



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

# Remoção de Biotita em Areias de Brita Utilizando Separador Magnético de Alta Intensidade a Seco

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Luís Marcelo Marques Tavares

Coorientador: Mateus Gomes Rossi

Rio de Janeiro  
Setembro de 2016

REMOÇÃO DE BIOTITA EM AREIAS DE BRITA UTILIZANDO SEPARADOR  
MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDADE A SECO

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

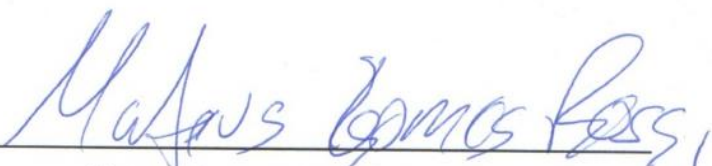
PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE  
ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO

Examinada por:



---

Prof. Luís Marcelo Tavares Marques, Ph.D.



---

Mateus Gomes Rossi, Geólogo.



---

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.



---

Eng. Paulo Fernando Almeida Braga, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL.

SETEMBRO DE 2016

Parreira, Hayla Miceli Tavares Bastos

Remoção de Biotita em Areias de Brita Utilizando Separador Magnético de Alta Intensidade a Seco. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.

xiii, 77 p.: il; 29,7 cm.

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares. Mateus Gomes Rossi

Projeto de graduação – UFRJ/Escola Politécnica/ Engenharia Metalúrgica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 61-65.

1. Biotita. 2. Separação magnética de alta intensidade a seco. 3. Areia de brita. I Luís Marcelo Marques Tavares. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Metalúrgica. III Remoção de Biotita em Areias de Brita Utilizando Separador Magnético de Alta Intensidade.

*“Somos do tamanho de nossos sonhos.”*

**Fernando Pessoa**

## **Agradecimentos**

À minha mãe, Marilene, que antes de tudo me ensinou a ser uma pessoa ética e que a educação é a única coisa que se leva da vida, nunca medindo esforços para me proporcionar a melhor educação possível. Sendo a grande responsável por eu estar aqui hoje;

Ao meu irmão, Pedro, pelo carinho e amor que sempre foram fundamentais em todos os momentos de minha vida;

Aos meus avós, Marlene, Mario e Dalva, que muitas das vezes foram muito mais do que meus avós, sendo exemplos a serem seguidos.

Ao Flávio, por ter sido meu companheiro e amigo durante toda a graduação, sempre compartilhando os diversos momentos de alegria e de dificuldades, me fazendo todos os dias querer ser uma pessoa melhor.

Ao meu orientador, Luís Marcelo, por todas as oportunidades que me foram dadas, pela excelente orientação e pela grande inspiração de pessoa e de profissional que é;

Ao meu coorientador, Mateus, que além de partilhar toda sua experiência, sempre me ajudou no desenvolvimento deste trabalho;

Ao CETEM, em especial a Sílvia França, ao Labest, em especial a Rosângela, ao IEN, em especial ao Luiz Montovano e ao Rubens e ao DeMat, em especial ao Prof. Dílson e ao Leandro, que me ajudaram na realização de toda a parte experimental em um curtíssimo espaço de tempo, me auxiliando muito além do que eu poderia esperar, sendo fundamentais para a conclusão deste projeto;

Aos meus amigos, os *MetalManos*, especialmente Raphael, Marcus, Rodrigo, Virgínia, Anderson, Gabriel e Leo, que me acolheram tão bem na engenharia metalúrgica e sempre me apoiaram, me ajudaram e fizeram essa jornada ser muito mais leve e divertida, se tornando companheiros e amigos de profissão que quero levar para vida;

A todos os professores do DEMM, que me apresentaram e fizeram com que eu me encantasse com a engenharia metalúrgica, que pouquíssimas pessoas têm a sorte de conhecer;

Ao Rangler e ao Pedro, por todos os momentos de descontração, divertimento e conversas que me proporcionaram durante os dias no LTM;

Aos bons amigos que o Ciclo Básico me trouxe, Ana Carolina, Leonardo, Joice, Tayanne, Priscilla e Rafaella, que fizeram os piores anos da engenharia serem também os melhores;

À Juliana, Marina, Mayara e Ludmila, amigas que sempre estiveram e estarão comigo, não importando as circunstâncias;

A toda a equipe do Laboratório de Tecnologia Mineral, especialmente a todos os técnicos, meu muito obrigada!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao DEMM/EP/UFRJ como parte integrante dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico

## REMOÇÃO DE BIOTITA EM AREIAS DE BRITA UTILIZANDO SEPARADOR MAGNÉTICO DE ALTA INTENSIDADE A SECO

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

Setembro/2016

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Coorientador: Mateus Gomes Rossi

Curso: Engenharia Metalúrgica

Rochas variadas têm sido usadas na produção de areia de brita para aplicação em construção civil. Micas são componentes importantes de várias rochas, em particular de gnaisse usados na produção de agregado no estado do Rio de Janeiro. Quando presente em grande quantidade, entretanto, esses minerais impõem desafios no uso da rocha em areia de brita para argamassas e concretos, pois sua presença resulta em piora da trabalhabilidade. O objetivo deste trabalho foi analisar a viabilidade técnica da remoção de um tipo de mica, a biotita, para a produção de uma areia de brita com melhores propriedades. Utilizaram-se três amostras de pó de pedra, com teores de biotita variando de 5,7 % a 10,3 %, classificadas em 4 faixas de tamanho. Os ensaios de separação foram realizados a seco em um separador magnético de terras-raras e as amostras foram analisadas quimicamente por fluorescência de raios-X. A partir dos teores de  $Fe_2O_3$ , os quais são diretamente relacionados com a presença de biotita, foi possível alcançar uma maior recuperação de ferro nas faixas de tamanhos de partículas mais finas bem como a produção de uma melhor areia de brita na amostra com maior teor inicial de biotita. Observou-se, entretanto, que a hornblenda, quando presente, também foi concentrada no produto magnético. Concluiu-se que o processo produz uma areia de brita preservando até 80 % de massa inicial com apenas 38 % do ferro contido originalmente, se tornando uma possível solução na produção de areia manufaturada de alta qualidade.

**Palavras-chave:** biotita, pó de pedra, areia de brita, separador magnético de alta intensidade.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEMM/POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Metallurgical Engineer.

## BIOTITE REMOVAL IN MANUFACTURED SANDS USING DRY HIGH-INTENSITY MAGNETIC SEPARATION

Hayla Miceli Tavares Bastos Parreira

September/2016

Advisors: Luís Marcelo Marques Tavares

Mateus Gomes Rossi

Course: Metallurgical Engineering

Different rocks have been used in the production of manufactured sand for application in construction and building. Micas are important components of various rocks, especially gneisses used in aggregate production in the state of Rio de Janeiro. When present in large amounts, however, these minerals pose challenges in the use of rock into manufactured sand for mortar and concrete, since it results in worsening of workability. The aim of this study was to analyze the technical feasibility of removal of a particular mica (biotite) for the production of manufactured sand with improved characteristics. Three manufactured sand samples with biotite contents ranging from 5.7 % to 10.3 % were classified into four size ranges. The separation test was performed in a dry high-intensity magnetic separator and the samples were chemically analyzed by x-ray fluorescence. Analyzing the  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  content, which is directly related to the presence of biotite, the highest iron recovery was reached in the finer particle sizes as well as the production of better manufactured sand in the sample with higher initial biotite content. It was also observed that hornblend, whenever present, was also concentrated in the magnetic product from the separator. It follows that the process produces manufactured sand preserving up to 80 % of the initial mass with only 38 % of the original iron becoming a possible solution in the production of high-quality manufactured sand.

**Keywords:** biotite, stone dust, manufactured sand, high- intensity magnetic separator.



## SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas .....	xiii
1 Introdução.....	1
2 Objetivo .....	2
3 Revisão Bibliográfica .....	3
3.1 Agregados para a Construção Civil .....	3
3.2 Geologia Regional do Estado do Rio de Janeiro.....	4
3.3 Micas .....	6
3.3.1 Aplicações .....	10
3.4 Concentração .....	12
3.4.1 Separação magnética.....	14
3.4.2 Separador magnético de terras-raras .....	18
3.5 Composição Mineral .....	19
3.6 Análise Química .....	20
3.7 Índices de Forma de Partículas .....	21
4 Materiais e Métodos .....	25
4.1 Materiais.....	25
4.2 Preparação das Amostras para os Ensaios .....	25
4.3 Ensaios de Separação Magnética .....	26
4.4 Composição Mineral .....	29
4.5 Análise Química .....	29
4.5.1 Preparação das Amostras para Análise Química.....	30
4.6 Índice de Forma das Partículas .....	31
5 Resultados e Discussões.....	33
5.1 Caracterização dos Pós de Pedra .....	33
5.2 Balanço de Massa e Balanço Metalúrgico .....	40
5.3 Recuperação de Ferro no Produto Magnético .....	45

5.4	Rendimento .....	49
5.5	Razão de Rejeição .....	52
5.6	Eficiência .....	56
6	Conclusões.....	59
7	Referências Bibliográficas .....	61
	Anexo I .....	66
	Anexo II .....	72

## Lista de Figuras

Figura 1 - Compartimentação Geo-Tectônica do Estado do Rio de Janeiro (Valeriano <i>et al.</i> , 2012).....	4
Figura 2 - Rocha gnáissica apresentando bandamento composicional - grupo litológico dos gnaisses facoidais.....	5
Figura 3 - Componentes do grupo das micas: 1 - muscovita; 2 - biotita .....	6
Figura 4 - Ilustração do aumento de consumo de água de um meio com partículas alongadas em relação a um meio com partículas esféricas para que ambos tenham a mesma viscosidade (modificado de Hawlitschek, 2014) .....	8
Figura 5 - Ensaio de saturação em água para dois <i>fillers</i> graníticos: <i>Filler A</i> , rico em quartzo e feldspato e <i>Filler B</i> , rico em mica e argilominerais (modificado de Lagerblad <i>et al.</i> , 2011).....	9
Figura 6 - Relação entre proporção de adição de biotita e fluidez de argamassas (modificado de Wakizaka <i>et al.</i> , 2005) .....	10
Figura 7 - Fluxograma esquemático de materiais em um processo de concentração mineral com separação de dois produtos.....	12
Figura 8 - Características, classificações e aplicações dos diferentes separadores magnéticos (Da Luz <i>et al.</i> , 2010) .....	14
Figura 9 - Curvas magnéticas para materiais paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos (Wills, 2006) .....	16
Figura 10 - Desenho esquemático do separador magnético de terras-raras .....	19
Figura 11 - Diagrama esquemático de um átomo saindo do estado excitado e indo para o estado fundamental .....	21
Figura 12 - Forma das partículas (Sordi, 2014).....	22
Figura 13 - Relação entre a razão de aspecto e a esfericidade das partículas (modificado de Hawlitschek, 2014) .....	23
Figura 14 - Desenho esquemático do equipamento para análise dinâmica de imagens .....	24
Figura 15 - Aparelho RO-TAP <sup>®</sup> utilizado para classificar as amostras por peneiramento .....	26
Figura 16 - Separador Magnético de Terras Raras: 1 – Perfil; 2 – Detalhe .....	26
Figura 17 - Esquema para os ensaios utilizando o Separador Magnético de Terras-Raras.....	28
Figura 18 - Difratorômetro de raios-X utilizado para a análise de composição mineralógica das amostras de pó de pedra .....	29

Figura 19 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva utilizado nas análises químicas das amostras .....	30
Figura 20 - Moinho planetário Pulverisette 6 utilizado na moagem das amostras .....	30
Figura 21 - Pastilhas de pó prensado utilizadas na fluorescência de raios-X em vácuo .....	31
Figura 22 - Prensa semiautomática utilizada para a confecção das pastilhas .....	31
Figura 23 - Diagrama esquemático do modo de análises de imagens, para avaliação dos índices de forma, no Camsizer XT (Manual de Análises LCT-USP) .....	32
Figura 24 - Tamanho de partícula para os pós de pedra e limites de tamanho segundo ABNT .....	33
Figura 25 – Distribuição do material contido em cada faixa de tamanho para as amostras de pó de pedra .....	34
Figura 26 - Imagem do microscópio estereoscópio da amostra PP - 02. 1: Tamanho de 0,425 mm X 0,212 mm (fino) e aumento de 0,8x; 2: Tamanho de 0,212 mm X 0,053 mm (muito fino) e aumento de 0,8x.....	36
Figura 27 - Imagem do microscópio estereoscópio da amostra PP - 05. 1: Tamanho de 0,425 mm X 0,212 mm (fino) e aumento de 0,8x; 2: Tamanho de 0,212 mm X 0,053 mm (muito fino) e aumento de 2x.....	36
Figura 28 - Imagem do microscópio estereoscópio da amostra PP - 06. 1: Tamanho de 0,600 mm X 0,425 mm (médio) e aumento de 1x; 2: Tamanho de 0,425 mm X 0,212 mm (fino) e aumento de 1x; 3: Tamanho de 0,212 mm X 0,053 mm (muito fino) e aumento de 0,8x.....	37
Figura 29 - Teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> por faixa de tamanho para as amostras de pó de pedra....	38
Figura 30 - Relação entre tamanho de partícula e razão de aspecto para as três amostras de pó de pedra .....	39
Figura 31 - Relação entre tamanho de partícula e esfericidade para as amostras dos três pós de pedra.....	39
Figura 32 - Balanço de massa e metalúrgico da amostra PP – 02.....	40
Figura 33 – Distribuição de tamanhos de partículas para a amostra PP - 02 e para a sua respectiva areia de brita .....	41
Figura 34 - Balanço de massa e metalúrgico da amostra PP – 05.....	42
Figura 35 – Distribuição de tamanhos de partículas para a amostra PP - 05 e para a sua respectiva areia de brita .....	43
Figura 36 - Balanço de massa e metalúrgico da amostra PP – 06.....	44
Figura 37 – Distribuição de tamanhos de partículas para a amostra PP - 06 e para a sua respectiva areia de brita .....	45

Figura 38 - Relação entre o teor de $Fe_2O_3$ e a recuperação para as quatro faixas de tamanho das amostras (1) PP – 02; (2) PP – 05; (3) PP – 06 .....	46
Figura 39 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Fino .....	48
Figura 40 - Teor de $Fe_2O_3$ no produto magnético em função da recuperação desse componente para as três amostras de pó de pedra .....	49
Figura 41 - Relação entre o teor de $Fe_2O_3$ e o rendimento para as quatro faixas de tamanho das amostras (1) PP – 02; (2) PP – 05; (3) PP – 06 .....	50
Figura 42 - Teor de $Fe_2O_3$ da areia de brita em função do rendimento para as três amostras de pó de pedra .....	52
Figura 43 - Relação entre a razão de rejeição e o rendimento para as quatro faixas de tamanho das amostras (1) PP – 02; (2) PP – 05; (3) PP – 06 .....	54
Figura 44 - Razão de rejeição função do rendimento para as três amostras de pó de pedra .....	55
Figura 45 - Eficiência para os estágios <i>rougher</i> e <i>scavenger</i> para as quatro faixas de tamanho, sendo (1) amostra PP – 02, (2) amostra PP – 05 e (3) amostra PP – 06 ....	57
Figura 46 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Grosso .....	66
Figura 47 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Médio .....	66
Figura 48 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Fino .....	67
Figura 49 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Muito Fino .....	67
Figura 50 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Grosso .....	68
Figura 51 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Médio .....	68
Figura 52 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Fino .....	69
Figura 53 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Muito Fino .....	69
Figura 54 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Grosso .....	70
Figura 55 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Médio .....	70
Figura 56 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Fino .....	71
Figura 57 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Muito Fino .....	71

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Fórmula química, composição química e hábito dos minerais mais comuns em rochas gnáissicas do Estado do Rio de Janeiro (Museu DNPM e Web Mineral, acesso em agosto 2016).....	5
Tabela 2 - Propriedades da muscovita e biotita .....	7
Tabela 3 - Susceptibilidade magnética de minerais selecionados e sua classificação (modificado de HUNT <i>et al.</i> , 1995).....	17
Tabela 4 - Classificação dos agregados quanto à forma dos grãos (Weidmann, 2008) .....	21
Tabela 5 - Classificação utilizada nas amostras.....	25
Tabela 6 - Composição mineralógica (em peso) dos pós de pedra realizada por DRX34	
Tabela 7 - Composição química dos pós de pedra realizada por FRX .....	35
Tabela 8 - Composição química para os produtos finais da amostra PP - 02 .....	41
Tabela 9 - Composição química para os produtos finais da amostra PP - 05 .....	42
Tabela 10 - Composição química para os produtos finais da amostra PP - 06 .....	44
Tabela 11 - Composição química da amostra PP - 05 na faixa de tamanho fina.....	55
Tabela 12 - Eficiência do processo de separação magnética para as 3 amostras .....	58
Tabela 13 - Composição Química da Amostra PP – 02 por faixa de tamanho .....	72
Tabela 14 - Composição Química da Amostra PP – 05 por faixa de tamanho .....	74
Tabela 15 - Composição Química da Amostra PP – 06 por faixa de tamanho .....	76

## 1 Introdução

Segundo a norma NBR 9935: Agregados – Terminologia, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o agregado artificial é o “material granular resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, para uso como agregado em concreto ou argamassa” e a areia é definida como “agregado miúdo originado por meio de processos naturais ou artificiais de desintegração de rochas, ou proveniente de processos industriais. É chamada de areia natural se resultante da ação de agentes da natureza, de areia artificial quando proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem; e de areia de britagem, quando proveniente do processo de cominuição mecânica da rocha, conforme normas específicas”.

Devido ao formato arredondado de suas partículas e ao baixo teor de material pulverulento (<0,075 mm), a areia natural geralmente tem maior preferência de uso se comparada com a areia de brita, pois garante menor desgaste de equipamentos, menor demanda de água para proporcionar boa trabalhabilidade ao concreto, melhor acabamento superficial e aumento da resistência mecânica. Porém, além de não ser sustentável a produção do agregado natural em diversas localidades, sua disponibilidade é limitada próximo aos principais mercados consumidores, as grandes cidades. Sendo assim, faz-se necessária a exploração deste agregado miúdo em locais distantes da sua utilização, o que acarreta em maior custo final de produto, principalmente devido ao custo adicional do transporte.

Como forma de minimizar os problemas de alto custo e da não sustentabilidade do agregado natural, a indústria da construção civil busca o uso da areia de brita como uma alternativa viável.

Diversas rochas têm sido usadas na produção de areia de brita, como granitos, gnaisses, sienitos, dioritos, basaltos, arenitos e calcários (Frazão, 2007). No estado do Rio de Janeiro, as empresas produtoras de agregados estão próximas a corpos granito-gnáissicos sin e pós-tectônicos, gnaisses do Complexo Rio Negro e gnaisses Facoidal. Os granitos-gnáissicos tem composição de quartzo-feldspato com altos teores de sílica e alumínio, micas (muscovita e biotita) e anfibólios (hornblenda).

Os minerais micáceos são componentes relevantes e presentes em particular nos gnaisses empregados na produção de agregado no estado do Rio de Janeiro. Quando presentes em grande quantidade, entretanto, esses minerais impõem desafios no uso da rocha em areia de brita para argamassas e concretos, pois eles resultam em piora da trabalhabilidade e da reologia do concreto.

## **2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é a remoção de biotita presente em diferentes areias de brita de unidades produtoras localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro, bem como o desenvolvimento de um processo que visa à produção de um agregado miúdo com melhores propriedades para ser utilizado na indústria da construção civil, em argamassas e concretos.



### **3 Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 Agregados para a Construção Civil**

A construção civil utiliza diversos tipos de agregados para produzir concreto, asfalto e argamassas, entre eles brita ou pedra britada, cascalho, areia natural ou areia manufaturada. Os agregados são materiais granulares, com dimensões e propriedades bem definidas, porém sem estabelecimento de forma e de volume. Estes agregados são amplamente consumidos, sendo então um indicativo de urbanização e benefícios à população. Dados do Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro (2012) estimaram que o consumo de areia para o ano de 2011 foi de 33.204.500 t, sendo 57,7 % usados no concreto para a construção civil e 42,3 % em revestimentos, calçamentos e argamassa, enquanto o consumo de brita em 2011 foi de 17.491.640 t, sendo 66 % destinado ao concreto para a construção civil.

Apesar destes agregados não serem escassos na natureza, eles normalmente são produzidos a uma distância considerável dos principais centros consumidores, sendo necessária a utilização de transportes e fretes, o que faz com que o seu custo seja aumentado, diminuindo as margens de lucro.

A areia é um dos agregados para a construção civil mais consumido e é considerada um agregado miúdo. De acordo com a NBR 9935, o agregado miúdo é o material passante na peneira de 4,75 mm e retido na peneira de abertura igual a 150 µm. A areia é proveniente da degradação de rochas e pode ser minerada em leitos de rios (derivada de processos naturais de intemperismo e transporte, sendo depositada nos leitos dos rios), em cava (areia retida em camadas de sedimentos arenosos) ou pelo desmonte mecânico de rochas através de processos de cominuição como a britagem.

As areias são basicamente constituídas por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e minerais da família dos feldspatos ( $(\text{K,Na,Ca})(\text{Si, Al})_4\text{O}_8$ ), tem “boa distribuição granulométrica e formas arredondadas, que garantem uma baixa porosidade, menor consumo de cimento, melhores características mecânicas e durabilidade do concreto, maior fluidez e economicidade, além de ter uma textura superficial áspera, que melhora a aderência do cimento” (DRM-RJ, 2012).

Devido ao fato das areias naturais terem sua maior aplicação nos concretos é importante comentar sobre os materiais que são deletérios às suas propriedades. Os materiais mais comuns são impurezas orgânicas, na forma de húmus e argila orgânica, materiais friáveis e/ou expansíveis como os torrões de argila, madeira e

carvão, e por último, mas não menos importante, minerais micáceos. Estas substâncias podem interferir, por exemplo, no processo de hidratação do cimento, na aderência entre agregados e pasta de cimento hidratada, e podendo ser reativas (Weidmann, 2008).

### 3.2 Geologia Regional do Estado do Rio de Janeiro

Segundo o estudo feito pela CPRM (Valeriano *et al.*, 2012), o estado do Rio de Janeiro encontra-se sob quatro terrenos geotectônicos (Figura 1) denominados de Terreno Oriental, Terreno Ocidental, Klipper Paraíba do Sul e Terreno Cabo Frio. Nestes terrenos, as principais litologias são os granitoides e os gnaisses, destacando-se o Complexo Rio Negro e o gnaise Facoidal. Estas litologias têm em sua composição típica feldspato, quartzo, biotita e hornblenda. Suas fórmulas e composições químicas e hábitos estão elucidados na Tabela 1. No estado do Rio de Janeiro, a grande maioria dessas rochas utilizada para a produção de brita e de seus derivados é do tipo gnáissica.

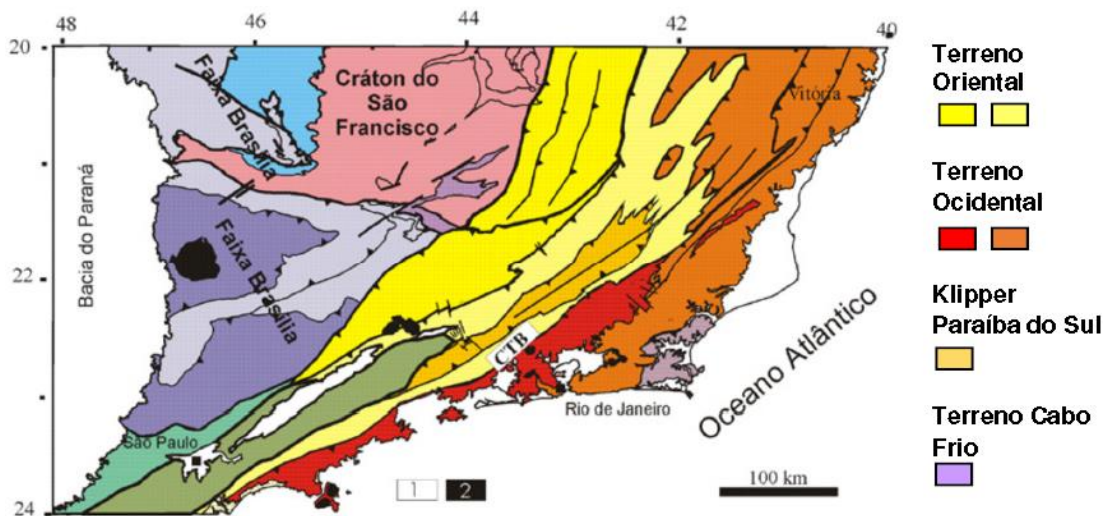


Figura 1 - Compartimentação Geo-Tectônica do Estado do Rio de Janeiro (Valeriano *et al.*, 2012)

Tabela 1 – Fórmula química, composição química e hábito dos minerais mais comuns em rochas gnáissicas do Estado do Rio de Janeiro (Museu DNPM e Web Mineral, acesso em agosto 2016)

	<b>Fórmula Química</b>	<b>Composição Química</b>	<b>Hábito</b>
<b>Feldspato potássico</b>	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	17 % $\text{K}_2\text{O}$ , 18 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 65 % $\text{SiO}_2$	Prismático
<b>Quartzo</b>	$\text{SiO}_2$	100 % $\text{SiO}_2$	Prismático
<b>Biotita</b>	$\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_{6-4}(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti})_{0-2}\text{Si}_{6-5}\text{Al}_{2-3}\text{O}_{20}(\text{OH}, \text{F})_4$	37 % $\text{SiO}_2$ , 18 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 9 % $\text{K}_2\text{O}$ , 1 % $\text{Na}_2\text{O}$ , 8 % $\text{MgO}$ , 2 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 21 % $\text{FeO}$ , 4 % elementos minoritários	Micáceo
<b>Hornblenda</b>	$\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe})_4(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Ti})\text{AlSi}_8\text{AlO}_{22}(\text{OH}, \text{O})_2$	12 % de $\text{CaO}$ , 10 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 30 % $\text{FeO}$ , 2 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 44 % $\text{SiO}_2$ , 2 % $\text{H}_2\text{O}$	Prismático

Os gnaisses são rochas metamórficas provenientes da transformação de rochas sedimentares ou ígneas, apresentando pelo menos 20 % em volume de feldspatos potássicos, podendo ser do tipo microclínio ou ortoclásio. Apresentam foliação incipiente e estrutura de bandamento composicional (Figura 2) com alternância de camadas félsicas (quartzo e feldspato) e camadas máficas (biotita e anfibólio). Sua textura pode ser do tipo (i) granoblástica, com minerais granulares em diversas dimensões formando mosaicos poligonizados; (ii) lepidoblástica, com predomínio de minerais micáceos orientados, ou ainda (iii) nematoblástica, pela orientação de minerais prismáticos como anfibólios e piroxênios (Best, 2008). Quando originados de rochas graníticas são classificados como ortognaisses e, quando originados de rochas sedimentares, são classificados como paragnaisses. Possuem boa resistência mecânica, estabilidade química e baixa presença de impurezas.

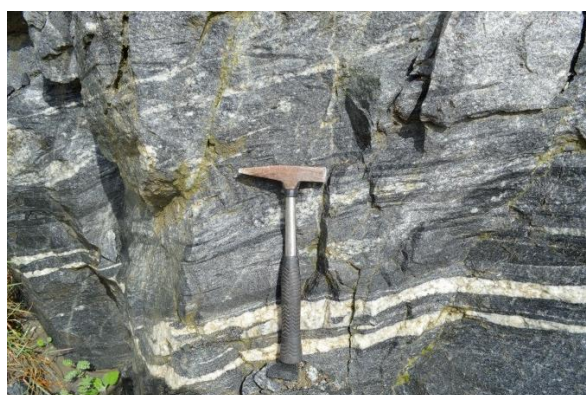


Figura 2 - Rocha gnáissica apresentando bandamento composicional - grupo litológico dos gnaisses facoidais

### 3.3 Micas

O termo mica vem do Latim *micare* e significa “brilhar”. As micas fazem parte da família dos filossilicatos, também chamado de grupo das micas, e sua ocorrência mais típica é em rochas magmáticas, metamórficas e sedimentares. A fórmula química geral para o grupo das micas é  $X_2Y_{4-6}Z_8O_{20}(OH,F)_4$ , na qual X normalmente é potássio, sódio ou cálcio; Y normalmente é alumínio, magnésio, ferro ou lítio; e, Z normalmente é silício ou alumínio (Schlantz e Tanner, 2006). Os dois minerais (Figura 3) mais usuais do grupo das micas são a muscovita, que é um silicato de potássio e alumínio hidratado e pode conter pequenas quantidades de ferro ( $Fe^{2+}$  ou  $Fe^{3+}$ ), magnésio, cálcio, sódio, lítio, flúor e titânio, e a biotita, que é um silicato de potássio, magnésio-ferro-alumínio hidratado.

Segundo Schlantz e Tanner (2006), a biotita é um mineral muito rico em ferro, podendo estar na forma de  $FeO$  ( $Fe^{2+}$ ) ou  $Fe_2O_3$  ( $Fe^{3+}$ ). O mais usual é representar o ferro através do óxido de ferro ( $FeO$ ), sendo assim importante estabelecer a correlação entre o  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  e ferro puro. O teor de ferro no  $FeO$  é de 39 %, enquanto o  $FeO$  representa aproximadamente 89 % de  $Fe_2O_3$ . Os teores de óxido de ferro podem chegar a 21 % com sua composição química usual de 37% de  $SiO_2$ , 18 % de  $Al_2O_3$ , 9 % de  $K_2O$ , 1 % de  $Na_2O$ , 8 % de  $MgO$ , 2 % de  $Fe_2O_3$ , 21 % de  $FeO$ , e 4 % de óxidos de elementos minoritários. Porém, pesquisas indicam que o teor de  $FeO$  na biotita pode variar entre 8 % e 27 % (Museu DNPM, acesso em agosto 2016; Galindo, 2013). Sendo assim, o ferro é um forte indicador da presença de biotita. A razão entre magnésia ( $MgO$ ) e sílica ( $SiO_2$ ) também é importante para caracterização das biotitas, tendo que o valor típico é por volta de 1:4,5 ( $SiO_2:MgO$ ). Outras variações das micas são as flogopitas, lepidolitas, vermiculitas e glauconitas. As principais propriedades das muscovitas e biotitas estão apresentadas na Tabela 2.



Figura 3 - Componentes do grupo das micas: 1 - muscovita; 2 - biotita

Tabela 2 - Propriedades da muscovita e biotita

	<b>Muscovita</b>	<b>Biotita</b>
<b>Fórmula Química</b>	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$	$K_2(Mg,Fe^{2+})_{6-4}(Fe^{3+},Al,Ti)_{0-2}Si_{6-5}Al_{2-3}O_{20}(OH,F)_4$
<b>Dureza</b>	2,0 a 2,5	2,5 a 3,0
<b>Densidade</b>	2,76 a 3,1	2,8 a 3,2
<b>Brilho</b>	Vítreo a sedoso ou nacarado	Reluzente
<b>Diafaneidade e Cor</b>	Transparente, incolor em folhas delgadas, em blocos espessos translúcida, com matizes claros do amarelo, castanho, verde e vermelho	Usualmente verde-escuro, castanho a preto. Mais raramente amarelo-claro
<b>Propriedades diagnósticas</b>	Caracterizada pela sua clivagem extremamente perfeita e por sua cor clara	Caracterizada por sua clivagem micácea e cor escura
<b>Cristalografia</b>	Sistema monoclinico, classe prismática	
<b>Propriedades óticas</b>	Biaxial	
<b>Hábito</b>	Placoso, laminado, foliado	
<b>Clivagem</b>	Pinacóide basal perfeita {001}	
<b>Fratura</b>	Não se observa fraturas, devido a sua clivagem perfeita resultando em folhas bem finas que são bastante flexíveis e elásticas	
<b>Traço</b>	Branco	

A forma das micas é o aspecto mais relevante na sua influência deletéria nas propriedades de concretos e argamassas. A existência de partículas em um fluido em movimento perturba o perfil de escoamento fazendo com que a viscosidade do meio aumente. Quanto maior for essa perturbação maior será o aumento na viscosidade.

Argamassas têm cerca de 80 % de sólidos e seu comportamento reológico é fortemente influenciado pela presença dos agregados miúdos. Os minerais micáceos com sua forma lamelar se aglomeram formando uma estrutura espacial rígida, que é responsável pela demanda de uma tensão mínima de cisalhamento necessária para iniciar o escoamento da suspensão. Para evitar esse tipo de aglomeração, essas partículas necessitam de quantidade de água superior àquela demandada por partículas esféricas para preencher os vazios presentes nos aglomerados formados, recobrir a superfície das partículas e separá-las para que possam fluir de forma correta e manter a mesma viscosidade, não impactando na reologia (Figura 4) (Hawllitschek, 2014).

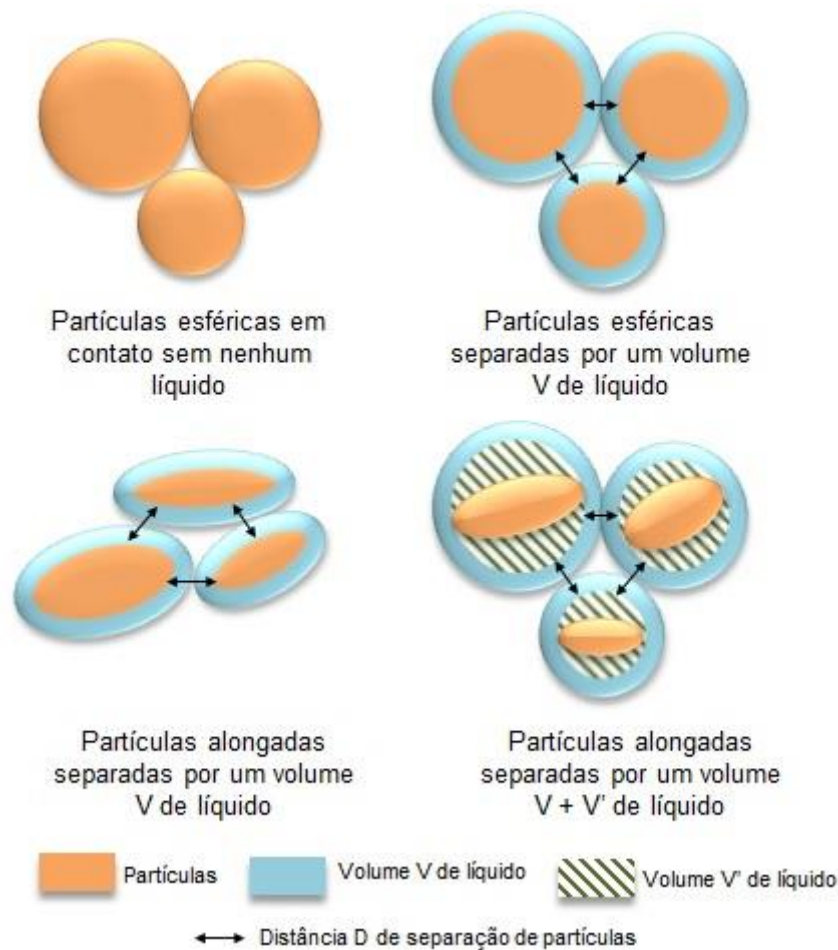


Figura 4 - Ilustração do aumento de consumo de água de um meio com partículas alongadas em relação a um meio com partículas esféricas para que ambos tenham a mesma viscosidade (modificado de Hawlitschek, 2014)

O maior consumo de água dos minerais micáceos foi objeto de estudo de Lagerblad *et al.* (2011). Foi feita a comparação de dois tipos de *fillers* graníticos, um rico em quartzo e feldspatos e o outro rico em micas e argilominerais, na capacidade de atingir a saturação em água (Figura 5), com o *filler* micáceo apresentando maior saturação. A presença de partículas que demandam maior consumo de água afeta a trabalhabilidade dos concretos (Lagerblad *et al.*, 2013). O maior consumo de água em minerais micáceos foi também observado por Smith *et al.* (2001), que atribuiu o formato lamelar e alongado da mica o efeito negativo na durabilidade e resistência dos concretos e argamassas.

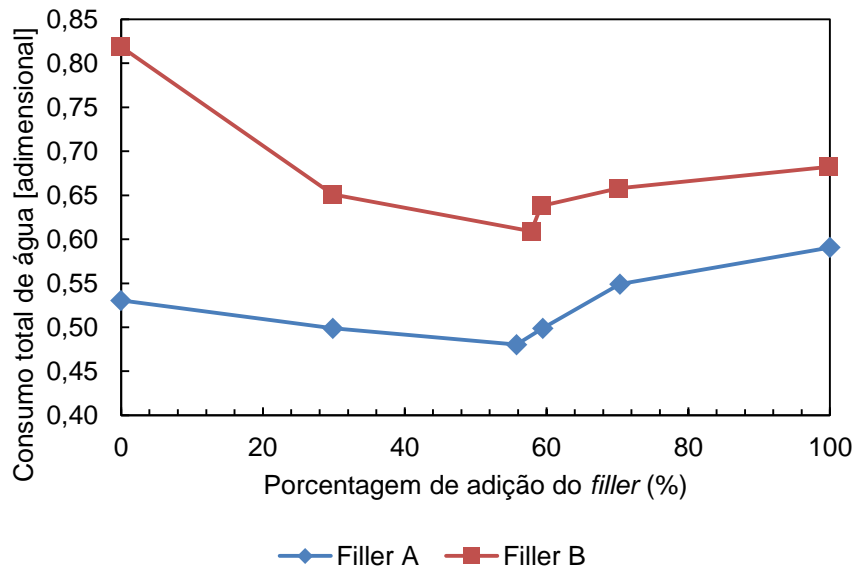


Figura 5 - Ensaio de saturação em água para dois *fillers* graníticos: *Filler A*, rico em quartzo e feldspato e *Filler B*, rico em mica e argilominerais (modificado de Lagerblad *et al.*, 2011)

Weidmann (2008) explicou que a mica livre em agregados miúdos pode ser devido aos minerais biotita ou muscovita, e tem um efeito negativo na demanda de água e na resistência do concreto, mesmo em pequenos teores, sendo responsável pela redução de 15 % na resistência do concreto aos 28 dias com um teor de 5 % de mica, e com relação constante água/cimento. Uma possível explicação para a redução na resistência seria a possibilidade de uma aderência insuficiente entre a pasta de cimento e a superfície das partículas de mica ou pela possibilidade da geração de produtos de alteração da biotita, por processos intempéricos, que podem ser da classe dos argilominerais e assim, apresentar comportamento expansivo na presença de água, prejudicando a trabalhabilidade do concreto. A vermiculita é um exemplo de mineral formado pela alteração intempérica da biotita (Museu DNPM, acesso em agosto 2016).

A trabalhabilidade e a resistência dos concretos e argamassas também são propriedades afetadas pela forma da biotita. Wakizaka *et al.* (2005) mostrou que o aumento da proporção de biotita diminui a fluidez das argamassas (Figura 6), medida que é relacionada à trabalhabilidade. A fluidez diminui quando os grãos se tornam maiores, pois quando a razão entre o comprimento do plano de clivagem e o comprimento do ângulo reto formado com este plano é grande significa que a forma da biotita é lamelar. Logo, quanto mais lamelar é a partícula de biotita, pior a trabalhabilidade do concreto ou argamassa. A redução da resistência se dá pelo

alinhamento do eixo de compressão nos ângulos entre 30° e 60° com a partícula lamelar do mineral micáceo.

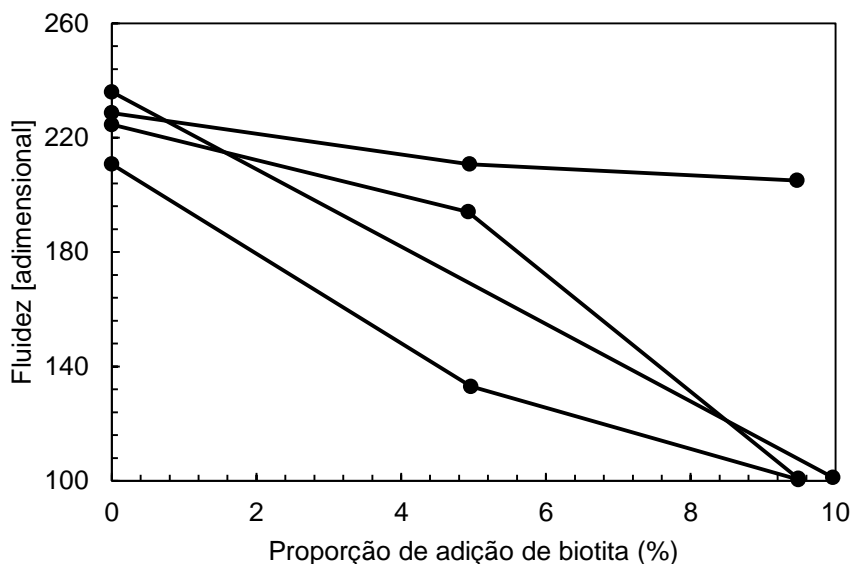


Figura 6 - Relação entre proporção de adição de biotita e fluidez de argamassas (modificado de Wakizaka *et al.*, 2005)

### 3.3.1 Aplicações

O Portal de Apoio ao Pequeno Produtor Mineral (PORMIN) da rede APL mineral do Ministério de Minas e Energia contém informações sobre a comercialização das micas. São comercializadas sob a forma de folhas e estas são classificadas como bloco – espessura mínima de 0,18mm, filme ou película – espessura ideal de 0,03 mm a 0,10 mm, e lâmina – espessura mínima de 0,03 mm.

A muscovita tem diversas aplicações, e quando comercializada em blocos, é utilizada em tubos a vácuo como isolante; já na forma de filmes tem emprego na produção de dielétricos em capacitores, pois se observa aumento na durabilidade e, quando em lâminas é usada para produzir folhas de mica que irão se transformar em fitas isolantes, chapas de modelagem, chapas para aquecedores, chapas flexíveis e placas segmentadas. Essas aplicações se justificam pelo fato de a muscovita ser um bom isolante (baixa condutibilidade elétrica) e um bom dielétrico. Além disso, quando moída, pode ser utilizada na produção de tintas e nas indústrias de materiais de transportes, eletrodos, cerâmica, indústria eletrônica e na perfuração de poços de



petróleo, pois é um material inerte, flexível e não abrasivo, com grau de brancura de 75 % (PORMIN, acesso em agosto de 2016).

Outra aplicação que vem sendo pesquisada é o uso dos minerais micáceos como fertilizante. Duarte (2012) explicou que um dos principais componentes de fertilizantes utilizados na agricultura é o potássio e que o Brasil só tem capacidade de produzir 10 % de sua demanda, sendo o restante importado. Assim, faz-se necessário o estudo de novas fontes do potássio para diminuir a sempre crescente dependência às importações. Uma dessas alternativas é o uso de micas, em particular da biotita, pois apresentam alto teor de potássio e são comuns nos solos brasileiros. O estudo mostrou que a biotita não tem uma eficiência tão boa no primeiro cultivo (60 dias após a sua aplicação), pois é um mineral pouco solúvel, não ocorrendo liberação total do potássio, especialmente quando comparada ao KCl, que é o componente que contém o potássio no fertilizante usual. Porém, a biotita apresenta um maior efeito residual, pois demora mais tempo para liberar o potássio no solo, porém mostra disponibilização eficaz do elemento a longo prazo, tendo um índice de eficiência agrônômica igual a 54 % (o emprego de 100 kg do mineral biotita correspondeu a aplicação de 54 kg do fertilizante cloreto de potássio), podendo assim substituir parcialmente a fonte padrão de fertilizante.

Uma outra aplicação investigada é no tratamento de água. Martins (2015) explorou o uso da biotita para promover a remoção de arsênio em águas, que é um elemento bioacumulável. O arsênio é um metal tóxico, sendo julgado como o elemento químico mais perigoso. O consumo de água com teores acima de 10 µg/L é considerado como caso grave de intoxicação. A biotita é usada no processo devido a sua elevada capacidade de troca catiônica e por ser um importante adsorvente natural. A biotita apresentou excelente habilidade de remover o arsênio, tendo efeito potencializado em condições ácidas. Em condições neutras e alcalinas, mesmo com menor eficiência de remoção, sua aplicação se mostrou satisfatória. Os resultados obtidos confirmaram estudos já realizados e coloca a biotita como uma opção eficaz no tratamento de águas contaminadas por arsênio, ressaltando que ainda não pode ser usada como sistema único para o tratamento, sendo necessárias pesquisas de sistemas de tratamento com baixo custo e que possam trabalhar em conjunto com a biotita no tratamento efetivo das águas contaminadas.

### 3.4 Concentração

Da Luz *et al.* (2010) explicam que as operações de concentração de minerais são realizadas com o objetivo de separar os minerais de interesse dos minerais de ganga, se baseando nas diferenças de propriedades destes, como massa específica (ou densidade), condutividade elétrica, susceptibilidade magnética, velocidade de sedimentação, propriedades químicas de superfície – como a hidrofobicidade, cor, radioatividade, forma, dentre outras. Sendo assim, podemos nomear alguns processos de classificação como concentração gravimétrica, flotação, separação magnética, separação eletrostática e de alta tensão e separação em meio denso.

Além da necessidade da existência das diferenças de propriedades, o mineral só irá se concentrar caso as partículas minerais estejam fisicamente liberadas, ou seja, idealmente as partículas deveriam conter apenas uma única espécie mineral. A liberação ocorre através de operações de cominuição. Deve-se fragmentar somente o necessário para que não haja gasto excessivo de insumos.

A fim de avaliar a eficiência dos processos de concentração, é necessário ter controle dos balanços mássicos e metalúrgicos (conservação da massa para o metal contido) envolvidos no processo. Na Figura 7 tem-se um fluxograma esquemático de materiais em um processo de concentração mineral, com alimentação de massa (A) e teor (a), concentrado de massa (C) e teor (c) e rejeito de massa (R) e teor (r).

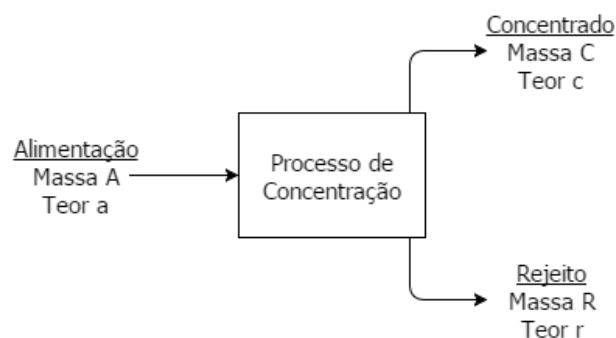


Figura 7 - Fluxograma esquemático de materiais em um processo de concentração mineral com separação de dois produtos

Define-se teor como sendo a razão entre a um determinado elemento de interesse contido no material e a sua massa total. Pelo princípio da conservação de massa, de

Lavoisier, tem-se que todo o material que entra em um sistema qualquer deve ser igual ao material que sai, ou seja, não existe acúmulo de material (equação 1):

$$\begin{aligned} A &= C + R \\ Aa &= Cc + Rr \end{aligned} \tag{1}$$

O rendimento (ou recuperação mássica) é a razão entre a vazão do concentrado e a vazão da alimentação (equação 2):

$$\text{Rendimento} = 100 \left( \frac{C}{A} \right) \tag{2}$$

A recuperação, que pode ser do metal ou da espécie mineral, sendo definida pela razão entre a quantidade de metal contida nos produtos e na alimentação (equação 3):

$$\text{Recuperação} = 100 \left( \frac{Cc}{Aa} \right) \tag{3}$$

A taxa de concentração ( $\tau$ ), ou razão de enriquecimento, é calculada utilizando-se somente os teores medidos, conforme equação 4:

$$\tau = C/a \tag{4}$$

A eficiência de uma operação de concentração (Tavares, 2004) é medida pela equação 5, que considera quanto do mineral de interesse é coletado no concentrado e quanto do mineral de ganga é removido do rejeito:

$$\text{Eficiência} = 100 \left( \frac{Cc}{Aa} \right) \left( \frac{R}{A} \right) \left( \frac{100-r}{100-a} \right) \tag{5}$$

### 3.4.1 Separação magnética

A separação magnética funciona de acordo com a susceptibilidade magnética dos minerais envolvidos, separando os minerais magnéticos (atraídos pelo campo magnético) dos minerais não magnéticos (repelidos pelo campo magnético), um exemplo é a separação da magnetita do quartzo. Como a separação magnética depende do meio em que vai ser realizada (a seco ou a úmido), da intensidade do campo magnético e do seu gradiente, ela pode ser classificada em diversos grupos, conforme Figura 8 (Da Luz *et al.*, 2010).

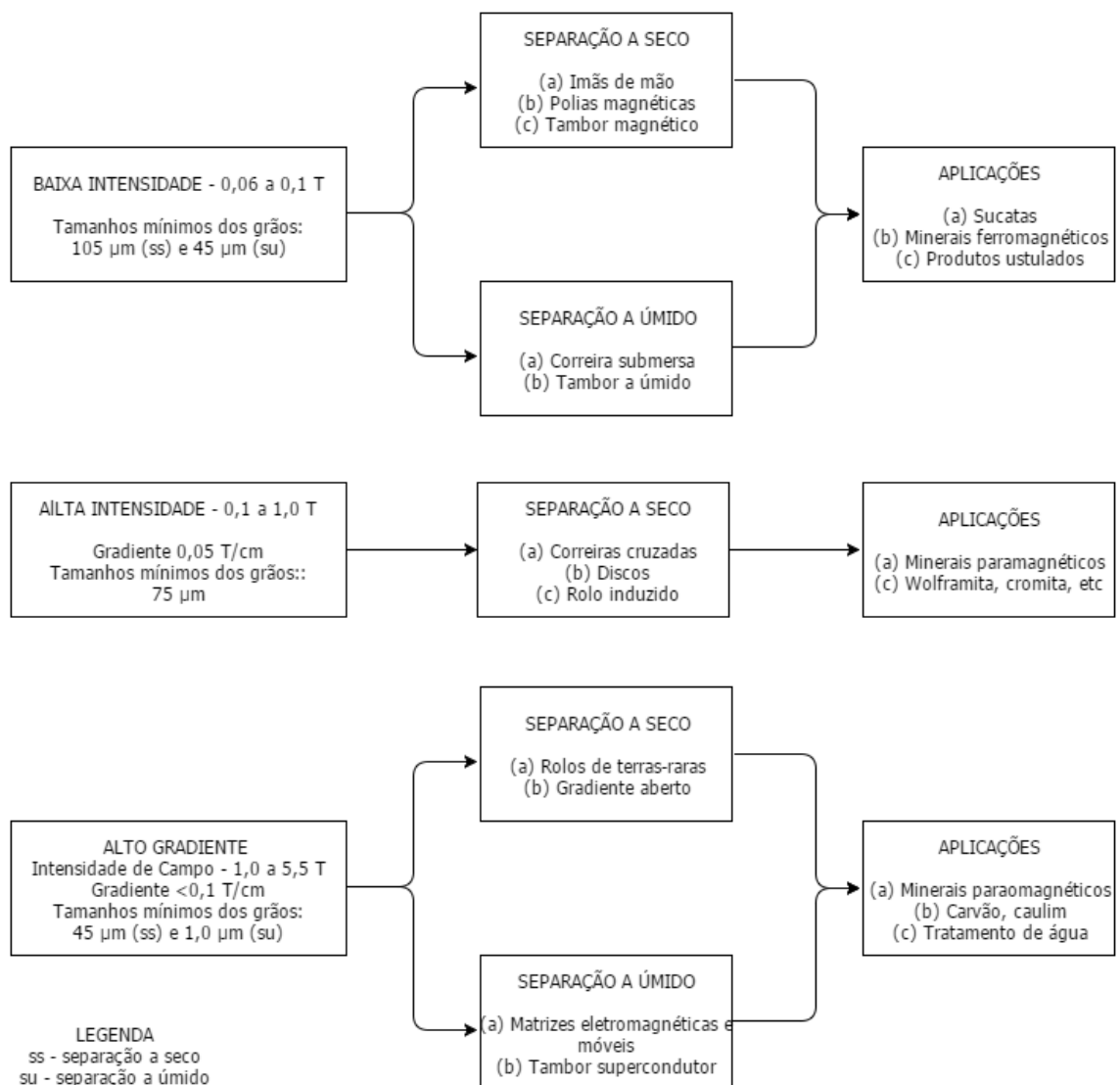


Figura 8 - Características, classificações e aplicações dos diferentes separadores magnéticos (Da Luz *et al.*, 2010)

A principal diferença entre um equipamento que realize a separação magnética por via seca e outro que a faça por via úmida é a granulometria utilizada. Enquanto a via seca utiliza granulometria média a grossa, a via úmida pode ser aplicada a partículas com granulometria fina. Outro fator que determina por qual via a separação magnética será realizada é a disponibilidade de água e, por conseguinte, o local apropriado para armazenamento do rejeito produzido, como barragens e bacias de sedimentação. A água, apesar de ser um recurso abundante não é facilmente acessível nas usinas de beneficiamento e tem se tornado cada vez um recurso mais escasso.

A separação magnética de baixa intensidade opera com ímãs permanentes de intensidades entre 0,06 T e 0,1 T. É muito utilizada para promover a separação de minerais que possuem alta susceptibilidade magnética, também chamados de ferromagnéticos, e para o processamento secundário de metais. Já a separação magnética de alta intensidade (0,1 T a 1,0 T), utiliza eletroímãs e viabiliza a separação de minerais com baixa susceptibilidade magnética, conhecidos como minerais paramagnéticos, sendo também aplicado na remoção de impurezas em minerais industriais como quartzos, feldspatos e baritas. Ademais, os processos classificados como de alto gradiente também são tecnologias de alta intensidade, apresentando intensidades de campo entre 1,0 T e 5,5 T e além do uso na concentração de minerais paramagnéticos, também podem ser aplicados na concentração de carvão e no tratamento de água.

Os campos magnéticos influenciam as partículas em diferentes níveis, pois elétrons desemparelhados presentes em alguns átomos causam dipolos magnéticos que levam a criação de momentos magnéticos em um material quando esses momentos estão alinhados pela devido à aplicação de um campo magnético externo e, assim, os minerais podem ser classificados como: (i) ferromagnéticos; (ii) paramagnéticos e (iii) diamagnéticos. Segundo Wills (2006), os minerais ferromagnéticos como a magnetita, por exemplo, são fortemente atraídos pelos campos magnéticos, ou seja, têm uma altíssima suscetibilidade magnética que varia com a intensidade de magnetização (Figura 9), podendo assim ser concentrados em separadores de baixa intensidade; os minerais paramagnéticos, como a hematita, biotita e hornblenda, são fracamente atraídos pelos campos magnéticos e sua suscetibilidade magnética é constante. Este tipo de material só consegue ser concentrado em separadores de alta intensidade. Já os minerais diamagnéticos são repelidos pelo campo magnético, pois têm suscetibilidade magnética negativa, como o

quartzo, sendo assim, estes não podem ser concentrados em separadores magnéticos.

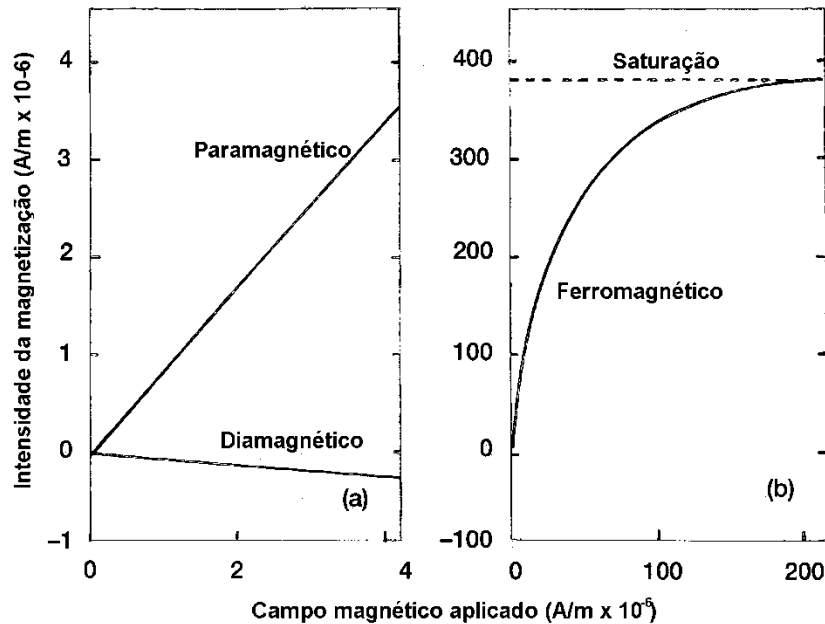


Figura 9 - Curvas magnéticas para materiais paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos (Wills, 2006)

O campo magnético é descrito pela densidade de fluxo magnético (B), que diz respeito à quantidade de linhas de indução que atravessam a partícula do mineral, e pela intensidade de campo magnético (H), que é a força de magnetização que possibilita a passagem destas linhas pela partícula. Estas grandezas se relacionam através da permeabilidade magnética do meio ( $\mu$ ), conforme a equação 6.

$$B = \mu H \quad (6)$$

O fluxo magnético (B) de uma partícula fracamente magnética é alterado quando esta é colocada em um determinado campo de uma região magnética. O valor do fluxo aumenta de um valor conhecido como indução magnética do material ( $\psi$ ), conforme equação 7. Porém, no ar, o valor da indução magnética pode ser desconsiderado por ser muito pequeno.

$$B = H + \psi \quad (7)$$

A intensidade de magnetização (J) é mais comumente utilizada, sendo descrita como o ato de se criar linhas de campo magnético ou o próprio campo magnético em uma partícula ou região do espaço. É definida pela equação 8:

$$\Psi = 4\pi J \quad (8)$$

Sendo assim, é possível definir a susceptibilidade magnética (k) como a razão entre a intensidade de magnetização e a intensidade de campo magnético, conforme equação 9:

$$k = J/H \quad (9)$$

Na Tabela 3 é apresentada a susceptibilidade magnética para os principais minerais e sua respectiva classificação. Rochas como os gnaisses são compostas por minerais diamagnéticos (quartzo e feldspato potássico) e paramagnéticos (biotita e hornblenda).

Tabela 3 - Susceptibilidade magnética de minerais selecionados e sua classificação (modificado de HUNT *et al.*, 1995)

<b>Classificação</b>	<b>Rocha/Mineral</b>	<b>Susceptibilidade Magnética (<math>10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}</math>)</b>
Diamagnético	Feldspato potássico	-0,49 – 0,67
	Galena	-0,44
	Quartzo	-0,5 – 0,6
Paramagnético	Biotita	52 - 98
	Hornblenda	25
	Hematita	10 - 760
	Goetita	40 - 70

	Ilmenita	46 – 80.000
Ferromagnético	Magnetita	20.000 – 110.000
	Pirrotita	69.000

### 3.4.2 Separador magnético de terras-raras

Os elementos considerados como de terras-raras são os 15 elementos da série dos lantanídeos (lantânio – La, cério – Ce, praseodímio – Pr, neodímio – Nd, promécio – Pm, samário – Sm, európio – Eu, gadolínio – Gd, térbio – Tb, disprósio – Dy, hólmio – Ho, érbio – Er, túlio – Tm, itérbio – Yb e lutécio – Lu), mais o ítrio (Y) e, em alguns casos, o escândio (Sc). Os elementos de terras-raras mais valiosos são o Nd, Eu, Tb, Dy, Y e Er, devido às suas propriedades únicas (Jordens, 2016). Os elementos de terras-raras têm diversas aplicações, como o uso em ímãs de alta intensidade, elementos de liga, catalisadores e compostos para polimento (Jordens, 2014).

Os separadores magnéticos de terras-raras são comumente utilizados após a remoção dos materiais ferromagnéticos, funcionando como os estágios cleaner, aumentando o teor ou a recuperação do mineral de interesse, o que não impede o seu uso em outras aplicações (Dobbins, 2010).

Este separador (Figura 10) opera a seco, consistindo basicamente de um silo de alimentação, uma correia transportadora e um rolo com um imã permanente de terras-raras, que produz um campo com intensidade superior a 1 T (Da Luz *et al.*, 2010). Os parâmetros que podem ser alterados são a espessura da correia, a velocidade de rotação dos rolos, o número de estágios utilizados e a faixa granulométrica da alimentação.

Durante a operação, o material alimentado é distribuído igualmente na correia de forma que todas as partículas sofram a ação do campo magnético e, de acordo com a susceptibilidade magnética da partícula, ela pode (i) permanecer aderida à superfície do rolo e ser depositada no campo de material magnético, (ii) ter seu caminho alterado por apresentar baixa susceptibilidade magnética ou seja, não permanecendo no rolo e sendo depositada no campo de material não magnético, ou (iii) ser depositada no campo de material misto, pois sua susceptibilidade não foi alta o suficiente para permanecer aderida na correia, como não foi baixa o suficiente para ir para o depósito de materiais não magnéticos.



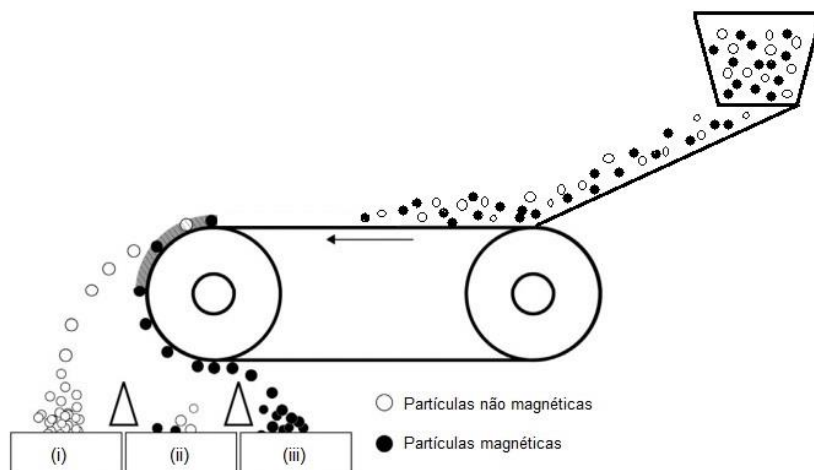


Figura 10 - Desenho esquemático do separador magnético de terras-raras

As vantagens do uso desse tipo de equipamento são a “(i) não necessidade de corrente elétrica e nem dos dispositivos para resfriamento de bobinas; (ii) os campos magnéticos obtidos por meio desses equipamentos são estáveis e situam-se na faixa acima de 1 T; (iii) os equipamentos são compactos e de fácil operação; (iv) o consumo de energia é muito baixo, comparado ao dos equipamentos com eletroímãs” (Da Luz *et al.*, 2010). Porém, pode-se citar como desvantagem a inflexibilidade para a variação da intensidade do campo magnético e o uso do equipamento em materiais com partículas muito finas, pois estas se aderem na superfície da correia, diminuindo a eficiência do processo e podendo levar a situações de desgaste, aumentando o custo da operação (Dobbins, 2010).

### 3.5 Composição Mineral

A caracterização mineralógica de uma amostra possibilita identificar e quantificar todos os minerais presentes, definindo quais são os minerais de interesse e de ganga. Uma técnica usual para esta caracterização é a difratometria de raios-X (DRX) que determina as fases cristalinas presentes, visto que nos sólidos os átomos se arranjam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X. É uma técnica simples, rápida, de alta confiabilidade de resultados, pois o perfil de difração obtido é característico para cada fase cristalina (Albers *et al.*, 2002).

Quando se incide um feixe de raios-X sobre um material cristalino, o mesmo interage com os átomos presentes, gerando raios difratados. A difração desses raios

ocorre segundo a Lei de Bragg (equação 10), que estabelece a relação entre o ângulo de difração ( $\theta$ ), a distância entre os planos que a originaram ( $d$ ) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) dos raios-X, onde  $n$  é um número inteiro.

$$n\lambda = 2d \text{ sen } \theta \quad (10)$$

### 3.6 Análise Química

A análise química diz respeito às técnicas laboratoriais que são utilizadas para identificar as diferentes espécies químicas presentes nas amostras e quantificar a sua presença, ou seja, é usada para caracterização da composição química da amostra estudada. Uma dessas técnicas é a espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX), a qual é um procedimento não destrutivo que possibilita a identificação dos elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa), assim como a sua proporção (análise quantitativa).

A fluorescência é um processo que se baseia no fato de que cada elemento químico emite radiações características quando são submetidos a uma excitação apropriada. Neste processo, uma fonte de radiação de alta energia, como a radiação X, excita os átomos que estão no estado fundamental da amostra analisada, fazendo com que eles absorvam energia e promovam seus elétrons a níveis mais elevados. Nesse momento, o átomo passa para uma situação instável conhecida como “Estado Excitado” e o átomo excitado segue a tendência de retorno ao estado fundamental, de baixa energia (Filho, 1999) (Figura 11). Quando o átomo volta para o estado fundamental, ocorre emissão de energia (fluorescência) na forma de um fóton de raios-X, que é particular de cada elemento químico. Esta emissão de energia característica permite a correta identificação e quantificação dos elementos químicos presentes, através do comprimento de onda dos elementos. De acordo com Da Luz et al. (2010), a energia da radiação e o comprimento de onda são os responsáveis pela identificação do elemento, ou seja, pela análise qualitativa. A intensidade, por sua vez, é função da concentração dos elementos, sendo responsável pela análise quantitativa.

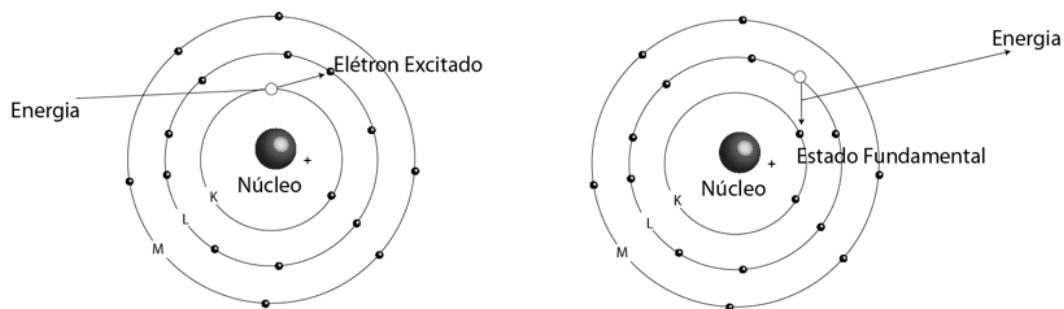


Figura 11 - Diagrama esquemático de um átomo saindo do estado excitado e indo para o estado fundamental

### 3.7 Índices de Forma de Partículas

A forma das partículas dos agregados exerce grande influência nas propriedades de concretos e argamassas, influenciando na sua trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Por exemplo, partículas lamelares têm a capacidade de acumular mais bolhas de ar e água, reduzindo a resistência mecânica do concreto.

As partículas de agregados têm dimensões de comprimento, largura e espessura (NBR 7225) e, segundo Weidmann (2008) podem ser classificados quanto à forma dos grãos em partículas alongadas, cúbicas, discóides, esféricas e lamelares (Tabela 4). De forma geral, para aplicações na construção civil, deseja-se que as partículas tenham formatos mais aproximados do formato esférico, evitando assim partículas lamelares.

Tabela 4 - Classificação dos agregados quanto à forma dos grãos (Weidmann, 2008)

Classificação	Descrição
Alongado	Comprimento muito maior que a largura e espessura que normalmente são da mesma ordem de grandeza
Cúbico	Comprimento, largura e espessura da mesma ordem de grandeza
Discóide	Espessura pequena em relação ao comprimento e largura que normalmente são da mesma ordem de grandeza
Esférico	Grão arredondado semelhante a uma esfera
Lamelar	Comprimento muito maior que a largura e largura muito maior que a espessura

Existem dois parâmetros muito utilizados (Weidmann, 2008) que auxiliam na classificação das partículas. São eles a esfericidade (equação 11) e a razão de aspecto (equação 12):

$$\text{Esfericidade} = 4\pi \cdot \text{Área} / \text{Perímetro}^2 \quad (11)$$

$$\text{Razão de aspecto} = \text{largura (b)} / \text{comprimento (l)} \quad (12)$$

Nas Figura 12 e Figura 13, são ilustrados esses fatores de forma. Pela razão de aspecto (b/l) observa-se que quanto menor forem os valores de b/l, mais alongadas são as partículas. A esfericidade representa a angulosidade da partícula e é medida entre valores de 0 a 1. Valores de esfericidade próximos ao limite superior sugerem uma superfície de partícula mais uniforme. Por outro lado, valores mais baixos indicam superfícies mais irregulares e angulares.

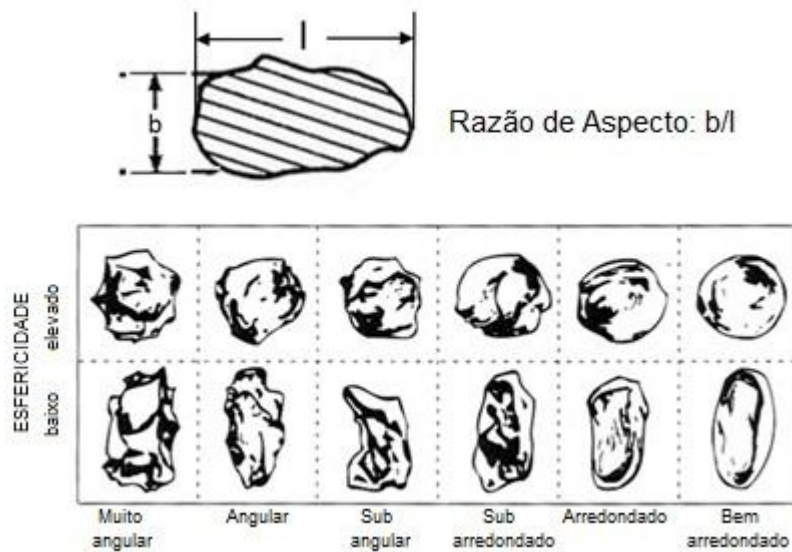


Figura 12 - Forma das partículas (Sordi, 2014)

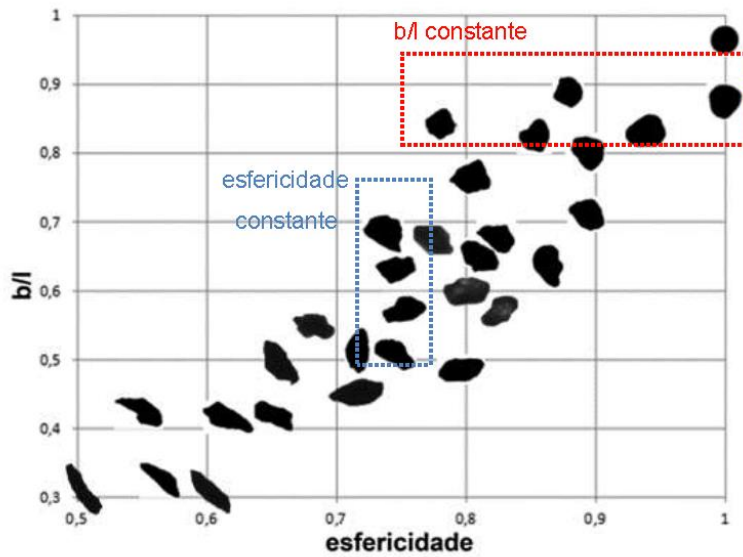


Figura 13 - Relação entre a razão de aspecto e a esfericidade das partículas (modificado de Hawlitschek, 2014)

Existem diferentes métodos para medir a forma das partículas. Para partículas maiores que 4,8 mm a medição é normalmente feita de forma manual, utilizando-se um paquímetro, que permite encontrar diretamente as dimensões das partículas e, conseqüentemente, classificá-las quanto à sua forma. Para partículas menores que 4,8 mm, o uso do paquímetro se torna árduo, tedioso, resultando em valores até incorretos, tendo em vista as reduzidas dimensões das partículas. Assim, para se medir essas dimensões das partículas, utiliza-se comumente a microscopia ótica ou a eletrônica de varredura para a obtenção das imagens e, portanto das dimensões. Porém, ambos os métodos são inconsistentes e de baixa reprodutibilidade e representatividade estatística (Hawlitschek, 2015). Uma forma de solucionar estes problemas é por meio do uso de análises dinâmicas de imagens. Esta utiliza métodos óticos-eletrônicos para medir tanto a forma das partículas como a distribuição granulométrica. As dimensões são obtidas por fluxo de partículas, caracterizando-se uma enorme quantidade de partículas em baixíssimo tempo, apresentando assim alta representatividade.

De acordo com Hawlitschek (2015), a análise dinâmica de imagens faz com que a distribuição de tamanhos de partículas possa ser expressa tanto segundo equivalentes das séries de peneiras Tyler ou ASTM, como em quaisquer outras faixas definidas pelo usuário (até 50 classes) e seus resultados podem ser expressos em termos de diferentes parâmetros de tamanho, tais como: diâmetro mínimo, área equivalente e

diâmetro de Ferret máximo (distância média entre pares de retas paralelas tangentes ao contorno projetado da partícula), entre outros; sendo o diâmetro mínimo o que mais se aproxima do peneiramento. Além disso, essa técnica possibilita a determinação direta dos parâmetros de esfericidade e razão de aspecto.

A análise dinâmica de imagens é realizada em equipamentos que consistem de um microscópio ótico em uma câmara a vácuo, junto com uma câmera que irá capturar a imagem da partícula, com um flash e um obturador de alta velocidade para conseguir efetivamente a imagem das partículas com boa qualidade. Um desenho esquemático dos equipamentos é apresentado na Figura 14.

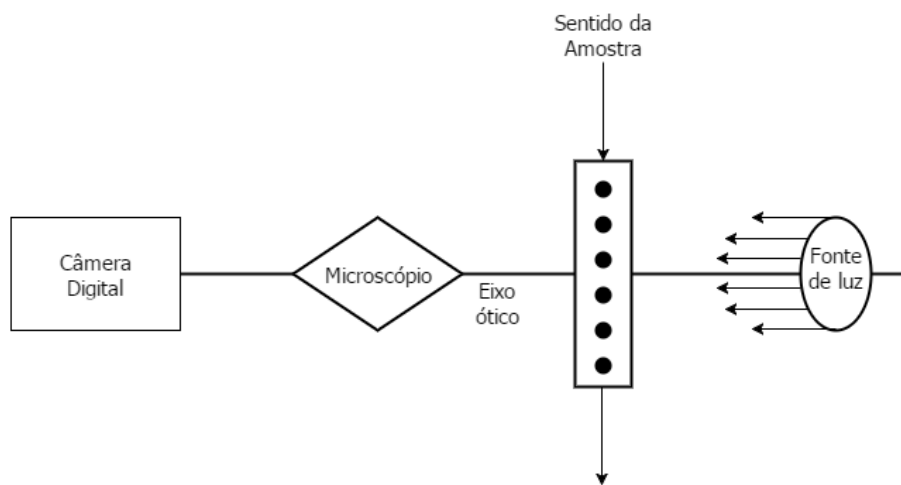


Figura 14 - Desenho esquemático do equipamento para análise dinâmica de imagens

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Materiais

Para a realização deste trabalho utilizou-se três tipos de pó de pedra (areias de brita) de rochas gnáissicas identificadas como PP – 02, PP – 05 e PP – 06. A amostra PP – 02 pertence ao grupo litológico Complexo Rio Negro enquanto as amostras PP – 05 e PP – 06 pertencem ao grupo litológico Gnaisse Facoidal. As amostras pertencentes a estes grupos foram escolhidas, pois estes litótipos são bastante representativos na região metropolitana do estado do Rio de Janeiro, e também porque apresentam composição química variada.

### 4.2 Preparação das Amostras para os Ensaios

Cada pó de pedra foi inicialmente classificado por peneiramento a seco utilizando-se o RO-TAP<sup>®</sup> (Figura 15), no qual as amostras foram agitadas por 15 minutos. As faixas de tamanho usadas na classificação do material foram definidas de acordo com o grau de liberação aparente das partículas. Separou-se o material em cinco faixas (Tabela 5). A faixa de material menor que 0,053 mm, denominada de pulverulento, não foi utilizada por se tratar de um material excessivamente fino para separação eficiente a seco. Após a classificação, as amostras foram cuidadosamente lavadas, a fim de remover qualquer material que estivesse aderido, sendo, em seguida secas em estufa por 24 h a 100 °C.

Tabela 5 - Classificação utilizada nas amostras

<b>Grosso</b>	<b>Médio</b>	<b>Fino</b>	<b>Muito Fino</b>	<b>Pulverulento</b>
6,30 x 1,18 mm	1,18 x 0,425 mm	0,425 x 0,212 mm	0,212 x 0,053 mm	<0,053 mm



Figura 15 - Aparelho RO-TAP® utilizado para classificar as amostras por peneiramento

### 4.3 Ensaios de Separação Magnética

Os ensaios de separação magnética foram realizados nas instalações do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), utilizando-se o Separador Magnético de Terras-raras (Figura 16), fabricado pela INBRAS-ERIEZ, modelo RE-ROLL, cujos rolos consistem de anéis de ímãs de terras-raras Erium-3000®, capazes de criar campos magnéticos com intensidade de até 1,2 T. Sua correia tem 0,7 mm de espessura, 16 cm de largura, 30 cm de comprimento e o diâmetro do rolo é igual a 8 cm.

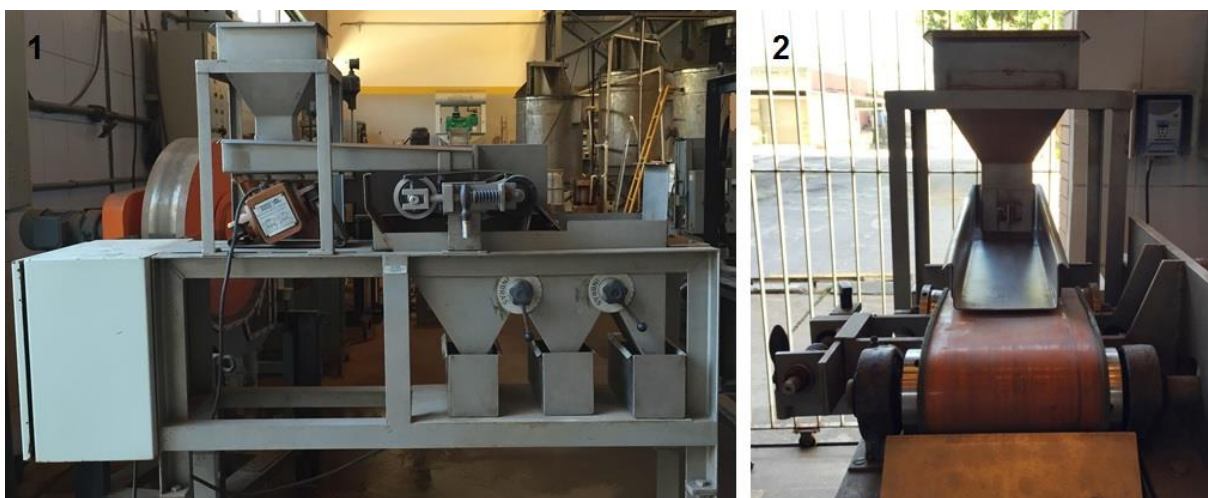


Figura 16 - Separador Magnético de Terras Raras: 1 – Perfil; 2 – Detalhe



Os ensaios foram realizados em dois estágios, conforme mostra a Figura 17. O primeiro estágio, chamado de etapa *rougher* para o produto não-magnético, foi alimentado pela amostra original (amostra de cabeça), na faixa de tamanho específico, e o ensaio foi realizado com a velocidade de rotação do rotor de 100 RPM a fim de garantir um bom volume de produto não magnético com baixo teor de biotita. Já o segundo estágio, que é alimentado com o produto magnético e o produto misto da etapa anterior, utilizou velocidade de rotação de 130 RPM para aumentar ainda mais o teor de biotita no produto magnético e misto, funcionando como uma etapa *cleaner* para o produto magnético, ou *scavenger* para o não magnético. A frequência de vibração usada no alimentador vibratório do separador magnético foi baixa o suficiente de forma a se ter, aproximadamente, apenas uma monocamada de material na correia, garantindo que todas as partículas estejam sob influência do campo magnético. Este separador, além de gerar os produtos magnéticos e não magnéticos, gerou também um produto denominado misto. O produto misto foi depositado no compartimento central do separador magnético e ele é gerado por uma susceptibilidade magnética insuficiente para ser dirigido ao concentrado ou ao rejeito. Este fato pode ser atribuído a uma aglomeração de partículas ou pelas partículas estarem pouco liberadas.

As amostras (i) amostra de cabeça; (ii) produto não magnético estágio *rougher*; (iii) produto magnético + misto estágio *rougher*; (iv) produto não magnético estágio *scavenger*; e (v) produto magnético estágio *scavenger* foram quarteadas com o objetivo de se obter uma pequena quantidade de material, entre 10 gramas e 20 gramas, para a realização das análises químicas. Não se realizou análise química no produto misto estágio *scavenger*, pois a quantidade de material obtido foi muito pequena.

Resumidamente, foram realizados 12 ensaios (três pós de pedra em quatro faixas granulométricas), gerando um total de 72 produtos, dentre os quais 60 foram analisados quanto à composição química. O produto não magnético final, que será chamado de areia de brita, é composto pela soma do produto não magnético do estágio *rougher* e do estágio *scavenger*, enquanto o produto magnético final, que será chamado de rejeito magnético, é composto pela soma do produto magnético e misto estágio *scavenger*.

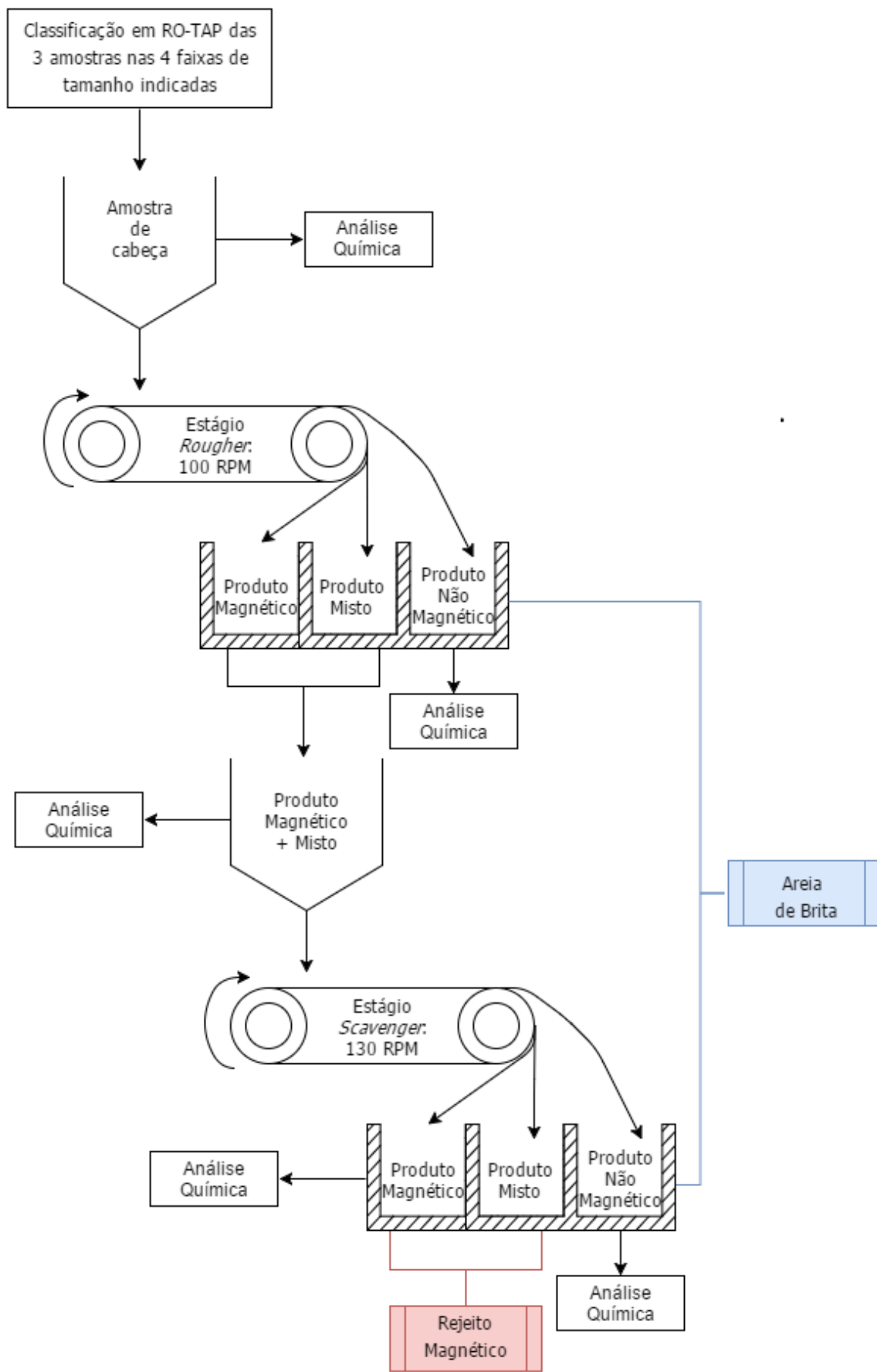


Figura 17 - Esquema para os ensaios utilizando o Separador Magnético de Terras-Raras

#### 4.4 Composição Mineral

A composição mineralógica foi medida por difratometria de raios-X (DRX), no difratômetro Bruker-AXS D4 Endeavour (Figura 18), com tubo de cobalto, operado a 40 kV e 35 mA, com  $2\theta$  variando de  $25^\circ$  a  $75^\circ$  e passo de  $0,02^\circ$ , localizado no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). A quantificação de fases foi realizada pelo método de Rietveld.



Figura 18 - Difratômetro de raios-X utilizado para a análise de composição mineralógica das amostras de pó de pedra

#### 4.5 Análise Química

O método empregado para a determinação da composição química das amostras foi a espectroscopia de fluorescência de raios-X em vácuo, utilizando-se o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva SHIMADZU Ray ny EDX-7001 (Figura 19) com tubo de 3 kW, alvo de ródio e detector de estado-sólido de Silício ativado com Lítio – Si(Li), resfriado por nitrogênio líquido. Este equipamento se localiza no Laboratório de Estruturas e Materiais Prof. Lobo Carneiro (COPPE/UFRJ) e detecta elementos em baixas concentrações e possibilita a qualiquantificação de elementos químicos com números atômicos situados entre as faixas do Sódio ao Escândio (Na-Sc) e do Titânio ao Urânio (Ti-U).



Figura 19 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva utilizado nas análises químicas das amostras

#### 4.5.1 Preparação das Amostras para Análise Química

Para a realização da fluorescência de raios-X, as amostras precisam apresentar tamanhos abaixo de 0,075 mm e compactadas em pastilhas de pó prensado. Sendo assim, as amostras foram moídas no moinho planetário modelo Pulverisette 6 fabricado pela FRITSCH (Figura 20) localizado no Laboratório de Degradação de Materiais (COPPE/UFRJ). As amostras não magnéticas e originais foram moídas por 6 minutos a 450 RPM e as amostras magnéticas e mistas foram moídas por 8 minutos a 470 RPM.



Figura 20 - Moinho planetário Pulverisette 6 utilizado na moagem das amostras

Para a confecção das pastilhas de pó prensado (Figura 21), o material moído foi compactado em uma prensa semiautomática hidráulica da H.G HERZOG (Figura 22), localizada no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), juntamente com uma matriz de ácido bórico, utilizando 8 toneladas de carga por 4 segundos.

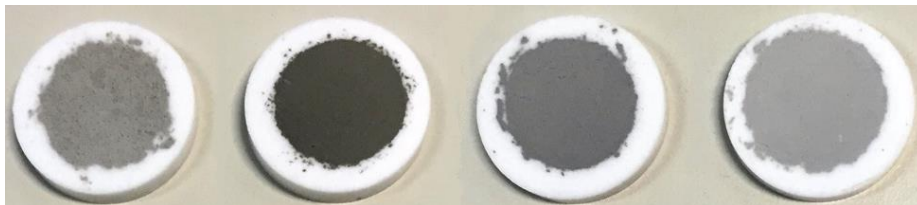


Figura 21 - Pastilhas de pó prensado utilizadas na fluorescência de raios-X em vácuo



Figura 22 - Prensa semiautomática utilizada para a confecção das pastilhas

#### 4.6 Índice de Forma das Partículas

A análise do índice de forma das partículas foi realizada por análise de imagens dinâmica em equipamento da marca Retsch, modelo Camsizer XT (Figura 23) localizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (USP). O Camsizer XT opera com material seco e também em meio líquido ( $<0,6$  mm) e tem alcance de 1  $\mu\text{m}$  a 3 mm. Nele, as partículas passam por uma área onde existe uma fonte de luz LED e as sombras geradas por essas partículas são captadas por duas câmeras digitais (*basic-camera* e *zoom-camera*) simultaneamente, fazendo a diferenciação

entre partículas grossas e finas. As imagens são, então, processadas por um software de análise de imagens.

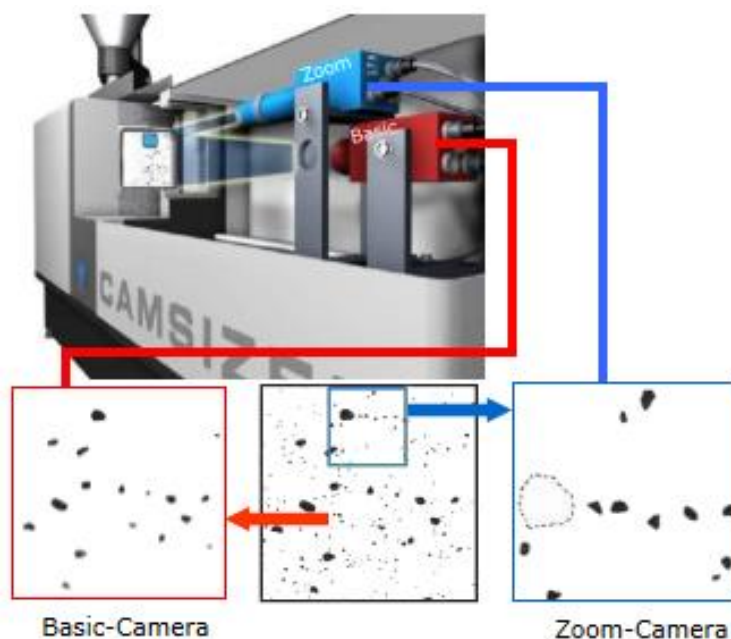


Figura 23 - Diagrama esquemático do modo de análises de imagens, para avaliação dos índices de forma, no Camsizer XT (Manual de Análises LCT-USP)

## 5 Resultados e Discussões

### 5.1 Caracterização dos Pós de Pedra

As amostras dos três pós de pedra tiveram sua distribuição granulométrica analisada utilizando o RO-TAP® e seguindo a série de peneiras de Tyler (razão igual a  $\sqrt{2}$ ). Os tamanhos de partícula foram comparados com os limites de tamanho para a areia de brita para utilização no concreto segundo a NBR 7211 (Figura 24), se mostrando dentro dos limites para a utilização.

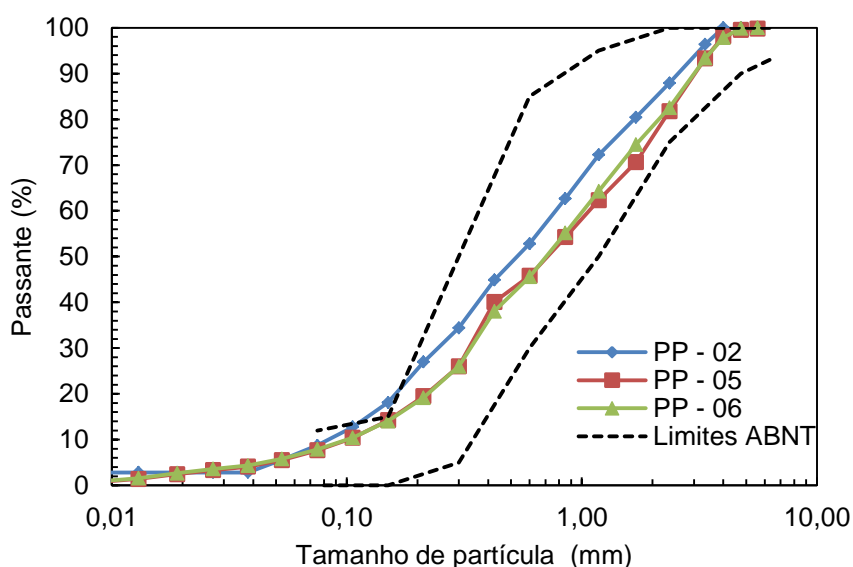


Figura 24 - Tamanho de partícula para os pós de pedra e limites de tamanho segundo ABNT

A distribuição do material nas faixas de tamanho utilizadas é representada na forma de um histograma na Figura 25. A faixa grossa apresentou maior massa de amostra retida, aproximadamente 33 %. Já as faixas média, fina e muito fina tiveram quantidades de material semelhantes. A primeira ficou com 25 % da totalidade da amostra, a segunda com 19 % e a terceira com 16 %. A faixa de pulverulentos representou apenas cerca de 5 % da amostra.

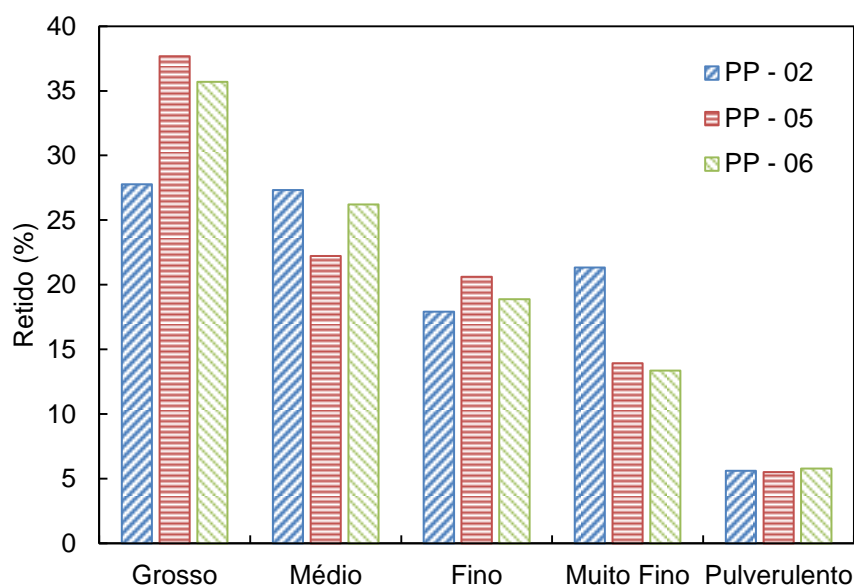


Figura 25 – Distribuição do material contido em cada faixa de tamanho para as amostras de pó de pedra

A difratometria de raios-X foi utilizada para analisar a composição mineralógica dos pós (Tabela 6). As amostras apresentam composição mineralógica predominante de quartzo (cerca de 30 %) e feldspato (entre 50 % e 60 %). Além destes, apresenta minerais como a biotita, presente nos três pós e com teores variando de 5,7 a 10,3 %. As amostras PP – 02 e PP – 06 ainda têm em sua composição o mineral hornblenda. A hornblenda, junto com a biotita, compõe as fases ricas em ferro, conferindo caráter paramagnético a estes gnaisses. Caulinita, zircão e granada estão presentes nas amostras PP – 05 e PP – 06 e a clorita também compõe as amostras PP – 02 e PP – 06.

Tabela 6 - Composição mineralógica (em peso) dos pós de pedra realizada por DRX

Mineral (%)	PP – 02	PP – 05	PP – 06
Quartzo	31,3	31,6	32,6
Feldspato	58,8	59,2	52,6
Biotita	5,7	6,2	10,3
Hornblenda	2,3	0,0	1,8
Caulinita	0,0	0,5	0,5
Zircão	0,0	0,6	0,8



Clorita	1,8	0,0	0,4
Granada	0,0	1,8	0,9
Calcita	0,0	0,0	0,2

A espectroscopia de fluorescência raios-X foi utilizada para analisar a composição química dos pós de pedra (Tabela 7). As amostras apresentam altos teores de  $\text{SiO}_2$  (entre 60 % e 65 %) e de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (cerca de 20 %) visto que os principais minerais constituintes destes gnaisses possuem sílica e óxido de alumínio em sua composição mineralógica, conforme Tabela 1. Observa-se também a presença de óxido de ferro, componente dos minerais como a biotita e a hornblenda, além da presença de óxido de magnésio, presente somente na biotita. De modo geral as três amostras apresentam composições químicas similares.

Tabela 7 - Composição química dos pós de pedra realizada por FRX

<b>Teor (%)</b>	<b>PP – 02</b>	<b>PP – 05</b>	<b>PP – 06</b>
$\text{SiO}_2$	64,30	64,56	61,40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	20,16	19,21	19,90
CaO	2,97	2,45	2,54
$\text{K}_2\text{O}$	4,76	5,34	5,01
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,13	4,64	6,14
$\text{TiO}_2$	0,58	0,59	0,82
MgO	1,23	0,79	1,52
Outros	1,88	2,41	2,68

Os pós de pedra passaram por uma análise de liberação aparente das partículas de biotita por meio de uma análise macroscópica. As amostras foram avaliadas no estereoscópio SMZ645 da NIKON localizado no Laboratório de Processamento Termomecânico – Bio Materiais (COPPE/UFRJ).

Na Figura 26 observam-se as imagens para a amostra PP – 02 e vê-se que as partículas ainda se encontram mistas na faixa de tamanhos de 0,425 mm a 0,212 mm e, na faixa de 0,212 mm a 0,053 mm a biotita já se encontra quase integralmente

liberada. Na Figura 27 têm-se as imagens para a amostra PP – 05 e, assim como na amostra anterior, na faixa de 0,425 mm a 0,212 mm as partículas são mistas e na faixa de 0,212 mm a 0,053 mm as partículas já se encontram liberadas. Porém, para a amostra PP – 06 (Figura 28) observa-se que tanto na faixa de tamanho de 0,425 mm a 0,212 mm como na faixa de 0,212 mm a 0,053 mm o mineral micáceo se encontra liberado e somente tem-se partículas mistas na faixa de tamanho de 0,600 mm a 0,425 mm.

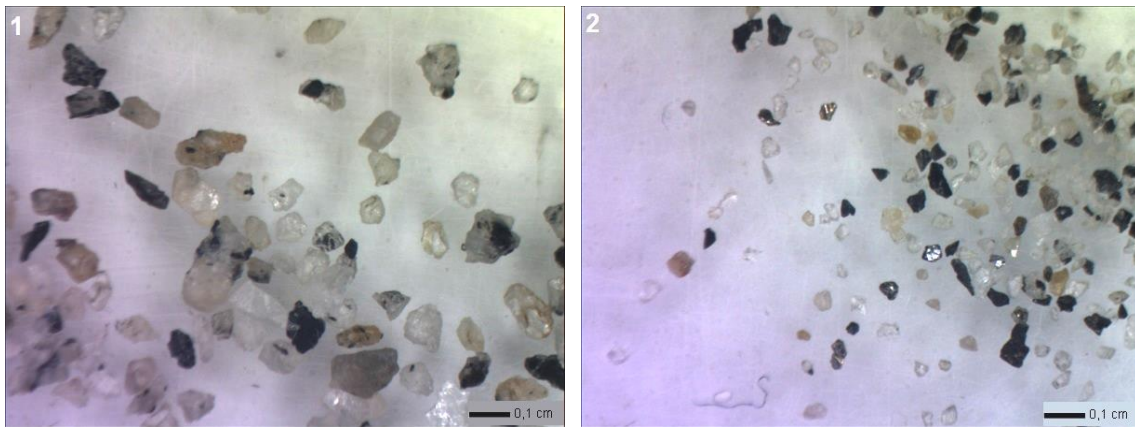


Figura 26 - Imagem do microscópio estereoscópio da amostra PP - 02. 1: Tamanho de 0,425 mm X 0,212 mm (fino) e aumento de 0,8x; 2: Tamanho de 0,212 mm X 0,053 mm (muito fino) e aumento de 0,8x

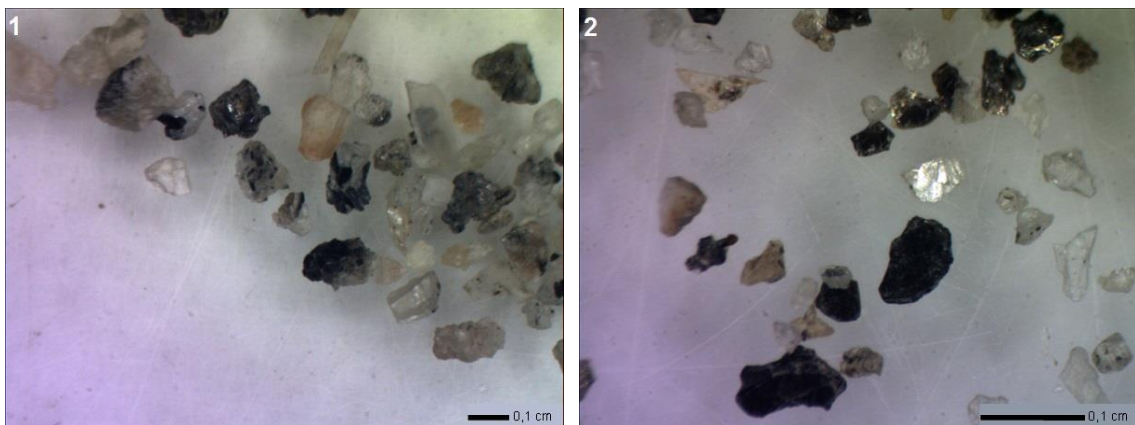


Figura 27 - Imagem do microscópio estereoscópio da amostra PP - 05. 1: Tamanho de 0,425 mm X 0,212 mm (fino) e aumento de 0,8x; 2: Tamanho de 0,212 mm X 0,053 mm (muito fino) e aumento de 2x

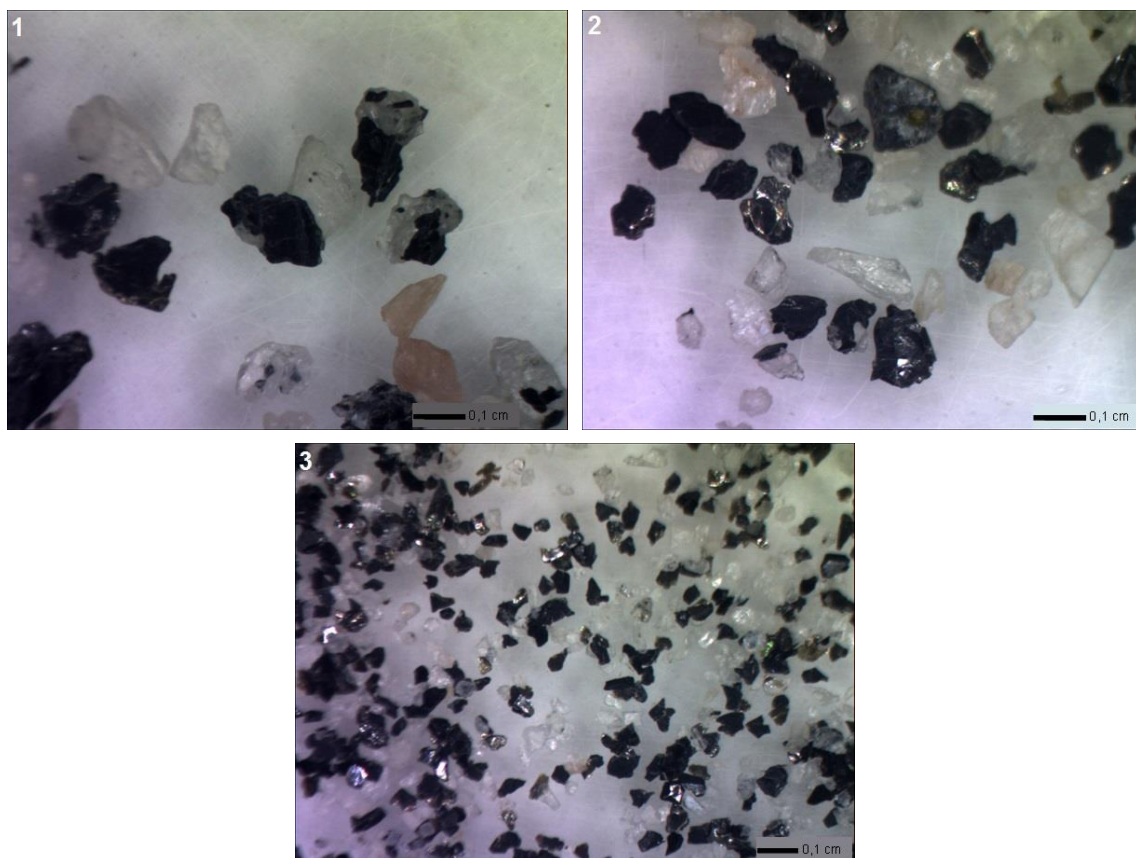


Figura 28 - Imagem do microscópio estereoscópio da amostra PP - 06. 1: Tamanho de 0,600 mm X 0,425 mm (médio) e aumento de 1x; 2: Tamanho de 0,425 mm X 0,212 mm (fino) e aumento de 1x; 3: Tamanho de 0,212 mm X 0,053 mm (muito fino) e aumento de 0,8x

A fim de corroborar com os resultados de liberação aparente, as amostras foram analisadas nas faixas de tamanho trabalhadas por fluorescência de raios-X. A partir dos dados de teor de hematita presente é possível observar que o ferro, expresso em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , se concentra nas faixas mais finas (Figura 29). Isto se deve à maior friabilidade dos grãos de biotita. Assim, espera-se uma melhor separação nestas faixas. Verifica-se também um valor mais alto para o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na amostra PP – 06. Este resultado é condizente com a análise mineralógica que mostrou teor igual a 10,3 % de biotita nesta amostra.

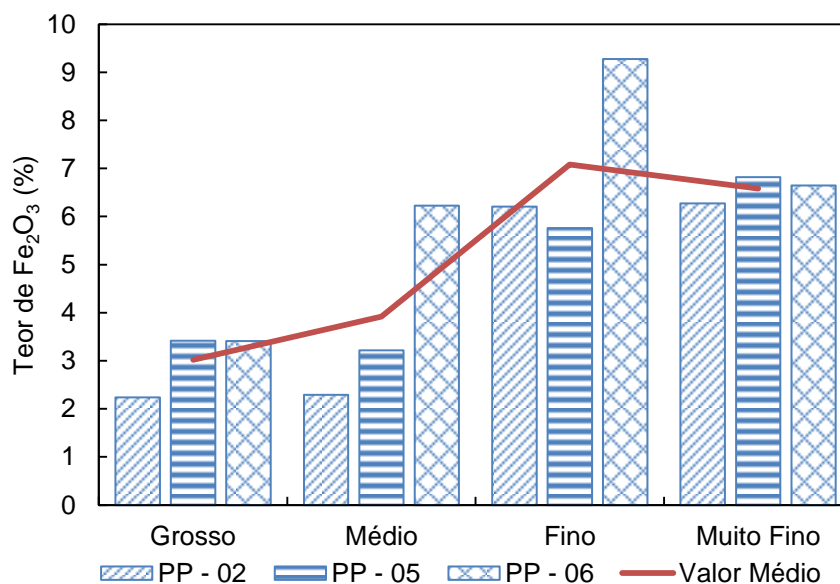


Figura 29 - Teor de  $Fe_2O_3$  por faixa de tamanho para as amostras de pó de pedra

Os índices de forma dados pela razão de aspecto e pela esfericidade foram medidos para as três amostras e estão apresentados na Figura 30 e na Figura 31, respectivamente.

É possível observar que quanto menor é o tamanho da partícula, geralmente menor é a sua razão de aspecto ( $b/l$ ), o que significa que partículas menores têm a forma mais alongada e, por sua vez, são essas as partículas que apresentam a biotita liberada. As partículas maiores já apresentam razão de aspecto mais elevadas, conferindo uma forma mais arredondada, porém o mineral micáceo não se encontra completamente liberado nestes tamanhos.

Os valores de esfericidade próximos a um representam partículas com superfícies uniformes, ou seja, com poucos ângulos ou cantos vivos, se aproximando assim de partículas esféricas. Para valores mais baixos, a superfície da partícula passa a ser não uniforme e com maiores ângulos, sendo classificada como uma partícula alongada/lamelar. Ao observar a Figura 31, constata-se que nas frações mais grossas as partículas têm valores de esfericidade em torno de 0,77, tendo assim forma mais favorável para aplicação em concreto. As partículas menores têm o valor da esfericidade inferior àquele das partículas mais grossas, chegando a 0,5. Essas partículas apresentam superfície mais irregular, não uniforme e com a presença de ângulos. A relação direta entre a presença de biotita liberada e o formato irregular de partículas nessas classes será objeto de um trabalho futuro.

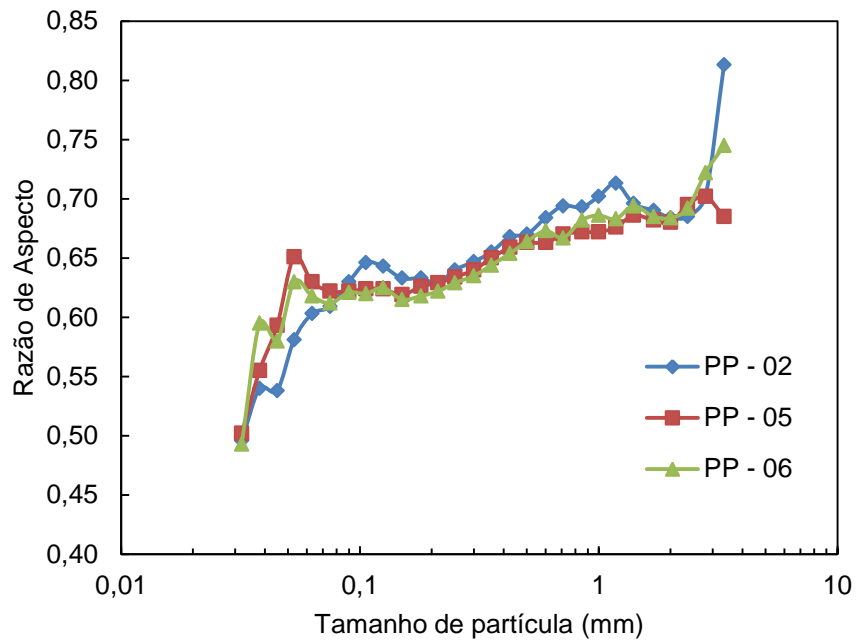


Figura 30 - Relação entre tamanho de partícula e razão de aspecto para as três amostras de pó de pedra

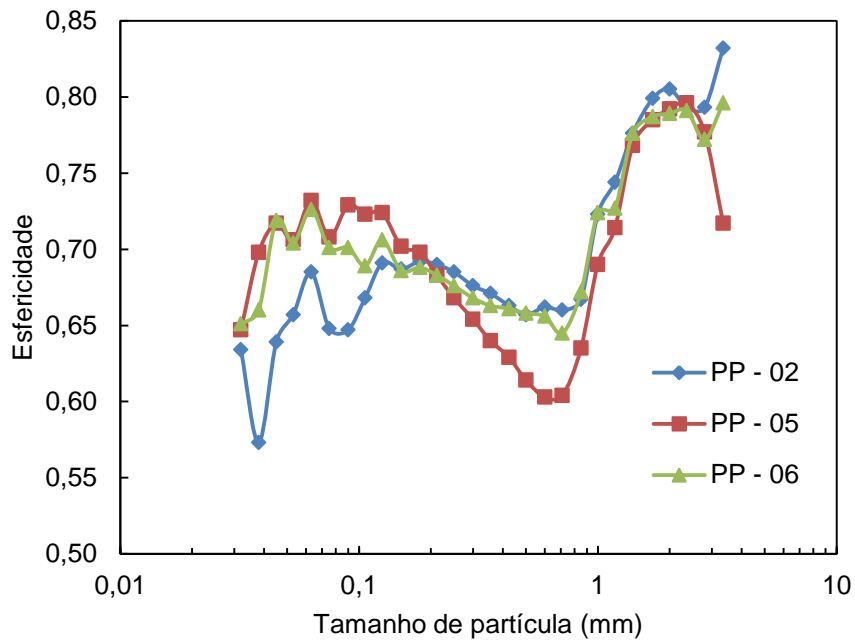


Figura 31 - Relação entre tamanho de partícula e esfericidade para as amostras dos três pós de pedra

## 5.2 Balanço de Massa e Balanço Metalúrgico

As 12 amostras foram ensaiadas individualmente, porém os balanços de massa e metalúrgicos apresentados a seguir são das amostras recompostas, a fim de avaliar qual material apresentou melhor remoção de biotita.

A amostra PP – 02 produziu uma areia de brita mantendo 77 % de sua massa e teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  igual a 1,5 %, correspondendo a 40 % do total de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  da amostra (Figura 32). O rejeito magnético, por sua vez, teve teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  igual a 12,8 %. Pode-se observar na análise química da areia de brita e do rejeito magnético (Tabela 8) há clara diferença entre os dois produtos. Analisando os teores de óxido de magnésio, que é um óxido presente somente na biotita, vê-se que a areia de brita apresenta somente 0,3 % enquanto o rejeito magnético possui 4,2 %. A areia de brita produzida não mostrou diferenças significativas de tamanho de partícula quando comparada com o pó de pedra original (Figura 33), ficando dentro dos limites estipulados pela ABNT para uso em concretos.

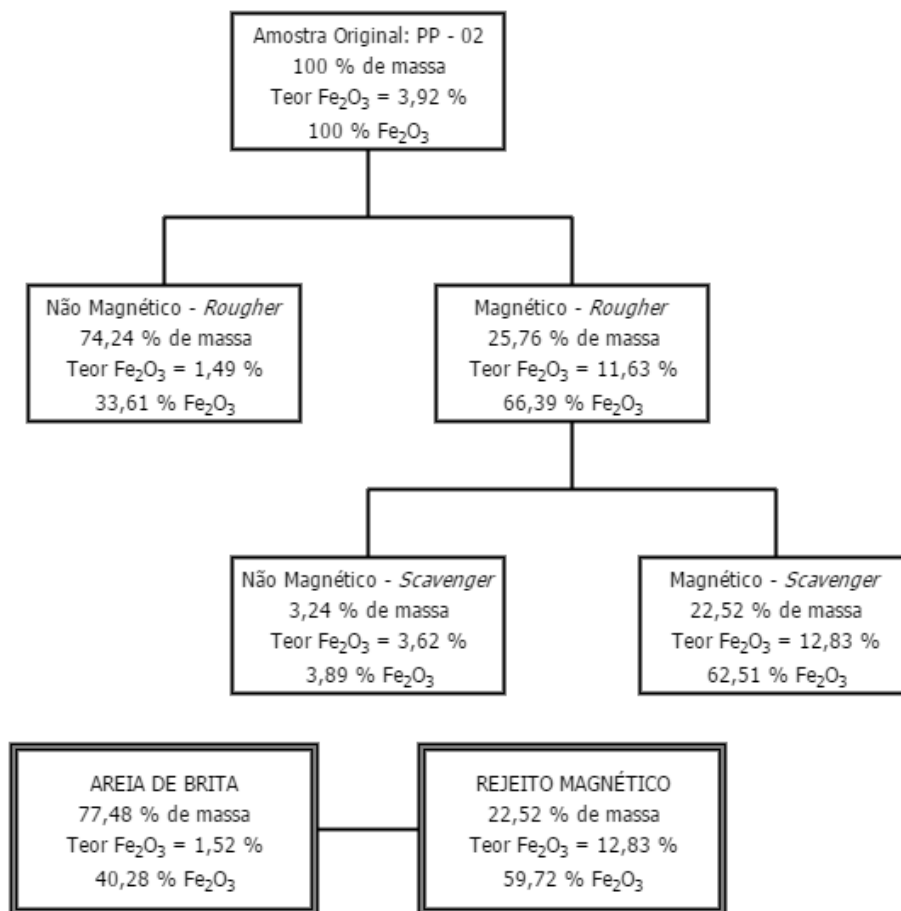


Figura 32 - Balanço de massa e metalúrgico da amostra PP – 02

Tabela 8 - Composição química para os produtos finais da amostra PP - 02

	Areia de Brita	Rejeito Magnético
<b>SiO<sub>2</sub></b>	68,16	51,32
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20,35	19,57
<b>CaO</b>	3,04	2,78
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,53	5,50
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,52	12,83
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,28	1,62
<b>MgO</b>	0,30	4,24
<b>Outros</b>	1,83	2,14

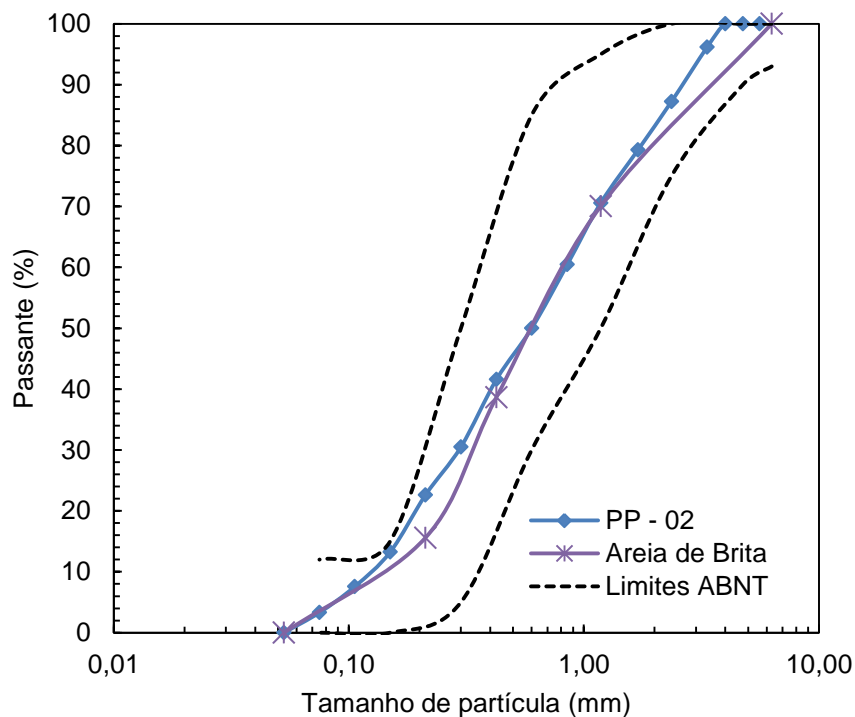


Figura 33 – Distribuição de tamanhos de partículas para a amostra PP - 02 e para a sua respectiva areia de brita

Comparativamente, a amostra PP – 05 gerou a areia de brita com pior qualidade. Apesar de ter mantido 83 % da massa original, ela conservou 52 % do total de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente inicialmente (Figura 34). Isso pode ser explicado pelo fato de que essa amostra é a única que não apresenta hornblenda em sua composição mineralógica, o

que sugere uma menor capacidade de magnetização das partículas de biotita. A análise química da areia de brita e do rejeito magnético está apresentada na Tabela 9 e pode-se observar o mesmo comportamento de diminuição do teor de MgO na areia de brita quando comparado com o mesmo teor no rejeito magnético. A areia produzida é levemente mais grossa que o seu pó de pedra, porém ainda se mantém dentro dos limites praticados pela ABNT (Figura 35).

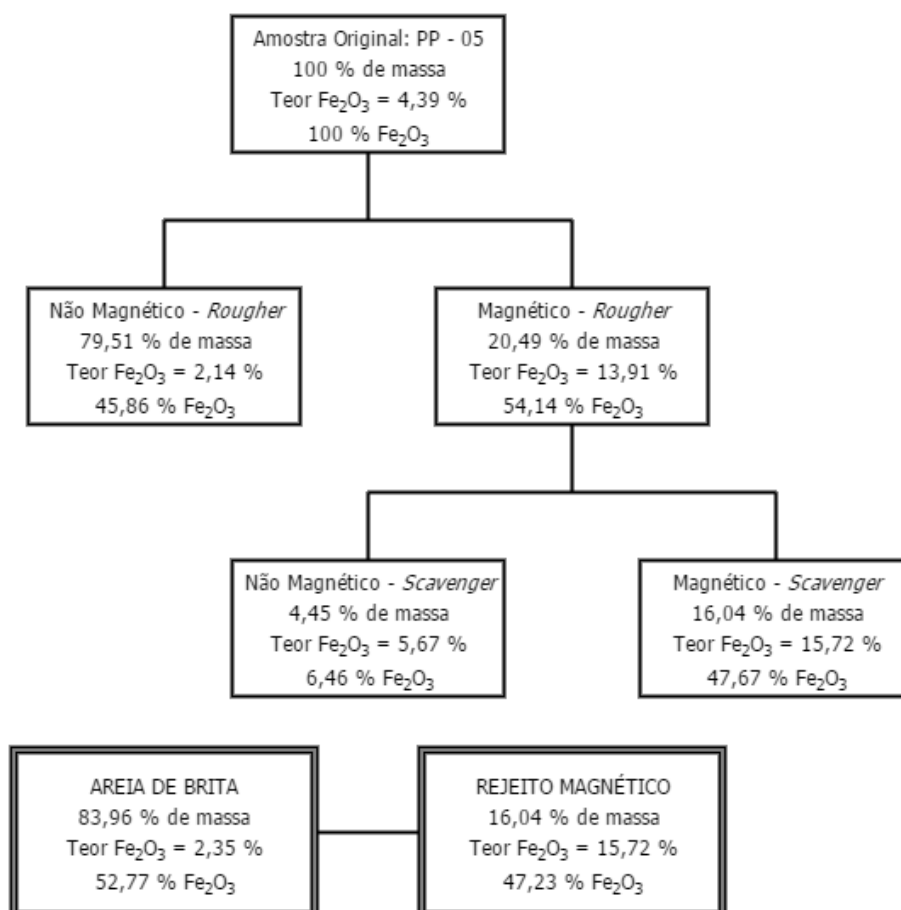


Figura 34 - Balanço de massa e metalúrgico da amostra PP – 05

Tabela 9 - Composição química para os produtos finais da amostra PP - 05

	Areia de Brita	Rejeito Magnético
SiO <sub>2</sub>	67,27	53,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,40	17,37
CaO	2,63	2,25
K <sub>2</sub> O	5,13	4,90



<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,35	15,72
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,26	1,97
<b>MgO</b>	0,33	2,72
<b>Outros</b>	2,62	1,87

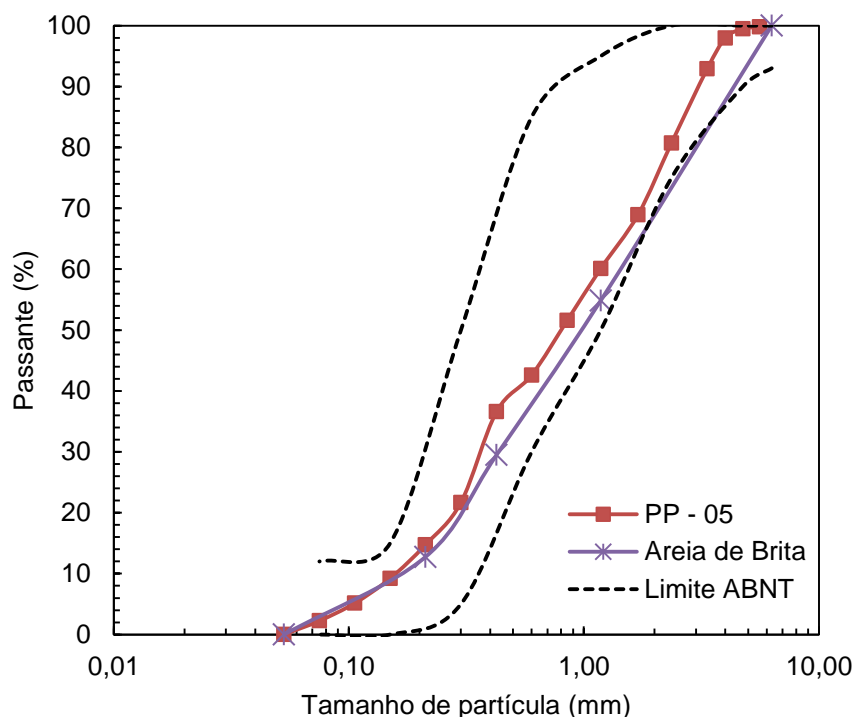


Figura 35 – Distribuição de tamanhos de partículas para a amostra PP - 05 e para a sua respectiva areia de brita

A amostra PP – 06 forneceu a melhor areia de brita, mantendo apenas 38 % do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e preservando 80 % de sua massa (Figura 36). Essa foi a amostra que apresentou liberação mais grossa entre as três analisadas. O teor final de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no rejeito magnético foi de 20 % enquanto o inicial era de aproximadamente 6 %, mostrando uma razão de enriquecimento igual 3,5 vezes. É possível observar uma diferença de 27 % nos teores de SiO<sub>2</sub> entre a areia de brita e o rejeito magnético, evidenciando um concentrado magnético mais limpo. Quando comparada com seu pó de pedra, a areia de brita se mostrou mais grossa, porém ainda dentro dos limites estabelecidos pela ABNT (Figura 37).

De modo geral, as três areias de brita produzidas estariam aptas para serem utilizadas em concretos segundo a norma da ABNT desde que a faixa de tamanho correspondente ao filler fosse removida.



Figura 36 - Balanço de massa e metalúrgico da amostra PP – 06

Tabela 10 - Composição química para os produtos finais da amostra PP - 06

	<b>Areia de Brita</b>	<b>Rejeito Magnético</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	67,63	40,00
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	19,71	20,57
<b>CaO</b>	2,99	1,65
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4,12	7,14
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,97	20,65

<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,28	2,63
<b>MgO</b>	0,30	5,55
<b>Outros</b>	3,01	1,80

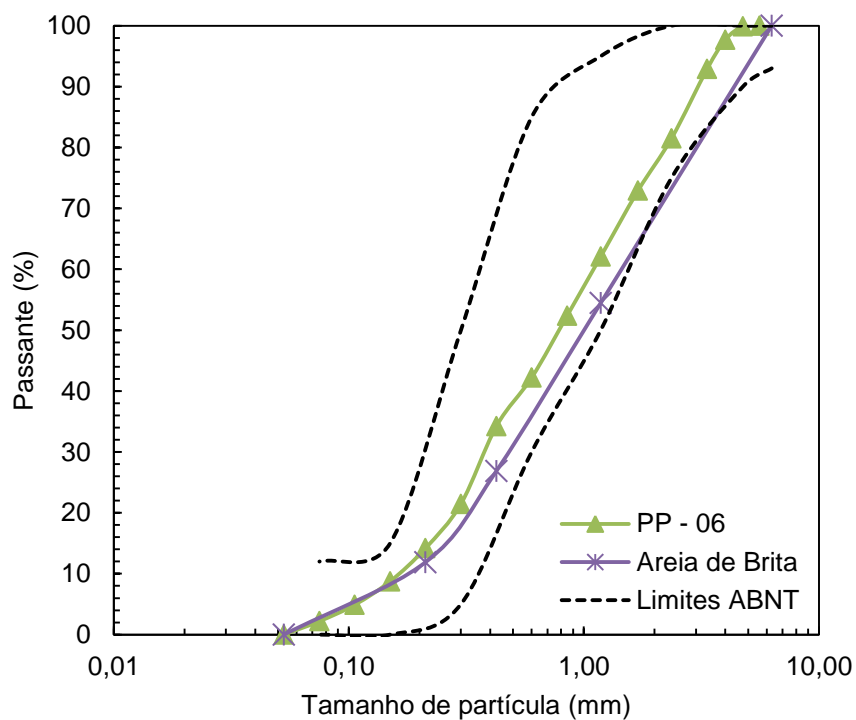


Figura 37 – Distribuição de tamanhos de partículas para a amostra PP - 06 e para a sua respectiva areia de brita

### 5.3 Recuperação de Ferro no Produto Magnético

A recuperação, também chamada de recuperação metalúrgica, é a medida do quanto de elemento de interesse contido na alimentação passou para o concentrado. Neste caso o concentrado é o produto magnético e o elemento de interesse é o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os gráficos de teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> por recuperação (%) para as quatro faixas de tamanho de cada amostra são representados na Figura 38.

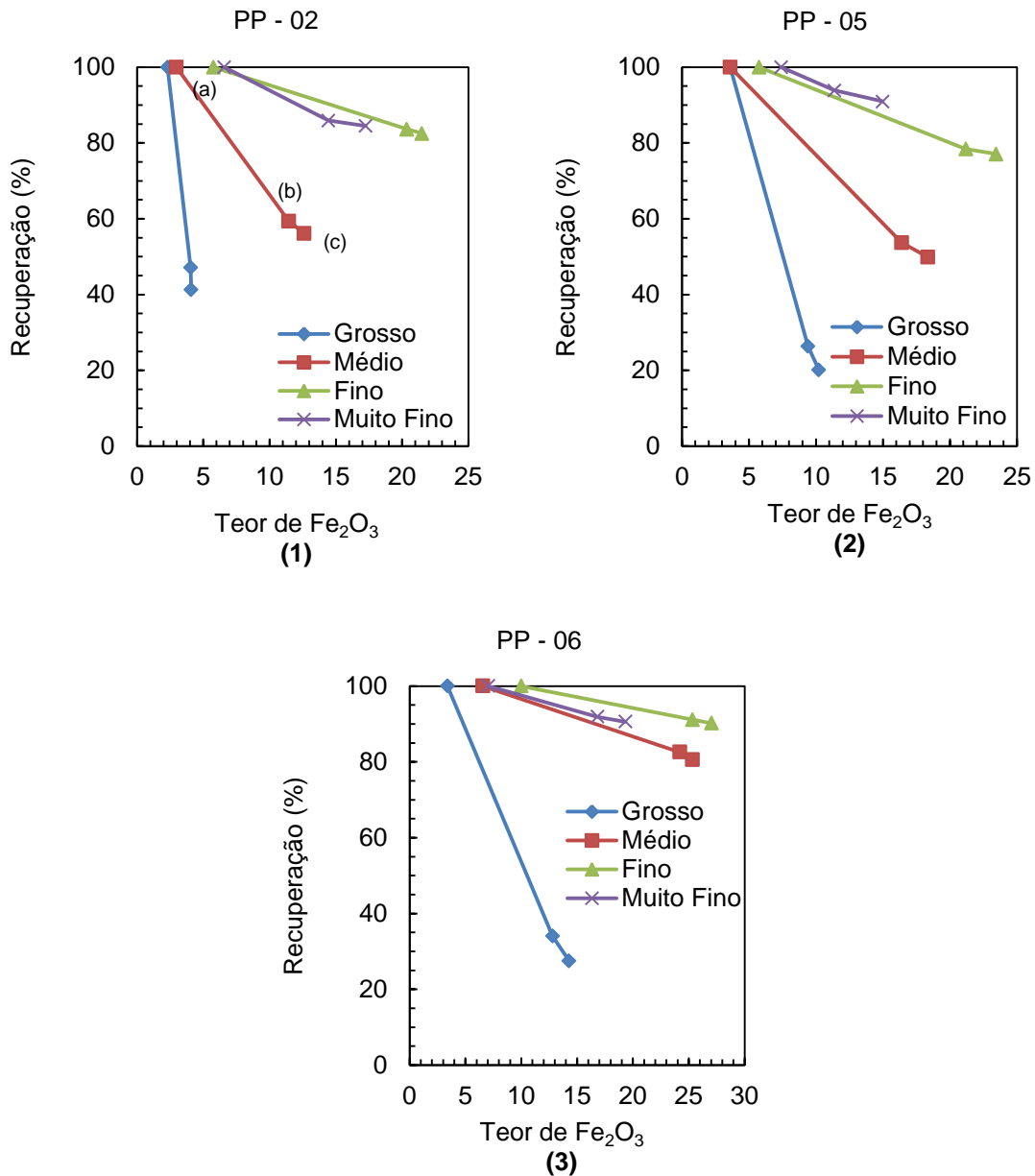


Figura 38 - Relação entre o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a recuperação para as quatro faixas de tamanho das amostras (1) PP – 02; (2) PP – 05; (3) PP – 06

O primeiro ponto de cada linha (a) representa a amostra de cabeça e tem recuperação igual a 100 %, pois se pode considerar que na amostra original tem-se todos os minerais que contém óxido de ferro. O segundo ponto (b) é relativo ao produto do estágio *rougher*, enquanto o terceiro ponto (c) representa estes valores para o estágio *scavenger*.

Em um processo ideal de separação e no caso em que as partículas minerais estivessem todas liberadas, estes gráficos seriam representados por uma reta

horizontal que se manteria fixa no valor de recuperação igual a 100 % e teria os valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  aumentando, ou seja, a partir do teor inicial esta reta cresceria para a direita, denotando que à medida que se sucedem os diferentes estágios da separação magnética, continua a se recuperar 100 % do mineral de interesse com o seu respectivo teor aumentando de forma a purificar este produto. Na prática, o processo não é perfeito, então busca-se obter curvas que sejam as mais horizontais o possível, traduzindo em uma boa recuperação e, por conseguinte, o aumento no teor de óxido de ferro no produto magnético.

Analisando os gráficos nota-se que devido à fraca liberação da biotita na faixa grossa, a recuperação para essas amostras diminui muito com o aumento do teor. A amostra PP – 02 apresenta reta com comportamento vertical, significando que o teor do concentrado praticamente não teve alteração quando comparado com o teor da amostra de cabeça. As amostras PP – 05 e PP – 06 tiveram, nessa faixa, um maior aumento do teor, porém a recuperação foi baixa, ficando em torno de 20 % a 27 % somente.

Os melhores resultados são obtidos nas faixas finas e muito finas para as três amostras, com os respectivos gráficos apresentando comportamento próximo ao horizontal. A biotita está bem liberada nestas faixas para todas as amostras, o que possibilita uma boa recuperação, conseguindo produtos bem puros (dado confirmado ao examinar as análises macroscópicas).

Já a faixa média apresenta comportamento fortemente dependente da composição mineralógica da amostra. A amostra PP – 06, rica no mineral micáceo e com maior liberação a tamanhos mais grossos, evidenciada pelas análises em microscópio estereoscópico, consegue recuperar 80 % da amostra magnética com um teor final igual a 25,35 %. As amostras PP – 02 e PP – 05 tem recuperação na casa dos 53 %, porém os teores tem um aumento considerável. A primeira amostra sai de 2,97 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  para 12,62 % e, a segunda amostra sai de 3,61 % para 18,35 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

A alta recuperação para a faixa fina da amostra PP – 06 pode ser confirmada com a Figura 39. Observa-se a eficiência do ensaio através da clara diferença de coloração entre os produtos não magnético do estágio *rougher* (majoritariamente quartzo) e magnético do estágio *scavenger* (presumivelmente um concentrado com alto teor de biotita) e a amostra de cabeça. Os resultados das análises macroscópicas para todos os ensaios encontram-se no Anexo I.

## PP – 06 FINO

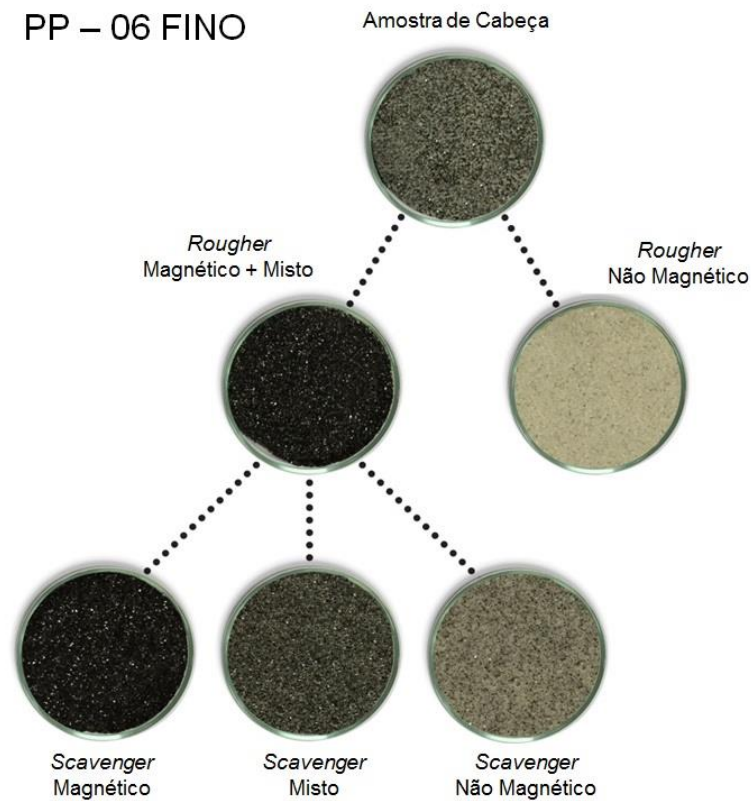


Figura 39 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Fino

A faixa fina da amostra PP – 05 também apresentou um bom resultado, com teor final de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  igual a 23,4 %. A diferença dessa amostra para as outras duas é que a PP – 05 só apresenta a biotita como mineral paramagnético, sendo ela a responsável pela eficácia da separação magnética.

Na Figura 40 pode-se avaliar a relação entre o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e recuperação (%) para as três amostras. Este gráfico foi feito a partir de uma média ponderada entre os valores dos teores e das recuperações para cada faixa de tamanho, de acordo com a distribuição granulométrica de sua respectiva amostra, chegando assim a um valor recomposto de teor de óxido de ferro e de recuperação para a amostra como um todo.

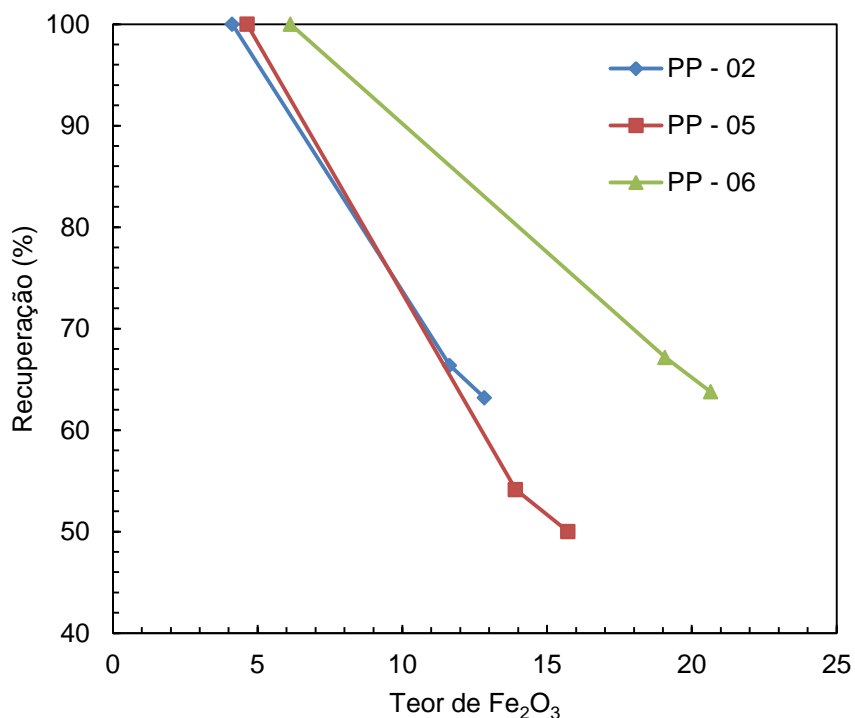


Figura 40 - Teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no produto magnético em função da recuperação desse componente para as três amostras de pó de pedra

As três amostras apresentaram boa recuperação de óxido de ferro no produto magnético, entre 50 % e 63 %. Porém, a amostra PP – 06 teve o melhor resultado já que sua curva é a que tem o comportamento mais horizontal, significando um maior aumento no teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esses resultados podem ser explicados pela maior liberação dos minerais que contém ferro a granulometrias mais grossas que nas demais amostras.

#### 5.4 Rendimento

O rendimento, também chamado de recuperação mássica, é a medida que diz respeito a quanto de massa inicial foi reportada para o concentrado. Neste caso o concentrado é representado pelo produto não magnético. A Figura 41 apresenta a relação entre o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o rendimento para as quatro faixas de tamanho de cada amostra.

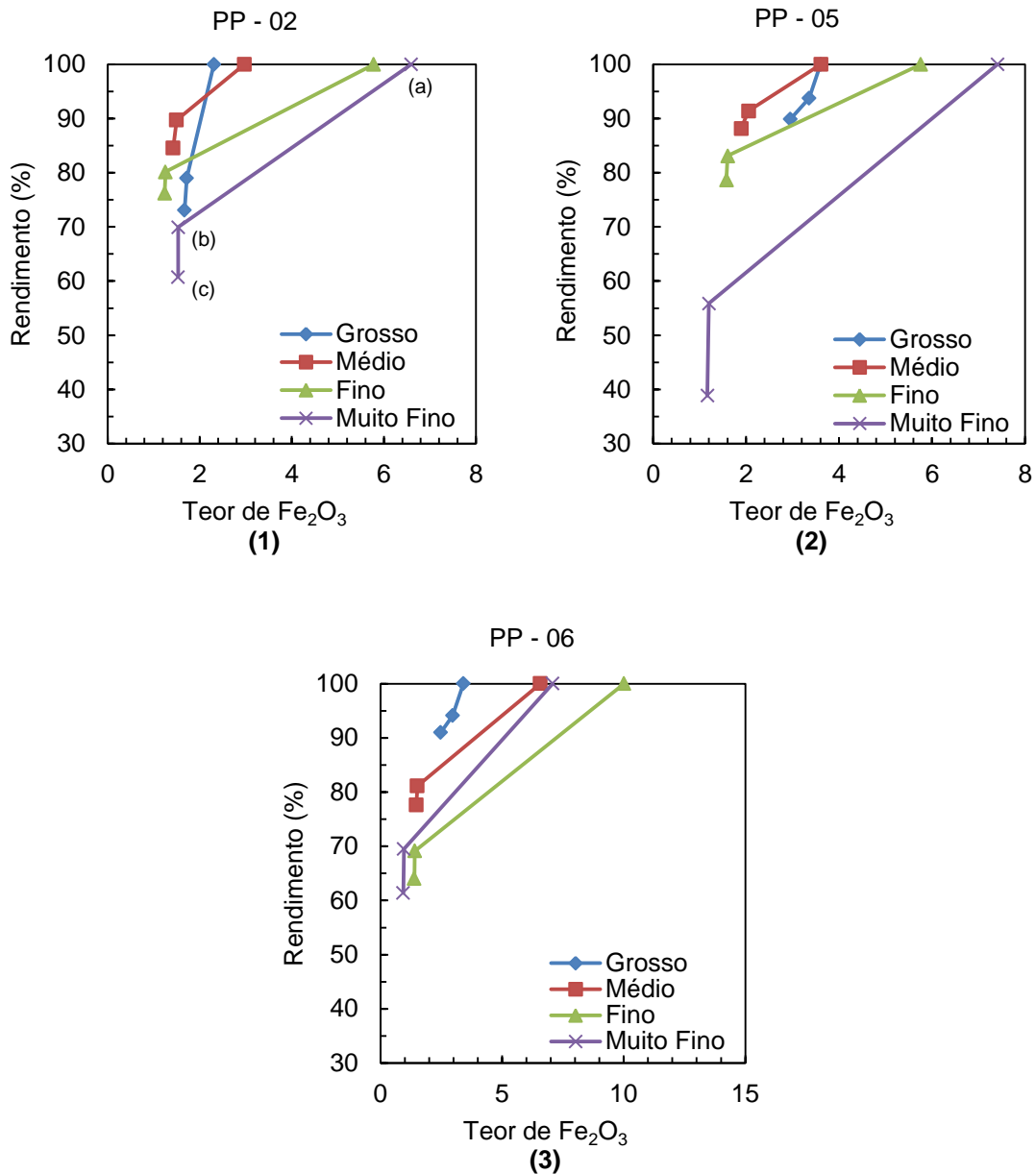


Figura 41 - Relação entre o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o rendimento para as quatro faixas de tamanho das amostras (1) PP – 02; (2) PP – 05; (3) PP – 06

Os pontos, em cada uma das retas, podem ser explicados como: (a) o primeiro ponto é aquele que corresponde à alimentação, ou seja, toda a massa da amostra sendo direcionada para o produto não magnético; (b) o segundo ponto retrata o rendimento do processo de concentração como um todo, relacionando o quanto da massa de todo o material foi para o produto não magnético final, ou seja, considera as massas não magnéticas dos estágios *rougher* e *scavenger* (que formam o produto areia de brita), aumentando o valor do rendimento sem comprometimento significativo



nos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; (c) o terceiro ponto representa o rendimento somente no estágio *rougher* do processo de concentração.

Sendo o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  o indicador da presença de biotita e demais minerais paramagnéticos, a redução do teor de hematita significa um produto não magnético (areia de brita) mais puro. Pode-se observar que o efeito da concentração não é tão significativo nas faixas de tamanho grossas. Isto se deve ao fato de que nesta faixa de tamanhos (6,3 mm x 1,18 mm) as partículas de biotita não se encontram liberadas. Para as outras três faixas de tamanhos observa-se uma boa redução no teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , com rendimento mássico para a faixa média entre 90 % e 80 %, para a faixa fina entre 83 % e 70 % e, para a faixa muito fina entre 70 % e 55 %. Um rendimento baixo para a faixa muito fina é esperado, pois esta contém partículas tão finas quanto 0,053 mm, que podem ir para o produto errado, ficarem aderidas na correia do separador magnético de terras-raras ou ainda terem sua trajetória influenciada por fatores externos, como correntes de ar.

Na Figura 42 é apresentada a relação entre o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e o rendimento (%) para as três amostras. Este gráfico também foi construído por meio da média ponderada entre os valores dos teores e dos rendimentos para cada faixa de tamanho, de acordo com a distribuição granulométrica da sua respectiva amostra, chegando assim a um valor recomposto de teor de óxido de ferro e de rendimento para a amostra como um todo. Ela mostra que a aplicação da separação magnética permitiu reduzir o teor de óxido de ferro de valores iniciais na faixa de 4 a 6,5% para valores entre 1,5 e 2,5%.

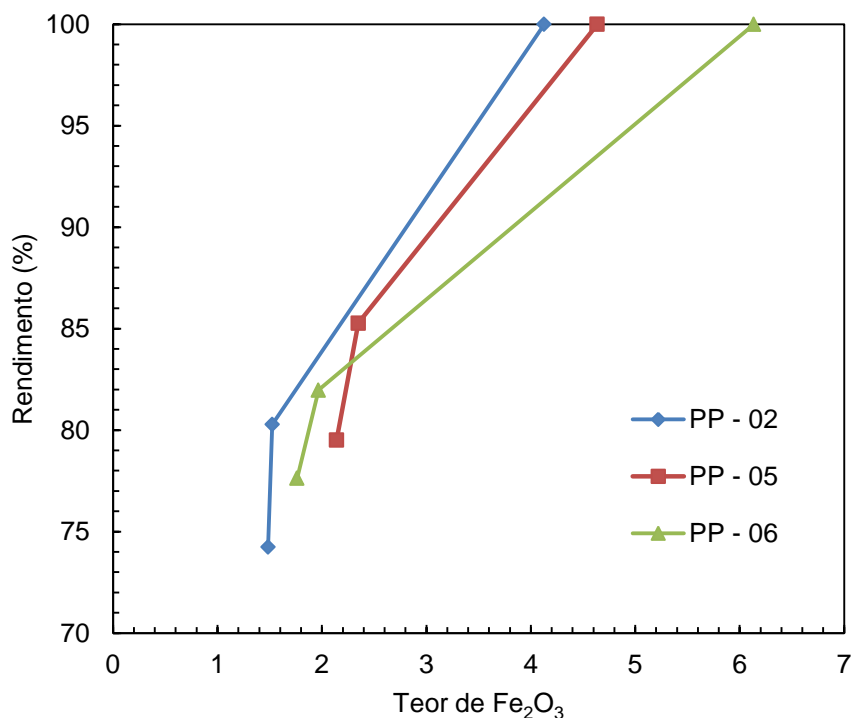


Figura 42 - Teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da areia de brita em função do rendimento para as três amostras de pó de pedra

A amostra PP – 02 teve a maior perda de massa para o produto magnético, ficando com 80 % de produto não magnético com teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> igual a 1,5 %. A amostra PP – 05 conservou a maior proporção de massa no produto não magnético (85 %) com teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> igual a 2,4 %. A amostra PP – 06 teve a maior redução de teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, variando de 6,1 % para a alimentação para 1,9 % no produto não magnético, com 82 % da massa.

É importante enfatizar que o segundo estágio da separação magnética promove um aumento no rendimento mássico considerável, entre 4,3 % e 6,0 %, sem prejudicar de forma expressiva o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no produto final, representando o que se espera de um eficiente estágio scavenger.

### 5.5 Razão de Rejeição

Com base na razão de enriquecimento (equação 4) é possível calcular a razão de rejeição. A razão de rejeição é o inverso da razão de enriquecimento. Enquanto a razão de enriquecimento significa quantas vezes o teor do mineral de interesse aumentou no concentrado, a razão de rejeição irá mostrar quanto do teor do mineral

de interesse não foi para o concentrado. Por exemplo, se a razão de rejeição aumenta após um processo de concentração para 2, significa que a amostra após a concentração possui metade do teor do mineral de interesse quando comparada com a amostra antes da concentração. As relações entre razão de rejeição e rendimento (%) estão apresentadas na Figura 43. A razão de rejeição para as faixas grossas é sempre baixa devido a não liberação das partículas de biotita. A partícula mista carrega consigo altos teores de biotita, contaminando o produto não magnético. Na amostra PP – 02 a razão de rejeição mais alta ocorreu na faixa fina, sendo igual a 4,6, e com rendimento igual a 76 %. A amostra muito fina apresentou valor ligeiramente inferior. Isto se deve ao fato de que como a partícula é muito fina ela tem sua trajetória facilmente desviada, podendo ir para o produto errado. A faixa fina também apresentou melhor resultado para a amostra PP – 05, com 79 % de rendimento e razão de rejeição igual a 3,6. A amostra PP – 06 que é a amostra que possui liberação mais grossa foi a amostra com a melhor razão de rejeição, sendo igual a 7,5, o que significa uma redução no teor de  $Fe_2O_3$  de 86 %. A faixa média para esta amostra também apresenta bons resultados, tendo a sua razão de rejeição o mesmo valor para a melhor faixa da amostra PP – 02 (4,6) e valor superior para a melhor faixa da PP – 05 (3,6).

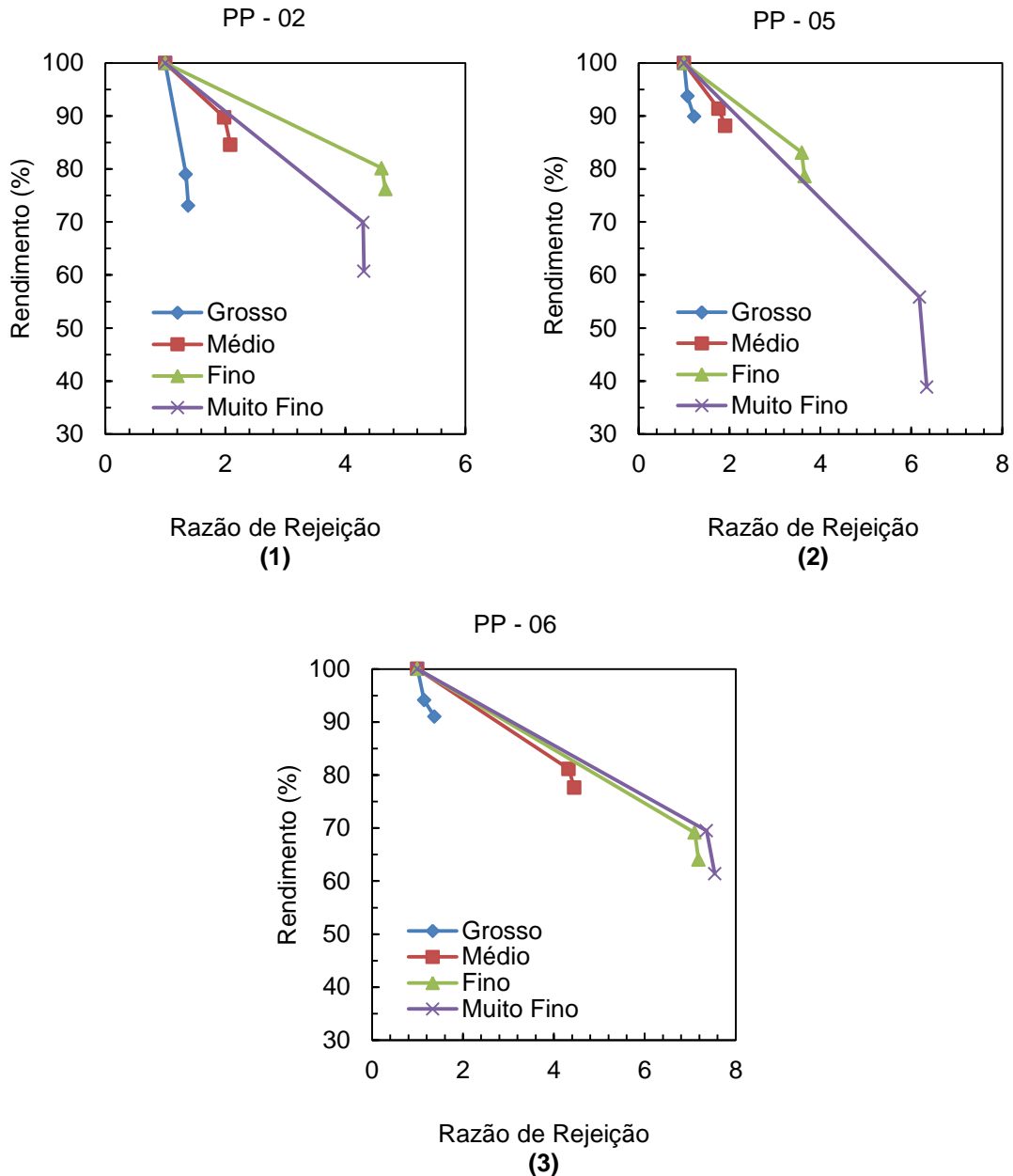


Figura 43 - Relação entre a razão de rejeição e o rendimento para as quatro faixas de tamanho das amostras (1) PP – 02; (2) PP – 05; (3) PP – 06

Na Figura 44 tem-se a relação entre a razão de rejeição e o rendimento (%) para as três amostras. Este gráfico foi feito seguindo a mesma lógica dos gráficos anteriores apresentando a relação entre valor recomposto da razão de rejeição e o rendimento para a amostra como um todo. A amostra PP – 06 novamente apresentou um melhor resultado, com razão de rejeição igual a 4,2. A razão de rejeição para a amostra PP – 05 é 2,6 e para a amostra PP – 06 é 2,8. O valor mais baixo para a

amostra PP – 05 confirma que esta é uma amostra que apresenta somente biotita como mineral que contém o óxido de ferro.

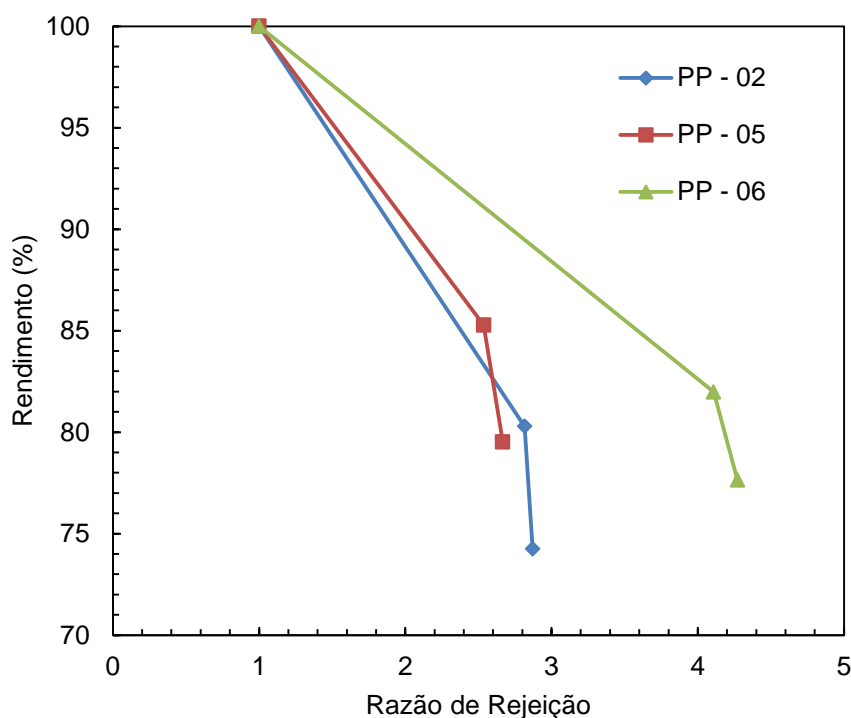


Figura 44 - Razão de rejeição função do rendimento para as três amostras de pó de pedra

A amostra PP – 05 apresentou indícios que comprovam que só a biotita está presente em sua composição mineralógica. Nessa amostra a faixa fina foi a faixa de tamanho que obteve melhores resultados de recuperação de  $Fe_2O_3$ . Ao analisar sua composição química (Tabela 11) observa-se que o teor de  $Fe_2O_3$  é igual a 23,44 %, que corresponde a 21,09 % de FeO, conforme composição química da biotita. Todas as análises químicas realizadas encontram-se no Anexo II.

Tabela 11 - Composição química da amostra PP - 05 na faixa de tamanho fina

Teor (%)	Rejeito Magnético
$SiO_2$	41,09
$Al_2O_3$	18,71
CaO	1,24
$K_2O$	6,95

<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	23,44
<b>TiO<sub>2</sub></b>	3,14
<b>MgO</b>	4,33
<b>Outros</b>	1,10

## 5.6 Eficiência

A eficiência foi calculada segundo a equação 5. O cálculo da eficiência visa comparar os estágios *rougher* e *scavenger* nas diferentes faixas de tamanho para as três amostras. A eficiência quantifica a proporção dos compostos de interesse recuperado no concentrado e a proporção de compostos nos quais não há interesse (ganga) removida no rejeito. No contexto do presente trabalho os compostos de interesse seriam o complemento do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o composto principal da ganga é o próprio Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Evidentemente, essa não é uma aplicação rigorosa da equação, tendo em vista que o óxido de ferro se encontra combinado formando a biotita e hornblenda, de forma que os valores calculados somente têm sentido quando considerados de forma comparativa.

A diferença de eficiência entre os estágios *rougher* e *scavenger* para as amostra é claramente evidenciada pela Figura 45. Esta diferença é devida ao fato de que a alimentação do *scavenger* é composta por material altamente contaminado de minerais paramagnéticos, sendo uma parcela significativa formada por partículas mistas. O aumento da eficiência no estágio *rougher* conforme as faixas de tamanho diminuem observado é esperado devido à liberação das partículas de biotita nas faixas mais finas. Além disso, a diminuição da eficiência na faixa muito fina também é esperada pelo fato desta faixa sofrer com possíveis aglomerações de material nas partículas ou na correia, influenciando na susceptibilidade magnética das partículas, assim como mudança de trajetória devido à ação de correntes de ar. Por outro lado, um ligeiro aumento da eficiência na faixa muito fina no estágio *scavenger* é justificado pela presença de uma quantidade significativa de partículas impropriamente separadas no estágio *rougher*, demonstrando o benefício da aplicação desse segundo estágio nessa classe de tamanhos.

A eficiência do processo de separação magnética foi comparada para as três amostras e está apresentada na Tabela 12. As amostras PP – 02 e PP – 06 apresentaram eficiências equivalentes, enquanto a amostra PP – 05 apresentou eficiência mais baixa. PP – 05 é a amostra que não possui hornblenda. Apesar de a

susceptibilidade magnética da hornblenda ser inferior que a da biotita, conforme Tabela 3, os resultados sugerem que a presença da hornblenda resulta em uma separação mais efetiva das partículas. Vale ressaltar que a hornblenda não apresenta efeitos deletérios na areia de brita, visto que o seu hábito é prismático e não micáceo (Tabela 1).

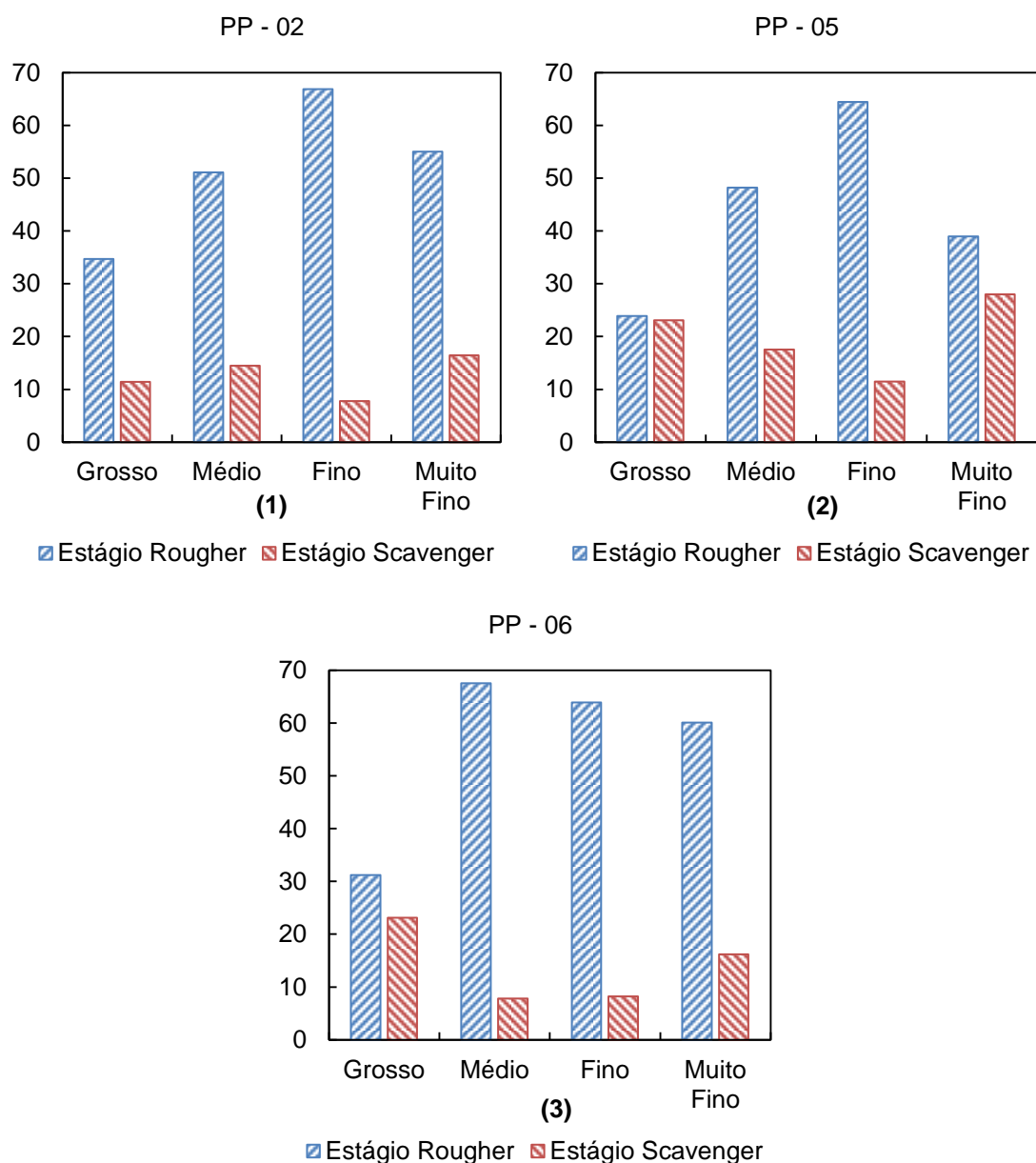


Figura 45 - Eficiência para os estágios *rougher* e *scavenger* para as quatro faixas de tamanho, sendo (1) amostra PP – 02, (2) amostra PP – 05 e (3) amostra PP – 06

Tabela 12 - Eficiência do processo de separação magnética para as 3 amostras

<b>PP - 02</b>	<b>PP - 05</b>	<b>PP - 06</b>
58,5 %	49,3 %	58,5 %



## 6 Conclusões

Os resultados de análise de forma permitiram concluir que as três amostras utilizadas apresentam material com formato indesejado para uso como agregado miúdo em argamassa e concreto nas frações de tamanhos mais finas. Este resultado pode estar relacionado com a concentração da biotita nessas faixas tamanho, visto que ela apresenta formato lamelar, e apresenta boa liberação dos grãos nessa faixa.

Dentre os três pós de pedra utilizados o que produziu melhor areia de brita após a separação magnética foi o PP – 06. Essa areia de brita continha o maior teor de ferro no rejeito magnético e a menor porcentagem de ferro total no produto não magnético, recuperando 80 % de massa inicial. Essa também foi a amostra com evidência de liberação mais grossa dentre as demais. A amostra PP – 06 também era a amostra com o maior teor de biotita, além de apresentar hornblenda (1,8 %). Estes minerais compõem as fases ricas em ferro, gerando o potencial paramagnético da amostra.

A amostra PP – 05 produziu a pior areia de brita. Apesar de apresentar valor intermediário de biotita (6,2 %) entre as amostras, não continha hornblenda, o que propôs a diminuição do potencial de magnetização das partículas promovendo uma separação menos eficiente. Já a amostra PP – 02 que contém o valor mais baixo de biotita (5,7 %) e o mais alto de hornblenda (2,3 %) produziu uma areia com qualidade intermediária. As amostras PP – 02 e PP – 06 apresentaram eficiência de 58 % enquanto a amostra PP – 05 exibiu eficiência de 49 %.

A separação magnética permitiu reduzir o teor de óxido de ferro da faixa de 4 a 6% para valores na faixa de 1,5 a 2,4% com bons rendimentos, qualificando-se como uma técnica viável para controlar o teor de biotita da areia de brita, mesmo em jazidas com teores variáveis desse mineral contaminante.

Pode-se sugerir que a hornblenda aparenta aumentar o caráter paramagnético das amostras, facilitando a separação magnética, o que contradiz o fato de a sua susceptibilidade magnética, conforme literatura, ser inferior a da biotita. Por possuir hábito prismático e não micáceo, não existiria necessidade da remoção de hornblenda de forma a evitar efeitos deletérios em concretos e argamassas. Porém, por possuir caráter paramagnético, sofre influência do campo magnético e é sendo removida em conjunto com a biotita.

Observou-se que quanto mais fina a faixa de tamanho maior foi a recuperação do ferro. Entre as quatro faixas de tamanho, a que se mostrou mais eficiente foi a faixa fina devido à boa liberação das partículas de biotita. Apesar de na faixa muito fina existirem menos partículas mistas, a precisão de separação não foi tão elevada quanto

esperada, pois nesta faixa de tamanhos parte das partículas tendem a permanecer aderidas tanto na correia transportadora do separado magnético quanto em outras partículas, além de serem mais facilmente influenciados por fatores externos, como correntes de ar, que alteram sua trajetória facilmente. As areias de brita produzidas são ligeiramente mais grossas quando comparadas com o pó de pedra original. Essa diferença de tamanho de partícula ainda permite que elas sejam utilizadas como agregado miúdo em concretos, estando dentro dos limites pela ABNT. Assim, as areias produzidas, por apresentarem menor concentração de biotita, apresentam forma de partícula mais uniforme e esférica, não apresentando efeitos deletérios quando aplicados em concretos e argamassas.

O separador magnético de terras-raras se mostrou como um equipamento eficiente para o objetivo do trabalho. É um separador de custo de investimento relativamente baixo, de fácil operação e manutenção e baixo custo energético. É um aparelho que pode ser facilmente implementado em escala industrial em uma mineração de agregado, pois não tem a necessidade do uso de água para promover a remoção da biotita e o rejeito é facilmente armazenado. Existem equipamentos industriais da Eriez, por exemplo, que operam enclausurados, não sofrendo com ações intempéricas, separando materiais a seco na faixa e 2,0 mm x 0,075 mm e com capacidade nominal de até 10 t/h. Estes equipamentos podem atingir campos magnéticos de até aproximadamente 21.000 gauss (2,1 T) e apresentam configuração de 1, 2 ou 3 rolos de ímãs de terras raras posicionados em cascata. É importante reconhecer, entretanto, que a separação não é viável para partículas na faixa de filler, de maneira que a remoção prévia desse material por classificação a seco seria necessária na operação industrial.

O rejeito magnético obtido representou entre 15 e 20 % da massa da alimentação e apresentou alto teor de ferro, podendo apresentar valor econômico se vendido para as indústrias de interesse, como para a adubação de solo na agricultura. Entretanto, o uso da biotita como fertilizante ainda precisa ser desenvolvido.

## 7 Referências Bibliográficas

ALBERS, A.P.F.; MELCHIADES, F.G.; MACHADO, R.; BALDO, J.B.; BOSCHI, A.O. 2002, ***Um Método Simples de Caracterização de Argilominerais por Difração De Raios-X***. Cerâmica, v. 48(305), p. 34.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1993, NBR **7225: *Materiais de Pedra e Agregados Naturais***. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2011, **NBR 7211: *Agregados para Concreto - Especificação***. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2011, **NBR 9935: *Agregados-Terminologia***. Rio de Janeiro.

Banco de Dados - Museu de Minerais e Rochas "HEINZ EBERT", Unesp. Disponível em: < <http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/index.html> > Acesso em: 18 de agosto de 2016.

BEST, M.G. 2008, ***Igneous and Metamorphic Petrology***. 2a ed. Oxford: Blackwell, 729 p.

CPRM. 2012, ***Geologia e recursos minerais da folha Baía de Guanabara SF.23-Z-B-IV, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000*** / Cláudio de Morisson Valeriano [et al.] ; organizador Luiz Carlos da Silva. – Belo Horizonte: CPRM, 156 p.

DA LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. 2010, ***Tratamento de Minérios***. 5ed. Rio de Janeiro. CETEM/MCT.

Departamento de Recursos Minerais do Rio de Janeiro – Secretaria de Estados de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços. 2012, **Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro – Situação e Perspectivas**. Rio de Janeiro.

DOBBINS, M.; SHERRELL, I. 2010, **Significant developments in dry rare-earth magnetic separation**. Mining Engineering, v. 62, n. 1, p. 49.

DUARTE, I.N.; SOUSA, R.T. X.; KORNDÖRFER, G.H.; FONTOURA, P.R.; SOARES, R.A.B.. 2012, **Biotita: Fonte de Potássio para Agricultura**. Bioscience Journal, v. 28, n. 1, p. 98.

FILHO, V.F.N., 1999, **Técnicas Analíticas Nucleares de Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (EDXRF) e por Reflexão Total (TXRF)**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 63 p.

FRAZÃO, E.B. 2007, “**Tecnologia para Produção e Utilização de Agregados.**” In: Agregados para Construção Civil no Brasil: contribuições para formulação de políticas públicas. Belo Horizonte. CETEC/SGM/MME.

GALINDO, A.C.; SILVA, F.C.A.; DE SOUZA, Z.S. 2013, **Química Mineral De Leucomicrogranitos Neoproterozóicos do Domínio Rio Grande do Norte (DRN)**. Geochimica Brasiliensis, v. 26, n. 1, p. 19.

HAWLITSCHKEK, G. 2014, **Caracterização das Propriedades de Agregados Miúdos Reciclados e a Influência no Comportamento Reológico de Argamassas**. Universidade de São Paulo, 295 p.. Tese de Mestrado.

HAWLITSCHKEK, G., ULSEN, C., KAHN, H., MASINI, E. A., & TOCCHINI, M. 2015, **Análise de Imagens Dinâmica - Caracterização da Distribuição de Tamanho e Forma e Partículas**. HOLOS, v. 3, p. 22.

HUNT, C.P.; MOSKOWITZ, B.M.; BANERJE, S.K. 1995, "**Magnetic Properties of Rocks and Minerals**" In: AHRENS, T.J. (Ed.), *Rock physics & phase relations: A handbook of physical constants*, 1 ed., chapter 12, California, American Geophysical Union.

JORDENS, A.; MARION, C.; LANGLOIS, R.; GRAMMATIKOPOULOS, T.; ROWSON, N.A.; WATERS, K.E. 2016, ***Beneficiation of the Nechalacho Rare Earth Deposit. Part 1: Gravity and Magnetic Separation***. Minerals Engineering, in press. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.04.006>.

JORDENS, A.; SHERIDAN, R.S.; ROWSON, N.A.; WATERS, K.E.. 2014, ***Processing a Rare Earth Mineral Deposit Using Gravity and Magnetic Separation***. Minerals Engineering, v. 62, p. 9.

LAGERBLAD, B.; GRAM, H.E.; WESTERHOLM, M.; 2013, ***Quality of Fine Materials from Crushed Rocks in Sustainable Concrete Production***. In Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Tokyo, Japan. 10 p.

LAGERBLAD, B.; CIRERA, J.R.; GRAM, H.E. 2001, ***How to Evaluate Filer from Crushed Rock Aggregates for Concrete Production***. In. XXI Nordic Concrete Research Symposia, Hämeenlinna, Finland / Nordic Concrete Federation. Oslo : Norsk Betongforening. Nordic Concrete Research, Publication No. 43, p. 305.

MARTINS, L.L. 2015, ***Eficiência do Uso de Biotite na Remoção de As em Águas***, Universidade de Lisboa, 57 p., Tese de Mestrado.

NALLURI, V.R. 2011, ***Novel Process Analytical Technological Approaches of Dynamic Image Analysis for Pharmaceutical Dry Particulate Systems***. 2011. University of Basel, 174 p., Tese de Doutorado.

PORMIN – Portal de Apoio ao Pequeno Produtor Mineral, Rede APL mineral. **Micas**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <[http://www.redeaplmineral.org.br/pormin/noticias/minerais-e-rochas-descricao-aplicacao-e-ocorrencias/mica\\_propriedades\\_aplicabilidade\\_ocorrencias.pdf](http://www.redeaplmineral.org.br/pormin/noticias/minerais-e-rochas-descricao-aplicacao-e-ocorrencias/mica_propriedades_aplicabilidade_ocorrencias.pdf)> Acesso em: 04 de setembro de 2016.

RAO, D.V.S. 2011, “**Magnetic Separation**” In: RAO, D.V.S. (Ed.), *Mineral beneficiation: a concise basic course*, 1 ed., chapter 17, The Netherlands CRC Press.

SCHLANZ, J.W.; JR. TANNER, J.T. 2006 “**Mica**”. In: KOGEL, J.E. (Ed.), *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*, 7 ed., chapter 49, Colorado, USA, SME.

SMITH M.R.; COLLIS N.L.; FOOKES P.G.; LAY J.I.; SIMS M.R.; SMITH G.W. 2001, “Aggregates for mortar”. In: Smith *et al.* (Ed.) “*Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*”. 3 ed, v. 17(1), p. 225. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications.

SORDI, M.V. 2014, **Parâmetros Granulométricos e Relações Morfoestratigráficas dos Depósitos Sedimentares de Vertente: O Caso da Serra de São Pedro - Faxinal – Pr.** Universidade Estadual de Maringá, 118 p., Tese de Mestrado.

TAVARES, L.M. 2004. **Uma Introdução a Teoria e Prática do Beneficiamento Físico de Matérias-Primas Minerais**, DMT/UFRJ.

WAKIZAKA, Y.; ICHIKAWA, K.; NAKAMURA, Y.; ANAN, S. 2005., “**Deterioration of concrete due to specific minerals**”. In: WAKIZAKA, Y.; ICHIKAWA, K.; NAKAMURA, Y.; ANAN, S (Ed.), *Proc. Aggregate 2001, Environment and Economy*, Conference, p. 331.

Web Mineral, Mineralogy Database. Disponível em: <  
[http://webmineral.com/Alphabetical\\_Listing.shtml#.V9h1JfkrLIU](http://webmineral.com/Alphabetical_Listing.shtml#.V9h1JfkrLIU)> Acesso em: 18 de agosto de 2016.

WEIDMANN, D.F. 2008, ***Contribuição ao Estudo da Influência da Forma e da Composição Granulométrica de Agregados Miúdos de Britagem nas Propriedades do Concreto de Cimento Portland***, Universidade Federal de Santa Catarina. 273 p., Tese de Mestrado.

WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T. 2006, “**Magnetic and Electrical Separation**”. In: WILLS, B.A.; NAPIER-MUNN, T. (Ed.), *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7ed., chapter 13, The University of Queensland, Australia, Butterworth-Heinemann.

## Anexo I

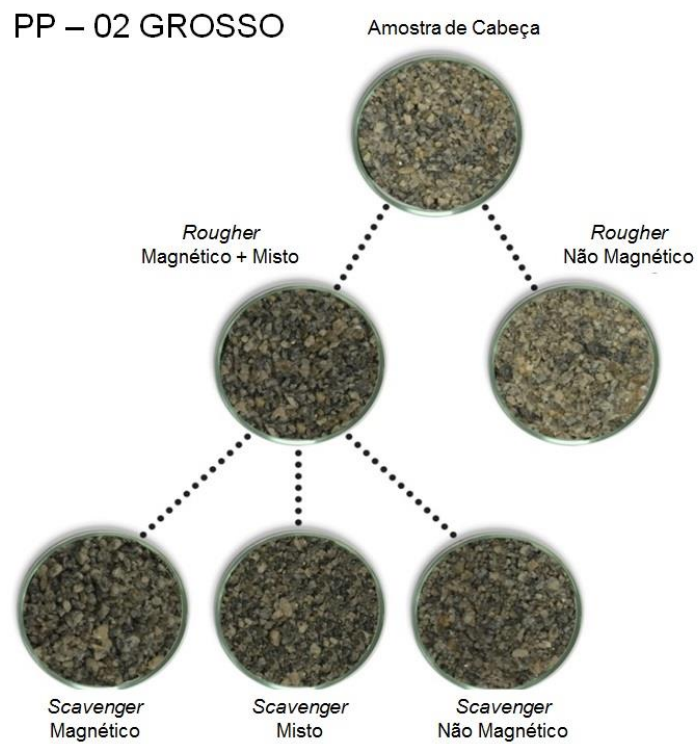


Figura 46 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Grosso

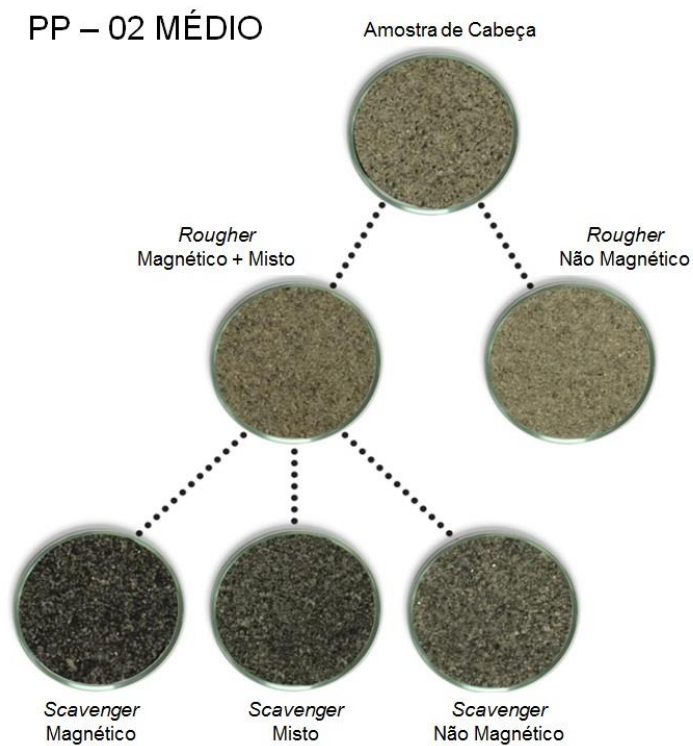


Figura 47 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Médio



PP – 02 FINO

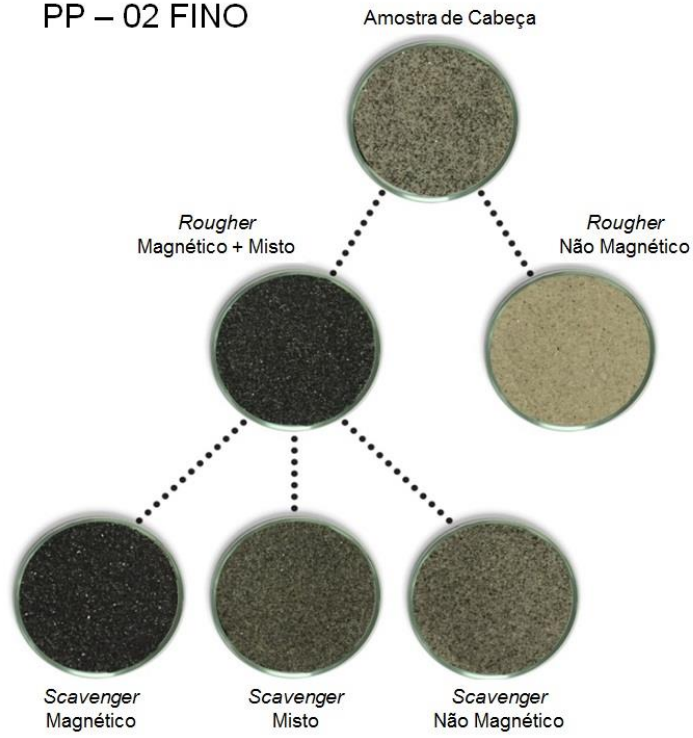


Figura 48 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Fino

PP – 02 MUITO FINO

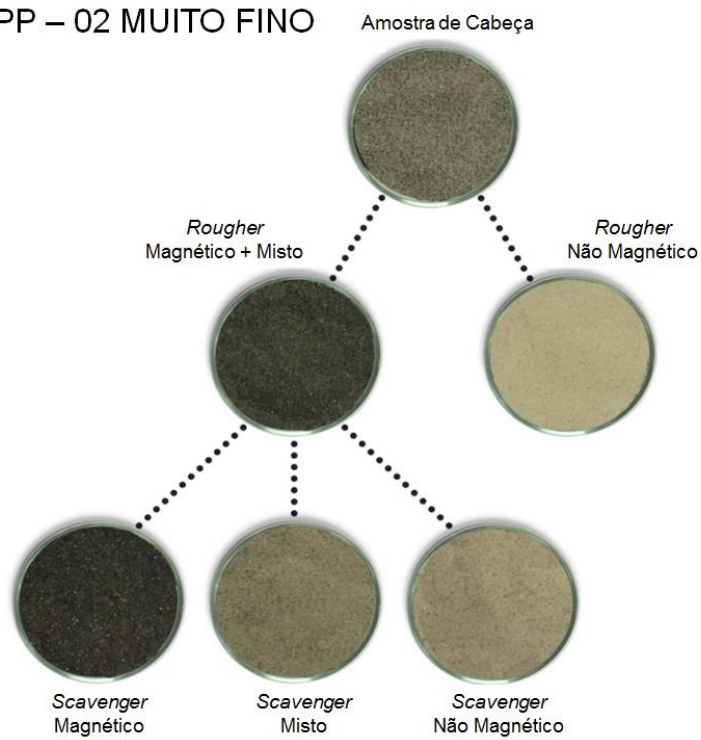


Figura 49 - Análise macroscópica da amostra PP – 02 Muito Fino

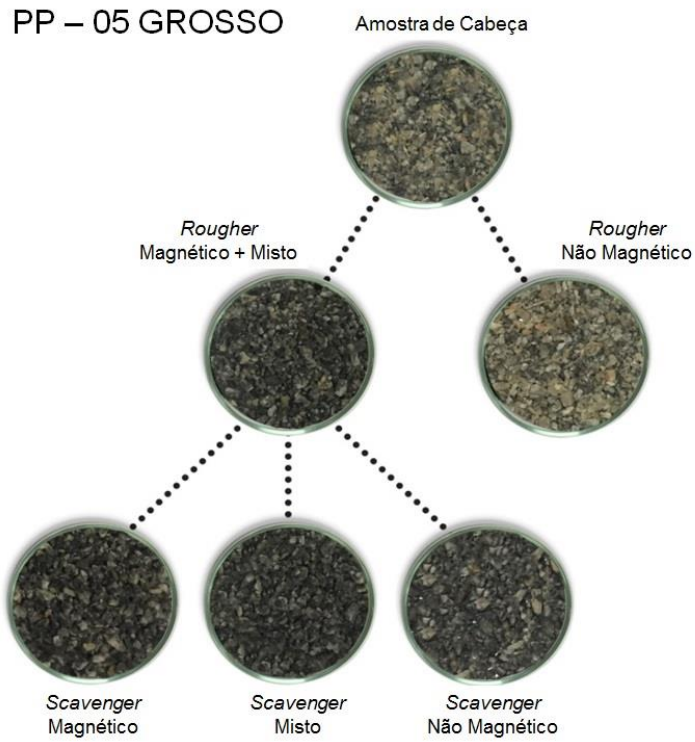


Figura 50 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Grosso

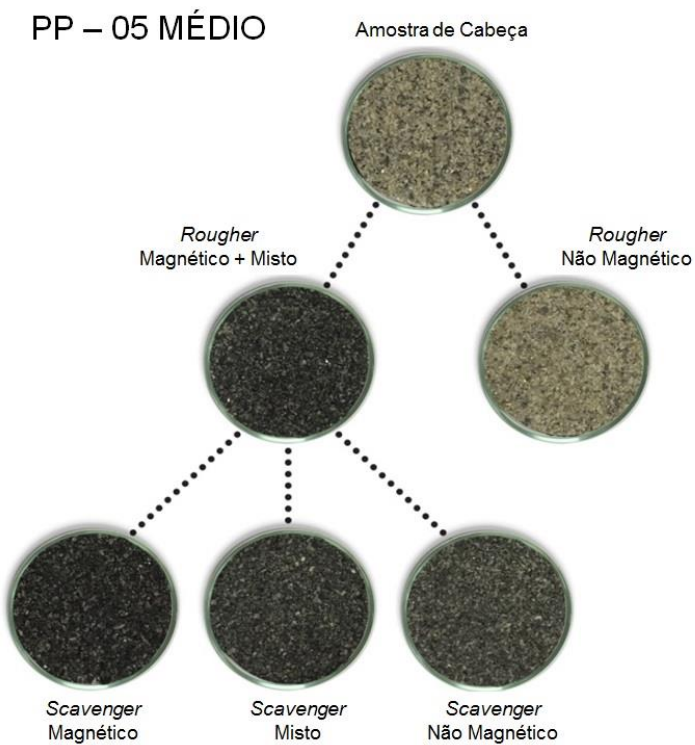


Figura 51 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Médio

PP – 05 FINO

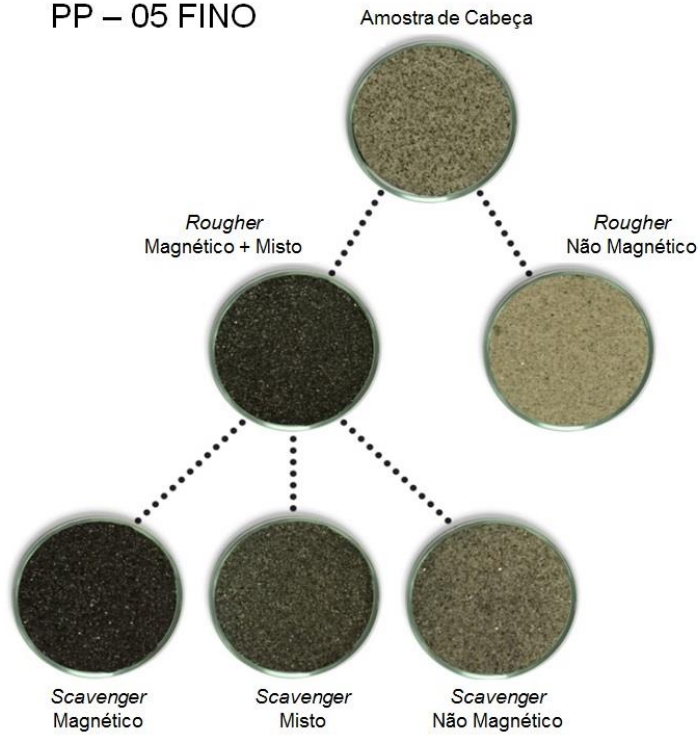


Figura 52 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Fino

PP – 05 MUITO FINO

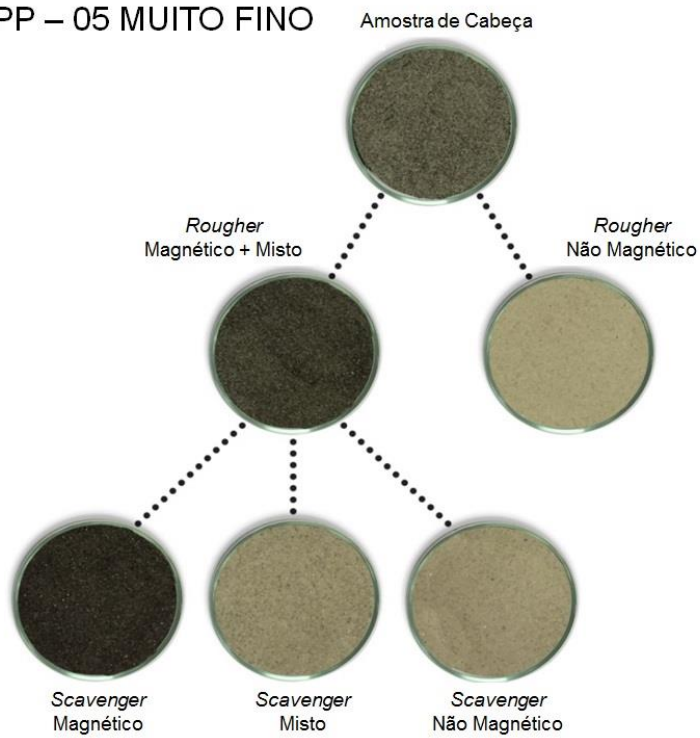


Figura 53 - Análise macroscópica da amostra PP – 05 Muito Fino

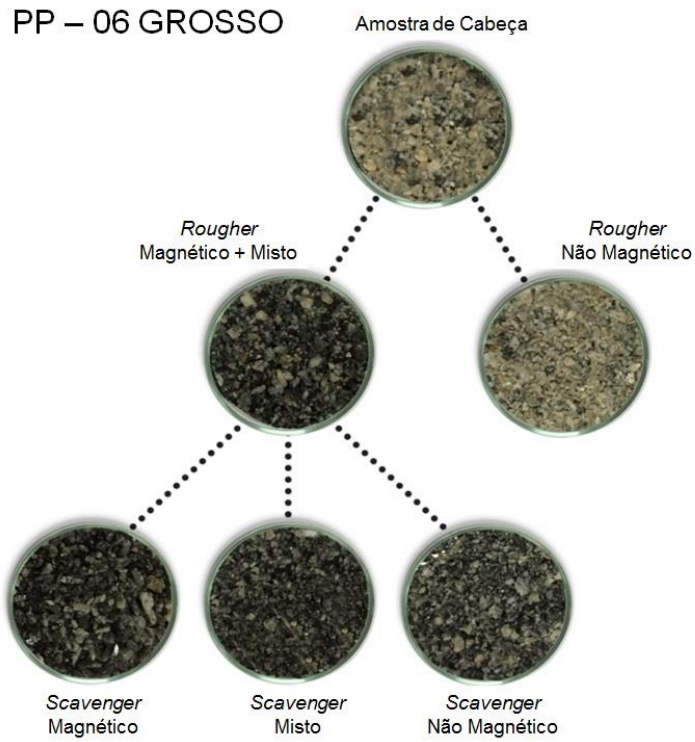


Figura 54 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Grosso

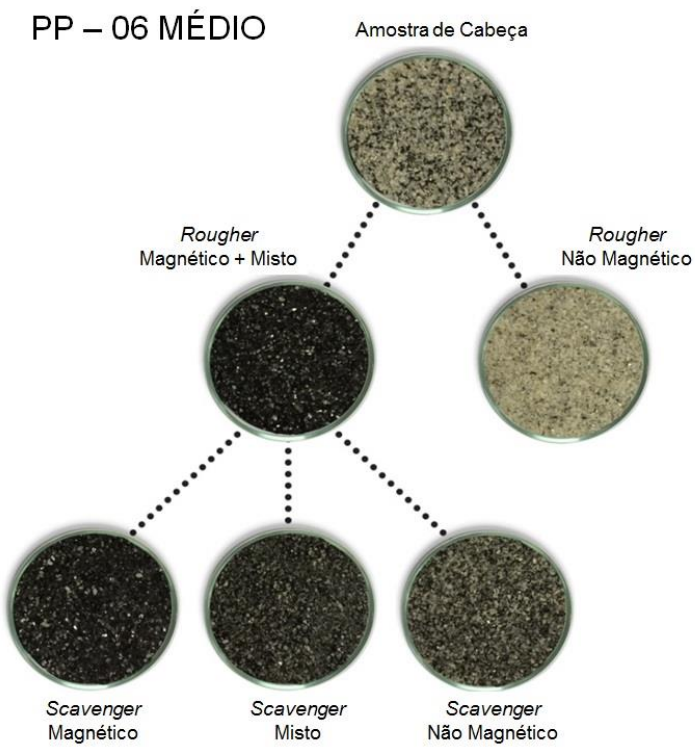


Figura 55 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Médio

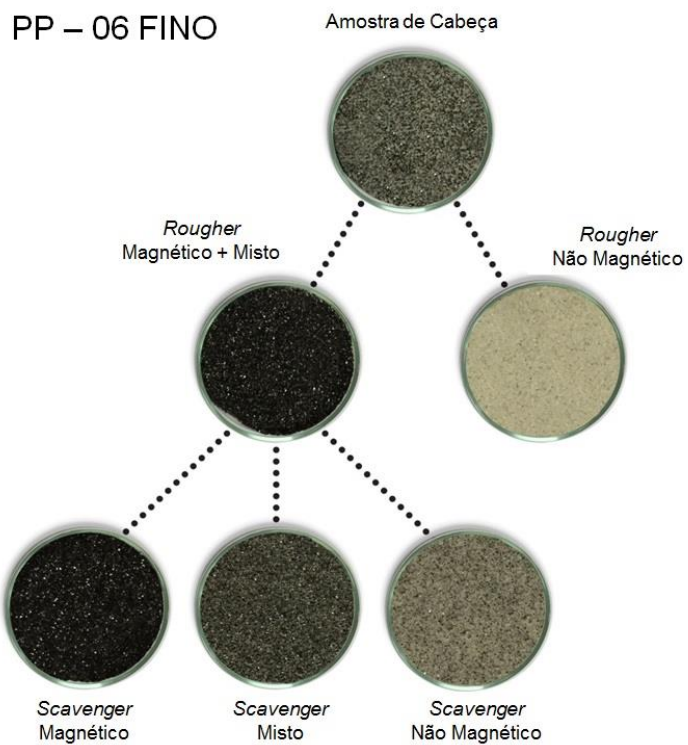


Figura 56 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Fino



Figura 57 - Análise macroscópica da amostra PP – 06 Muito Fino

## Anexo II

Tabela 13 - Composição Química da Amostra PP – 02 por faixa de tamanho

PP - 02 Grosso						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	73,12	26,88	3,12	79,03	20,97
SiO <sub>2</sub>	64,96	65,70	62,94	63,42	65,65	62,94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,48	22,02	20,01	20,56	21,99	19,95
CaO	2,89	2,77	3,22	2,95	2,77	3,27
K <sub>2</sub> O	5,86	6,39	4,43	4,62	6,35	4,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,31	1,67	4,05	3,84	1,72	4,08
TiO <sub>2</sub>	0,44	0,40	0,56	0,62	0,41	0,55
MgO	0,73	0,57	1,17	1,07	0,58	1,18
Outros	1,32	0,47	3,64	2,93	0,53	3,62
PP - 02 Médio						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	84,58	15,42	1,71	89,71	10,29
SiO <sub>2</sub>	67,15	69,89	52,11	61,78	69,70	50,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,15	19,02	19,88	20,47	19,05	19,81
CaO	2,69	2,60	3,20	3,44	2,62	3,16
K <sub>2</sub> O	4,11	3,93	5,10	4,02	3,93	5,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,97	1,43	11,45	4,48	1,50	12,62
TiO <sub>2</sub>	0,48	0,23	1,85	0,84	0,25	2,02

MgO	0,97	0,42	4,00	1,37	0,44	4,44
Outros	2,47	2,48	2,41	3,61	2,51	2,08

**PP - 02 Fino**

	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	76,24	23,76	1,39	80,15	19,85
SiO <sub>2</sub>	63,53	71,27	38,70	61,89	71,22	37,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,02	20,20	19,42	20,18	20,20	19,38
CaO	2,87	3,22	1,76	3,78	3,22	1,62
K <sub>2</sub> O	4,51	3,62	7,38	3,99	3,62	7,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,78	1,24	20,35	4,26	1,25	21,49
TiO <sub>2</sub>	0,75	0,18	2,56	1,25	0,19	2,66
MgO	1,96	0,00	8,25	1,13	0,01	8,75
Outros	0,58	0,27	1,58	3,52	0,29	1,40

**PP - 02 Muito Fino**

	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	60,76	39,24	5,00	69,95	30,05
SiO <sub>2</sub>	60,43	66,92	50,39	65,84	66,89	49,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,83	19,98	19,61	20,20	19,99	18,90
CaO	3,50	3,75	3,12	4,03	3,76	2,61
K <sub>2</sub> O	4,35	3,69	5,37	3,60	3,68	5,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,59	1,53	14,43	1,68	1,53	17,24
TiO <sub>2</sub>	0,76	0,20	1,63	0,45	0,21	1,65
MgO	1,58	0,00	4,03	0,00	0,00	4,19
Outros	2,95	3,93	1,43	4,21	3,94	0,91

Tabela 14 - Composição Química da Amostra PP – 05 por faixa de tamanho

<b>PP - 05 Grosso</b>						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	89,89	10,11	6,27	93,73	6,27
SiO <sub>2</sub>	66,30	66,70	62,78	63,48	66,41	62,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,95	19,25	16,33	17,43	19,08	15,89
CaO	2,19	2,13	2,71	2,63	2,18	2,74
K <sub>2</sub> O	5,59	5,83	3,50	3,85	5,65	3,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,60	2,95	9,41	7,50	3,36	10,22
TiO <sub>2</sub>	0,39	0,31	1,07	1,00	0,37	1,11
MgO	0,60	0,51	1,44	1,28	0,58	1,51
Outros	2,37	2,32	2,76	2,83	2,37	2,65
<b>PP - 05 Médio</b>						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	88,16	11,84	8,61	91,39	8,61
SiO <sub>2</sub>	67,39	69,34	52,85	64,40	69,19	50,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,50	18,69	17,12	17,39	18,65	17,10
CaO	2,18	2,16	2,34	2,46	2,17	2,32
K <sub>2</sub> O	5,39	5,48	4,71	4,24	5,44	4,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,61	1,90	16,39	6,94	2,05	18,36
TiO <sub>2</sub>	0,41	0,20	1,98	1,02	0,23	2,18
MgO	0,34	0,00	2,85	1,07	0,03	3,22
Outros	2,18	2,24	1,76	2,50	2,25	1,40



<b>PP - 05 Fino</b>						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	78,68	21,32	16,84	83,10	16,90
SiO <sub>2</sub>	62,26	67,53	38,70	65,01	67,50	41,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,84	20,05	19,07	19,60	20,04	18,71
CaO	2,68	2,97	1,60	2,82	2,97	1,24
K <sub>2</sub> O	5,08	4,59	6,89	4,85	4,59	6,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,76	1,58	21,18	3,89	1,60	23,44
TiO <sub>2</sub>	0,83	0,16	3,29	0,62	0,17	3,14
MgO	1,31	0,43	4,53	0,61	0,44	4,33
Outros	2,26	2,69	4,75	2,61	2,69	1,10
<b>PP - 05 Muito Fino</b>						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	38,87	61,13	43,98	55,86	44,14
SiO <sub>2</sub>	58,73	66,12	54,02	66,49	66,18	50,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,13	20,54	19,88	20,45	20,52	19,84
CaO	3,28	4,14	2,73	3,96	4,11	2,32
K <sub>2</sub> O	4,99	4,01	5,61	4,19	4,04	6,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,41	1,17	11,38	1,38	1,20	14,98
TiO <sub>2</sub>	1,07	0,13	1,66	0,16	0,14	2,20
MgO	1,26	0,00	2,06	0,00	0,00	2,81
Outros	3,14	3,89	2,66	3,38	3,81	1,61

Tabela 15 - Composição Química da Amostra PP – 06 por faixa de tamanho

<b>PP - 06 Grosso</b>						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	90,96	9,04	5,90	94,10	5,90
SiO <sub>2</sub>	64,91	66,29	51,04	56,48	65,54	49,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,10	20,05	20,57	20,63	20,09	20,58
CaO	2,43	0,00	3,00	3,18	2,44	2,93
K <sub>2</sub> O	5,22	5,27	4,76	4,32	5,20	4,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,41	2,47	12,82	8,98	2,97	14,29
TiO <sub>2</sub>	0,54	0,44	1,62	1,41	0,51	1,70
MgO	0,88	0,66	3,13	2,26	0,78	3,46
Outros	2,51	4,83	3,06	2,75	2,48	3,01
<b>PP - 06 Médio</b>						
	Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
Prop. em massa (%)	100,00	77,59	22,41	18,88	81,12	18,88
SiO <sub>2</sub>	61,43	69,15	34,69	56,95	69,08	33,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,87	19,72	20,42	0,00	19,72	20,42
CaO	2,42	2,86	0,92	2,95	2,86	0,77
K <sub>2</sub> O	4,81	3,80	8,28	4,70	3,81	8,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,57	1,48	24,22	8,80	1,52	25,36
TiO <sub>2</sub>	0,81	0,16	3,07	1,38	0,17	3,19
MgO	1,49	0,00	6,66	2,23	0,01	6,99

	Outros	2,59	2,84	1,74	23,00	2,83	1,56	
<b>PP - 06 Fino</b>								
		Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético	
	Prop. em massa (%)	100,00	64,02	35,98	30,80	69,11	30,89	
	SiO <sub>2</sub>	56,06	69,05	32,94	65,51	69,03	31,00	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,72	19,38	20,34	19,39	19,38	20,59	
	CaO	2,43	3,46	0,60	3,14	3,46	0,43	
Teor (%)	K <sub>2</sub> O	5,10	3,11	8,64	3,85	3,11	9,05	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,01	1,39	25,35	3,93	1,41	27,06	
	TiO <sub>2</sub>	1,28	0,11	3,35	0,32	0,12	3,59	
	MgO	2,58	0,00	7,18	0,60	0,00	7,70	
	Outros	2,81	3,49	1,60	3,26	3,49	0,57	
	<b>PP - 06 Muito Fino</b>							
			Amostra de Cabeça	1º Concentrado Não Magnético	1º Concentrado Magnético	2º Concentrado Não Magnético	Areia de Brita	Rejeito Magnético
		Prop. em massa (%)	100,00	61,37	38,63	30,47	69,50	30,50
	SiO <sub>2</sub>	59,50	68,43	45,32	67,41	68,40	41,90	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,65	19,10	20,52	19,11	19,10	20,82	
	CaO	3,25	4,04	1,99	3,89	4,04	1,69	
Teor (%)	K <sub>2</sub> O	4,70	3,28	6,95	3,51	3,29	7,53	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,08	0,94	16,84	1,70	0,96	19,34	
	TiO <sub>2</sub>	0,95	0,13	2,27	0,00	0,12	2,64	
	MgO	1,75	0,00	4,53	0,00	0,00	5,28	
	Outros	3,11	4,08	1,58	4,38	4,09	0,79	