. Cada faixa recebe um índice específico, e utiliza-se o método de Gaudin para determinação do grau de liberdade (RAMOS *et al.*, 2015).

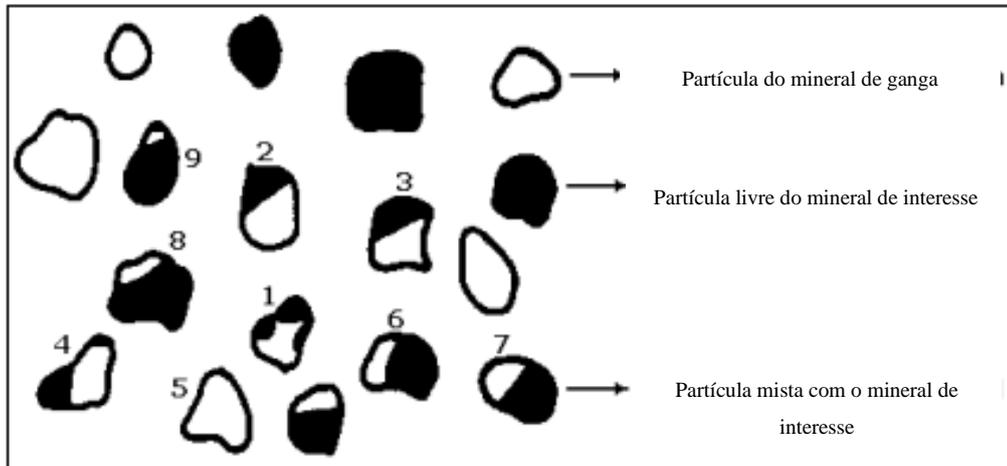


Figura 12: Partículas livres e mistas utilizadas para a obtenção do grau de liberação.

Fonte: Adaptado de Ramos *et al.* (2015).

#### 2.4.4 Fluorescência de raios-X

Segundo Filho (1999), a análise por fluorescência de raios-X é um método qualitativo, e tem seu funcionamento baseado na quantidade de raios-X detectados por unidade de tempo, ou seja, pela intensidade dos raios-X que são emitidos pelos elementos da amostra. A Figura 13 mostra um espectro obtido por meio de fluorescência de raios-X.

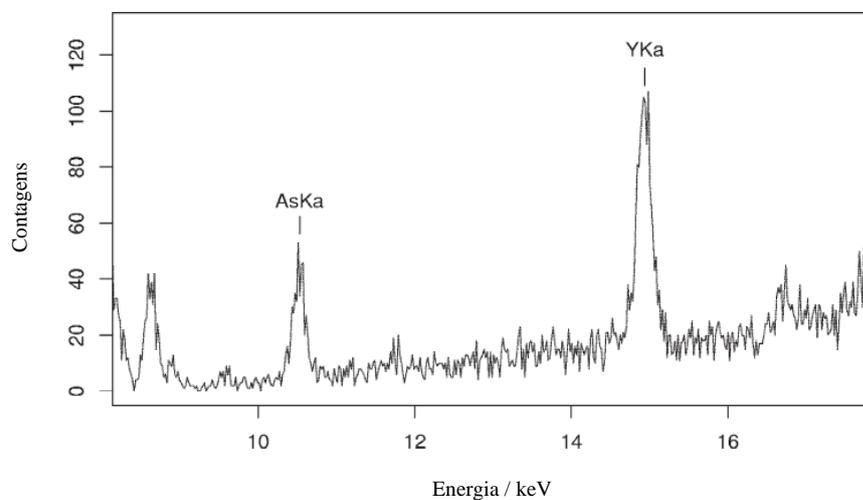


Figura 13: Espectro típico obtido para uma amostra aquosa de arsênio em forma de gota seca sobre o filme.

Fonte: Pataca *et al.*, 2004.

Linhas espectrais com energias características do elemento estudado são emitidas por fontes radioativas que excitam os elementos constituinte da amostra. A intensidade das linhas espectrais produzidas está interligada com a concentração do elemento na amostra. Com a excitação de um elemento da amostra, elétrons tendem a ser ejetados do interior dos átomos, e os elétrons mais afastados realizam um salto quântico preenchendo a vacância, segundo Filho (1999).

De modo geral segundo Filho (1999), a análise por fluorescência de raios-X consiste na excitação dos elementos constituintes da amostra, pela dispersão dos raios-X característicos emitidos pela amostra, e pela detecção desses raios-X. Devido a preservação da amostra e determinação simultânea e sequencial da concentração de vários elementos, a técnica de fluorescência de raios-X é utilizada principalmente para amostras sólidas.

## **2.5 Agregados para construção civil**

De acordo com Valverde (2001), agregado é a matéria prima mineral que pode ser bruta ou beneficiada, passando por processos de cominuição, e que é empregada na indústria da construção civil. No Brasil, devido as vastas características geológicas, existe uma grande diversidade de rochas sendo utilizadas como agregados.

Algumas características da rocha devem ser observadas para que as mesmas possam ser utilizadas como agregado, pois, alguns constituintes mineralógicos podem causar reações inesperadas em conjunto com outros suprimentos da construção. Para isso, é necessária uma caracterização tecnológica fundamentada em normas técnicas, no caso do Brasil, as normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (LUZ; ALMEIDA, 2012).

Segundo Luz e Almeida (2012), além das questões ambientais geradas na exploração de agregados, o custo com transporte é outro problema enfrentado e que acaba aumentando os custos finais do produto. A busca por substitutos para os agregados é cada vez maior, pois, embora a demanda da sociedade por materiais de construção esteja aumentando, as restrições à sua produção também são crescentes. A exploração ou até mesmo o reaproveitamento de resíduos para o uso como agregados em regiões próximas ao mercado consumidor é um desafio a ser superado.

Para que um determinado tipo de rocha ou resíduo seja usado como agregado, é necessário que algumas características, em especial, sejam analisadas. Dentre essas, podemos citar a petrografia e composição mineralógica, a presença ou não de matéria orgânica, sais minerais e

minerais reativos, a granulometria das partículas quanto à forma, textura, resistência, tamanho, porosidade e permeabilidade (LUZ; ALMEIDA, 2012).

Para a determinação da granulometria do agregado, são seguidos padrões técnicos regulamentados pela NBR NM 248 de 2003. O ensaio deve ser realizado em uma série de peneiras, que é dividida em série normal e intermediária, conforme apresentado na Tabela 3. Os resultados obtidos com o peneiramento possibilitam o cálculo do módulo de finura (MF), obtido por meio da Equação 2, e a determinação da dimensão máxima dos grãos.

Tabela 3: Série de peneiras normal e intermediária.

<b>Normal</b>	<b>Intermediária</b>
<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
150	-
-	100
75	-
-	63
-	50
37,5	-
-	31,5
-	25
19	-
-	12,5
9,5	-
-	6,3
4,75	-
2,36	-
1,18	-
0,6	-
0,3	-
0,15	-

Fonte: NBR NM 248 (2003).

$$MF = \frac{\sum \% \text{ peso retido acumulado nas peneiras da série normal}}{100}$$

[2]

De acordo com Luz e Almeida (2012), o agregado pode ser classificado como areia grossa, média ou fina, Tabela 4.

Tabela 4: Classificação da areia quanto ao módulo de finura.

<b>Classificação da Areia</b>	<b>Módulo de Finura</b>
Grossa	$MF > 3,9$
Média	$3,9 > MF > 2,4$
Fina	$MF < 2,4$

Fonte: Adaptado de Luz e Almeida (2012).

Segundo Kulaif e Lima (2001), os agregados podem ser utilizados na construção civil em diversos setores. Alguns exemplos do uso de agregados em função de sua granulometria são em assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, emboço, concreto e asfalto, para agregados com a granulometria variando de 4,8 a 0,074 mm.

Segundo Luz e Almeida (2012), a presença de material pulverulento, com granulometria inferior a 0,074 mm, nos agregados pode afetar significativamente as propriedades do concreto, podendo aumentar a demanda por água para que o concreto atinja a trabalhabilidade necessária. Para que o agregado possa ser utilizado, a porcentagem máxima de material pulverulento deve ser de 3% para concreto submetido a desgaste superficial e de 5% para concretos protegidos do desgaste superficial.

### 3 METODOLOGIA

Neste tópico serão apresentados os procedimentos experimentais que incluem a preparação e caracterização das amostras, além dos ensaios de concentração magnética.

#### 3.1 Preparação da amostra

Para a execução deste trabalho utilizou-se uma amostra de rejeito magnético proveniente do beneficiamento de rocha fosfática. As etapas de preparação das amostras foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do CEFET-MG, Unidade Araxá.

Inicialmente secou-se uma amostra de 450 kg, em uma estufa a 150 °C, para possibilitar uma melhor homogeneização do mesmo. Após a secagem o material apresentou uma massa de 432 kg.

Nas etapas de homogeneização da amostra, primeiramente o material foi homogeneizado em pilha cônica. O material foi misturado com uma enxada garantindo-se que o material que se encontrava na base da pilha fosse para o topo da mesma. O processo foi repetido por 8 ciclos em torno da pilha, mostrada na Figura 14.



Figura 14: Pilha cônica, amostra inicial.

Em seguida, montou-se uma pilha alongada com comprimento de três metros, conforme apresentado na Figura 15. A amostra inicial foi distribuída da esquerda para a direita e assim

sucessivamente. A quantidade presente nas extremidades foi retomada e disposta novamente ao longo da pilha. Ao final do processo o material foi retomado da pilha alongada de modo a separar amostras de 20 kg cada.



Figura 15: Pilha alongada, amostra inicial.

Para a separação das alíquotas necessárias para os testes de peneiramento e picnometria, montou-se uma pilha alongada de um metro com 20 kg de material, conforme Figura 16, seguindo-se a mesma metodologia adotada na pilha feita com a amostra inicial. O material foi retomado da pilha de modo a separar alíquotas de 0,500 kg cada.



Figura 16: Pilha alongada para separação de alíquotas de 0,500kg.

A Figura 17 mostra a esquematização da etapa de preparação das amostras.

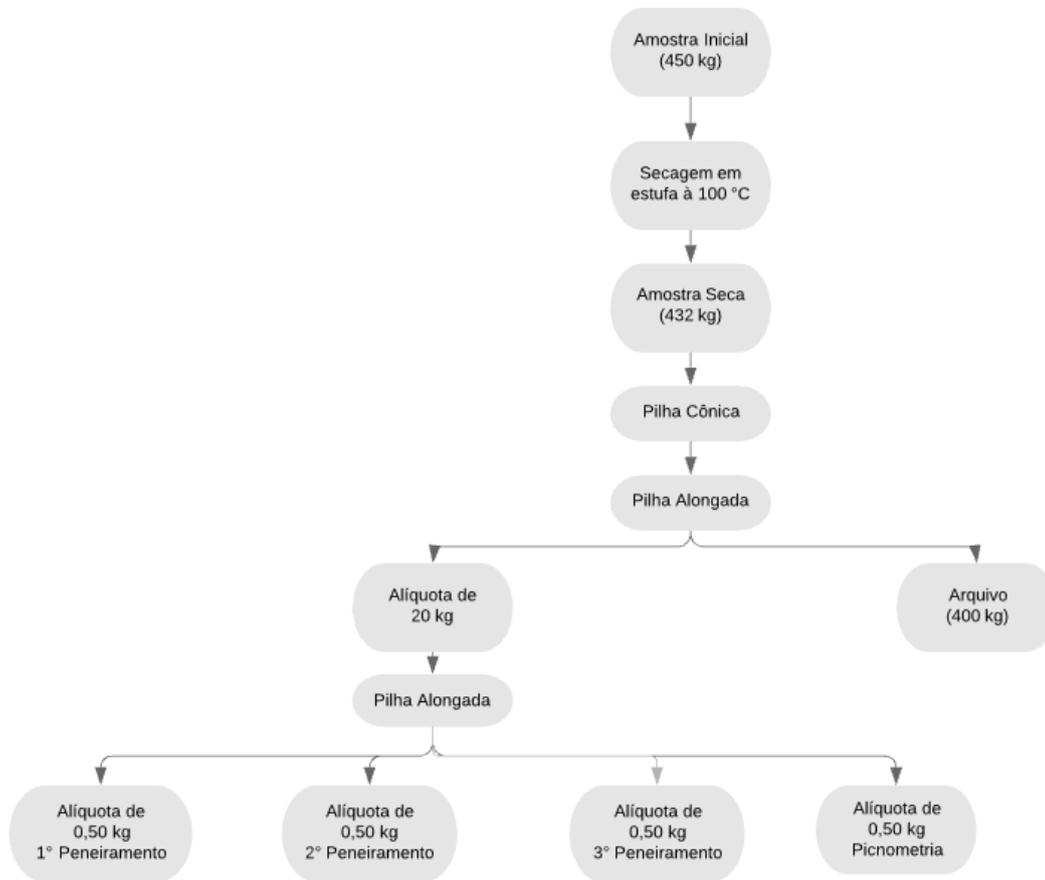


Figura 17: Fluxograma etapa de preparação das amostras.

## 3.2 Caracterização das amostras

Os testes para caracterização da amostra foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios e no Laboratório de Mineralogia do CEFET – MG, Unidade Araxá.

### 3.2.1 Ensaios para determinação da densidade

Para a determinação da densidade, foi utilizada a técnica de picnometria. Para cada ensaio, obteve-se inicialmente a massa do picnômetro vazio. Em seguida, o fundo da vidraria foi coberto com material e aferiu-se a massa do picnômetro com amostra. Adicionou-se água ao picnômetro e aferiu-se o peso do picnômetro com amostra e água. Por fim limpou-se o

picnômetro e adicionou-se água ao mesmo para que fosse realizada a aferição da massa de picnômetro com água.

Foram realizados dez testes de picnometria, sendo que três deles tiveram seus resultados descartados devido ao alto desvio padrão apresentado em relação aos demais. A Equação 3 foi utilizada para a determinação da densidade do material.

$$d_s = \frac{A_2 - A_1}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad [3]$$

Onde:

ds: Densidade dos sólidos;

A1: Massa do picnômetro;

A2: Massa do picnômetro + Amostra;

A3: Massa do picnômetro + Amostra + Água;

A4: Massa do picnômetro + água.



Figura 18: Picnômetros identificados conforme equação [3].

### 3.2.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica da amostra foi realizada por peneiramento combinado. Inicialmente foi realizado um peneiramento a úmido na peneira de 74 µm. O material passante e o retido foram secos em estufa a 150 °C. A fração retida foi submetida a um peneiramento a

seco por 20 minutos em peneirador suspenso, marca CDC e modelo PV-08, utilizando as peneiras da série Tyler, como mostrado na Figura 19. O material retido em cada peneira, e o passante do peneiramento a úmido foram pesados para a confecção das curvas de distribuição granulométrica.



Figura 19: Peneirador suspenso.

### 3.2.3 Determinação do grau de liberação por faixa granulométrica

O grau de liberação da amostra foi determinado utilizando-se um estéreomicroscópio (lupa trinocular) da marca Laborana, modelo STMRO-B, conforme mostra-se na Figura 20. Para a separação das partículas em livres ou mistas, foram selecionadas amostras representativas contendo um número de aproximadamente 200 partículas.



Figura 20: Lupa trinocular utilizada para determinação do grau de liberação.

As partículas de interesse nesse estudo, de magnetita, foram dispostas em uma placa de Petri, como mostrado na Figura 21, e separadas umas das outras para que fosse possível a contagem das mesmas. Os grãos foram divididos mentalmente em quatro partes, como mostrado na Figura 22, para que fossem classificados de acordo com o seu grau de liberação. Os mesmos foram divididos em partículas livres de magnetita, nas proporções 100%, 75% e 25% livres.



Figura 21: Partículas de 1200  $\mu\text{m}$  dispostas em uma placa de Petri.



Figura 22: Esquematização de divisão realizada em uma partícula para classificação do grau de liberação.

O grau de liberação foi determinado com o uso da Equação 4. Cada partícula recebeu um fator de multiplicação de acordo com seu grau de liberação, onde as partículas 100% livres receberam um fator igual a 20, e partículas 75%, 50% e 25% livres receberam um fator de 15, 10 e 5, respectivamente. O índice de liberação foi obtido multiplicando-se o fator correspondente a cada faixa pela sua porcentagem de liberação, e pelo número de partículas presentes em cada fração.

$$GL = \frac{\text{Índice de liberação das partículas livres}}{\sum \text{Índice de liberação das partículas livres+mistas}} * 100 \quad [4]$$

### 3.2.4 Ensaios de separação magnética

Por se tratar de um material de alta susceptibilidade magnética, que exige um baixo campo para separação, a separação magnética do material foi realizada utilizando-se um imã de mão no LMT. Nessa etapa o material foi disposto sobre um recipiente metálico de modo a evitar camadas grossas que poderiam ocasionar uma separação ineficiente.

Com o auxílio de um imã de mão revestido com plástico, as partículas foram separadas em duas frações (magnética e não magnética), chamada de etapa *Rougher*, sendo a fração não magnética submetida a um novo estágio de separação magnética, chamada de *Scavenger*. A fração não magnética foi submetida a uma análise mineralógica na lupa trinocular.

O ensaio descrito acima foi realizado para três diferentes faixas granulométricas, sendo a fração retida nas peneiras de 14# (1200  $\mu\text{m}$ ), 48 # (300  $\mu\text{m}$ ) e 100# (150  $\mu\text{m}$ ). Após a realização dos ensaios, as amostras da alimentação, concentrado (fração magnética) e rejeito (fração não magnética) foram analisados quimicamente utilizando o método de espectrometria de fluorescência de raios-X. Tendo posse dos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  analisados, em %, foram obtidas a recuperação mássica e metalúrgica de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , bem como a razão de enriquecimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no concentrado (magnético) e a razão de enriquecimento de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no rejeito (não magnético), em %, através das Equações 5 a 8, respectivamente

$$\text{Recuperação mássica (\%)} = \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{alimentação}} - \% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{rejeito}}}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{concentrado}} - \% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{rejeito}}} \times 100 \quad [5]$$

$$\text{Recuperação metalúrgica (\%)} = \text{Recuperação mássica (\%)} \times \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{concentrado}}}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{alimentação}}} \quad [6]$$

$$\text{Razão de enriquecimento de Fe}_2\text{O}_3 \text{ no concentrado} = \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{concentrado}}}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{alimentação}}} \quad [7]$$

$$\text{Razão de enriquecimento de P}_2\text{O}_5 \text{ no rejeito} = \frac{\% \text{P}_2\text{O}_5_{\text{concentrado}}}{\% \text{P}_2\text{O}_5_{\text{alimentação}}} \quad [8]$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos seguintes serão apresentados os resultados e discussões referentes a caracterização das amostras.

### 4.1 Análise de densidade

A Tabela 5, mostra as massas aferidas durante a realização dos testes de picnometria, e a densidade média de 4,64 g/cm<sup>3</sup> apresentada pela amostra. O baixo valor de desvio padrão encontrado mostram a boa precisão da realização dos testes.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de picnometria.

Teste	A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
1	30,26	36,24	85,63	80,94	4,64
2	29,86	36,24	85,51	80,52	4,59
3	30,61	37,41	85,45	80,12	4,63
4	32,04	36,10	85,63	82,43	4,72
5	35,46	39,27	91,38	88,36	4,82
6	30,60	36,32	84,60	80,12	4,61
7	30,63	35,56	85,31	81,44	4,65
<b>Densidade média (g/cm<sup>3</sup>)</b>					<b>4,64</b>
<b>Desvio</b>					<b>0,07</b>

### 4.2 Análise Granulométrica

Nos três ensaios de peneiramento realizados, calculou-se a massa de Gaudin, utilizando-se a Equação 1. Como detalhado no Apêndice A.1, a massa retida em cada peneira não ultrapassou a massa de Gaudin em nenhum dos três ensaios de peneiramento, mostrando a representatividade dos mesmos. Ainda cabe ressaltar que a perda de massa nos três peneiramentos foi inferior a 5%.

Analisando-se a Figura 23, que mostra a curva granulométrica confeccionada para os três peneiramentos utilizando-se os dados apresentados no Apêndice A.1, determinou-se um valor de  $d_{80}$  de cerca de 0,50 mm para o primeiro peneiramento, 0,60 mm para o segundo, e 0,65 mm para o terceiro, mostrando que cerca de 80% das partículas constituintes do material apresentam granulometria inferior a 0,65 mm.

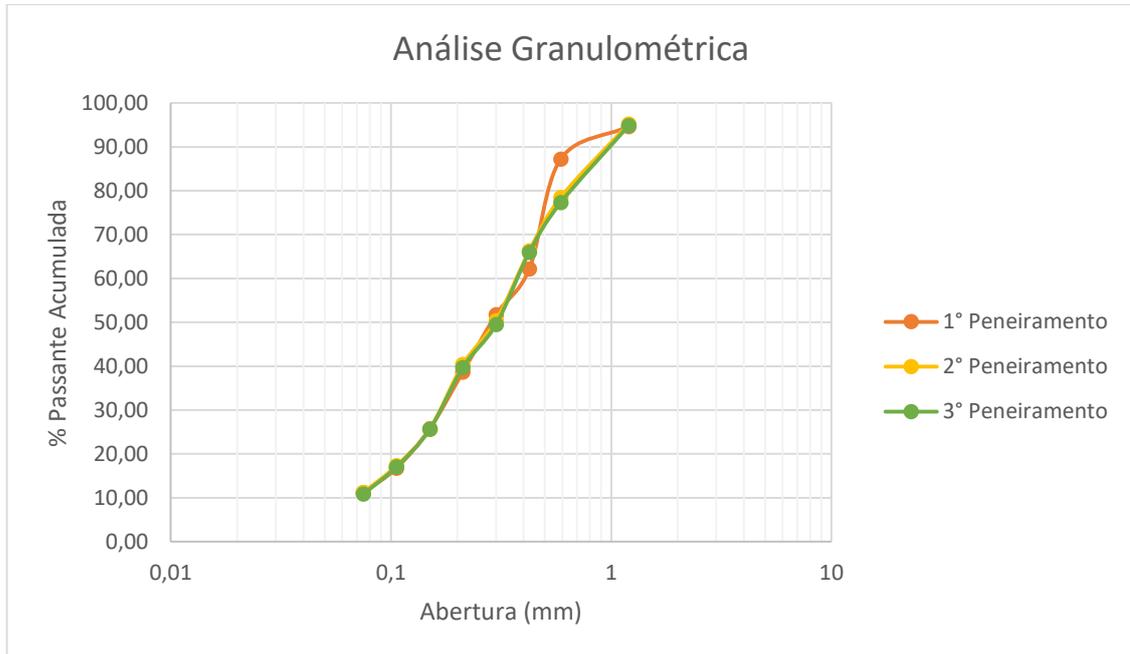


Figura 23: Curva granulométrica do segundo peneiramento.

Com base nas Tabelas 10, 11 e 12 e utilizando-se a Equação 2, calculou-se o Módulo de Finura para a primeira, segunda e terceira análise granulométrica, respectivamente. Os valores encontrados foram de 1,41, 1,50 e 1,53, tendo como valor médio 1,48 para o módulo de finura. De acordo com a classificação mostrada na Tabela 4, classificou-se o material como areia fina. Desse modo, por meio de uma primeira análise o mesmo apresenta potencial para ser utilizado como agregado na construção civil como um substituto da areia fina, levando-se em consideração sua granulometria. Entretanto, para que seja possível afirmar que o mesmo pode ser utilizado como agregado se fazem necessários testes adicionais, para que seja possível analisar outros requisitos básicos que um material deve apresentar para ser utilizado como agregado, como por exemplo, a presença de matéria orgânica.

Como detalhado no Apêndice A.1, o diâmetro máximo do material (*top size*) foi de 1,2 mm, a porcentagem de material com granulometria inferior a 0,075 mm variou de 10,84 a 11,22%, com média de 11,10%. Entretanto não é possível afirmar que essa é a porcentagem de material pulverulento presente na amostra, visto que, para se caracterizar essa quantidade é necessária a realização de teste específico baseado em norma da ABNT. Considerando-se os resultados apresentados, 88,90% do material apresentou granulometria entre 4,8 e 0,074 mm.

Com base nos dados apresentados por Kulaif e Lima (2001), esse material apresenta a granulometria adequada para a utilização em assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, emboço, concreto e asfalto. Entretanto, a porcentagem de material pulverulento foi

superior a 5%, valor limite para a utilização em concreto. Uma alternativa para que o rejeito magnético possa ser utilizado como agregado na fabricação de concretos, é a realização do peneiramento a úmido do mesmo, com a finalidade de retirar o excesso de material com granulometria inferior a 0,074 mm.

### 4.3 Grau de Liberação

Os valores do grau de liberação encontrados para as frações entre 1,2 mm (14#) e 0,15 mm (100#) são mostrados na Figura 24, na qual é possível verificar que mais de 90% das partículas de magnetita se encontram liberadas quando apresentam tamanhos inferiores a 0,212 mm (65#). As quantidades de partículas mistas e liberadas em cada fração granulométrica são apresentadas no Apêndice A.2.

Não foi possível a determinação do grau de liberação para as faixas de 0,106 mm (150#) à -0,075 mm (-200#), devido à atração magnética que uma partícula exerce sobre a outra, de modo a impedir a contagem manual da quantidade de partículas.

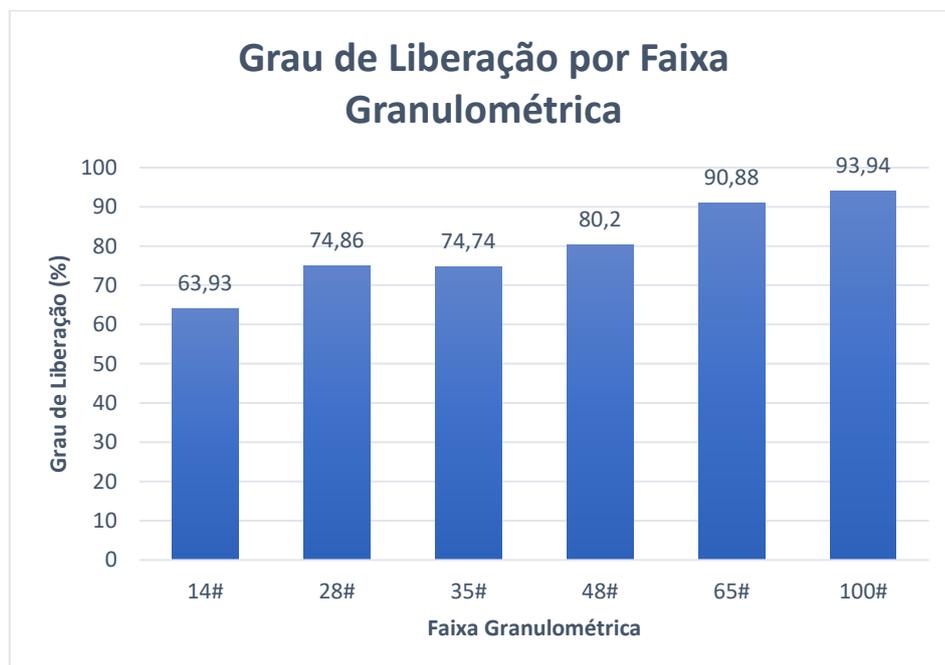


Figura 24: Grau de liberação por faixa granulométrica.

Uma análise visual das alíquotas de 0,106mm (150#), 0,075mm (200#) e -0,075 mm (-200#) mostrou que as partículas de magnetita estavam em sua grande maioria liberadas, assim como as partículas da Figura 25. Embora não seja possível determinar com exatidão o grau de

liberação nessas faixas, pelo método utilizado na pesquisa, a análise visual realizada e a tendência de aumento do grau de liberação com a diminuição da granulometria apresentada nas faixas anteriores, leva a crer que o grau de liberação nessas faixas é próximo à 100%.



Figura 25: Imagem de lupa trinocular de partícula liberada de magnetita.

#### 4.4 Análise Mineralógica

Na Tabela 6 são apresentados os minerais paramagnéticos e diamagnéticos, nas granulométricas de 1,2 mm a 0,106 mm. Nas frações granulométricas de 0,075mm e -0,075mm não foi possível diferenciar os minerais presentes utilizando-se a lupa trinocular.

Os minerais presentes foram identificados com base em suas propriedades macroscópicas, como hábito, cor e clivagem.

Tabela 6: Análise mineralógica, fração não magnética.

Série Tyler	(mm)	Minerais encontrados na fração não magnética
14#	1,2	perovskita, flogopita, apatita, quartzo
28#	0,59	ilmenita, perovskita, quartzo, flogopita, sílex, piroxênio, apatita
35#	0,425	ilmenita, perovskita, quartzo, flogopita, sílex, piroxênio, apatita
48#	0,30	flogopita, limonita, quartzo, apatita, piroxênio, vermiculita

<b>65#</b>	<b>0,212</b>	flogopita, quartzo, apatita, piroxênio, vermiculita, ilmenita, perovskita
<b>100#</b>	<b>0,15</b>	flogopita, quartzo, apatita, piroxênio, vermiculita, ilmenita, perovskita
<b>150#</b>	<b>0,106</b>	flogopita, quartzo, apatita, piroxênio, vermiculita, ilmenita, perovskita

A perovskita ( $\text{CaTiO}_3$ ), pertencente a classe de óxidos, foi identificada devido ao seu hábito granular, falta de clivagem e cor amarelada. Outro mineral da classe dos óxidos encontrado foi a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ). Os cristais de ambos os minerais foram encontrados com formas semelhantes a cubos.

A limonita,  $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , pertencente ao grupo de óxidos de ferro foi identificada devido ao seu brilho terroso, cor marrom e por não possuir clivagem.

Alguns dos minerais pertencentes a classe dos silicatos encontrados foram a flogopita, vermiculita, e o quartzo. A flogopita,  $\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$  mineral pertencente ao subgrupo das micas, e a vermiculita,  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  pertencente ao subgrupo dos argilominerais, foram identificadas com base na sua clivagem perfeita em uma única direção, e hábito micáceo, laminar e escamoso. A diferenciação entre esses dois minerais se deu pela coloração. A flogopita apresentou uma coloração mais escura, enquanto que a vermiculita apresentou uma coloração mais clara, próxima a um marrom amarelado. O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), pertencente a classe de silicatos, foi identificado pela ausência de planos de clivagem, pela cor branca à incolor, pelo seu brilho vítreo e fratura conchoidal. Os minerais são apresentados na Figura 26.



Figura 26: Imagem de lupa trinocular dos minerais flogopita, vermiculita e quartzo.

Outro mineral pertencente a classe dos silicatos encontrado na fração não magnética foi o piroxênio, identificado devido a sua forma granular, por apresentar fraturas irregulares, e por sua coloração esverdeada.

A apatita,  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ , mineral pertencente a classe dos fosfatos foi identificada devido ao seu hábito granular e sua cor marrom amarelado. As Figura 26 e Figura 27 mostram alguns dos minerais encontrados na análise mineralógica.



Figura 27: Imagem de lupa trinocular óptico dos minerais piroxênio, limonita, apatita e quartzo.

#### 4.5 Ensaios de separação magnética

Na análise química, através da espectrometria de fluorescência de raios-X, foram obtidos os teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$ . Os resultados são apresentados na Tabela 8, onde a fração magnética é considerada como concentrado e a não magnética como rejeito.

Tabela 7: Teores de óxidos determinados em análise química (%)

<b>Fração Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Ponto de amostragem</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>
<b>1200</b>	Alimentação	1,26	80,79	5,07	2,82	3,25	6,37	11,82
<b>1200</b>	Concentrado	1,32	83,08	4,82	2,24	0,42	0,83	11,52
<b>1200</b>	Rejeito	6,24	43,09	1,39	12,05	0,77	6,46	24,99
<b>300</b>	Alimentação	1,29	93,07	4,89	2,53	0,04	1,18	11,56
<b>300</b>	Concentrado	1,02	95,84	5,11	2,03	0,08	0,86	11,6
<b>300</b>	Rejeito	12,54	19,64	2,95	22,77	2,93	23,2	15,47
<b>150</b>	Alimentação	1,75	83,49	5,3	3,52	3,46	7,23	9,07
<b>150</b>	Concentrado	1,49	89,24	5,74	2,43	3,76	7,72	8,71
<b>150</b>	Rejeito	15	21,06	2,57	25,87	2,11	15,35	13,99

Observa-se na Tabela 8 que, na fração de 150  $\mu\text{m}$ , houve um maior aumento do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado se comparado ao da alimentação. Isto se deve ao fato do grau de liberação nesta faixa ter apresentado valores na ordem de 94%, de modo que a seletividade da magnetita é aumentada quando a mesma foi submetida a um campo magnético externo.

Outro fator observado é que, após a separação magnética, os teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nos rejeitos, obtidos nas três faixas, apresentaram valores acima de 6%, sendo que, geralmente nas minas de rocha fosfática, o teor de corte (aquele a partir do qual a rocha é considerada minério) é na ordem de 5% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Ou seja, existe a possibilidade de parte deste rejeito ser reincorporado ao processo de beneficiamento de rocha fosfática, sendo que, de acordo com os resultados de análise granulométrica, mais de 90% deste material (alimentação dos ensaios de separação magnética) apresentam tamanhos inferiores a 1200  $\mu\text{m}$ .

Com base nos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, foram calculados a recuperação mássica (RMA), a recuperação metalúrgica de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (RMET), a razão de enriquecimento de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado (REN Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Conc.) e a razão de enriquecimento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no rejeito (REN P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Rej.), que são mostrados na Tabela 9.

Tabela 8: Recuperação mássica, metalúrgica e relação de enriquecimento.

<b>Fração Granulométrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Ponto de amostragem</b>	<b>RMAS (%)</b>	<b>RMET (%)</b>	<b>REN Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Conc.</b>	<b>REN P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Rej.</b>
<b>1200</b>	Alimentação				
<b>1200</b>	Concentrado	94,27	96,95	1,03	4,95
<b>1200</b>	Rejeito				
<b>300</b>	Alimentação				
<b>300</b>	Concentrado	96,36	99,23	1,03	9,72
<b>300</b>	Rejeito				
<b>150</b>	Alimentação				
<b>150</b>	Concentrado	91,57	97,87	1,07	8,57
<b>150</b>	Rejeito				

Nota-se que houve maior aumento na razão de enriquecimento do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado na faixa mais fina, de 150  $\mu\text{m}$ . Conforme dito, essa tendência está relacionada com o aumento de grau de liberação nas partículas mais finas.

Considerando que as recuperações metalúrgicas apresentaram valores acima de 90%, há pouca perda de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no rejeito.

Observa-se uma maior razão de enriquecimento de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no rejeito para as faixas de 300 e 150  $\mu\text{m}$ , indicando que essa faixa pode servir de referência para trabalhos futuros de concentração deste material.

## 5 CONCLUSÃO

Os testes de caracterização mostraram que a porcentagem de material com granulometria inferior a 0.075 mm presente na amostra foi de aproximadamente 11,10%. Essa porcentagem pode evidenciar que, para que o mesmo seja utilizado na fabricação de concreto é necessário que seja realizado um peneiramento com o intuito de retirar o excesso de finos. Entretanto, para que essa afirmação seja feita se fazem necessários mais testes de caracterização.

Com base no valor encontrado de módulo de finura de 1,48, o material foi classificado como um possível substituinte para a areia fina. Levando-se em consideração a distribuição granulométrica apresentada, o mesmo pode ser considerado como um possível substituto para o assentamento de bloquetes, tubulações em geral, tanques, emboço, concreto e asfalto.

Os testes de grau de liberação indicaram o aumento gradual do grau de liberação à medida que a granulometria diminui e, os resultados mostraram que, para partículas menores que 0,212 mm, 90% das partículas de magnetita encontram-se liberadas.

Através da análise mineralógica, foi possível identificar minerais das classes de óxidos, silicatos e fosfatos.

Os resultados de separação magnética indicaram uma maior razão de enriquecimento de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no concentrado para partículas menores que 150  $\mu\text{m}$ , ou seja, para a fração mais fina que foi estudada. Já em relação à razão de enriquecimento de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no rejeito, houve maior valor para as faixas abaixo de 300  $\mu\text{m}$ , ou seja, sugere-se trabalhos futuros com o intuito de melhor estudá-la para um possível reaproveitamento no processo de beneficiamento de rocha fosfática.

## REFERÊNCIAS

ARANTES, F. R. **Estudo do Comportamento Magnético de Nanopartículas de Magnetita e Nanofios de Níquel Diluídos em Cristais Líquidos Liotrópicos**. Universidade de São Paulo, Instituto de Física, São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AUGUSTO, P. A.; CASTELO-GRANDE, T.; AUGUSTO, P.; BARBOSA, D. **Novo Separador e Classificador Magnético: Aplicações em Processamento de Minérios**. Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2006.

BEZERRA, M. A.; BROD, J. A. **Mineralogia da Apatita do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira**. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

Cristais de Curvelo. Disponível em: <  
<https://www.cristaisdecurvelo.com.br/pages/LIMONITA-Aprenda-Mais-sobre-Este-Mineral.html>>. Acesso em 10 nov. 2019.

FILHO, V. F. N. **Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (ED-XRF) e por Reflexão Total (TXRF)**, Departamento de Ciências Exatas/ESALQ, 1999.

GARCIA CERDA, L. A.; RODRIGUES FERNANDEZ, O. S.; BETANCOUT GALINDO, R.; SALDIVAR GUERRERO, R.; TORRES TORRES, M. A. **Síntesis y propiedades de ferrofluidos de magnetita**, Distrito Federal, México, 2003.

INBRAS. **Separador Eletromagnético modelo L-4: Manual de Instrução, Operação e Manutenção**. Diadema – SP, 2013.

KULAI, Y.; LIMA, J. R. B. **Análise dos mercados de matérias primas minerais: estudo de caso da indústria de pedras britadas do estado de São Paulo**, São Paulo, 2001.

LUZ, A. B.; ALMEIDA, S. L. M. **Manual de Agregados para a construção civil**, CETEM, Rio de Janeiro, 2012.

MACEDO, R. S.; TEIXEIRA, W. G. **Determinação da densidade de partículas de diferentes solos da Amazônia**, Manaus, 2004.

MALVIK, T. **An Em Pirical Model to Establish The Liberation Properties for Minerals**. In: International Mineral Processing Congress, Toronto, 1982.

Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/>>. Acesso em: 9 nov.2019.

PATACA, L. C. M.; BORTOLETO, G. G.; BUENO, M. I. M. S. **Determinação de Arsênio em Água Contaminadas Usando Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva**. Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

RAMOS, E. R.; BEZERRA, L. M.; QUEZADO, R. C. B.; SABOIA, R. P. **Deteminação do Grau de Liberação de Particulado Fino do Minério Oxidado da Mina do Sossego em Canaã dos Carajas**. Poços de Caldas, MG, 2015.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; GONZAGA, L. M. **Tratamento de minérios**. Separação Magnética e Eletrostática, CETEM, 6ª Ed., p. 341- 379, Rio de Janeiro, 2018.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. **Tratamento de Minérios**. Análise Granulométrica por Peneiramento, CETEM, 6ª Ed., p. 53-72, Rio de Janeiro, 2018.

SANTANA, P. G.; RAMOS, A. M.; FABRIS, J. D. **Uma Estratégia Adaptada para Síntese de Magnetita**. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2007.

SILVA, F. B. R. **Análise das Principais Variáveis na Flotação Industrial do Complexo de Mineração de Tapira - MG**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SVOBODA, J; FUJITA, T. **Innovation in magnetic techniques of material treatment: technology at a crossroad**. Proceeding of the XXII International Mineral Processing Congress, Lorenzen, L, p. 261-269, Cape Town, South Africa, 2003.

VALADÃO, G. E.S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2007.

VALVERDE, F. M. **Agregados para construção civil**. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção, ANEPAC, São Paulo, 2001.

## APÊNDICE A.1 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Tabela 9: Análise granulométrica do primeiro peneiramento.

Malha (#)	Abertura (µm)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Massa de Gaudin (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante Acumulada
14	1200	1,20	26,29	-	5,33	5,33	94,67
28	590	0,59	36,65	391,39	7,44	12,77	87,23
35	425	0,425	123,34	221,94	25,03	37,80	62,20
48	300	0,30	51,43	158,53	10,44	48,23	51,77
65	212	0,212	64,53	111,95	13,09	61,33	38,67
100	150	0,15	63,57	79,15	12,90	74,23	25,77
150	106	0,106	44,34	55,98	9,00	83,23	16,77
200	75	0,075	27,25	39,58	5,53	88,75	11,25
-200	-75	-0,075	55,42	-	11,25	100,00	0,00
<b>TOTAL</b>			492,82		100,00		

Tabela 10: Análise granulométrica do segundo peneiramento.

Malha (#)	Abertura (µm)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	Massa de Gaudin (g)	% Retido Simples	% Retido Acumulado	% Passante Acumulada
14	1200	1,20	23,69	-	4,80	4,80	95,20
28	590	0,59	82,59	391,39	16,72	21,52	78,48
35	425	0,425	60,12	221,94	12,17	33,69	66,31
48	300	0,30	78,74	158,53	15,94	49,63	50,37
65	212	0,212	49,37	111,95	10,00	59,63	40,37
100	150	0,15	72,67	79,15	14,71	74,34	25,66
150	106	0,106	41,13	55,98	8,33	82,67	17,33
200	75	0,075	30,21	39,58	6,12	88,78	11,22
-200	-75	-0,075	55,40	-	11,22	100,00	0,00
<b>TOTAL</b>			493,92		100,00		

Tabela 11: Análise granulométrica do terceiro peneiramento.

<b>Malha (#)</b>	<b>Abertura (µm)</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>Massa de Gaudin (g)</b>	<b>% Retido Simples</b>	<b>% Retido Acumulado</b>	<b>% Passante Acumulada</b>
14	1200	1,20	25,56	-	5,17	5,17	94,83
28	590	0,59	86,67	391,39	17,53	22,70	77,30
35	425	0,425	55,87	221,94	11,30	34,01	65,99
48	300	0,30	81,42	158,53	16,47	50,48	49,52
65	212	0,212	48,47	111,95	9,81	60,29	39,71
100	150	0,15	69,79	79,15	14,12	74,40	25,60
150	106	0,106	42,26	55,98	8,55	82,95	17,05
200	75	0,075	30,68	39,58	6,21	89,16	10,84
-200	-75	-0,075	53,58	-	10,84	100,00	0,00
TOTAL			494,30		100,00		

## APÊNDICE A.2 – GRAU DE LIBERAÇÃO

Tabela 12: Grau de liberação, fração retida na malha de 14#.

<b>14#</b>						
<b>%Liberada</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>
<b>25</b>	5	625	9	1.125	3	375
<b>50</b>	9	4.500	12	6.000	11	5.500
<b>75</b>	55	61.875	57	64.125	73	82.125
<b>100</b>	76	152.000	69	138.000	57	114.000
<b>GL</b>	69,41		65,95		56,44	
	<b>GL médio</b>	63,93				

Tabela 13: Grau de liberação, fração retida na malha de 28#.

<b>28#</b>						
<b>%Liberada</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>
<b>25</b>	9	1.125	6	750	6	750
<b>50</b>	14	7.000	10	5.000	11	5.500
<b>75</b>	35	39.375	33	37.125	39	43.875
<b>100</b>	65	130.000	76	152.000	69	138.000
<b>GL</b>	73,24		78,00		73,36	
	<b>GL médio</b>	74,86				

Tabela 14: Grau de liberação, fração retida na malha de 35#.

<b>35#</b>						
<b>%Liberada</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>
<b>25</b>	17	2.125	5	625	6	750
<b>50</b>	15	7.500	25	12.500	9	4.500
<b>75</b>	76	85.500	62	69.750	80	90.000
<b>100</b>	126	252.000	141	282.000	138	276.000
<b>GL</b>	72,60		77,29		74,34	
	<b>GL médio</b>	74,74				

Tabela 15: Grau de liberação, fração retida na malha de 48#.

<b>48#</b>						
<b>%Liberada</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>
<b>25</b>	2	250	0	0	0	0
<b>50</b>	8	4.000	10	5.000	3	1.500
<b>75</b>	52	58.500	52	58.500	76	85.500
<b>100</b>	150	300.000	150	300.000	133	266.000
<b>GL</b>	82,70		82,53		75,35	
	<b>GL médio</b>	80,20				

Tabela 16: Grau de liberação, fração retida na malha de 65#.

<b>65#</b>						
<b>%Liberada</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>
<b>25</b>	5	625	3	375	4	500
<b>50</b>	2	1.000	4	2.000	3	1.500
<b>75</b>	30	33.750	34	38.250	44	49.500
<b>100</b>	222	444.000	210	420.000	205	410.000
<b>GL</b>	92,62		91,18		88,84	
	<b>GL médio</b>	90,88				

Tabela 17: Grau de liberação, fração retida na malha de 100#.

<b>100#</b>						
<b>%Liberada</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Índice</b>
<b>25</b>	6	750	6	750	5	625
<b>50</b>	6	3.000	5	2.500	7	3.500
<b>75</b>	21	23.625	36	40.500	33	37.125
<b>100</b>	300	600.000	285	570.000	288	576.000
<b>GL</b>	95,64		92,87		93,32	
	<b>GL médio</b>	93,94				