

**ALEXANDRE NASCIMENTO CONFESSORO**

**CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS PESADOS NO PRODUTO DA  
USINA DE PARAGOMINAS**

**São Paulo  
2008**

**ALEXANDRE NASCIMENTO CONFESSORO**

**CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS PESADOS NO PRODUTO DA  
USINA DE PARAGOMINAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Junior

**São Paulo**

**2008**

EPMI  
TF-2008  
C76c  
Synd 1733905

M2008y

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700004240

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Confessoro, Alexandre Nascimento**

Concentração de minerais pesados no produto da usina de Paragominas / A.N. Confessoro. -- São Paulo, 2008.  
30 p.

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

1.Bauxita 2.Processamento de minerais metálicos 3.Concentração densitária 4.Classificação de minerais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo III.t.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Homero Delboni Junior, pelo caráter e dedicação que me fizeram despertar o gosto pelo Tratamento de Minérios.

À minha família, Francisco, Cleide e Vivian, que sempre me apoiou e me deu segurança para alcançar meus objetivos pessoais.

Ao Engenheiro de Operações da Mina de Bauxita Paragominas Geraldo Brittes e a toda equipe do CETEM, em nome do Técnico Químico Antônio Odilon da Silva e do Engenheiro João Alves Sampaio, que me proporcionaram realizar um estágio de férias em Paragominas e despertaram meu interesse para realização deste trabalho.

À Engenheira Bianca Foggiato, pela atenção e ajuda em todos os momentos que precisei, e aos Técnicos Rogério de Almeida, Osvaldo Acosta Barbosa Junior e Cícero André Simplício Silva, do Laboratório de Simulação e Controle da Escola Politécnica da USP, pelo apoio em todos os momentos.

Ao Professor Dr. Henrique Kahn, ao Químico Freud S. Campbell, à Engenheira Carina Ulsen, à Geóloga Juliana Lívi Antoniassi, ao Geólogo André Borges Braz e aos Técnicos Juscelino Santana Rocha e Ailton Santos Azevedo, do Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da USP pela utilização dos equipamentos necessários e por sempre se mostrarem dispostos a ajudar.

Aos meus amigos da Escola, principalmente ao pessoal da ATOP e do atletismo, por esses seis anos passados e por outros que virão em nossas vidas.

Por fim, a todos os professores do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo que me fizeram adorar este curso e escolher a Engenharia de Minas como profissão.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar os ensaios realizados em laboratório com o produto final da planta piloto da Mina de Bauxita Paragominas, visando à obtenção de um concentrado de titânio e ferro.

A recuperação de minerais portadores de titânio e ferro tem por objetivo reduzir o teor destes minérios na polpa enviada por mineroduto à refinaria onde ocorrerá o processo de obtenção de alumina. A retirada de parte destes minerais da polpa diminui os riscos de desgaste do fundo da tubulação do mineroduto, proporcionando uma maior vida útil ao mesmo.

Foram realizados ensaios de deslamagem e meio-denso com o minério amostrado e os resultados obtidos foram satisfatórios e contemplaram os objetivos traçados. Partindo-se de uma alimentação com 1,78% de titânio e 12,5% de ferro, chega-se a um concentrado com 12,3% de titânio e 53,5% de ferro. A recuperação em massa do concentrado é de 4,9% e apenas 1,3% de alumina presente na alimentação é recuperada.

Assim, fica demonstrada a viabilidade técnica da recuperação de ferro e titânio no produto final da planta piloto. Concluída esta etapa, deve-se agora ser iniciados estudos em escala piloto visando à obtenção deste concentrado a partir do produto final da planta industrial.

**Palavras-chave:** bauxita, minerais pesados, mineroduto, Paragominas.

## ABSTRACT

This paper aims to present the tests in laboratory with the final product of Paragominas' Bauxite Pilot Plant, aiming to obtain an iron and titanium concentrate.

The recovery of the iron and titanium mineral is an attempt to reduce the content of these minerals in the slurry pipeline's pulp sent to the process plant where the process of obtaining alumina occurs. The withdrawal of these minerals from the pulp reduces the wear, and erosion risks of the pipe's bottom, providing it greater life to it.

Desliming and heavy medium separation tests were performed with ore samples and the results were satisfactory and the contemplated goals set out. Starting from a iron grade feed of 1,78% and a titanium 12,5%, a 53,5% iron and a 12,3% titanium concentrate is reached. The mass recovery of the concentrated is only 4,9% and only 1,3% of the alumina in the feed sample is recovered.

Thus, it demonstrated the technical feasibility of the iron and titanium recovering in the pilot plant's final product. Having completed this stage, pilot scale studies should now be initiated in order to achieve this product concentrated with the plant's product.

**Palavras-chave:** bauxite, heavy minerals, slurry pipeline, Paragominas.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil bauxítico típico .....	11
Figura 2 – Vista aérea da Mina de Bauxita Paragominas .....	12
Figura 3 – Tanques de estocagem e homogeneização da polpa para posterior envio à Barcarena .....	13
Figura 4 – Terminal de bombeamento da polpa localizado na planta industrial .....	14
Figura 5 – Fluxograma da planta piloto .....	15
Figura 6 – Moinho SAG, trommel e britador de mandíbulas da planta piloto .....	15
Figura 7 – Vista geral da planta piloto.....	16
Figura 8 – Quarteador Jones .....	17
Figura 9 – Representação da deslamagem e seus produtos .....	17
Figura 10 – Conjunto cilindros/frascos utilizados no ensaio de meio denso .....	18
Figura 11 – Afundado e flutuado .....	19
Figura 12 – Capela ventilada utilizada durante ensaio de meio denso .....	19
Figura 13 – Curva granulométrica da amostra cabeça do produto .....	20
Figura 14 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto geral. Partículas, em sua maioria liberadas, de gibbsita (1), oxi-hidróxidos de Fe (2; magnetita, hematita e goethita) e zircão (3). .....	23
Figura 15 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto de detalhe. Partícula mista de rutilo com oxi-hidróxidos de Fe (1). Partículas liberadas de anatásio (2), rutilo (3) e oxi-hidróxidos de Fe (4).....	23
Figura 16 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto de detalhe. Partícula mista de zircão com rutilo (1). Partículas liberadas de oxi-hidróxidos de Fe (2) e hidróxidos de alumínio (3).....	24
Figura 17 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto de detalhe. Partículas liberadas de oxi-hidróxi de Fe (1) e zircão (2). Partícula mista de rutilo com zircão (3). .....	24
Figura 18 – Fluxograma da rota de estudo utilizada.....	26
Figura 19 – Espiral concentradora simples (esquerda) e tripla (direita).....	27
Figura 20 – Detalhe do desviador de fluxo de uma espiral concentradora.....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação granulométrica do produto enviado por mineroduto .....	13
Tabela 2 – Análise química por faixa granulométrica .....	20
Tabela 3 – Análise química da deslamagem .....	21
Tabela 4 – Teor e distribuição para os produtos do ensaio em meio denso .....	21
Tabela 5 – Mineralogia do produto afundado .....	22
Tabela 6 – Teor e distribuição para os produtos gerados .....	25



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral /Ministério da Ciência e Tecnologia

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LCT – Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Minas e Petróleo da EPUSP

LTM – Laboratório de Tratamento de Minérios e Resíduos Industriais do Departamento de Minas e Petróleo da EPUSP

MBP – Mina de Bauxita Paragominas

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	6
LISTA DE TABELAS.....	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	8
<b>1 Introdução .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>10</b>
2.1 Bauxita .....	10
2.2 Minerais de titânio .....	11
2.3 Mina de Bauxita Paragominas .....	12
2.4 Mineroduto.....	13
2.5 Planta Piloto Mina de Bauxita Paragominas.....	14
<b>3. Materiais e métodos .....</b>	<b>16</b>
3.1 Amostragem.....	16
3.2 Preparação das amostras .....	16
3.3 Deslamagem.....	17
3.4 Ensaio em meio denso .....	18
<b>4. Resultados e discussões.....</b>	<b>20</b>
4.1 Distribuição granulométrica.....	20
4.2 Deslamagem.....	21
4.3 Ensaio em meio denso .....	21
4.4 Produtos gerados .....	25
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>26</b>
5.1 Espirais concentradoras .....	27
<b>6. Trabalhos futuros.....</b>	<b>28</b>
<b>7. Referências bibliográficas .....</b>	<b>29</b>
<b>ANEXO A – Difratoograma de raios X e fases identificadas do produto afundado .....</b>	<b>30</b>

## 1 Introdução

O objetivo deste trabalho é realizar estudos de caracterização tecnológica do produto final da planta piloto da Mina de Bauxita Paragominas (MBP), visando à concentração dos minerais portadores de titânio e ferro e avaliar a possibilidade de recuperação de ambos no produto final da planta industrial.

A recuperação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  no produto final da planta industrial visa à redução do teor destes minérios na polpa enviada por mineroduto à refinaria da Alunorte em Barcarena. A retirada deste material da polpa diminui os riscos de desgaste do fundo da tubulação do mineroduto, minimizam o risco de entupimento do mineroduto por acumulação de minerais pesados em seu interior, além de representar uma diminuição no envio de impurezas que em nada contribuem no processo de obtenção da alumina.

Os minerais portadores de titânio e ferro são os principais constituintes da lama vermelha, denominação genérica dada ao resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer, processo este que é o principal e mais econômico método para produção de alumina e alumínio a partir de bauxíticos gibbsíticos com baixa porcentagem de sílica.

Neste trabalho foram realizados ensaios de deslamagem e meio denso. Os produtos gerados pelos ensaios deram origem ao concentrado de bauxita, produto final utilizado na fabricação de alumínio e o concentrado de titânio e ferro.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Bauxita

A bauxita foi descoberta, em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier na aldeia Les Baux, no sul da França. Trata-se de uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio com mais de 40% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A proporção dos óxidos de ferro determina a coloração da rocha. Assim, a bauxita branca contém de 2% a 4% de óxidos de ferro, já na bauxita vermelha essa proporção atinge 25%.

A bauxita é composta de um ou mais hidróxidos de alumínio – gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , bohemita  $\text{AlO}(\text{OH})$  e diásporo  $\text{AlO}(\text{OH})$ . As proporções destes minerais na rocha variam muito entre os depósitos, bem como o tipo e a quantidade de impurezas do minério, tais como: óxidos de ferro, argila, sílica, dióxido de titânio, entre outras.

Os depósitos de bauxita no Brasil são de origem laterítica, constituídos essencialmente por gibbsita e formados pela ação intensa do clima tropical sobre diferentes tipos de rocha (MELFI, 1997). O Brasil destaca-se entre os países que possuem as maiores reservas de bauxita, sendo que as mais importantes são as de Trombetas, Paragominas e Almerim, todas no estado do Pará.

Um perfil bauxítico típico é constituído pelos seguintes horizontes:

- Solo orgânico com espessura média de 0,5m;

- Argila amarelada que capeia a maioria dos perfis bauxíticos, constituída de caulinita (80%) e quartzo, com espessura máxima no centro do platô, decrescendo para as suas margens;
- Camada bauxítica com espessura média de 10 m, subdividindo-se em bauxita nodular, laterita ferruginosa e bauxita maciça e granular;
- Argila e areia.

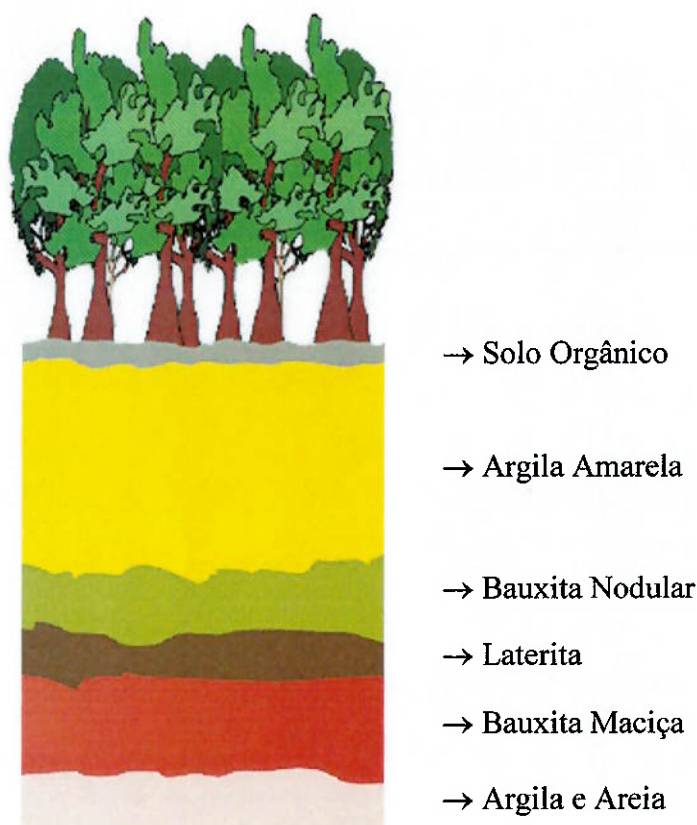


Figura 1 – Perfil bauxítico típico

## 2.2 Minerais de titânio

O titânio (Ti) é o nono elemento mais abundante na Terra e foi descoberto, em 1971, por William Gregor ao realizar experiências de tratamento de ilmenita com ácido sulfúrico e ácido clorídrico. O nome titânio vem da palavra grega *titanes*, que na mitologia grega é um dos filhos de *Urano* (Céu) e *Gaia* (terra).

As principais fontes comerciais de titânio são a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ), o anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), o rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e o leucoxênio. Devido suas propriedades de tenacidade, elevado ponto de fusão, alta resistência à corrosão, elevada resistência mecânica, grande capacidade de dispersão e elevada brancura, o titânio possui diversas aplicações industriais, indo desde a fabricação de turbinas de aviões supersônicos até próteses dentárias. Seu uso é especialmente indicado para a fabricação de diversos artefatos da indústria aeroespacial.

O Brasil possui 6% das reservas mundiais de titânio e produziu, no ano de 2007 aproximadamente 2,3% da produção mundial. Segundo NETO (2008), o maior consumo de

titânio no Brasil, em 2007, foi destinado à fabricação de tintas, esmaltes e vernizes (51,5%). Na indústria do papel, o pigmento possui alto índice de refração, o que resulta em elevados índices de opacidade e alvura, porém, se comparado ao caulim, o uso de dióxido de titânio em papel fica limitado pelo seu elevado preço.

### 2.3 Mina de Bauxita Paragominas

A Mina de Bauxita Paragominas (MBP), da Companhia Vale do Rio Doce (VALE), está localizada a 64 km da cidade de Paragominas, no nordeste do Pará, e a 350 km de Belém. Descoberta por exploradores da Mineradora Rio Tinto (MRN) na década de 1970, este projeto está diretamente ligado aos programas de expansão da refinaria de alumina Alunorte, Alumina do Norte do Brasil S.A., localizada em Barcarena/PA.

O empreendimento foi idealizado para operar em três fases. A fase I entrou em operação no primeiro trimestre de 2007 e possui capacidade nominal de produzir 5,4 milhões t/ano de bauxita. Para a fase II, que entrou em operação no segundo trimestre de 2008, está previsto um acréscimo na produção de 4,5 milhões t/ano de bauxita. Já a fase III será integrada à nova refinaria de alumina a ser implantada nas proximidades da Alunorte, em Barcarena, em parceria da VALE com empresa norueguesa Norsk Hydro. A fase III produzirá mais 4,95 milhões t/ano de bauxita em 2011, quando estará totalmente concluída.



Figura 2 – Vista aérea da Mina de Bauxita Paragominas

A mineralização de bauxita em Paragominas ocorre em camadas horizontais, associadas a platôs (planaltos), e por este motivo foi adotado o método de lavra por tiras. A área atualmente lavrada e também onde se encontra a planta industrial é o platô Miltônia 3, cujos recursos medidos e indicados são da ordem de 98 milhões de toneladas, o que representa uma vida útil estimada de 20 anos. O Platô Miltônia 5, localizado a 8 km do anterior, abastecerá a fase III.

O minério beneficiado na planta industrial é enviado para Barcarena na forma de polpa, com 50% de sólidos, pelo mineroduto de 244 km de extensão e 24 polegadas de diâmetro. A polpa proveniente do mineroduto é recebida e tratada pela Alunorte que a

transforma e envia parte desta para o abastecimento da Albrás (Alumínio Brasileiro S.A.) onde o alumínio é fabricado.

Tabela 1 – Especificação granulométrica do produto enviado por mineroduto

Abertura (mm)	% passante acumulada
0,297	100
0,210	95
0,044	47

## 2.4 Mineroduto

Mineroduto pode ser definido como o modo de transporte de sólidos granulares misturados com um líquido, que funciona como veículo de transporte (CHAVES, 2002).

A alternativa de transporte por mineroduto, apesar de exigir um investimento inicial maciço, apresenta alta eficiência e segurança operacional, isso porque são utilizadas tecnologias avançadas, com sistema automático de supervisão instalado em vários pontos de monitoramento do fluxo de minério, que evita a ocorrência de vazamentos, permitindo uma operação segura e confiável.

Uma outra vantagem do mineroduto, pelo fato de estar em subsolo, é o baixo impacto ambiental causado nas regiões por onde atravessa.



Figura 3 – Tanques de estocagem e homogeneização da polpa para posterior envio à Barcarena

Para garantir a eficiência do transporte e minimizar o desgaste na parte inferior do tubo faz-se necessário garantir um tamanho máximo de partícula compatível com este tipo de transporte.

A grande limitação da vida dos minerodutos é o desgaste da parede do tubo, especialmente na parte inferior, uma vez que a tubulação, sendo enterrada, não pode ser



girada de 90° quatro vezes durante sua vida útil, como as tubulações industriais (CHAVES, 2002).

Outros parâmetros importantes de projeto que necessitam de monitoramento são:

- Porcentagem de sólidos: visa impedir o assentamento das partículas e facilitar a retomada do escoamento após uma eventual parada;
- Velocidade de transporte da polpa: visa limitar o efeito de abrasão da tubulação além de garantir a operação dos equipamentos de bombeamento abaixo da velocidade máxima admitida por estes.

A VALE é a primeira empresa do mundo a utilizar um mineroduto para escoamento de bauxita e, com isso, derrubou o paradigma que imperava na indústria mundial de que o comportamento reológico da polpa de bauxita impediria seu transporte em duto, em função da escala industrial e da longa distância.



Figura 4 – Terminal de bombeamento da polpa localizado na planta industrial

## 2.5 Planta Piloto Mina de Bauxita Paragominas

Uma planta piloto é uma replica fiel da planta de processos, porém em escala reduzida. O objetivo de uma planta piloto é simular as etapas de beneficiamento realizadas na planta industrial, possibilitando a medição de variações do processo e o envio de amostras para testes.

A planta piloto da MBP é uma parceira da VALE com o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e é composta, como pode ser observada na figura a seguir, por dois circuitos: o circuito do moinho SAG e o circuito do moinho de bolas.





O circuito do moinho de bolas envolve duas correias transportadoras, o moinho de bolas, uma peneira, um ciclone de fundo chato e um ciclone. Conforme mostrado na Figura 5, este circuito pode ser utilizado para a formação do produto PF2 ou para a formação do produto PF4 e dos finos do moinho de bolas. Na escala industrial o produto PF2, homogeneizado com o produto P1A e PF4, representa o minério que alimenta o mineroduto. Os finos do moinho de bolas juntamente com a lama natural e os finos do P1 representam o rejeito gerado pela planta industrial.

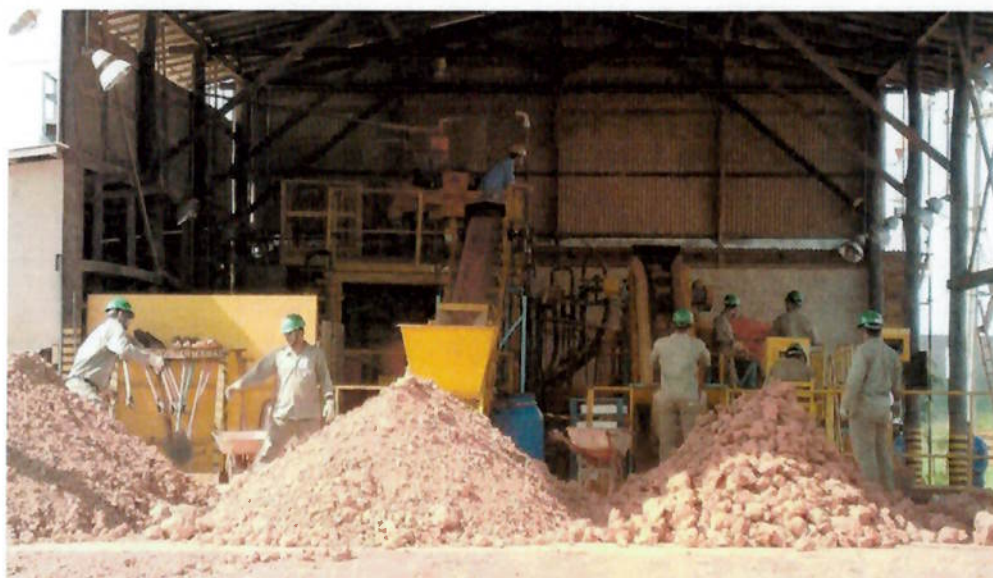


Figura 7 – Vista geral da planta piloto

### 3 Materiais e métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Tratamento de Minérios (LTM) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). As amostras geradas foram caracterizadas por análise química semiquantitativa, por espectrometria de fluorescência de raios-X, no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da EPUSP.

#### 3.1 Amostragem

A amostragem consiste na retirada de uma quantidade modular do material de um todo que se deseja amostrar, de tal forma que esta seja representativa do todo amostrado.

A amostra objeto deste estudo é um dos tambores de 50 L formados pelo produto final da planta piloto MBP coletado no mês de julho 2008 durante execução de rotina da planta piloto e é proveniente dos platôs Miltônia 3, trincheira 8 e Miltônia 5, trincheira 22.

#### 3.2 Preparação das amostras

A amostra proveniente da Planta Piloto MBP, aproximadamente 32kg, foi colocada em bandejas e seca em estufa a 100 °C. Após a secagem, foi feita uma pilha alongada para homogeneização, as pontas foram retomadas e a pilha foi quarteada. Após a realização da

segunda pilha alongada, seguindo a mesma metodologia da anterior, a amostra foi quarteada e encaminhada ao amostrador Jones onde foi realizado o quarteamento da amostra até atingir uma alíquota de 1kg . Esta alíquota foi encaminhada à análise granulométrica e suas frações à análise química.

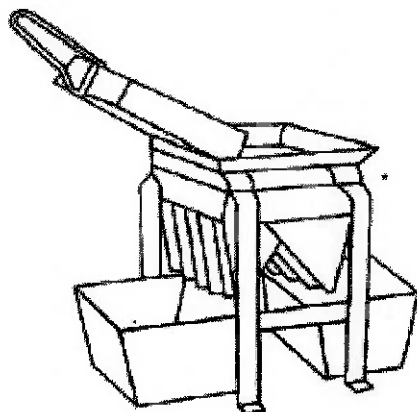


Figura 8 – Quarteador Jones

### 3.3 Deslamagem

A deslamagem tem como objetivo a retirada de material fino presente na amostra. A presença deste material em um ensaio de separação por meio denso reduz a densidade e aumenta a viscosidade do meio denso, isso porque os finos não possuem massa suficiente para se comportarem como partículas e não são separados.

Neste ensaio foi utilizado os ciclones de 1 polegada presentes no LTM da EPUSP. Os ciclones, com diâmetro de corte de  $10\ \mu\text{m}$  e pressão de alimentação de 20 psi, eram alimentados por uma polpa com 10% de sólidos. As duas amostras geradas, *overflow* e *underflow*, foram encaminhadas à estufa para secagem. A amostra do *underflow* foi encaminhada à análise química.

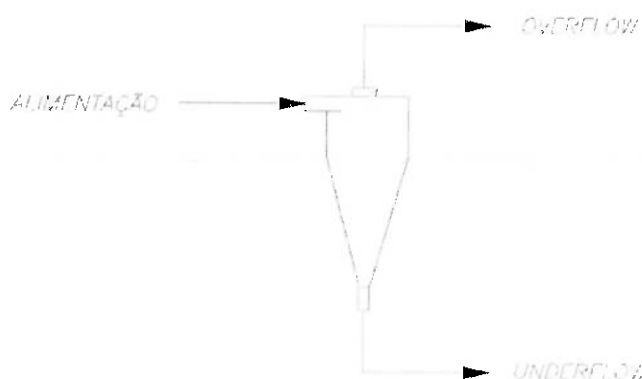


Figura 9 – Representação da deslamagem e seus produtos

Para a realização deste ensaio fez-se necessário um prévio escalpe da amostra em 0,297 mm a fim de evitar o entupimento do apex do ciclone.

### 3.4 Ensaio em meio denso

A separação por meio denso consiste na utilização de um meio de imersão com densidade intermediária à dos minerais que se deseja separar. Neste trabalho, foi utilizado o líquido orgânico bromofórmio, de composição química  $\text{CHBr}_3$  e de densidade a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  igual a  $2,86\text{ g/cm}^3$ , para separar a sílica e a alumina, de densidades aproximadas  $2,65$  e  $2,35\text{ g/cm}^3$  respectivamente, dos minerais de titânio e ferro, de densidades aproximadas  $3,9$  e  $4,9\text{ g/cm}^3$  respectivamente.

A amostra alimentada na centrífuga para o ensaio de meio denso é proveniente da homogeneização da fração escarpada para a realização do ensaio de deslamagem com a fração proveniente do *underflow* do ciclone.

O equipamento utilizado neste ensaio foi a centrífuga, da marca Bunker, modelo NT-820-1, que se encontra no LTM da EPUSP. Para a realização deste ensaio, os cilindros opostos contendo a amostra e o líquido denso precisavam apresentar a mesma massa em seu conjunto, para um melhor equilíbrio e maior exatidão nos resultados obtidos. Cada cilindro era dotado de três frascos independentes entre si, conforme pode ser observado na figura abaixo, e caso dois cilindros diametralmente opostos não apresentassem tal equilíbrio, era necessário pipetar o líquido denso no cilindro de menor massa até que o equilíbrio fosse atingido.



Figura 10 – Conjunto cilindros/frascos utilizados no ensaio de meio denso

Após a verificação do equilíbrio entre os cilindros, a centrífuga era fechada e o ensaio era iniciado. Após 1 minuto a centrífuga era aberta e os frascos agitados objetivando uma maior liberação de partículas mais densas da fração flutuada e de partículas menos densas da fração afundada. Esta agitação era realizada cuidadosamente de modo a não misturar a fração afundada com a fração flutuada. Depois de concluída a agitação manual os cilindros eram recolocados na centrífuga por mais 1 minuto para uma nova centrifugação.

Terminado o ensaio, as frações afundada e flutuada foram encaminhadas à estufa e posteriormente a análise química. A figura seguinte ilustra os produtos afundado e flutuado após ensaio em meio denso.





Figura 11 – Afundado e flutuado

Durante a realização do ensaio foram tomadas precauções necessárias para o seu bom andamento: realização de todas as operações de separação em capela ventilada devido à alta volatilidade do líquido orgânico, uso de luvas, óculos de proteção e máscaras protetoras. O uso dos equipamentos de proteção individual (EPI) são obrigatórios durante a realização do ensaio.



Figura 12 – Capela ventilada utilizada durante ensaio de meio denso

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Distribuição granulométrica

A amostra do produto final da planta piloto MBP apresenta a distribuição granulométrica e os teores expostos na tabela a seguir.

Tabela 2 – Análise química por faixa granulométrica

Malha (mesh)	Abertura (mm)	Massa		% Passante Acumulada	Teor (%)			
		(g)	(%)		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
+65	0,210	65,8	6,8	93,2	55,2	5,33	1,39	10,8
-65 +100	0,149	108,5	11,1	82,1	55,9	5,14	1,41	10,6
-100 +200	0,074	250,7	25,7	56,4	55,3	4,77	2,04	11,2
-200 +400	0,037	136,3	14,0	42,4	55,8	4,27	1,94	11,2
-400 +635	0,020	83,5	8,6	33,8	55,6	4,00	1,70	11,6
-635	-	329,4	33,8	-	49,9	8,07	1,75	15,3
Total		974,2	100,0	-	53,6	5,83	1,78	12,5

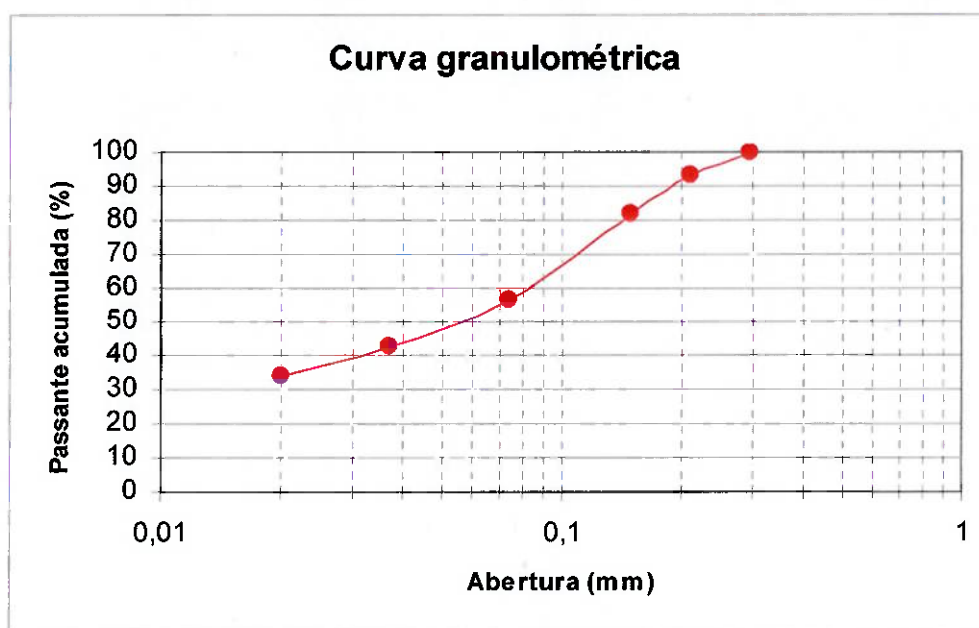


Figura 13 – Curva granulométrica da amostra cabeça do produto

Observando a Tabela 2, nota-se que:

- A fração passante em 0,020 mm representa 33,8% da massa total da amostra;
- A fração passante em 0,020 mm apresenta o maior teor de SiO<sub>2</sub> e de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e o menor teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre as frações observadas;

Estes fatores justificam a deslamagem do minério antes do ensaio em meio denso.

## 4.2 Deslamagem

O resultado da deslamagem é apresentado na tabela abaixo. Pelo fato da amostra não apresentar teor elevado de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em nenhuma das frações, como pode ser observado na Tabela 2, o *overflow* (lamas) e o *underflow* dos ciclones de deslamagem não foram caracterizados por faixa granulométrica.

Tabela 3 – Análise química da deslamagem

Produto	Massa		Teor (%)				Distribuição (%)			
	(g)	(%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Underflow	1395,1	79,3	52,0	4,70	1,94	12,0	77,0	64,0	86,2	76,3
Overflow	363,1	20,7	59,8	10,2	1,20	14,4	23,0	36,0	13,8	23,7
Total	1758,2	100,0	53,6	5,83	1,78	12,5	100,0	100,0	100,0	100,0

Levando-se em consideração a Tabela 3, percebe-se que:

- As lamas representam 20,7% da amostra de alimentação do ciclone;
- O teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no *underflow* é de 12,0% e sua recuperação metalúrgica é de 76,3%;
- O teor de  $\text{TiO}_2$  no *underflow* é de 1,94% e sua recuperação metalúrgica é de 86,2%;

## 4.3 Ensaio em meio denso

O ensaio em meio denso foi realizado com a amostra proveniente do *underflow* do ensaio de deslamagem. A tabela a seguir apresenta o resultado da análise química dos produtos gerados pelo ensaio em meio denso.

Tabela 4 – Teor e distribuição para os produtos do ensaio em meio denso

Produto	Massa		Teor (%)				Distribuição (%)			
	(g)	(%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Flutuado	454,1	93,9	54,5	4,62	1,26	9,3	98,3	92,3	61,0	72,7
Afundado	29,7	6,1	14,3	5,89	12,3	53,5	1,7	7,7	39,0	27,3
Total	483,8	100,0	52,0	4,70	1,94	12,0	100,0	100,0	100,0	100,0

De acordo com a Tabela 4, observa-se que:

- O produto afundado apresenta recuperação mássica de 6,1%;
- O teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no produto flutuado é de 9,3% e o teor de  $\text{TiO}_2$  é de 1,26%;
- O teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no produto flutuado é de 54,5% e sua recuperação metalúrgica é de 98,3%;

- O produto flutuado apresenta um teor maior de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  quando comparado à amostra do produto final da planta piloto, como se pode observar na Tabela 2;
- O produto flutuado apresenta um menor teor de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  quando comparado à amostra do produto final da planta piloto, como é observado na Tabela 2;
- O teor de  $\text{TiO}_2$  no produto afundado é de 12,30% e o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é de 53,5%;
- A recuperação metalúrgica de  $\text{TiO}_2$  no produto afundado é de 39,0%;
- A recuperação metalúrgica de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no produto afundado é de 27,3%;

O produto afundado foi encaminhado ao LCT para realização da difratometria de raios X. O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego do difratômetro de raios X, marca Philips, modelo MPD 1880.

A identificação das fases cristalinas, discriminadas na tabela abaixo, foi obtida por comparação do difratograma do produto afundado com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANanalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007). No anexo A, é apresentado o difratograma obtido (cor vermelha), onde são assinaladas as linhas de difração correspondentes às fases identificadas (cada fase em uma cor distinta).

Tabela 5 – Mineralogia do produto afundado

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula química</b>
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Zircão	$\text{Zr}(\text{SiO}_2)$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Caulinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
Rutilo	$\text{TiO}_2$
Anatásio	$\text{TiO}_2$

A amostra do produto afundado é constituída basicamente por oxi-hidróxidos de ferro (55%; goethita e hematita), hidróxidos de alumínio (25,5%; caulinita e gibbsita), óxidos de titânio (13,5%; anatásio e rutilo) e zircão (5,1%).

As fotos a seguir foram obtidas através do uso do estereomicroscópio, da marca Carl Zeiss, modelo STEMI SV8, localizado no Laboratório de Microscopia do LCT da EPUSP.

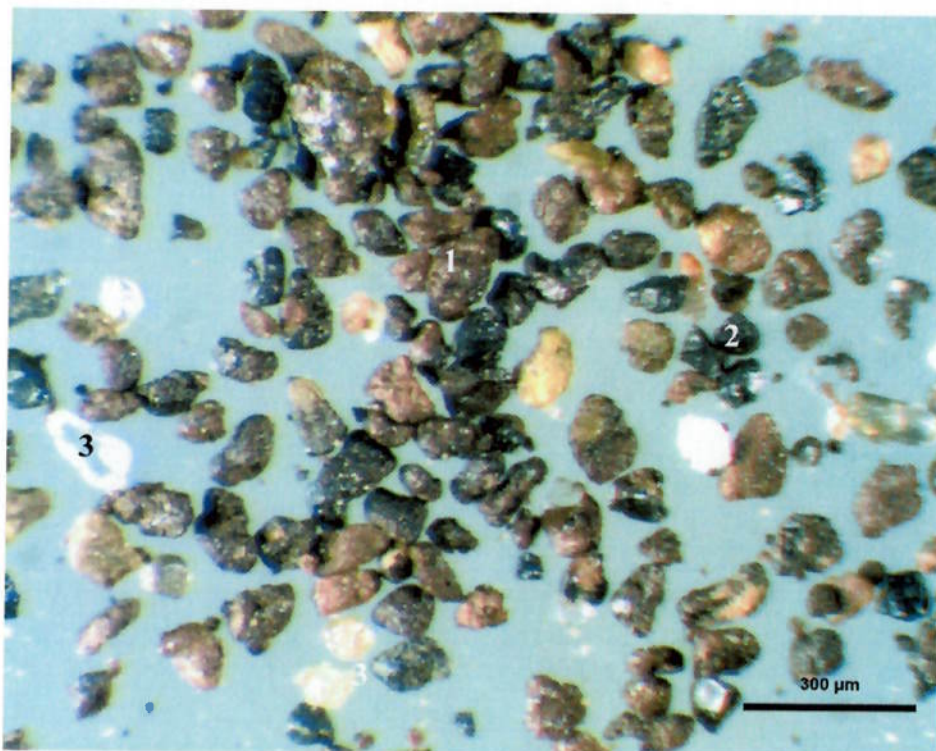


Figura 14 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto geral. Partículas, em sua maioria liberadas, de gibbsita (1), oxi-hidróxidos de Fe (2; magnetita, hematita e goethita) e zircão (3).

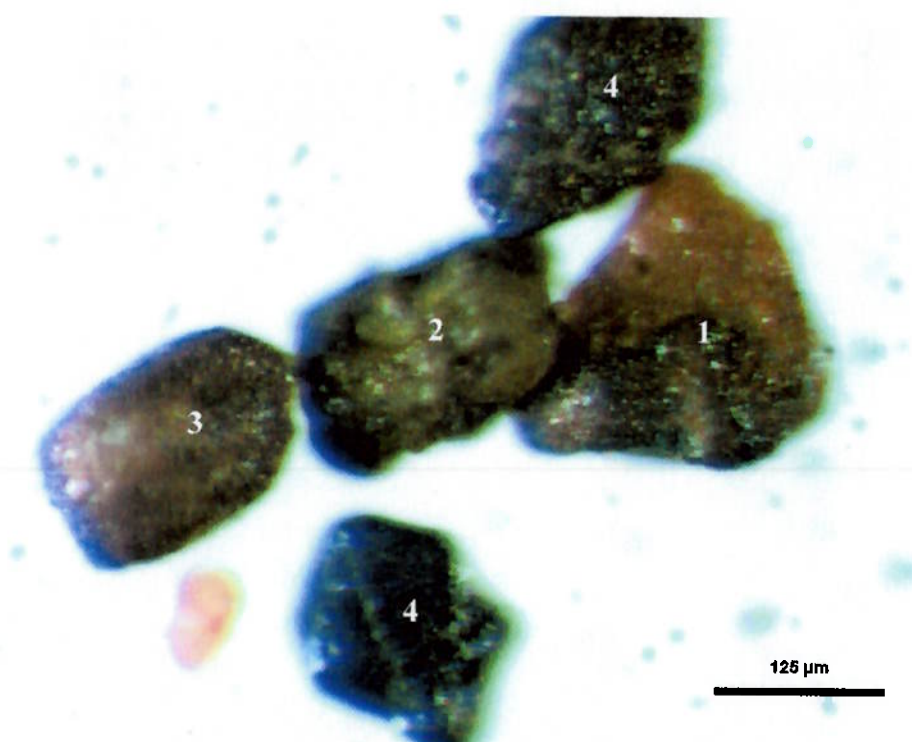


Figura 15 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto de detalhe. Partícula mista de rutilo com oxi-hidróxidos de Fe (1). Partículas liberadas de anatásio (2), rutilo (3) e oxi-hidróxidos de Fe (4).



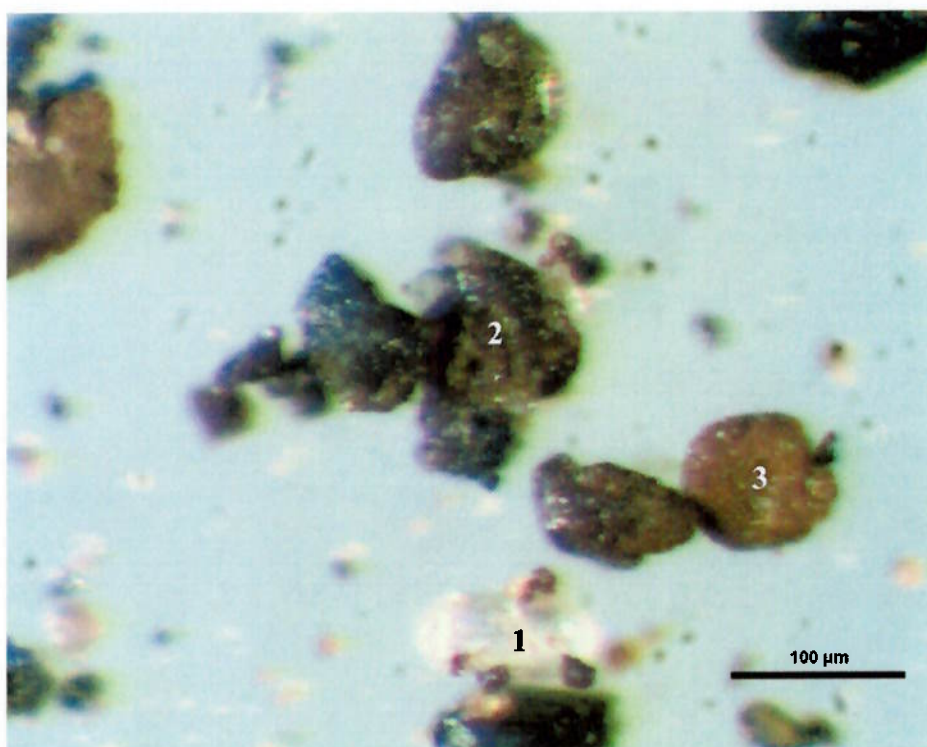


Figura 16 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto de detalhe. Partícula mista de zircão com rutilo (1). Partículas liberadas de oxi-hidróxidos de Fe (2) e hidróxidos de alumínio (3).



Figura 17 – Amostra: produto afundado, fração -0,297 mm. Aspecto de detalhe. Partículas liberadas de oxi-hidróxi de Fe (1) e zircão (2). Partícula mista de rutilo com zircão (3).

#### 4.4 Produtos gerados

Os produtos gerados após os ensaios realizados em laboratório são: o concentrado de bauxita, formado pelo *overflow* da deslamagem e pelo produto flutuado do ensaio de meio denso, e o concentrado de titânio e ferro, formado pelo produto afundado do ensaio de meio denso, conforme mostra a tabela a seguir.

Tabela 6 – Teor e distribuição para os produtos gerados

Produto	Massa (%)	Teor (%)				Distribuição (%)			
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Concentrado de bauxita	95,1	55,6	5,83	1,25	10,4	98,7	95,1	66,4	79,2
Concentrado de titânio e ferro	4,9	14,3	5,89	12,3	53,5	1,3	4,9	33,6	20,8
Total	100,0	53,6	5,83	1,78	12,5	100,0	100,0	100,0	100,0

Observando a Tabela 6, nota-se que:

- O concentrado de bauxita apresenta recuperação mássica de 95,1% e recuperação metalúrgica de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é de 98,7%;
- Os teores de TiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado de bauxita são menores do que os apresentados pela amostra do produto final da planta piloto, como se pode observar na Tabela 2;
- O concentrado de titânio e ferro apresenta recuperação mássica de 4,9%;
- A recuperação metalúrgica no concentrado de titânio e ferro de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é 1,3% e de SiO<sub>2</sub> é 4,9%;
- Os teores de TiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado de titânio e ferro são muito superiores aos apresentados pela amostra do produto final da planta piloto, como se pode observar na Tabela 2;
- A recuperação metalúrgica de TiO<sub>2</sub> no concentrado de titânio e ferro é de 33,6%;
- A recuperação metalúrgica de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no concentrado de titânio e ferro é de 20,8%;

## 5 Conclusões

A necessidade de se recuperar  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do produto final sem desvalorizá-lo foi atingida, pois observando a Tabela 6 nota-se que o concentrado de titânio e ferro apresenta teor de ambos muito superior ao mostrado na Tabela 2. Além disso, este concentrado apresenta uma mínima recuperação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em relação ao produto gerado pela planta piloto.

Além da possibilidade da geração de um sub-produto constituído basicamente por minerais portadores de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , a eliminação de parte destes minerais acarreta em um menor desgaste da parede da tubulação do mineroduto, principalmente na parte inferior, isto pelo fato destes minerais serem mais abrasivos e densos que os minerais portadores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ . Estes desgastes podem ocorrer na forma de riscamento e erosão da tubulação, através do movimento das partículas na parte interna do mineroduto, ou até mesmo na forma de um pequeno corte da superfície interna da tubulação, causada pelo impacto das partículas mais grosseiras, dependendo de sua forma e dureza, contra a superfície metálica de baixa dureza.

A seguir é mostrado um fluxograma simplificado da rota de estudo utilizada durante a elaboração deste trabalho visando à concentração de minerais pesados presentes na bauxita.

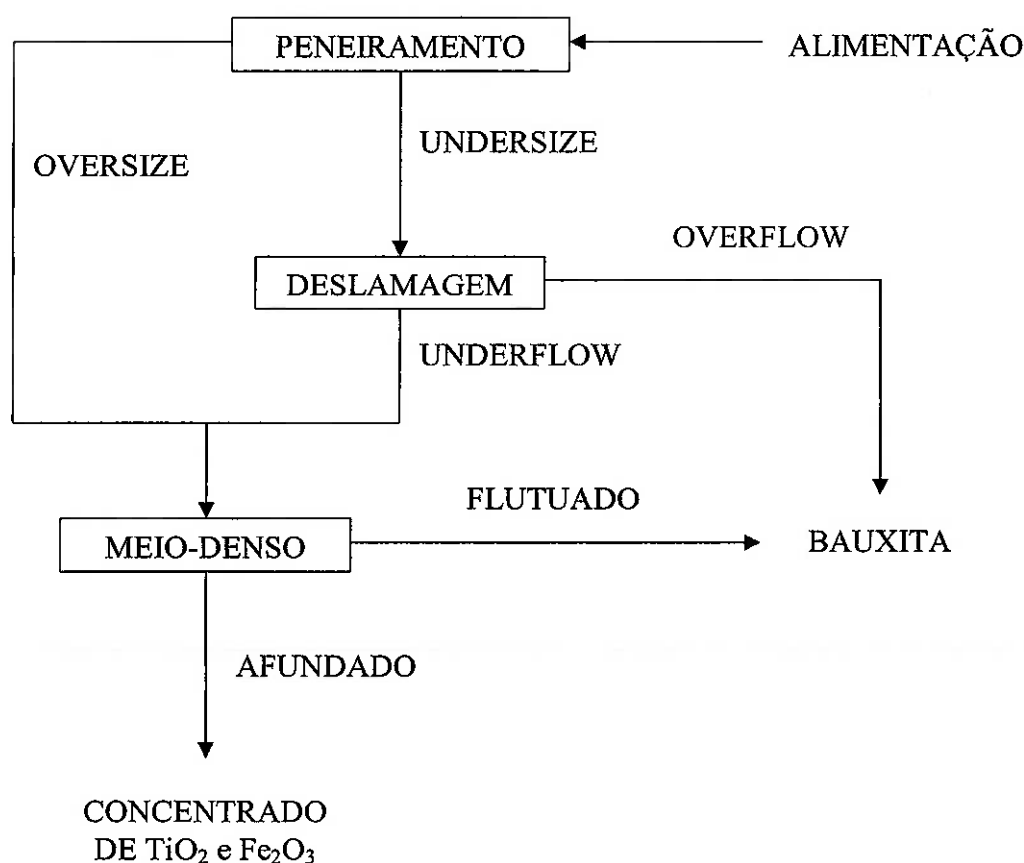


Figura 18 – Fluxograma da rota de estudo utilizada

A concentração em meio-denso com líquidos orgânicos, utilizada neste trabalho, se destaca por ser a mais precisa dentre todas aquelas utilizadas no beneficiamento gravimétrico. Entretanto, por apresentar um elevado custo de investimento e operação e além de uma alta toxicidade, sua aplicação industrial é extremamente limitada. Em substituição a este método

de concentração é possível estudar processos de separação gravimétrica que se caracterizam por apresentar baixo custo de operação e investimento, alta capacidade e recuperação, além da facilidade de operação e instalação em usinas. Atualmente, o equipamento que mais se adapta as condições mencionadas são as espirais concentradoras.

### 5.1 Espirais concentradoras

Embora sejam processos menos eficientes de separação gravimétrica, a concentração em espirais concentradoras encontra uma gama de aplicações no beneficiamento de minérios, sendo responsáveis por uma grande parte da produção mundial de ouro, estanho e areias pesadas contendo rutilo, ilmenita e zircão (DAVIES, 2001).



Figura 19 – Espiral concentradora simples (esquerda) e tripla (direita)

A ampla aplicação de espirais se deve não só ao seu baixo custo de investimento, mas também porque ela consegue lidar melhor com as variações da taxa de alimentação e concentração de sólidos que pode ocorrer em uma usina (APLAN, 1985).

Como podemos observar na Figura 19, uma espiral concentradora consiste basicamente de uma calha em forma de helicóide, de seção semicircular modificada e suportada por uma coluna central, na qual uma polpa de alimentação é introduzida por meio de uma caixa de alimentação, posicionada acima do equipamento.

A separação dos produtos contidos no fluxos da espiral concentradora é realizada de uma das seguintes maneiras:

- No final da calha, por meio de desviadores de fluxo ajustáveis;
- Ao longo da calha com a utilização de simples orifícios ou desviadores, como mostrado na figura abaixo.





Figura 20 – Detalhe do desviador de fluxo de uma espiral concentradora

Na concentração de partículas finas, menores que  $100\ \mu\text{m}$ , e muito finas, menores que  $20\ \mu\text{m}$ , como neste caso, as espirais competem com concentradores que são mecanicamente e operacionalmente mais complexos e que apresentam custos de operação e investimentos bem maiores que as espirais, como por exemplo, o concentrador Knelson, o concentrador Falcon e o MGS (Multi-Gravity Separator).

## 6 Trabalhos futuros

Após os resultados apresentados faz-se necessário um estudo com a mesma linha deste, porém realizado com amostras do produto final da planta industrial, para ratificar a possibilidade de concentração dos minerais portadores de titânio e ferro e avaliar a possibilidade da recuperação de ambos no produto final da planta industrial.

É indicado também o desenvolvimento de tal estudo em uma escala piloto, utilizando espirais concentradoras, a fim de concretizar a possibilidade de recuperação deste concentrado sem prejudicar o produto final enviado por mineroduto.

## 7 Referências bibliográficas

- APLAN, F. F. In: **SME Mineral Processing Handbook**. Littleton: N. L. Weiss, ed., 1985.
- CARVALHO, A.; BOULANGÉ, B.; MELFI, A.; LUCAS, Y. The Cataguases bauxite deposit. In: CARVALHO, A. et al. **Brazilian bauxites**. São Paulo: USP/FAPESP, 1997. p. 195-208.
- CHAVES, A. P.; NAKAE, T.; SALGADO, O. R. Bombeamento de polpas. In: CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. Vol. 1. 2ª Edição. São Paulo: Signus Editora, 2002. p. 141-150.
- DAVIES, P. O. J.; GOODMAN, R. H.; DESCHENPS, J. A. Recent developments in spiral design, construction and application. **Minerals Engineering**. Vol. 4, 1991. p. 437-456.
- GOES, M. A. C.; LUZ, A. B.; POSSA, M. V. **Amostragem**. CETEM/MCT. Disponível em: <[www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-180-00.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-180-00.pdf)>. Acesso em: 16 Nov. 2008.
- KAHN, H. **PMI2612 - Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Minerais I**. Notas de aula, 2005.
- KURUSU, R. S. **Flotação de finos de bauxita**. 43p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- Mineração Rio do Norte. **Perfil Litológico de Jazida**. Disponível em: <[http://www.mrn.com.br/index\\_1024.htm](http://www.mrn.com.br/index_1024.htm)>. Acesso em: 04 Nov. 2008.
- NETO, A. A. A. Titânio. **Sumário Brasileiro Mineral**. DNPM, 2008. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/titanio.pdf>>. Acesso em: 13 Out. 2008.
- Outotec. **Spiral Concentrators**. Disponível em: <<http://www.outotec.com>>. Acesso em: 22 Nov. 2008.
- SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. Concentração em calhas e espirais. **Beneficiamento Gravimétrico**. 1ª Ed. Rio Grande do Sul: UFRGS Editora, 2005, p. 339-410.
- SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. Bauxita. In: LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 279-303.
- SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; BALTAR, C. A. M. Minerais de Titânio. In: LUZ, A. B.; LINS, F. F. **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. p. 655-676.

## ANEXO A – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X E FASES IDENTIFICADAS DO PRODUTO AFUNDADO

