



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

**AVALIAÇÃO DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO, DOSAGEM DE
REAGENTES E GRANULOMETRIA PARA FLOTAÇÃO DE FOSFATO
EM COLUNA**

LUÍS ALBERTO SILVA

ARAXÁ
2015

LUÍS ALBERTO SILVA

**AVALIAÇÃO DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO, DOSAGEM DE
REAGENTES E GRANULOMETRIA PARA FLOTAÇÃO DE FOSFATO
EM COLUNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Michelly dos Santos Oliveira.

ARAXÁ

2015

LUÍS ALBERTO SILVA

AVALIAÇÃO DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO, DOSAGEM DE REAGENTES
E GRANULOMETRIA PARA FLOTAÇÃO DE FOSFATO EM COLUNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do
título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 17/08/2015

Banca Examinadora:

Michelly

Profª. Drª. Michelly dos Santos Oliveira – Presidente da Banca Examinadora
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientadora

Leandro Henrique Santos

Prof. Me. Leandro Henrique Santos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Marcílio Prado Fontes

Prof. Esp. Marcílio Prado Fontes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Sandro Barbosa e Silva

Prof. Sandro Barbosa e Silva
Instituto Federal do Triângulo Mineiro

Aos meus pais Alberto e Dulce
e meus irmãos Mychelle e Dierly.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, dono da minha vida e por ter me dado saúde pra chegar até aqui.

Em seguida, meu total agradecimento e gratidão aos maiores responsáveis por essa conquista: minha família.

Minha rainha, não há um dia em que eu não me lembre da senhora e sinta sua falta ao meu lado. É uma dor irreparável, dilacera e não passa com o tempo. Com sua ausência, luz se fez escuridão, alegria se tornou tristeza e um vazio existencial tomou conta de mim. Porém, com o passar dos anos, essa mistura de sentimentos deu lugar a saudade e lembrança dos momentos que pude compartilhar com a senhora. Hoje, dedico essa vitória à você, que mesmo tão longe fisicamente, sinto-a tão perto em meus sonhos e em meu coração, sempre cumprindo com seu papel de amar, cuidar e me proteger. Obrigado, meu anjo!

Pai, você sempre esteve em todos os momentos por mim, sendo meu melhor amigo e me dando apoio incondicional mesmo quando muitas vezes foi tão difícil. Obrigado por me mostrar o caminho certo a trilhar e me deixar com livre arbítrio para escolher o melhor pra mim. Exemplo de humildade, superação e caráter se fazem presentes em sua vida e permanço fiel aos seus ensinamentos. Mas, o meu maior agradecimento é ter você como meu pai, e em meio a esse turbilhão de momentos ruins, o senhor me fez renascer, recuperar o amor pela vida e por mim mesmo e ter vontade de lutar para me reerguer. Você é a razão da minha vida, e me mostra todos os dias que super-heróis de verdade não são como os de revista em quadrinhos, que possuem poderes, são invencíveis e não existem de verdade. Mas pelo contrário, são humanos, reais, de coração e com razão diária para lutar por aqueles que tanto ama. Obrigado!

Aos meus irmãos e padrinhos Dierly e Mychelle.

A vida nos presenteia com irmãos para que possamos aprender desde cedo a essência da fraternidade e cumplicidade. Pedro Bial diz: “Seja legal com seus

irmãos. Eles são a melhor ponte com o seu passado e possivelmente quem vai sempre mesmo te apoiar no futuro”. Portanto, se cheguei até aqui é porque tenho vocês comigo, esse diploma é grande parte de vocês. Amo vocês!

Aos amigos.

Gostaria de agradecer também, aos meus amigos e amigas, em especial minha colega de sala Luciana que auxiliou-me durante toda a monografia. Mesmo distantes, todos estávamos buscando alcançar nossos sonhos seja em Patos ou em outras cidades, mas sempre buscando tempo para reencontros, palavras amigas, ligações intermináveis. O tempo correu sem me dar conta de quanta coisa se passou, mas o importante é que continuamos juntos aqui.

À empresa.

O meu agradecimento à Vale Fertilizantes, por me fornecer o material para a realização deste trabalho de conclusão de curso, bem como a realização de algumas análises químicas.

Aos mestres.

Gratidão a todos os professores que passaram pela minha vida, concebendo-me conhecimento. Gostaria de destacar a professora Michelly por me guiar e contribuir para minha formação profissional rumo ao meu trabalho de conclusão de curso, bem como ao professor Alexandre Linhares pelo empenho e determinação na montagem da coluna de flotação.

RESUMO

A flotação é um dos métodos de concentração mais empregados na indústria mineral, resultando no aproveitamento de minérios. A coluna de flotação é um dos equipamentos de destaque neste processo. A obtenção de melhores concentrados, maior rendimento metalúrgico e o menor investimento de capital justificam tal importância. O sucesso na sua utilização depende de alguns fatores dentre os quais destacam-se a definição de parâmetros obtidos em testes de laboratório, como o estudo e entendimento da dosagem de reagentes, tempo de condicionamento e granulometria do minério. Com relação à dosagem ótima de coletor, escolheu-se a de 250 g/t dentre os testes realizados, pois obteve-se teor no concentrado de 29,25% e uma recuperação metalúrgica de 71,19%. Dentre os testes variando-se os tempos de condicionamentos mereceu destaque o tempo de condicionamento do depressor de 5 minutos e de coletor de 1 minuto, com teor no concentrado de 29,25% e uma recuperação metalúrgica de 71,19%. Com relação à granulometria, o melhor resultado foi na fração granulométrica de -80# +325# que corresponde à alimentação da coluna do circuito de ultrafinos do CMT.

Palavras-chave: flotação, granulometria, coluna, reagentes, concentração.

ABSTRACT

The flotation is one of the most used methods of concentration performed in the mineral industry, resulting in rational use of minerals. The flotation column is one of the equipments of great value in this process. Achieving better concentrations, greater metallurgical efficiency and less capital investment are some of the reasons for such importance. Successful use depends on some factors among which include the definition of parameters obtained in laboratory tests, such as the study and understanding of reagents dosage, conditioning time and ore grain size. With regards to the optimum dosage of collector, the 250 g/t was chosen among the tests conducted, once 29,25% of concentration level have been reached as well as 71,19% of metallurgical recuperation. When varying the conditioning times during the tests, the conditioning time of both the depressor of 5 minutes and the collector of 1 minute were both highlighted, with concentration level of 29,25% and a metallurgical recuperation of 71,19%. In relation to size distribution, the best result was found in the size fraction of -80# +325# that corresponds to the feed column of CMT ultrathin circuit.

Keywords: flotation, grain size, column, reagents, concentration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

A) FIGURAS

FIGURA 3.1 – APATITA	7
FIGURA 3.2 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA CÉLULA MECÂNICA E SUAS ZONAS	21
FIGURA 3.3 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA CÉLULA PNEUMÁTICA.....	22
FIGURA 3.4 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA COLUNA DE FLOTAÇÃO.....	25
FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA DA USINA DE CONCENTRAÇÃO DO CMT.....	32
FIGURA 4.2 – CONJUNTO DE PENEIRAS	33
FIGURA 4.3 – PENEIRADOR VIBRATÓRIO.....	34
FIGURA 4.4 – PENEIRADOR SUSPENSO	35
FIGURA 4.5 – MIXER	36
FIGURA 4.6 - PICNÔMETRO.....	38
FIGURA 4.7 – COLUNA DE FLOTAÇÃO	40
FIGURA 4.8 – CÉLULA MECÂNICA DENVER.....	43
FIGURA 4.9 – PHMETRO UTILIZADO NOS TESTES.....	44

B) QUADROS

QUADRO 3.1 – TÉCNICAS PARA CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS	9
---	---

C) GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA PENEIRAMENTO A SECO	51
GRÁFICO 5.2 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA O PENEIRAMENTO A ÚMIDO COM E SEM ATRIÇÃO.....	53
GRÁFICO 5.3 – CURVA GRANULOMÉTRICA PARA O GRANULÔMETRO A LASER CILAS 1090.....	54
GRÁFICO 5.4 – RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE COLETOR	58
GRÁFICO 5.5 – TEOR DE P_2O_5 NO CONCENTRADO E REJEITO FINAL EM FUNÇÃO DA DOSAGEM DE COLETOR..	59
GRÁFICO 5.6 – RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO COLETOR..	61
GRÁFICO 5.7 – TEOR DO CONCENTRADO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CONDICIONAMENTO DO COLETOR	62
GRÁFICO 5.8 – RECUPERAÇÃO METALÚRGICA EM FUNÇÃO DAS DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	63
GRÁFICO 5.9 – TEOR DO CONCENTRADO EM FUNÇÃO DAS DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS.....	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – DOSAGEM DE DEPRESSOR E COLETOR E SEUS RESPECTIVOS TEMPOS DE CONDICIONAMENTO	44
TABELA 4.2 – PLANEJAMENTO DOS TEMPOS DE CONDICIONAMENTO	47
TABELA 4.3 – FLOTAÇÃO PARA DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS.....	47
TABELA 5.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS AMOSTRAS DA ALIMENTAÇÃO.....	49
TABELA 5.2 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PENEIRAMENTO A SECO.....	50
TABELA 5.3 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PENEIRAMENTO A ÚMIDO SEM ATRIÇÃO.....	51
TABELA 5.4 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PENEIRAMENTO A ÚMIDO COM ATRIÇÃO	52
TABELA 5.5 – ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO GRANULÔMETRO A LASER CILAS 1090.	54
TABELA 5.6 – DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DA AMOSTRA DE MINÉRIO	55
TABELA 5.7 – CALIBRAÇÃO DOS PICNÔMETROS	55
TABELA 5.8 – TESTE DE PICNOMETRIA I	56
TABELA 5.9 – TESTE DE PICNOMETRIA II	57
TABELA 5.10 – TEORES DO CONCENTRADO, REJEITO E RECUPERAÇÕES MÁSSICAS E METALÚRGICAS PARA AS DIFERENTES DOSAGENS DE COLETOR.....	58
TABELA 5.11 - TEORES DO CONCENTRADO, REJEITO E RECUPERAÇÕES MÁSSICAS E METALÚRGICAS PARA OS DIFERENTES TEMPOS DE CONDICIONAMENTO DE COLETOR E DEPRESSOR.....	60
TABELA 5.12 - TEORES DO CONCENTRADO E RECUPERAÇÕES MÁSSICAS E METALÚRGICAS PARA AS DIFERENTES FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMC	carboximetilcelulose
CMT	Complexo de Mineração de Tapira
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X
MIBC	metilisobutilcarbinol

LISTA DE SÍMBOLOS

$d_{\text{água}} (T=x^{\circ}C)$	densidade da água na $T_{\text{água}}$
$d_{\text{água}}$	densidade da água
d_{min}	densidade do minério
$m_{\text{água}}$	massa de água utilizada
$m_{\text{água.cond}}$	massa de água do condicionamento
$m_{\text{água.dil}}$	massa de água de diluição
$m_{\text{água.flot}}$	massa de água da flotação
$m_{\text{água+m}}$	massa de água adicionada ao picnômetro com amostra
m_{amostra}	massa da amostra
m_{col}	massa de coletor
m_{dep}	massa de depressor
m_{min}	massa de minério
m_{p}	massa de polpa
$m_{\text{pic+amostra}}$	massa picnômetro com amostra
$m_{\text{pic+amostra+água}}$	massa picnômetro com amostra e água
$m_{\text{pic.vazio}}$	massa do picnômetro vazio
$m_{\text{pic+água}}$	massa do picnômetro com água
$m_{\text{p.cond}}$	massa de polpa do condicionamento
$m_{\text{p.flot}}$	massa de polpa da flotação
m_{seca}	massa seca
$m_{\text{sól}}$	massa de sólidos
$m_{\text{sol.col}}$	massa da solução de coletor
$m_{\text{sol.dep}}$	massa da solução de depressor
m_{u}	massa úmida
$T_{\text{água}}$	temperatura da água
$U_{\%}$	umidade em %
$V_{\text{água}}$	volume de água adicionado ao picnômetro
V_{min}	volume de minério
V_{polpa}	volume de polpa
$V_{\text{real.pic}}$	volume real do picnômetro

$\%_s$	% de sólidos
$\%_{s.cond}$	% de sólidos no condicionamento
$\%_{s.flot}$	% de sólidos na flotação
ζ_{col}	dosagem de coletor
ζ_{dep}	dosagem de depressor
ρ_{polpa}	densidade de polpa
$R_{m\acute{a}s}$	recuperação mássica
R_{met}	recuperação metalúrgica
C	massa do concentrado
A	massa da alimentação
c	teor do concentrado
a	teor da alimentação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	O BEM MINERAL	4
3.1.1	GEOLOGIA	5
3.1.2	APATITA	6
3.2	O TRATAMENTO DE MINÉRIOS	8
3.2.1	A FLOTAÇÃO	9
3.3	REAGENTES	10
3.3.1	COLETORES	10
3.3.2	ESPUMANTES	14
3.3.3	MODIFICADORES OU REGULADORES	16
3.4	CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIOS FOSFÁTICOS	19
3.5	EQUIPAMENTOS DE FLOTAÇÃO	20
3.5.1	CÉLULAS MECÂNICAS	21
3.5.2	CÉLULAS PNEUMÁTICAS	22
3.5.3	COLONAS DE FLOTAÇÃO	22
3.6	VARIÁVEIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO	26
3.6.1	DOSAGEM DE REAGENTES	26
3.6.2	GRANULOMETRIA	27
3.6.3	TEMPO DE CONDICIONAMENTO	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	AMOSTRAS	31
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DA ALIMENTAÇÃO	32
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	32
4.2.2	CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	33
4.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	37
4.3.1	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E SECAGEM DO MINÉRIO	37
4.3.2	HOMOGENEIZAÇÃO E QUARTEAMENTO	38
4.3.3	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO DOS SÓLIDOS – PICNOMETRIA	38
4.4	DESCRIÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL	40
4.5	REAGENTES	41
4.5.1	SAPONIFICAÇÃO DO ÓLEO DE SOJA	41
4.5.2	GELATINIZAÇÃO DO FUBÁ DE MILHO	42
4.6	TESTES DE FLOTAÇÃO EM CÉLULA MECÂNICA	43
4.6.1	DOSAGEM DE REAGENTES	44
4.6.2	TEMPO DE CONDICIONAMENTO	46

4.7	TESTES DE FLOTAÇÃO EM COLUNA	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA DA ALIMENTAÇÃO	49
5.1.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	49
5.1.2	CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA	49
5.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	55
5.2.1	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E SECAGEM DO MINÉRIO	55
5.2.2	ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO DOS SÓLIDOS – PICNOMETRIA	55
5.3	TESTES DE FLOTAÇÃO EM CÉLULA MECÂNICA	57
5.3.1	DOSAGEM DE REAGENTES	57
5.3.2	TEMPO DE CONDICIONAMENTO	60
5.4	TESTES DE FLOTAÇÃO EM COLUNA	62
6	CONCLUSÃO	65
7	SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

As reservas mundiais de fósforo somam aproximadamente 105 bilhões de toneladas e sua produção mundial é de aproximadamente 140 milhões de toneladas métricas por ano (SILVA, 2005). No Brasil, estima-se que as reservas de fosfato apresentam 320 milhões de toneladas de P_2O_5 , ocupando a 11ª posição mundial equivalente a 0,6% do total (SANTOS, M. A., 2010).

Com a crise do petróleo iniciou-se no Brasil a busca por desenvolvimento de tecnologia para aproveitamento das jazidas de apatita, a fim de que se tornasse um país autossuficiente na produção de fertilizantes fosfatados (SILVA, 2005). Porém, com uma intensa demanda e uma dificuldade de acompanhar o crescimento da agropecuária, o mercado nacional de fertilizantes importa cerca de 50% de concentrado fosfático oriundo de países como Marrocos, Argélia e Israel tornando-se assim um país importador, ocupando o 4º lugar numa escala mundial (SAAB; PAULA, 2008 *apud* SANTOS, M. A., 2010, p. 2).

A maior parte dos depósitos brasileiros são de origem ígnea e, por possuírem uma complexa mineralogia associada a um baixo teor, apresentam dificuldades no beneficiamento desse minério, bem como um elevado custo (SANTANA, 2011). Por esse motivo, nota-se uma grande necessidade de melhorias no processo de concentração para um melhor aproveitamento das reservas fosfáticas (GUIMARÃES *et al.*, 2004 *apud* SANTANA, 2007, p. 3).

O CMT está localizado em Tapira, estado de Minas Gerais, a 35 km da cidade de Araxá, ocupando 78.000.000 m² e contempla atividades de lavra a céu aberto, beneficiamento de minérios através de flotação, operação de mineroduto e instalações de suporte (ARAUJO *et al.*, 2002).

Com relação ao processo de concentração, o principal método utilizado denomina-se flotação. Tem como importância o fato de que consegue-se, de forma seletiva, hidrofobizar a superfície das partículas minerais de interesse quando

devidamente condicionada, utilizando-se de reagentes específicos com funções de coletor, depressor e modulador (SILVA, 2005).

Dentre os equipamentos de flotação, as colunas têm ganhado destaque em relação às máquinas convencionais, principalmente quando refere-se à obtenção de melhores teores no concentrado, menores custos de capital, operação e energia (OLIVEIRA, 2004).

Por se tratar de um processamento mineral complexo, a flotação contempla inúmeros fenômenos físico-químicos e hidrodinâmicos cuja recuperação, teores e seletividade são dependentes de variáveis físicas, químicas, operacionais e de equipamentos (ASLAN; FIDAN, 2008 *apud* SANTANA, 2011, p. 4).

Por esse motivo, justifica-se o presente trabalho, através da busca de um melhor entendimento de algumas das variáveis do processo, dentre elas, o tempo de condicionamento, a dosagem de coletor e a granulometria na etapa de flotação em coluna utilizando-se do minério oriundo do circuito de ultrafinos do CMT. Os testes foram realizados alterando-se as variáveis acima e, a partir dos resultados obtidos pelas análises químicas, analisaram-se as recuperações de P_2O_5 no concentrado final bem como seus teores.

Além de que, o trabalho contribuiu para a determinação dos principais parâmetros utilizados na coluna de flotação, visto que, tratou-se dos primeiros testes realizados no equipamento após sua implantação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Determinar por testes de bancada, um padrão ótimo na flotação de minério fosfático para as seguintes variáveis: granulometria, tempo de condicionamento e dosagem de reagentes.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Estabelecer condições de coleta seletiva, através dos reagentes, para obtenção de um concentrado com teor e recuperação desejados.
- ✓ Estimar uma faixa ótima de granulometria.
- ✓ Determinar um tempo de condicionamento ideal capaz de permitir a efetiva adsorção dos reagentes sobre as partículas minerais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O Bem Mineral

“O fósforo, símbolo químico ”P”, é um elemento pertencente ao grupo dos metalóides, integrante do grupo V da Tabela Periódica dos Elementos, com número atômico 15”. (SOUZA; FONSECA, 2009, v.29, p.546).

É encontrado com abundância na natureza, sendo classificado como o décimo elemento mais comum, tendo como proporção: 1050 ppm na crosta terrestre, teores médios de 8690 em carbonatitos, 650 ppm em granitos e 390 ppm em diabásios (HENRICH, 1966; MASON, 1971 *apud* LOUREIRO *et al.*, 2008, p.141).

Em virtude de sua alta reatividade, o fósforo não ocorre na natureza livremente, sendo encontrado em combinação com diversos elementos em mais de 300 minerais, principalmente na forma de fosfatos (SANTANA, 2011).

A importância do fósforo se dá em conjunto com o nitrogênio e potássio, pois são os constituintes primordiais à vida vegetal e animal. De acordo com Oliveira (2007, p. 6):

Nos seres vivos animais, o fósforo é constituinte do tecido nervoso, do protoplasma celular, dos dentes, dos ossos. Além disso, faz parte da urina, do sangue e de outros líquidos corporais. Nas plantas, estimula o crescimento das raízes durante a floração, a formação de sementes e aceleração da maturação, além de desempenhar um papel específico na produção, armazenamento e fornecimento de energia nos processos de respiração e fotossíntese.

É um elemento que não pode ser renovado ou substituído por outro capaz de reproduzir suas funcionalidades, sendo, portanto absolutamente imprescindível.

O fósforo apresenta uma infinidade de usos e aplicações que determinam a demanda da rocha fosfática. Porém é inicialmente na agricultura e, por conseguinte, na indústria de fertilizantes em que ele se destaca. Dentre outras finalidades estão às indústrias de alimentos e bebidas, ração animal, sabões e detergentes (SOUZA; FONSECA, 2010 *apud* PAIVA, 2011, p.3).

3.1.1 Geologia

As associações mineralógicas e as concentrações nas ocorrências minerais são determinadas por processos geológicos ocorridos durante a formação dos depósitos fosfáticos, há aproximadamente 70 milhões de anos (SANTANA, 2007).

Isso resultou na facilidade ou dificuldade de lavra das minas, possibilitando ou não o processo de concentração industrial dos fosfatos ocorrentes e até mesmo da aplicação direta na agricultura (SANTANA, 2007).

Denominam-se rochas fosfáticas àquelas ricas em minerais do grupo da apatita apresentando teores de P_2O_5 oscilando entre 5 e 22% ou cujo concentrado fosfático atinja teores de P_2O_5 variando entre 32 e 38%. O concentrado fosfático ou concentrado apatítico é o produto da exploração e do beneficiamento da rocha fosfática (LOUREIRO *et al.*, 2008).

A distribuição aproximada das reservas mundiais de fosfato atende à seguinte especificação: 75% do total correspondem aos depósitos de origem sedimentar; 15 a 20% do total representam aos depósitos de origem ígnea e de 2 a 3% participam os depósitos biogénéticos (ABOUZEID, 2008 *apud* SANTOS, M. A., 2010, p.11).

No território brasileiro, aproximadamente 80% das jazidas fosfáticas naturais são de origem ígnea, contendo rocha carbonatítica e minerais micáceos de maneira acentuada (SOUZA; FONSECA, 2009, v.29, p.546).

Os fosfatos oriundos de depósitos ígneos, além de apresentarem boa cristalização e baixa área superficial específica, exibem maior flotabilidade em relação aos fosfatos sedimentares, devido às distinções nas suas propriedades físicas e composição química (MISHRA, 1979; MISHRA, 1982; EL-SHALL, 2004 *apud* OLIVEIRA, 2007, p. 8).

Logo, nestes depósitos magmáticos, há grande necessidade de operações de lavra mais seletivas e processos de concentração otimizados, visto que o fósforo estará presente como fluorapatita que possui pequeno grau de substituição.

Enquanto nos depósitos sedimentares, o fósforo está presente como fosforito com mesma fórmula química da apatita, necessitando de um processo de beneficiamento simplificado devido ao seu menor grau de cristalização e maior grau de substituição (GUIMARÃES, 1997; SILVA E LOPES, 1991 *apud* OLIVEIRA, 2007, p. 7).

Segundo Loureiro *et al.* (2008), no Brasil, os materiais fosfáticos ocorrem em seis ambientes geológicos distintos:

- ✓ Magmáticos – Complexos alcalino-carbonatíticos mesozóicos em que os minérios de mais elevados teores se formaram por enriquecimento supergênico de carbonatitos apatíticos e/ ou piroxenitos apatíticos: Catalão-GO; Tapira-MG; Araxá.-MG; Jacupiranga-SP; Anitápolis-SC; Iperó-SP; Patrocínio-MG; Cajati-SP; Ovidor-GO.
- ✓ Ortomagmáticos – Complexos alcalino-carbonatíticos, proterozóicos, metamorfizados, nos quais ocorreram também concentrações residuais: Angico dos Dias-BA e Maecuru-PA.
- ✓ Metassedimentares – Nas bacias intracratônicas de idade proterozóica: Patos de Minas-MG; Irecê-BA; Lagamar-MG e Itataia- CE.
- ✓ Sedimentogênicos – Nas bacias marginais mesozóicas: Paulista/Igarassu-PE, Goiana-PE.
- ✓ Lateríticos – Materiais fosfatados aluminosos resultantes da lateritização de rochas sedimentares e metassedimentares, com teores elevados de fósforo: Tauira e Pirocáua-MA.
- ✓ Orgânicos – Constituídos por excrementos de aves (guano): Ilha Rasa-PE.

3.1.2 Apatita

Com uma mineralogia extremamente diversificada, a apatita é considerada a principal fonte natural do fósforo e pode estar presente em quase todos os ambientes geológicos. A densidade desse mineral está entre 3,1 e 3,2 g/cm³ e pode ser visualizado na FIG. 3.1 (OLIVEIRA, 2004).

Figura 3.1 – Apatita



Fonte: MACHADO *et al.*, 2015.

Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>

Em questão da coloração, podem apresentar as tonalidades marrom, verde, azul ou violeta. (LOUZADA, 2008 *apud* SANTOS, 2012, p.7). E com relação aos seus cristais, podem ser prismáticos, tabulares, granulares ou compactos (SANTOS, M. A., 2010).

A representação da apatita é dada pela fórmula geral: $A_{10}(XO_4)_6Z_2$, onde o A pode ser substituído por um cátion alcalino (Ca, Pb, Sr, Zn, Na, Be, Cd, ETR, Sc, Mg, Mn), o X por um ânion trivalente (P, Si, S, C, Cr, As, V) e o Z por um ânion monovalente (F, Cl, OH, Br) (BARROS, 2005).

O vasto número de substituições típicas na composição química das apatitas provoca variação nas propriedades de superfície de um minério para outro resultando em relações químicas e estruturas complexas somadas à diferentes respostas à flotação de apatitas de diferentes localidades. (HANNA; SOMASUNDARAN, 1976 *apud* OLIVEIRA, 2007, p.9).

Com relação aos depósitos de origem ígnea, os principais minerais-minérios de fosfato são a fluorapatita [$Ca_5(PO_4,CO_3,OH)_3 (F,OH)$], a hidroxiapatita [$Ca_5(PO_4)_3 (OH,F)$] e, com menor frequência, a cloroapatita [$Ca_5(PO_4)_3 (Cl,OH)$]. Em grande parte dos depósitos de origem sedimentar há predominância de carbonatoapatita [$Ca_5(PO_4,CO_3)_3 (OH,F)$] e carbonato-fluorapatita [$Ca_5(PO_4,CO_3)_3 (F,OH)$] (SANTOS, 2012).

3.2 O tratamento de minérios

O beneficiamento de minérios trata-se de operações realizadas aos bens minerais com o intuito de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies mineralógicas ou a sua forma, preservando as características químicas ou físicas dos minerais (LUZ; LINS, 2004).

Grande parte dos metais e outros bens minerais necessitam de um prévio beneficiamento de seus minérios, a fim de que se obtenham produtos com particularidades que se adequem aos processos posteriores, como a metalurgia extrativa ou a processos químicos (OLIVEIRA; SOUZA, 2008).

As fases operatórias do tratamento de minérios são: a fragmentação, classificação, concentração, separação sólido-líquido e operações auxiliares.

A concentração consiste de operações que buscam o enriquecimento de um minério, utilizando-se de suas características físicas e físico-químicas. A separação entre os minerais úteis e os de ganga se faz através de operações de concentração, cujo êxito está ligado à três requisitos básicos: liberabilidade, separabilidade dinâmica e diferenciabilidade (OLIVEIRA; SOUZA, 2008).

É imprescindível que os minerais estejam fisicamente liberados para ocorrer a concentração de um minério. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica. Os minérios são submetidos a operações de redução de tamanho denominadas de cominuição, isto é, britagem e moagem. Tais operações são responsáveis pela liberação do mineral de interesse. Após a redução de tamanho e a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser conduzidos às operações de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito (LUZ; LINS, 2004).

Considerando-se as propriedades que diferenciam as espécies minerais envolvidas, a separação dinâmica consiste na criação de um mecanismo que atue de forma distinta no mineral minério e na ganga, separando-os (JÚNIOR, 2010).

A diferenciabilidade consiste na base da seletividade do método, e leva em conta a propriedade diferenciadora (cor, densidade, forma e tamanho, carga elétrica, susceptibilidade magnética e propriedades de superfície) (GUIMARÃES, 1995 *apud* OLIVEIRA, 2004, p. 6). As principais técnicas utilizadas na concentração de minerais são apresentadas no QUADRO 3.1.

Quadro 3.1 – Técnicas para concentração de minerais

TÉCNICAS PARA CONCENTRAÇÃO DE MINERAIS	
PROPRIEDADES	MÉTODOS
Ópticas	Escolha óptica (manual ou automática)
Densidade	Meio denso, jigues, mesas, espirais, cones, ciclones, ciclones de meio denso
Forma, Peso Específico	Idem à densidade
Susceptibilidade Magnética	Separação magnética
Condutividade Elétrica	Separação eletrostática
Radioatividade	Escolha com contador
Textura-Friabilidade	Cominuição, classificação, hidroseparação, peneira
Reatividade Química	Hidrometalurgia
Reatividade de Superfície	Flotação, agregação ou dispersão seletiva, eletroforese, aglomeração esférica

Fonte: OLIVEIRA, 2004, p. 6

3.2.1 A flotação

A flotação é uma das operações de concentração de minerais mais eficiente e seletiva, e que tem a reatividade de superfície como propriedade diferenciadora, possibilitando a separação entre minério e ganga (OLIVEIRA, 2004). As propriedades de superfície (hidrofobicidade/hidrofilicidade) das espécies minerais são a base para o processo de separação por flotação, possibilitado pela adição de reagentes específicos.

É um dos processos mais utilizados na indústria mineral, possibilitando o aproveitamento de minérios complexos e/ou de baixo teor de forma econômica e com eficiência no rendimento (CALDARA, 2010).

3.3 Reagentes

A maior parte dos minerais existentes são naturalmente hidrofílicos, ou seja, são facilmente atraídos pela água e, portanto, não flotáveis. Apenas alguns minerais são exceção e possuem uma hidrofobicidade natural como talco, molibdenita, grafita entre outros (PERES; ARAÚJO, 2006 *apud* SANTOS, M. A., 2010, p.23).

A exequibilidade econômica da flotação está ligada aos reagentes utilizados para adequar as propriedades de superfície, no que se refere à distinção da hidrofobicidade dos componentes de uma mistura de minerais-minério e minerais de ganga. A melhoria no processo se dá através da adição destes reagentes que atuarão na superfície dos minerais presentes promovendo uma separação seletiva (SANTANA, 2011).

Existem três grupos de reagentes de flotação principais, e são subdivididos de acordo com suas funções no processo. São eles (OLIVEIRA, 2004):

- ✓ Coletores: possui como principal função promover características hidrofóbicas às superfícies dos minerais;
- ✓ Espumantes: proporcionam uma espuma estável e um tamanho das bolhas adequado para conduzir os minerais ao concentrado;
- ✓ Modificadores ou reguladores: além de aumentar a seletividade, promovem a adequação da ação efetiva do coletor.

3.3.1 Coletores

Para promover uma separação eficaz das partículas a serem flotadas deve-se levar em consideração o grau de hidrofobicidade das mesmas. Portanto, os coletores são os principais reagentes responsáveis por tornar hidrofóbica a superfície naturalmente hidrofílica de um mineral, possibilitando a adesão da bolha na partícula (SANTOS, M. A., 2010).

São compostos orgânicos classificados como heteropolares, em razão de possuírem em sua estrutura uma parte iônica, de natureza polar, que adsorverá na

superfície do mineral, e outra covalente, composta por uma cadeia orgânica que fornece a hidrofobicidade ao mineral devido às características elétricas das ligações (SANTANA, 2011).

À medida que os coletores são adicionados à polpa, a superfície que a partícula mineral apresenta não é mais a sua original, e sim, uma recoberta desta substância hidrofóbica, pois os coletores depositam-se seletivamente na superfície do mineral, recobrando-o na forma de um filme (LUZ *et al.*, 2004 *apud* SANTANA, 2007, p.25).

Os coletores podem ser classificados segundo a sua carga iônica em: catiônicos e aniônicos.

3.3.1.1 *Coletores Catiônicos*

Os coletores catiônicos correspondem ao grupo das aminas e seus acetatos, e possuem como principal aplicação a flotação de não-metálicos, tais como quartzo, silicatos, aluminosilicatos e vários óxidos, talcos e micas, etc (SANTOS, M. A., 2010).

Através de um mecanismo de primeira ordem, os coletores catiônicos são coletados eletricamente e, em razão disso, são adsorvidos e dessorvidos fácil e rapidamente. Além disto, possui menor poder de seletividade em relação aos coletores aniônicos e são mais afetados por modificadores de coleta (SILVA, 2005).

Os minerais que são facilmente flotáveis utilizam aminas que variam de 8 a 15 carbonos em sua composição e os minerais mais difíceis necessitam de aminas de até 22 carbonos. Portanto, à medida que aumenta-se o comprimento da cadeia carbônica, aumenta-se também as propriedades coletoras porém, perde-se em solubilidade (CHAVES *et al.*, 2010).

3.3.1.2 Coletores Aniônicos

Os coletores aniônicos se subdividem-se, de acordo com a função química correspondente, em oxidrídricos e sulfidrídricos (BALTAR, 2008).

3.3.1.2.1 Coletores Aniônicos Oxidrídricos

A escassez de uma pesquisa aplicada acarreta na pouca utilização destes reagentes na indústria, embora representem a grande maioria dos coletores. Os principais coletores deste grupo são os ácidos graxos e seus sabões além dos sulfatos e sulfonatos de alquila ou arila (CHAVES *et al.*, 2010).

Ácidos graxos e seus sabões

Os ácidos graxos e seus derivados são utilizados como coletores de minerais salinos, oxidados e não metálicos. Por possuir grande extensão da cadeia, os ácidos graxos conseguem coletar uma faixa ampla de minerais, tornando-o pouco seletivo. Esse fator pode ser melhorado através de uma rigorosa modulação da dosagem. No Brasil são utilizados na flotação de fosfatos e fluorita (CHAVES; LEAL FILHO, 2002 *apud* SANTOS, M. A., 2010, p.25).

Estes coletores trabalham saponificados ou em meio alcalino. Portanto, a temperatura deve estar alta ou então perde-se em solubilidade. O uso de aquecedores é necessário para emulsionar o coletor em épocas frias (CHAVES *et al.*, 2010).

Sulfatos e Sulfonatos de alquila ou arila

São coletores que possuem dessorção facilitada, sendo convenientemente usado para flotações coletivas. Outra característica importante está no fato desses coletores possuírem elevada solubilidade, inclusive em águas duras (águas que caracterizam-se pela presença de sais de cálcio e magnésio em sua composição). Juntamente com os ácidos graxos, esses reagentes competem entre si nas mesmas

aplicações. São utilizados como coletores seletivos de minerais como barita, fluorita, celestita, cianita e gipsita (CHAVES *et al.*, 2010).

3.3.1.2.2 Coletores Aniônicos Sulfidrílicos

É um grupo conhecido como tióis, amplamente utilizado para flotação de minerais sulfetados. Os principais coletores deste grupo são: xantatos, mercaptans, tiouréias, ditiofosfatos e tiocarbamatos (CHAVES *et al.*, 2010).

Xantatos ou Ditiocarbonatos

São reagentes de cadeia curta, praticamente não apresentam função espumante, possuem alta solubilidade em água e alta seletividade formando compostos solúveis com metais leves (K e Na) e alcalinos terrosos (Mg, Ca, Sr e Ba), compostos moderadamente solúveis com metais intermediários (Fe, Zn e Mn) e compostos praticamente insolúveis com metais pesados (Cu, Pb, Au, Ag, Hg) (BALTAR, 2008).

Mercaptans

Por possuir um odor ruim, possui utilização pouco frequente. Porém, são coletores seletivos para sulfetos de cobre e zinco e bons coletores para minerais oxidados (CHAVES *et al.*, 2010).

Tiouréias

Possui alta seletividade em relação à pirita e é bom coletor para a galena (CHAVES *et al.*, 2010).

Ditiofosfatos e Tiocarbamatos

Os ditiofosfatos apresentam como principais características: formação de sais insolúveis com metais pesados, instabilidade na presença de umidade e apresentam

maior resistência à oxidação em relação aos xantatos (APLAN; CHANDER, 1988 *apud* BALTAR, 2008, p.109).

Os tiocarbamatos possuem utilização limitada em plantas de flotação por possui alto preço, embora possuam expressiva ação como coletor (GLEMBOTSKII *et al.*, 1972 *apud* BALTAR, 2008, p.110).

3.3.2 Espumantes

Os espumantes são substâncias químicas tensoativas utilizadas no processo de flotação para criar uma camada de espuma sob a polpa de maneira que as partículas flotadas possam ser retiradas da superfície (SANTANA, 2007).

São compostos orgânicos heteropolares e possuem estrutura similar a dos coletores. A principal distinção está no caráter funcional do grupo polar: nos coletores o radical é quimicamente ativo e capaz de interagir química ou eletricamente com a superfície da partícula mineral a ser coletada. Enquanto os espumantes possuem um radical liofílico de grande afinidade pela água. Assim, os coletores movem-se para a interface sólido-gás e os espumantes migram para a interface líquido-gás (LUZ *et al.*, 1998 *apud* SILVA, 2005, p.18).

Os espumantes por concentrarem-se na interface líquido-gás reduzem a tensão superficial (energia livre por unidade de área). A redução dos efeitos de coalescência se dá através desta nova membrana composta com moléculas surfactantes, proporcionando bolhas com diâmetros menores e estáveis, auxiliando na formação e estabilidade da espuma (VERAS, 2010).

As propriedades espumantes crescem com o comprimento da cadeia apolar até 7-8 carbonos e depois decrescem, em razão da queda da solubilidade do reagente. Determina-se a solubilidade através da porção polar da molécula, e em razão disto, é viável que se escolha radicais que não possuam afinidade pela superfície do mineral a flotar, para evitar interferências com a coleta (CHAVES *et al.*, 2010).

Existem reagentes que são usados como coletores e que possuem a função espumante, como é o caso dos ácidos graxos. Do ponto de vista econômico, embora esta função seja desejável em razão da economia de um reagente, muitas vezes esta característica atrapalha a operação, em razão da dificuldade de controle independente da espuma (CHAVES; LEAL FILHO, 2002 *apud* SANTOS, M. A., 2010, p. 26).

Segundo Baltar (2008), considera-se que um bom espumante atenda aos seguintes requisitos:

- ✓ Não adsorver-se na superfície mineral, ou seja, não apresentar atividade de coletor;
- ✓ Proporcionar bolhas suficientemente estáveis para completar o transporte das partículas hidrofóbicas;
- ✓ Produzir espumas que permitam a drenagem da água retida entre as bolhas;
- ✓ A espuma produzida deve sofrer colapso na descarga do flotado;
- ✓ Ser o tanto quanto possível, insensível à variação de pH e à presença de sais dissolvidos na polpa;
- ✓ Ser ativo em pequenas concentrações;
- ✓ Atender ao requisito da disponibilidade;
- ✓ Ter baixo custo.

Dentre os principais espumantes utilizados destacam-se os sintéticos e os naturais.

Os principais espumantes sintéticos são o metilisobutilcarbinol (MIBC) e os éteres poliglicólicos. Dentre os espumantes naturais destacam-se o óleo de pinho e o ácido cresílico (BALTAR, 2008).

3.3.2.1 *Espumantes Sintéticos*

3.3.2.1.1 MIBC

O MIBC é o espumante mais importante em termos de utilização e produz uma espuma muito aberta, permitindo uma boa drenagem da ganga (CHAVES *et al.*, 2010).

Por se tratar então, de um espumante bastante seletivo, é recomendado pela literatura para a flotação de ultrafinos (GUPTA *et al.*, 2007; LASKOWSKI *et al.*, 2003 *apud* BALTAR, 2008, p.124).

3.3.2.1.2 Éteres Poliglicóis

Os éteres poliglicóis formam espumas finas, são seletivos por não apresentarem ação de coletores, formam uma espuma fraca que colapsa na descarga e possuem composição química definida (LOVELL, 1982 *apud* BALTAR, 2008, p.124).

3.3.2.2 *Espumantes Naturais*

3.3.2.2.1 Óleo de Pinho

É um espumante natural que contém em sua composição inúmeros compostos, dos quais destacam-se os terpinóis. Possui baixo custo, possui caráter alcalino e é utilizado, portanto, em circuitos alcalinos (CHAVES *et al.*, 2010).

3.3.2.2.2 Ácido Cresílico

O ácido cresílico é um fenol obtido pela destilação do alcatrão do carvão e é constituído por xilenóis, cresóis e fenóis. Trata-se de um reagente tóxico que forma espumas frágeis, com ausência de uniformidade em sua composição e pouca solubilidade em água (BALTAR, 2008).

3.3.3 Modificadores ou Reguladores

Os reguladores são utilizados no processo de flotação a fim de se estabelecer uma ação mais efetiva do coletor e com isso promover uma separação mais seletiva. São compostos por diferentes funções químicas como ácidos, bases, sais e compostos orgânicos (SANTOS, M. A., 2010).

Os modificadores recebem diversas denominações como: reguladores de pH, ativadores e depressores (SUTULOV, 1963 *apud* SANTANA, 2007, p.28).

3.3.3.1 *Reguladores de pH*

O pH é uma das variáveis de maior destaque que afeta a flotação em razão da sua contribuição na dissociação dos demais reagentes e nas condições de adsorção ou hidratação na superfície das partículas (SANTOS, M. A., 2010).

Os principais reguladores utilizados são a barrilha e a soda cáustica (CHAVES *et al.*, 2010).

3.3.3.1.1 Barrilha ou Carbonato de Sódio

A barrilha geralmente é comercializada na forma de um pó branco cuja qualidade está ligada ao teor em Na_2O contido (BALTAR, 2008).

3.3.3.1.2 Soda Cáustica

É um regulador que consegue obter variações bruscas de pH com baixas dosagens, e ao ser utilizado deve-se levar em conta cuidados durante o transporte e manuseio devido ao seu poder corrosivo (BALTAR, 2008).

3.3.3.2 *Ativadores*

São os íons que mudam a superfície do mineral que se quer flotar, tornando-a atrativa para a coleta e ativando a adsorção do coletor. Devem ser utilizados quando o coletor não for capaz de adsorver-se em nenhuma das espécies minerais presentes na polpa (SANTANA, 2007).

Os principais ativadores utilizados são o sulfeto de sódio (utilizado na sulfetização de óxidos de cobre, chumbo e zinco) e o sulfato de cobre (usado para ativação da esfalerita) (CHAVES *et al.*, 2010).

3.3.3.3 Depressores

Os depressores são os reagentes capazes de modificar a superfície de determinados minerais proporcionando-lhes um caráter hidrofílico acentuado, além de impedir a ação dos coletores sobre essas superfícies (BADALF; SHUBERT, 1980; LIN; BURDICK, 1988 *apud* NUNES, 2011, p. 13).

São divididos em depressores orgânicos e inorgânicos e devem ser adicionados antes dos coletores em condicionadores (CHAVES *et al.*, 2010).

3.3.3.3.1 Depressores Inorgânicos

Atuam com o intuito de dificultar a ação do coletor sobre os minerais de ganga sendo assim mais seletivos que os depressores orgânicos. Muitos deles são tóxicos e podem causar diversos impactos ambientais (BALTAR, 2008).

Silicato de Sódio

É amplamente utilizado para a depressão da ganga silicatada, sobretudo, em sistemas com coletor do tipo carboxílico (LOVELL, 1982; GALLIOS; MATIS, 1992 *apud* BALTAR, 2008, p. 136).

Sulfeto de Sódio

Age como depressor de sulfetos na flotação com xantatos (e outros coletores sulfidrílicos) (BALTAR, 2008).

3.3.3.3.2 Depressores Orgânicos

Os depressores orgânicos apresentam como principais características serem biodegradáveis, baixo custo e resistentes à oxidação e estáveis (HANNA; SOMASUNDARAN, 1976; LIU *et al.*, 2000 *apud* NUNES, 2011, p. 13).

Amido

“O amido de milho é uma reserva energética vegetal formada, basicamente, pela condensação de moléculas de glicose geradas através do processo fotossintético.” (MONTE; PERES, 2002 *apud* SANTOS, M. A., 2010, p. 28).

É um reagente de flotação dependente do processo de gelatinização que pode ser feito por efeito térmico ou por adição de soda cáustica (hidróxido de sódio), além de ser insolúvel em água fria (SANTANA, 2007).

Carboximetilcelulose (CMC)

É um depressor com grande número de grupos carboxílicos em sua composição, conferindo-lhe uma hidrofilição acentuada, além de ser solúvel em água (NUNES, 2011). Tem grande emprego na flotação de minérios polimetálicos (BULATOVIC, 1999 *apud* NUNES, 2011, p. 15).

3.4 Concentração de minérios fosfáticos

No início dos anos 60, o Brasil desenvolveu a tecnologia ligada à produção de concentrado fosfático a partir de depósitos ígneos, que apresentava uma deficiência, por se caracterizarem por depósitos bastante peculiares. Esse problema foi resolvido devido ao “Processo Serrana”, liderado por duas equipes que finalizaram a completa definição da jazida de Cajati (SP) e sua caracterização mineralógica, além do tratamento do minério propriamente dito. Esse processo foi muito importante, pois proporcionou o aproveitamento dos outros depósitos de fosfato de origem ígnea (KULAIF, 2009 *apud* SANTOS, 2012, p. 19).

As etapas envolvidas no processo de concentração por flotação de minérios fosfáticos no Brasil são: cominuição, classificação, deslamagem, separação magnética e flotação (LEAL FILHO; CHAVES, 2004 *apud* ALBUQUERQUE, 2010, p. 15).

A flotação concentra a apatita até que o produto obtenha os teores adequados para seu uso como matéria prima na fabricação de fertilizantes. Deve possuir em torno de 35% de P_2O_5 , e teores baixos de impurezas ($SiO_2 < 3\%$ e $Fe_2O_3 < 7\%$). Para o concentrado fino, o limite mínimo do teor de P_2O_5 é de 33,5% (TESTA, 2008).

Com relação aos coletores, utiliza-se no Brasil para flotação de rochas fosfáticas o *tall-oil* cuja composição contém 46% de ácido oleico, 41% de ácido linolênico e apenas 5% de ácido palmítico (PADLEY *et al.*, 1986 *apud* SILVA, 2005, p. 8). Porém outros coletores foram adotados em razão do baixo custo e maior seletividade em relação à ganga de carbonatos. Os principais são óleo de arroz e óleo de soja (SANTOS, M. A., 2010). A composição do óleo de arroz é de 42,3% de ácido oleico, 37,1% de ácido linolênico e 16,4% de ácido palmítico (SILVA, 2005).

De forma tradicional, o amido de milho é utilizado como depressor dos minerais de ganga no beneficiamento de minérios fosfáticos brasileiros (BARROS, 2013). Como regulador de pH utiliza-se soda cáustica.

Com relação ao caráter espumante, o amido de milho embora contenha uma alta concentração de óleo, não atrapalha na formação de espuma. Ele apresenta características espumantes ao ser utilizado com coletores iônicos (GUIMARÃES *et al.*, 2005).

3.5 Equipamentos de flotação

A definição do tipo de equipamento a ser utilizado na flotação é muito importante para se obter bons resultados, podendo até mesmo ser decisivo de acordo com a granulometria mineral, a seletividade e a recuperação desejadas (SANTOS, M. A., 2010).

De acordo com Oliveira e Souza (2008, p. 172), os principais fatores a serem considerados na avaliação da performance de um equipamento de flotação são:

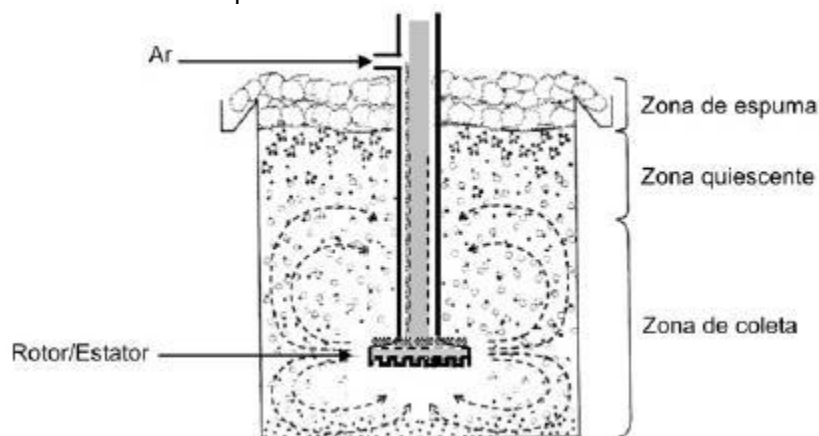
- ✓ Desempenho: representado por teor e recuperação do mineral de interesse;
- ✓ Capacidade em toneladas por hora de alimentação de sólidos por unidade de volume;
- ✓ Custos operacionais por tonelada de sólidos alimentada;
- ✓ Facilidade de operação.

Com o intuito de melhorar a eficiência e diminuir os custos de flotação, foram desenvolvidos e aperfeiçoados diferentes tipos de máquinas, as quais podem ser divididas em células mecânicas, células pneumáticas e células de coluna (SILVA, 2013).

3.5.1 Células mecânicas

As células mecânicas foram os equipamentos pioneiros a serem desenvolvidos no processo de tratamento de minérios por flotação (YOUNG, 1982 *apud* SILVA, 2013, p. 17). Um exemplo deste tipo de equipamento pode ser visualizado na FIG. 3.2.

Figura 3.2 – Desenho esquemático de uma célula mecânica e suas zonas



Fonte: LIMA *et al.*, 2006 *apud* SILVEIRA, 2013, p.30

Os componentes essenciais de uma célula mecânica são (SILVEIRA, 2013):

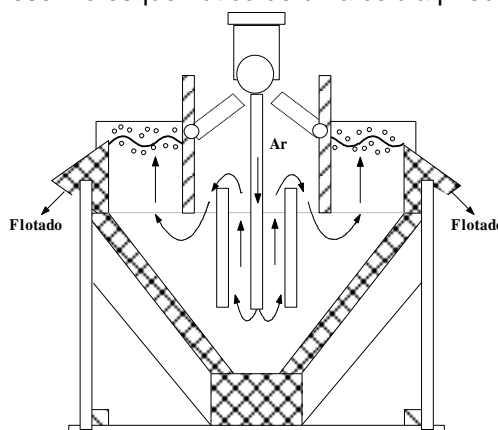
- ✓ rotor: tem como principal função a agitação, mantendo as partículas suspensas, sob regime de turbulência, garantindo uma alta probabilidade de colisão partícula-bolha;

- ✓ dispersor: responsável pela quebra do jato de ar em bolhas com tamanho adequado ao das partículas que serão flotadas;
- ✓ estator: lida com a mudança no regime, de turbulento para uma zona quieta objetivando não desestabilizar a adesão da partícula à bolha.

3.5.2 Células pneumáticas

São os equipamentos que foram desenvolvidos para suprir algumas das dificuldades encontradas nas células mecânicas. A principal distinção delas se comparado às células mecânicas está no fato da inexistência de impelidores para agitação da polpa, geração e dispersão das bolhas de ar. Nesse caso, a agitação e aeração são realizados por injeção de ar comprimido (OLIVEIRA; SOUZA, 2008). Um exemplo deste tipo de equipamento pode ser visualizado na FIG. 3.3.

Figura 3.3 – Desenho esquemático de uma célula pneumática



Fonte: OLIVEIRA; SOUZA, 2008

3.5.3 Colunas de Flotação

O grande progresso da flotação nos últimos anos deu-se em razão da tecnologia das máquinas pneumáticas denominadas de colunas de flotação (COUTO *et al.*, 2007).

A busca por melhorias na probabilidade de colisão entre as partículas e as bolhas foi um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento da flotação em coluna. Esse método promove um ambiente de menor turbulência para o agregado

formado, melhorando a recuperação e coletando faixas granulométricas mais finas (SILVEIRA, 2013).

Ao realizar uma comparação entre a coluna de flotação e as células mecânicas, podem ser evidenciadas diferenças em quatro aspectos básicos: geometria (maior relação altura/diâmetro), presença da água de lavagem, ausência de agitação mecânica e sistema de geração de bolhas (AQUINO *et al.*, 2004 *apud* SANTANA, 2011, p. 38).

À medida que eleva-se a altura da coluna, aumenta-se também o tamanho da zona de recuperação e conseqüentemente o seu tempo de residência, criando condições favoráveis à coleta de partículas hidrofóbicas pelas bolhas. E quanto maior a relação da altura com o diâmetro, menor será a turbulência gerada na região de recuperação (SANTOS, 2005 *apud* SANTANA, 2011, p. 44).

A água de lavagem possui três objetivos principais: realiza a troca da água de alimentação na fração flotada diminuindo o arraste de partículas hidrofílicas; promove o aumento da estabilidade e da altura da camada de espuma; minimiza o fenômeno da coalescência de bolhas (CARVALHO, 2003).

A ausência de agitação mecânica é um fator que permite realizar a separação das espécies minerais de maneira mais estável e tranquila com relação à flotação convencional, uma vez que há a eliminação da turbulência gerada por agitadores mecânicos (VIEIRA, 2005). Isso explica o porquê da coluna conseguir flotar minérios mais grossos do que as células convencionais.

E com relação ao sistema de geração de bolhas, na coluna são feitos por aeradores e podem ser internos ou externos. Os aeradores externos são aqueles onde água e ar sob pressão (ou polpa e ar) são misturados e injetados na coluna, chamados de *spargers*, enquanto nas células mecânicas, o sistema de aeração é feito pelo rotor.

De acordo com Oliveira (2004, p. 39), este tipo de equipamento proporciona como vantagens:

- ✓ fluxo contracorrente que garante uma maior probabilidade de adesão partícula-bolha e condições hidrodinâmicas adequadas ao processo de flotação na zona de recuperação;
- ✓ possibilidade de projeto, fabricação e operação de unidades de grande porte;
- ✓ confiabilidade nas equações de dimensionamento;
- ✓ diminuição do custo de fabricação e manutenção, devido a sua simplicidade;
- ✓ diminuição de peças de reposição;
- ✓ redução do consumo de energia;
- ✓ minimização de custos com operadores pela possibilidade de controle centralizado;
- ✓ aumento de seletividade através da diminuição do arraste de materiais de ganga garantida pelo controle da altura da camada de espuma e da presença da água de lavagem.

E segundo Silva (2005, p. 39), apresenta algumas desvantagens:

- ✓ baixa área específica de superfície livre para transbordo do concentrado, comparativamente às células mecânicas de mesmo volume;
- ✓ menor valor de borda para transbordo do concentrado principalmente quando comparamos um circuito de células mecânicas com somente uma coluna.

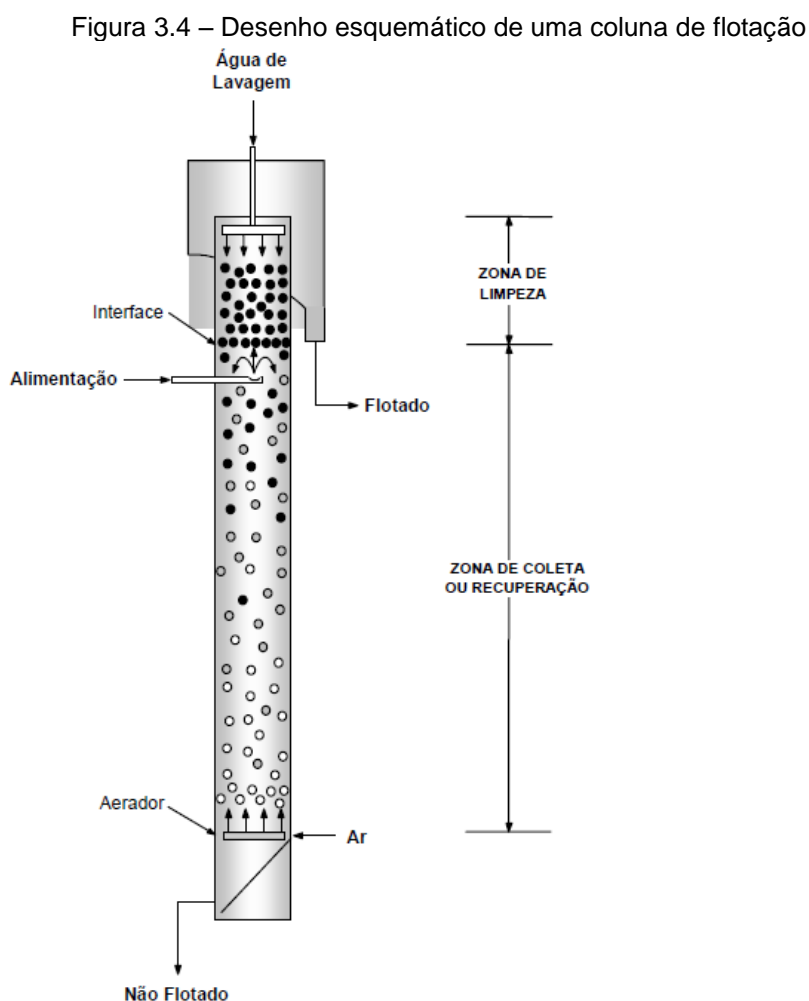
De acordo com Silva (2005, p. 30), “o modelo de dimensionamento de uma coluna de flotação baseia-se na divisão do equipamento em duas zonas bastante distintas: a zona de recuperação (zona de coleta) e a zona de limpeza (zona de espuma)”.

A zona de recuperação está localizada na base da coluna, entre o sistema de geração de bolhas e a interface polpa-espuma (SANTOS, M. A., 2010). Tem como principal função a coleta de partículas minerais hidrofóbicas, devido à interação entre o fluxo ascendente das bolhas de ar e as partículas minerais provenientes da alimentação, que pela ação gravitacional, estão sedimentando (SANTOS, E. P., 2010).

A zona de limpeza está situada entre a interface polpa-espuma e o transbordo (SANTANA, 2007). Nessa zona ocorre a ação do filtro da camada de espuma somada à adição da água de lavagem injetada no topo da coluna promovendo a limpeza do material flotado. As partículas hidrofóbicas agregadas às bolhas de ar saem da seção de recuperação em direção à seção de limpeza, onde há contato com o fluxo descendente da água de lavagem. Ocorre uma diminuição notória dos

minerais hidrofílicos na região acima da interface polpa-espuma, aumentando o teor da fração flotada. Isso acontece devido à ação efetiva da água de lavagem que inibe a entrada de partículas hidrofílicas arrastadas na base da espuma (SILVA, 2013).

Na FIG. 3.4 temos um exemplo deste tipo de equipamento.



Fonte: OLIVEIRA; AQUINO, 2005 *apud* SILVA, 2013, p.19

Um grande número de variáveis controlam o processo de flotação em coluna. Tais variáveis possuem efeito significativo sobre teor e recuperação do mineral-minério. A grande influência entre essas variáveis, somadas às perturbações das quais não podem ser medidas fazem da flotação em coluna um dos processos mais complexos de concentração mineral (MONTENEGRO *et al.*, 2001 *apud* VIEIRA, 2005, p. 26).

3.6 Variáveis da coluna de flotação

A flotação é uma operação de inúmeras variáveis, cuja definição e descrição quantitativa necessitam de vários estudos. Na atualidade, tem-se um considerável domínio prático desta área, porém ainda não existe um conhecimento total da teoria e da prática que englobe a existência de uma fórmula adequada de flotação e os resultados práticos obtidos com relação a um estudo teórico prévio. Isto se resume ao fato que não há conhecimento de todas as variáveis que controlam o processo de flotação e aquelas que já foram descobertas não têm sido amplamente estudadas (SILVA, 2005).

De acordo com Vieira (2005, p. 26), “quantificar o efeito das variáveis operacionais sobre a relação entre o teor e a recuperação é essencial para a otimização e o controle de um circuito industrial de flotação”.

Segundo a literatura mais de trinta parâmetros influenciam o rendimento desse processo de concentração. Dentre as quais, se destacam no seguinte trabalho:

- ✓ Dosagem de reagentes;
- ✓ Granulometria;
- ✓ Tempo de condicionamento.

3.6.1 Dosagem de reagentes

Trata-se de um assunto de intenso estudo por envolver grande parte do custo operacional das unidades industriais de flotação. A escolha dos reagentes a serem utilizados inicialmente está ligada a experiências anteriores citadas na literatura. A pesagem do reagente deve ser realizada de forma criteriosa, uma vez que erros acarretam no resultado final do teste. Em termos práticos, essa dosagem é calculada em termos de concentração molar ou da relação reagente (gramas)/minério seco (tonelada) (SAMPAIO; BALTAR, 2007).

A dosagem de coletor ideal é aquela que seja mínima e capaz de obter uma monocamada molecular sobre a superfície das partículas que serão flotadas. Dosagens adicionais acima deste valor não possuem efeito e podem atrapalhar o processo, diminuindo a recuperação, reduzindo a seletividade do processo em razão da possível flotação de outros minerais e elevação de custos (OLIVEIRA; LUZ, 2003 *apud* SANTOS, 2012, p. 25).

A dosagem de depressor é um fator importante no sucesso da flotação, pois um acréscimo até certo valor aumenta o teor do mineral de interesse no concentrado e redução da sua recuperação. E dosagens adicionais acima desse valor definido experimentalmente podem não surtir efeitos práticos ou promover a depressão parcial do mineral de interesse (OLIVEIRA; LUZ, 2003 *apud* SANTOS, 2012, p. 25).

A adição dos reagentes é feita de forma escalonada levando-se em consideração o tempo de condicionamento de cada um dos reagentes. Em primeiro momento devem ser adicionados os modificadores, e em seguida, os coletores e espumantes. A razão disto é que as superfícies e o ambiente químico da interface sólido-líquido necessitam de um prévio ajuste a fim de favorecer uma adsorção fácil e seletiva do coletor. Como o espumante atua na interface líquido-gás não é necessário participar do condicionamento juntamente com o minério (BALTAR, 2008).

3.6.2 Granulometria

Durante o processo de flotação, na polpa são encontradas partículas minerais de tamanhos diferentes, variando de décimos de milímetro a micrômetros. A extensão da flotação de um mineral está ligada a seu tamanho, devido à prática industrial e às pesquisas realizadas. Logo, o tamanho das partículas minerais é uma variável importante na operação de flotação (GLEMBOTSKII *et al.*, 1972; BAZIN *et al.*, 2001 *apud* VIEIRA, 2005, p. 42).

Os processos minerais não podem beneficiar todos os tamanhos de partículas minerais de maneira satisfatória, sendo o diâmetro dos minerais fator decisivo para escolha do processo de beneficiamento. Assim, o êxito de qualquer operação de

beneficiamento, como a flotação, está ligada à escolha do método de moagem adequado, bem como, da seleção da distribuição granulométrica correta (SANTANA, 2007).

O tamanho máximo flotável dos minerais que serão flotados e o grau de liberação mais adequado dos mesmos são parâmetros que devem ser estimados para definição do tamanho abaixo do qual o minério deverá ser moído. A partir do conhecimento destas duas variáveis, diminuem-se as perdas no processo de concentração, uma vez que, o minério estará em uma faixa granulométrica e grau de liberação ideais (AMORIM, 2013).

O grau de liberação é definido como sendo a relação entre a quantidade de partículas livres desse mineral e a quantidade total de partículas desse mineral na amostra (OLIVEIRA; SOUZA, 2008).

O tamanho máximo flotável é definido como o maior diâmetro de partícula capaz de aderir à bolha de ar e flotar. Deve-se levar em consideração que esse tamanho máximo flotável é dependente da densidade do mineral e da capacidade de transporte das bolhas de ar presentes no sistema de flotação (LEAL FILHO, 1995 *apud* AMORIM, 2013, p. 20).

As características das bolhas estão ligadas ao equipamento utilizado e seus mecanismos de aeração, além dos reagentes adicionados ao sistema. Portanto, não é uma característica que um mesmo mineral exibirá. (LEAL FILHO, 1995 *apud* AMORIM, 2013, p. 20).

Para obtenção do tamanho máximo de partícula que poderá ser flotada, utiliza-se de curvas de recuperação *versus* tamanho e que podem ser divididas convenientemente em três regiões (TRAHAR, 1981 *apud* VIEIRA, 2005, p. 42):

- ✓ Região de finos: partículas finas com dificuldade de serem flotadas e separadas;
- ✓ Região de médios: partículas intermediárias e geralmente mais fáceis de serem flotadas;

- ✓ Região de grossos: partículas grosseiras em que a dificuldade ou facilidade da flotação dependerá do mineral e das condições.

Na prática, são as partículas intermediárias que possuem uma ótima eficiência de flotação, enquanto as partículas finas e as grosseiras apresentam efeito contrário. Isso está ligado à deficiência de captura por bolhas nas partículas finas e à menor capacidade de carregamento pelas bolhas em partículas grosseiras (SANTOS, E. P., 2010).

A definição do tamanho da partícula, muitas vezes, é feita sem um critério que padronize esta classificação, sendo necessária uma atenção ao referenciar partículas finas e grossas, pois em diversas situações uma partícula que é classificada como fina por um autor, pode ser grossa para outro e vice-versa (CARVALHO, 2003).

De acordo com Santana (2007, p. 44), algumas citações mostram a falta de normalização na definição de tamanho de partícula:

- ✓ TRAHAR (1981): finos de 5 a 10 μm , partículas de tamanho intermediário entre 10 e 70 μm e grossos acima de 70 μm ;
- ✓ KIMPELL (1989): partículas finas entre 105 e 417 μm e partículas grossas entre 417 e 1168 μm ;
- ✓ VALDERRAMA E RUBIO (1998): finos entre 6 e 50 μm e ultrafinos menores que 6 μm ;
- ✓ JUNIOR (2010) *apud* AMORIM (2013): finos entre 150 e 10 μm , ultrafinos entre 10 μm e 1 μm e partículas coloidais abaixo de 1 μm ;
- ✓ GUO (2001): finos ou lamas, geralmente menores que 10 μm ;
- ✓ BAZIN E PROULX (2001): finos, menores que 37 μm ;
- ✓ VALADÃO (2003) *apud* OLIVEIRA (2004): finos entre 10 e 100 μm , ultrafinos entre 1 e 10 μm e colóides abaixo de 1 μm ;
- ✓ COWBURN *et al.* (2005): finos menores que 150 μm ;
- ✓ SCHWARZ E GRANO (2005): partículas pequenas, menores que 5 μm e partículas grandes maiores que 50 μm .

Existe para a flotação, uma faixa de tamanho de partícula de maior importância, além de um tamanho de partícula ótimo para a recuperação por essa operação de concentração. O tamanho relevante está compreendido entre 1 a 300 μm (TRAHAR, 1981 *apud* SANTANA, 2007, p. 45). E com relação ao tamanho ótimo, há grande divergência entre os autores, porém está compreendida entre 10 e 200 μm (SANTANA, 2007).

3.6.3 Tempo de Condicionamento

Na operação de flotação, a polpa é submetida ao condicionamento que consiste na adição dos reagentes à polpa antes do início dos testes.

No condicionamento normal de polpa, a reação entre a superfície das partículas minerais presentes no minério e os reagentes (coletores, depressores, modificadores, espumantes, etc) é estabelecida por meio da agitação e do tempo de contato efetivo entre as partículas e reagentes (SANTOS, E. P., 2010).

Deve ser realizado com alta porcentagem de sólidos (baixa diluição de polpa), ou seja, deve-se adensar a polpa antes do condicionamento (CHAVES *et al.*, 2010).

Esse tratamento da polpa é tão antigo quanto à flotação e foi intensamente utilizado nos anos 30 e 40, onde os “super condicionadores” Denver foram desenvolvidos e largamente utilizados em usinas de concentração (CHEN *et al.*, 1999b *apud* MATIOLO, 2005, p. 21).

Os condicionadores são tanques agitados em que são adicionados os reagentes cuja intensidade de agitação está ligada ao tempo necessário para as interações físicas e químicas ocorrerem (LASKOWSKI, 2007 *apud* TESTA, 2008, p. 20). Estes equipamentos possuem geometria cilíndrica, instalados entre a descarga do moinho/produto da deslamagem e a etapa de flotação (OLIVEIRA; SOUZA, 2008).

O condicionamento adequado é um fator muito importante para se reduzir o tempo de flotação. Há casos em que necessita-se adiar o tempo da reação entre reagente e as partículas minerais, e até mesmo adicionar antecipadamente o reagente no moinho (NUNES, 2010). Entretanto, essa medida atrapalha o controle na dosagem dos reagentes devido à carga circulante e a perdas destes reagentes nas lamas (OLIVEIRA; SOUZA, 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

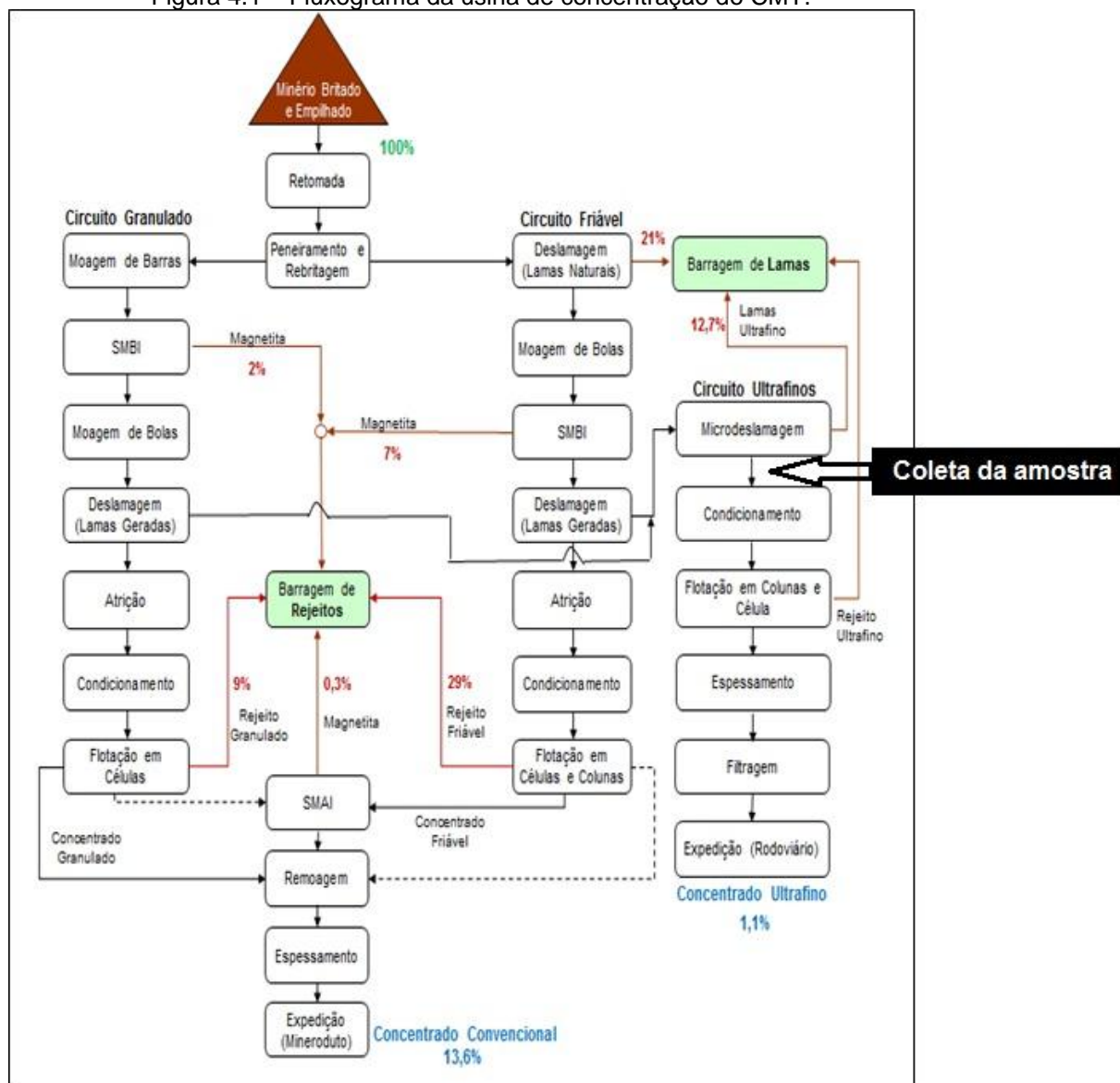
4.1 Amostras

O minério utilizado neste trabalho é oriundo da jazida de fosfato da Vale Fertilizantes, sobretudo do CMT, que consiste numa chaminé ultramáfico-carbonatítica e está ligada ao evento magmático, que afetou a plataforma brasileira, do fim do período jurássico ao terciário inferior e, que teve como ponto inicial, os derrames basálticos da bacia do Paraná (CRUZ *et al.*, 1975 *apud* ARAUJO *et al.*, 2002, p. 3).

As amostras de fosfato a serem utilizadas são similares às amostras usadas na alimentação das colunas da Vale Fertilizantes, a nível industrial. Logo, já passaram por etapas de homogeneização, quarteamento, britagem, moagem, peneiramento, separação magnética de baixo campo magnético, atrição, deslamagem e estão prontas para os ensaios de flotação.

A amostra obtida foi coletada na alimentação do circuito de ultrafinos. Esta etapa é composta pela alimentação das etapas anteriores, sobretudo pelos *underflow's* da 4ª e 6ª deslamagens do circuito friável e da 2ª deslamagem do circuito granulado (SANTOS, 2012). A FIG. 4.1 representa um fluxograma da usina de concentração do CMT e o local onde o minério foi coletado.

Figura 4.1 – Fluxograma da usina de concentração do CMT.



Fonte: RESENDE, 2015, p. 145

4.2 Caracterização da Amostra da Alimentação

4.2.1 Caracterização Química

A determinação do teor das espécies químicas presentes na amostra da alimentação foi realizada utilizando-se a técnica de FRX.

Nesta técnica, a irradiação por um feixe primário de raios X resulta no processo de excitação da amostra, produzindo uma radiação secundária de acordo

com as características dos elementos químicos presentes. A partir do ângulo de reflexão e das intensidades da radiação, identificam-se e quantificam-se os elementos químicos presentes na amostra (SANTOS, M. A., 2010).

4.2.2 Caracterização granulométrica

A análise granulométrica foi feita por duas técnicas diferentes: peneiramento a seco e a úmido e por difração de raios *laser*.

4.2.2.1 *Peneiramento a Seco e a Úmido*

Realizaram-se três peneiramentos para a construção das curvas granulométricas, sendo um deles a seco e os outros dois a úmido. Com as curvas granulométricas, conseguiu-se observar um parâmetro importante denominado de d_{50} que corresponde ao diâmetro ou abertura da peneira na qual 50% das partículas passaram. Em outras palavras, 50% das partículas são menores que esse diâmetro.

Para ambos os peneiramentos, escolheram-se um conjunto de peneiras das marcas Granutest e a BROZINOX que mais adequaram-se à granulometria da amostra de minério. Escolheram-se as peneiras de 80# (0,18 mm), 115# (0,125 mm), 200# (0,074 mm), 275# (0,053 mm), 325# (0,045 mm) e 400# (0,037 mm). As peneiras podem ser visualizadas na FIG. 4.2.

Figura 4.2 – Conjunto de peneiras



No peneiramento a seco utilizou-se um peneirador vibratório e uma amostra inicial de 100 g. Deixou-se peneirar por 30 minutos em razão da granulometria do minério e, após o término do peneiramento, através da aferição das massas retidas em cada peneira e do passante da última, calculou-se a perda mássica, a massa retida simples, a % retida acumulada e a % passante acumulada para a construção da curva granulométrica. O peneirador utilizado é da marca Granuteste, modelo T e pode ser visualizado na FIG. 4.3.

Figura 4.3 – Peneirador vibratório



No primeiro peneiramento a úmido utilizou-se de uma amostra inicial de 100 g. A mesma foi empalpada com uma porcentagem de sólidos de 50%, utilizando-se da seguinte expressão:

$$\%_s = \frac{m_{sól}}{m_p} \times 100 \quad (1)$$

Após a amostra ter sido empalpada transferiu-a para a coluna de peneiras selecionadas.

Encerrou-se o peneiramento quando alcançaram-se os seguintes requisitos (SAMPAIO; SILVA, 2007):

- ✓ a água coletada na saída, através de um balde, encontrava-se tão limpa quanto a água adicionada na entrada;
- ✓ quando não mais encontrava-se partículas de minério na fração passante da peneira de menor abertura.

Para o ensaio em questão utilizou-se um peneirador suspenso da marca CDC, modelo PV-08 e gastou-se um tempo de 7 minutos. O equipamento pode ser visualizado na FIG. 4.4.

Figura 4.4 – Peneirador suspenso



Na etapa posterior, removeram-se todas as frações retidas nas peneiras e, em pratos apropriados, levaram-nas à estufa para a secagem do minério. Após a secagem, pesaram-se cada fração, descritas no peneiramento a seco, para a construção da curva granulométrica.

No segundo peneiramento realizou-se a atrição da polpa anterior à transferência da mesma para a coluna de peneiras. Após a amostra de minério ter sido empalpada, transferiu-a para um equipamento denominado mixer e, durante 10 minutos, realizou-se a atrição da polpa (SAMPAIO; SILVA, 2007). A partir desta etapa, seguiram-se os mesmos passos do primeiro peneiramento a úmido para o término do ensaio. Devido ao fato do laboratório de tratamento de minérios não possuir filtros, a massa do material passante na peneira de 400# (0,037 mm) foi obtida pela diferença entre a massa total e a soma das massas retidas nas peneiras anteriores, o que justifica o fato de não ter ocorrido perda mássica nos peneiramentos a úmido. O equipamento utilizado para a atrição pode ser visualizado na FIG. 4.5.

Figura 4.5 – Mixer



4.2.2.2 *Difração de raios laser*

A difração consiste num método pelo qual as partículas são dispersas em um fluido em movimento provocando descontinuidades no fluxo do fluido e que são

detectadas por uma luz incidente, e correlacionadas com o tamanho da partícula. O princípio do método está no fato de que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação segundo quatro diferentes fenômenos (difração, refração, reflexão e absorção) formando um invólucro tridimensional de luz (HILDEBRAND, 1999 *apud* PAPINI, 2003, p.21).

O formato e o tamanho deste invólucro são afetados pelo índice de refração relativo da partícula no meio dispersante, pelo comprimento de onda da luz, e pelo tamanho e formato da partícula. Detectores estrategicamente posicionados medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada. O sinal dos detectores é então convertido para a distribuição de tamanho de partícula através de softwares matemáticos (ALLEN, 1997 *apud* PAPINI, 2003, p.22).

Para a difração de raios *laser* foi utilizado um granulômetro da marca CILAS modelo 1090.

4.3 Preparação das amostras

4.3.1 Determinação da Umidade e Secagem do Minério

As amostras chegaram úmidas ao laboratório de tratamento de minérios em dois sacos plásticos e, em seguida, realizou-se a pesagem dos mesmos.

Para a realização da secagem utilizou-se de duas bandejas para separação do minério e, em seguida, colocaram-se as mesmas na estufa, a uma temperatura de 100° C. Esse minério permaneceu na estufa durante o intervalo de 24 horas para a secagem completa do material.

Ao obterem-se os valores das massas de minério natural e seca, respectivamente, calculou-se a umidade da amostra (base úmida) através da expressão (SAMPAIO; SILVA, 2007):

$$U_{\%} = \frac{m_u - m_{seca}}{m_u} \times 100 \quad (2)$$

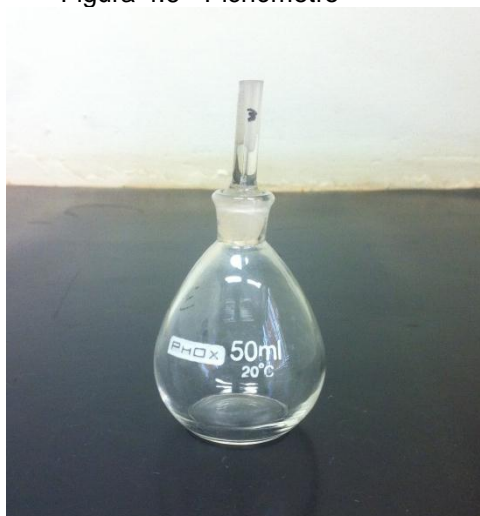
4.3.2 Homogeneização e Quarteamento

Após a secagem, para obtenção de amostras de minério, variando entre 400 a 500 g, realizou-se a homogeneização da amostra inicial formando-se uma pilha alongada cujos dois extremos foram retomados. Dividiu-se a pilha ao meio longitudinalmente e dividiram-se as duas partes em 10 porções iguais, totalizando-se 20, permitindo-se assim a formação de duas amostras (uma formada pelas porções pares e outra pelas porções ímpares). Com a determinação das porções ímpares e pares, pesaram-se alíquotas de 400 a 500 g e realizou-se o ensacamento da amostra para a realização dos testes.

4.3.3 Ensaio para Determinação do Peso Específico dos Sólidos – Picnometria

Para a determinação do peso específico dos sólidos utilizou-se do método de picnometria. De acordo com Sampaio e Silva (2007, p. 39) “picnômetro consiste num balão de vidro com fundo chato, equipado com uma rolha também de vidro, através da qual passa um canal capilar”. A FIG. 4.6 é uma fotografia representativa de um picnômetro.

Figura 4.6 - Picnômetro



Antes do início do teste, realizou-se a calibração dos picnômetros do laboratório, a fim de que se obtivesse o volume real dos mesmos. Utilizou-se do método descrito a seguir em etapas:

- a) Pesou-se o picnômetro vazio e anotou-se a sua respectiva massa ($m_{pic.vazio}$);
- b) Preencheu-se completamente o picnômetro com água. Secou-se o excesso de água que escorreu pelas paredes do picnômetro. Pesou-se o conjunto picnômetro e água e anotou-se sua respectiva massa ($m_{pic+água}$);
- c) Mediu-se e anotou-se a temperatura da água ($T_{água}$), em °C;
- d) Verificou-se e anotou-se a densidade da água em uma tabela (*handbook*) nesta temperatura do item c) ($d_{água(T=x^{\circ}C)}$);
- e) Calculou-se o volume real do picnômetro ($V_{real.pic}$) através da equação:

$$V_{real.pic} = \frac{(m_{pic+água}) - (m_{pic.vazio})}{d_{água(T=x^{\circ}C)}} \quad (3)$$

Após a calibração, realizou-se o teste de picnometria para determinação da densidade relativa do sólido, através do procedimento descrito abaixo:

- i. Pesou-se o picnômetro vazio, previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e anotou-se a sua respectiva massa ($m_{pic.vazio}$);
- ii. Encheu-se o picnômetro com água até transbordar, secou-se a água que molhou a superfície externa do mesmo e, após, pesou-se o picnômetro com água e anotou-se sua massa ($m_{pic+água}$);
- iii. Determinou-se a massa de água utilizada através da fórmula ($m_{água}$):

$$m_{água} = m_{pic+água} - m_{pic.vazio} \quad (4)$$

Sabendo-se o valor do volume real do picnômetro feito pelo procedimento da letra e, descobriu-se a densidade da água ($d_{água}$) através da fórmula:

$$d_{água} = \frac{m_{água}}{V_{real.pic}} \quad (5)$$

- iv. Adicionou-se a amostra de minério fosfático no picnômetro e, em seguida, pesou-se todo o conjunto amostra e picnômetro ($m_{pic+amostra}$). A massa da amostra é dada pela fórmula:

$$m_{amostra} = m_{pic+amostra} - m_{pic.vazio} \quad (6)$$

- v. Adicionou-se água ao conjunto picnômetro e amostra, e pesou-se o novo conjunto. Anotou-se sua massa ($m_{pic+amostra+água}$). A massa de água adicionada ao picnômetro com a amostra de minério é determinada pela fórmula:

$$m_{água+m} = m_{pic+amostra+água} - m_{pic+amostra} \quad (7)$$

- vi. O volume de água adicionado ao picnômetro é obtido pela fórmula:

$$V_{água} = \frac{m_{água+m}}{d_{água}} \quad (8)$$

- vii. O volume de minério é determinado pela fórmula:

$$V_{minério} = V_{real.pic} - V_{água} \quad (9)$$

- viii. A densidade do minério é dada pela equação:

$$d_{min} = \frac{m_{amostra}}{V_{minério}} \quad (10)$$

4.4 Descrição da Unidade Experimental

Para a realização dos testes de flotação será utilizada uma coluna de flotação de bancada, como pode ser visualizada na FIG. 4.7.

Figura 4.7 – Coluna de flotação



A coluna é constituída de uma seção de aeração e de um tubo acrílico transparente com 40 mm de diâmetro e altura de 2,5 m. A unidade é equipada com bomba peristáltica para o deslocamento de líquidos e suspensões, controle automático da pressão de ar e dispositivos para medidas instantâneas das vazões de ar e água de lavagem.

A operação descontínua do presente estudo funciona com carga circulante para assegurar a passagem de todas as partículas pela zona de coleta. A carga circulante é movimentada com bomba peristáltica e removida no fundo da coluna para ser recirculada no equipamento em uma posição de altura de dois terços em relação à base.

A água de lavagem foi captada pela rede do laboratório, passou pelo rotâmetro e foi distribuída através de um aspersor fixado no topo da coluna.

4.5 Reagentes

Os reagentes utilizados para a flotação foram:

- ✓ Coletor: reagente do tipo ácido graxo da Clariant, modelo Flotigam 5806, preparado em uma reação de saponificação de óleo de soja;
- ✓ Depressor: fubá de milho gelatinizado da marca Sinhá, obtido em uma reação com NaOH a 10% e água;
- ✓ Regulador de pH: solução de hidróxido de sódio a 10%;

4.5.1 Saponificação do óleo de soja

Realizou-se a saponificação do óleo de soja através do seguinte procedimento (OLIVEIRA, 2005; OLIVEIRA, 2004).

Inicialmente, realizou-se a pesagem dos componentes utilizados em béqueres separados sendo, respectivamente, 2,5 g de ácido graxo, 3,92 g de água utilizados inicialmente, 3,57 g de soda a 10% e 90 g de água utilizadas no final para diluição

da solução. A temperatura do óleo deveria encontrar-se baixa e se caso o óleo apresentasse solidificação, seria necessário aquecê-lo até que se liquefizesse.

Realizou-se o procedimento em um agitador magnético a partir do béquer contendo ácido graxo, e através de uma agitação moderada, misturou-se a quantidade de água inicial e, em seguida, despejou-se lentamente a soda a 10%. Essa primeira parte do procedimento durou 10 minutos.

Após o primeiro procedimento, adicionou-se a água de diluição com a agitação baixa e, durante mais 10 minutos, deixou-se agitar para obtenção de uma solução homogênea e que não apresentasse grumos.

4.5.2 Gelatinização do Fubá de Milho

Obteve-se o fubá de milho gelatinizado através da adição de hidróxido de sódio sob agitação, seguindo o seguinte procedimento (OLIVEIRA, 2005; OLIVEIRA, 2004).

Inicialmente, realizou-se a pesagem dos componentes utilizados em béqueres separados sendo, respectivamente, 5 g de fubá, 45 g de água, 12,5 g de soda a 10% e 104,16 g de água de diluição.

Realizou-se o procedimento em um agitador magnético a partir do béquer contendo fubá, e através de uma agitação moderada, misturou-se a quantidade de água inicial e, em seguida, despejou-se lentamente a soda a 10%. Essa primeira parte do procedimento durou 10 minutos.

Após o primeiro procedimento, adicionou-se a água de diluição com a agitação baixa e, durante mais 10 minutos, deixou-se agitar para obtenção de uma solução homogênea e que não apresentasse grumos.

4.6 Testes de Flotação em Célula Mecânica

Inicialmente, realizaram-se os primeiros testes de flotação na célula mecânica e posteriormente na coluna de flotação, a fim de garantir uma maior adequação das variáveis analisadas. Essas variáveis são, respectivamente, dosagem de reagentes e tempo de condicionamento.

Utilizou-se nos testes uma célula mecânica da marca Denver Equipaments Company, conforme FIG. 4.8.

Figura 4.8 – Célula Mecânica Denver.



Ajustou-se o pH a partir de um pHmetro da marca Analyser, modelo pH 300 juntamente com um eletrodo da marca Sensoglass sensores analíticos, modelo SC 09. O equipamento pode ser visualizado na FIG. 4.9.

Figura 4.9 – pHmetro utilizado nos testes



4.6.1 Dosagem de reagentes

A partir da revisão bibliográfica, realizaram-se quatro testes de flotação variando-se apenas a dosagem de coletor e mantendo-se constante a dosagem de depressor e ambos os tempos de condicionamentos, conforme visto na TAB. 4.1.

Tabela 4.1 – Dosagem de depressor e coletor e seus respectivos tempos de condicionamento

TESTE	DOSAGEM DE DEPRESSOR (g/t)	TEMPO DE COND. DO DEPRESSOR (min)	DOSAGEM DE COLETOR (g/t)	TEMPO DE COND. DO COLETOR (min)
1	500	5	150	1
2			200	
3			250	
4			300	

Os testes foram realizados seguindo o procedimento descrito a seguir:

- a. Escolheu-se a cuba para flotação;
- b. Determinou-se o seu volume de polpa ($V_{polpa} = 1450 \text{ cm}^3$). Para a célula mecânica, considerou-se o V_{polpa} como o volume da cuba escolhida;
- c. Considerando-se um condicionamento com 50% de sólidos e uma flotação com 25% de sólidos, calculou-se a densidade de polpa (ρ_{polpa}) utilizada, a partir da seguinte equação:

$$\rho_{polpa} = \frac{-d_{min}}{((d_{min} \times \%_{s.flot}) - (\%_{s.flot}) - (d_{min}))} \quad (11)$$

- d. Determinou-se a massa de polpa utilizada na flotação ($m_{p.flot}$) através da equação:

$$m_{p.flot} = V_{polpa} \times \rho_{polpa} \quad (12)$$

- e. Determinou-se a massa de minério (m_{min}) utilizada para os testes de flotação através da equação:

$$m_{min} = \%_{s.flot} \times m_{p.flot} \quad (13)$$

- f. Determinou-se a massa de água utilizada na flotação ($m_{\acute{a}gua.flot}$) através da equação:

$$m_{\acute{a}gua.flot} = m_{p.flot} - m_{min} \quad (14)$$

- g. Determinou-se a massa de polpa utilizada no condicionamento ($m_{p.cond}$) através da equação:

$$m_{p.cond} = \frac{m_{min}}{\%_{s.cond}} \quad (15)$$

- h. Determinou-se a massa de água utilizada para condicionamento ($m_{\acute{a}gua.cond}$) através da equação:

$$m_{\acute{a}gua.cond} = m_{p.cond} - m_{min} \quad (16)$$

- i. Determinou-se a massa de água utilizada para diluição ($m_{\acute{a}gua.dil}$) através da equação:

$$m_{\acute{a}gua.dil} = m_{\acute{a}gua.flot} - m_{\acute{a}gua.cond} \quad (17)$$

- j. Determinou-se a massa de depressor (m_{dep}), mantendo a sua dosagem constante para os quatro testes. Utilizou-se da seguinte fórmula:

$$m_{dep} = \frac{\zeta_{dep} \times m_{min}}{1.000.000} \quad (18)$$

- k. Determinou-se a massa da solução de depressor ($m_{sol.dep}$) em uma solução de 3% utilizando-se da seguinte fórmula:

$$m_{sol.dep} = \frac{m_{dep} \times 100}{3} \quad (19)$$

- l. Determinou-se a massa de coletor (m_{col}) utilizando-se da seguinte fórmula:

$$m_{col} = \frac{\zeta_{col} \times m_{min}}{1.000.000} \quad (20)$$

- m. Determinou-se a massa da solução de coletor ($m_{sol.col}$) em uma solução de 2,5% utilizando-se da seguinte fórmula:

$$m_{sol.col} = \frac{m_{col} \times 100}{2,5} \quad (21)$$

- n. Adicionou-se o minério e a água utilizada no condicionamento na cuba;
 o. Ligou-se o rotor e regulou-se a rotação para 1200 rpm;
 p. Regulou-se o pH em 9,5 através da adição de soda e adicionou-se o depressor (deixou-se condicionar por 5 minutos);
 q. Adicionou-se o coletor e deixou-se condicionar por 1 minuto;
 r. Diluiu-se a polpa com a água de diluição e ajustou-se o pH;
 s. Ligou-se o ar e coletou-se o flotado até acabar a espuma;
 t. Secou-se e pesou-se o flotado e o afundado;
 u. Levou-se as amostras do flotado e afundado para análises químicas.

A partir do resultado das análises químicas, calculou-se a recuperação metalúrgica (R_{met}), utilizando-se da seguinte fórmula:

$$R_{met} = R_{m\acute{a}s} \times \frac{c}{a} \times 100 \quad (22)$$

E com relação à recuperação mássica ($R_{m\acute{a}s}$) utilizou-se da seguinte equação:

$$R_{m\acute{a}s} = \frac{C}{A} \times 100 \quad (23)$$

4.6.2 Tempo de condicionamento

Construiu-se uma matriz de planejamento, onde realizaram-se nove testes de flotação variando-se o tempo de condicionamento do coletor e do depressor e, mantendo constante, a dosagem de depressor em 500 g/t e a dosagem de coletor em 250 g/t, que são os valores próximos aos utilizados no CMT. A matriz de planejamento pode ser visualizada na TAB. 4.2. A variável X1 representa o tempo de condicionamento do depressor sendo que -1 indica o valor mínimo utilizado (3 minutos), 0 indica o valor médio (5 minutos) e +1 indica o maior valor utilizado (7 minutos). De maneira análoga, a variável X2 representa o tempo de condicionamento do coletor sendo que -1 indica o valor mínimo utilizado (1 minuto), 0 indica o valor médio (3 minutos) e +1 indica o maior valor utilizado (5 minutos).

Tabela 4.2 – Planejamento dos tempos de condicionamento

TESTE	X1	X2	Tempo de condicionamento do depressor	Tempo de condicionamento do coletor
1	-1	-1	3	1
2	-1	0	3	3
3	-1	1	3	5
4	0	-1	5	1
5	0	0	5	3
6	0	1	5	5
7	1	-1	7	1
8	1	0	7	3
9	1	1	7	5

O procedimento para realização dos testes foi equivalente ao descrito no item 4.6.1, utilizando-se dos mesmos equipamentos, reagentes e % de sólidos na flotação e no condicionamento.

4.7 Testes de Flotação em Coluna

Após a escolha da melhor definição da dosagem de reagentes e do tempo de condicionamento para coletor e depressor, realizaram-se também três testes de flotação em coluna para determinação de uma faixa granulométrica ótima.

Separou-se a amostra da alimentação em três faixas de tamanho distintas a serem analisadas conforme TAB. 4.3.

Tabela 4.3 – Flotação para diferentes faixas granulométricas

TESTE	FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS (#)	DOSAGEM DE DEPRESSOR (g/t)	TEMPO DE COND. DEP. (min)	DOSAGEM DE COLETOR (g/t)	TEMPO DE COND. COL. (min)
1	-80# +325#	500	5	250	1
2	-80# +200#				
3	-200# +325#				

O condicionamento foi realizado na célula mecânica conforme o procedimento descrito no item 4.6.1, porém, considerando-se um condicionamento com 60% de sólidos e uma flotação com 15% de sólidos.

Após o condicionamento, realizaram-se os procedimentos a seguir para a flotação em coluna:

- a. Transferiu-se a polpa para o recipiente responsável pela alimentação da coluna, sendo que ambos os registros (tanto da alimentação quanto do reciclo) deveriam encontrar-se fechados para realizar tal ação;
- b. Ligou-se o compressor e ajustou-se a vazão de ar em 1,2 L/min (valor mantido durante toda a alimentação da coluna) (ALVES, 2015);
- c. Acionou-se a bomba peristáltica e regulou-se a sua frequência para o reciclo em 100% (51 Hz) e, em seguida, colocaram-se os recipientes para a coleta de concentrado e rejeito em seus devidos lugares (ALVES, 2015);
- d. Para o completo preenchimento da coluna, abriu-se o registro da alimentação;
- e. Ligou-se o registro da água de lavagem e ajustou-se sua vazão para 0,1 L/min (ALVES, 2015);
- f. Finalizada a alimentação, fechou-se o registro da mesma, e abriu-se o registro de reciclo;
- g. O teste finalizou-se quando a interface polpa/espuma chegou ao topo da coluna, onde em seguida, desligou-se a água de lavagem e o registro do reciclo;
- h. Abriu-se a válvula de descarga para coleta de afundado;
- i. Os produtos foram levados para estufa e posteriormente para pesagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da Amostra da Alimentação

5.1.1 Caracterização Química

A composição química das amostras da alimentação utilizadas neste trabalho pode ser visto na TAB. 5.1.

Tabela 5.1 – Composição química das amostras da alimentação

AMOSTRA PP6124					
PONTO DE AMOSTRAGEM	GERAL	DATA ANÁLISE	23/06/2015 16:01	PROCESSO	PP
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)					
P₂O₅	Fe₂O₃	MgO	CaO	Al₂O₃	Nb₂O₅
10,78	20,21	5,25	17,44	4,42	0,16
SiO₂	TiO₂	BaO	SrO	MnO	
20,49	7,57	0,58	0,41	0,3	

Fonte: CMT, 2015.

Observa-se que a porcentagem de P₂O₅ é de 10,78%, um valor bem abaixo do requerido, que gira em torno de 33,5%. Nota-se, também, que os minerais de ganga que ocorrem em maior proporção são os de silício e ferro, respectivamente.

5.1.2 Caracterização Granulométrica

5.1.2.1 *Peneiramento a Seco e a Úmido*

A TAB. 5.2 mostra a análise granulométrica do peneiramento a seco.

Tabela 5.2 – Análise granulométrica do peneiramento a seco.

Peneiramento a seco					
Frações (#)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
+80#	0,18	5,7	5,8	5,8	94,2
-80# +115#	0,125	9,0	9,1	14,9	85,1
-115# +200#	0,074	28,7	29,1	44,0	56,0
-200# +275#	0,053	19,9	20,2	64,2	35,8
-275# +325#	0,045	7,3	7,4	71,6	28,4
-325# +400#	0,037	8,2	8,3	79,9	20,1
-400#	-	19,8	20,1	100,0	0,0
	Total	98,6			

Inicialmente, realizou-se o peneiramento com 100 g de amostra, obteve-se uma perda de 1,4 g. Esse valor equivale a uma perda mássica de 1,4%. Observou-se também que aproximadamente 20,1% das partículas são menores que 0,037 mm (400#). A partir dos dados obtidos pela TAB. 5.5, construiu-se uma curva granulométrica do peneiramento a seco, observada no GRÁF. 5.1.

Gráfico 5.1 – Curva granulométrica para peneiramento a seco



Analisando-se a curva granulométrica, observou-se que o parâmetro $d_{50} = 0,069$ mm.

As TAB. 5.3 e TAB. 5.4 mostram, respectivamente, as análises granulométricas do peneiramento a úmido sem e com atrição.

Tabela 5.3 – Análise granulométrica do peneiramento a úmido sem atrição

Peneiramento a úmido (sem atrição)					
Frações (#)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
+80#	0,18	7,3	7,3	7,3	92,7
-80# +115#	0,125	8,1	8,1	15,4	84,6
-115# +200#	0,074	22,0	22,0	37,4	62,7
-200# +275#	0,053	15,2	15,2	52,6	47,4
-275# +325#	0,045	10,4	10,4	63,0	37,0
-325# +400#	0,037	6,0	6,0	69,0	31,0
-400#	-	31,0	31,0	100,0	0,0
Total		100			

Tabela 5.4 – Análise granulométrica do peneiramento a úmido com atrição

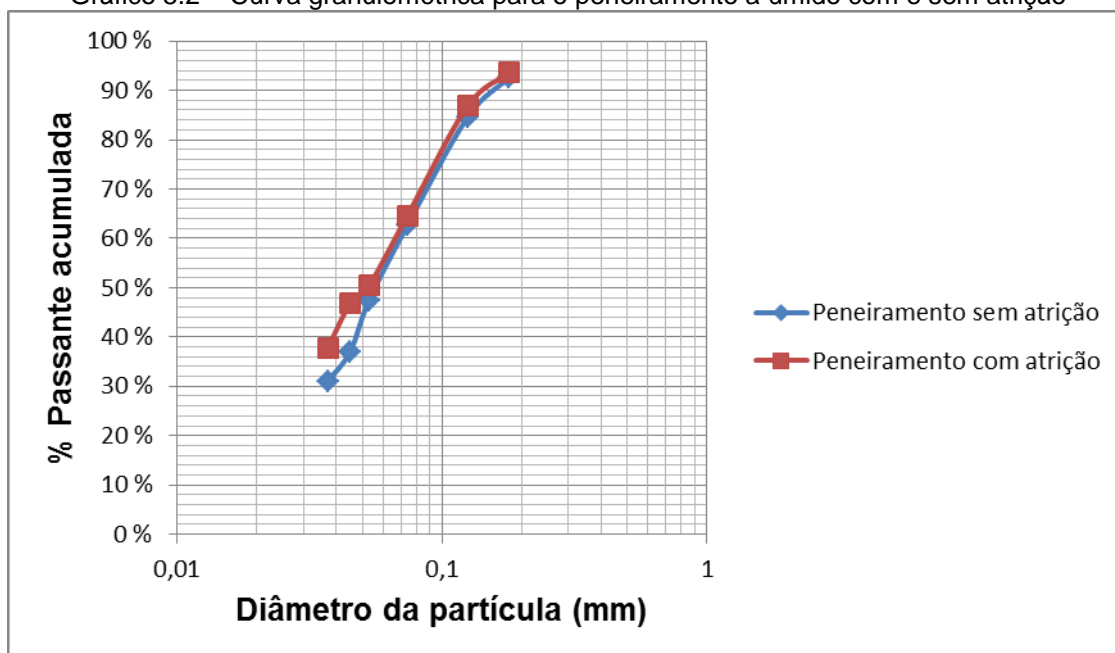
Peneiramento a úmido (com atrição)					
Frações (#)	Abertura (mm)	Massa Retida (g)	% Retida Simples	% Retida Acumulada	% Passante Acumulada
+80#	0,18	6,3	6,3	6,3	93,7
-80# +115#	0,125	6,8	6,8	13,1	86,9
-115# +200#	0,074	22,3	22,3	35,4	64,6
-200# +275#	0,053	14,2	14,2	49,6	50,4
-275# +325#	0,045	3,6	3,6	53,1	46,9
-325# +400#	0,037	9,2	9,2	62,3	37,7
-400#	-	37,7	37,7	100,0	0,0
Total		100			

Inicialmente, em ambos os peneiramentos a úmido, realizou-se o peneiramento com 100 g de amostra. Realizou-se a formação da polpa, adicionando-se 100 ml de água, obedecendo-se a porcentagem de sólidos de 50%. Observou-se que no peneiramento sem atrição, 31% das partículas são menores que 0,037 mm (400#), enquanto que, no peneiramento com atrição observou-se que aproximadamente 37,7% das partículas são menores que 0,037 mm (400#).

Esse desvio de 6,7% significa que necessita-se da operação de atrição antes da realização da flotação, pois através desta, espera-se que as partículas finas que estavam recobrando as partículas maiores desprendam-se. O fenômeno cujas partículas finas aderem-se às grossas é denominado de *slime coating* e é, em alguns casos, prejudicial ao processo de flotação, diminuindo o teor e a recuperação.

A partir dos dados obtidos pelas TAB. 5.3 e TAB. 5.4, construíram-se as curvas granulométricas do peneiramento a úmido sem e com atrição, respectivamente. Os resultados podem ser observados no GRÁF. 5.2.

Gráfico 5.2 – Curva granulométrica para o peneiramento a úmido com e sem atrição



Analisando-se as curvas granulométricas, observou-se que para o peneiramento a úmido sem atrição o $d_{50} = 0,058$ mm, enquanto que, no peneiramento a úmido com atrição o $d_{50} = 0,053$ mm. Portanto, de modo geral, o peneiramento a úmido mostrou-se mais eficaz com relação ao peneiramento a seco, uma vez que a utilização da água auxiliou na passagem das partículas menores, diminuindo-se o entupimento.

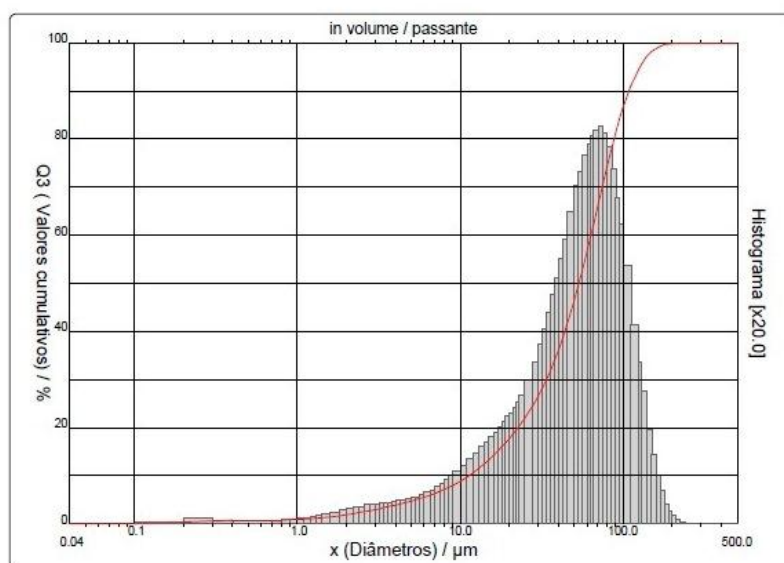
5.1.2.2 Difração de raios laser

O resultado da difração de raios laser pode ser visualizado na TAB. 5.5 e no GRÁF. 5.3.

Tabela 5.5 – Análise Granulométrica do Granulômetro a Laser CILAS 1090.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	
CILAS 1090 Líquido	
Faixa : 0.04 µm - 500.00 µm / 100 Classes	
Ref da amostra	: Sample_X_
Sample Type	: Amostra 1
Sample type	: Ultrafinos
Comentários	:
Líquido	:
Agente dispersante	:
Operador	: Bruno
Empresa	: DEMAT - CEFET MG
Localização	: Belo Horizonte
Data : 17/07/2015	Hora : 13:38:03
Índice med.	: 858
Database name	: CilasDB1
Ultrasom	: 60 s
Obscuration	: 17 %
Diâmetro a 10%	: 11.31 µm
Diâmetro a 50%	: 53.59 µm
Diâmetro a 90%	: 109.03 µm
Diâmetro médio	: 57.79 µm
Fraunhofer	:
Densidade/Fator	: -----
Superfície específica	: -----
Diluição automática	: Não / Não
Medida./Limp.	: 60s/60s/4
SOP name	: Fraunhofer

Gráfico 5.3 – Curva Granulométrica para o Granulômetro a Laser CILAS 1090



Fonte: Laboratório de Materiais do CEFET/MG – Campus I.

Verificou-se com essa análise que ambas as técnicas, tanto o peneiramento quanto a difração de raios laser mostraram-se eficientes e com resultados semelhantes, sendo que o $d_{50} = 0,053$ mm.

Além de que, enfatizou-se a importância da atrição antes dos testes de flotação, a fim de diminuir o fenômeno de *slime coating*.

5.2 Preparação das amostras

5.2.1 Determinação da Umidade e Secagem do Minério

De acordo com o procedimento do item 4.3.1, determinou-se a % de umidade da amostra de minério fosfático. Os resultados podem ser vistos na TAB. 5.6.

Tabela 5.6 – Determinação da Umidade da Amostra de Minério

AMOSTRA	MINÉRIO NATURAL (kg)	MINÉRIO SECO (kg)	% UMIDADE
Saco 1	25,04	16,91	32,48
Saco 2	32,34	21,89	32,33
Média	-	-	32,40

Portanto, a umidade média do minério foi de 32,40%. Em outras palavras, para cada 100 kg de minério fosfático e água, 32,40 kg são de água.

5.2.2 Ensaio para Determinação do Peso Específico dos Sólidos – Picnometria

De acordo com a metodologia proposta no item 4.3.3, realizou-se a calibração dos cinco picnômetros a serem utilizados nos testes. Os resultados podem ser vistos na TAB. 5.7.

Tabela 5.7 – Calibração dos picnômetros

CALIBRAÇÃO DO PICNÔMETRO					
DADOS	PICNÔMETRO 1	PICNÔMETRO 2	PICNÔMETRO 3	PICNÔMETRO 4	PICNÔMETRO 5
Massa do picnômetro vazio (g)	31,84	31,41	29,63	29,93	28,98
Massa do picnômetro com água (g)	81,77	82,08	80,52	80,82	81,18
Temperatura da água (°C)	27	27	27	27	27
Densidade da água nesta temperatura (g/cm ³)	0,9968	0,9968	0,9968	0,9968	0,9968
Volume real do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,05	52,37

Com o valor do volume real de cada um dos picnômetros, realizou-se o teste de picnometria para determinação da densidade média do minério utilizado. Os resultados encontram-se na TAB. 5.8.

Tabela 5.8 – Teste de picnometria I

PICNOMETRIA						
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	TESTE 4	TESTE 5	MÉDIA
Massa do picnômetro vazio e seco (g)	31,84	31,39	29,66	29,93	29,20	30,40
Massa do picnômetro com água (g)	81,66	82,06	80,48	80,74	81,13	81,21
Massa de água (g)	49,82	50,67	50,82	50,81	51,93	50,81
Volume real do picnômetro (cm ³)	50,09	50,83	51,05	51,08	52,37	51,08
Densidade da água (g/cm ³)	0,99461	0,997	0,995	0,995	0,992	0,995
Massa do picnômetro com amostra (g)	33,39	35,45	32,41	33,77	32,93	33,59
Massa da amostra (g)	1,550	4,060	2,750	3,840	3,730	3,186
Massa do picnômetro com água e amostra (g)	82,68	84,42	82,22	83,11	83,57	83,20
Massa de água adicionada ao picnômetro com amostra (g)	49,29	48,97	49,81	49,34	50,64	49,61
Volume de água adicionado ao picnômetro (cm ³)	49,56	49,12	50,04	49,60	51,07	49,88
Volume de minério (cm ³)	0,533	1,705	1,015	1,478	1,301	1,206
Densidade do minério (g/cm ³)	2,909	2,381	2,711	2,598	2,867	2,693

O resultado do teste dos picnômetros 2 e 4 mostraram-se bem distantes dos demais e, portanto, retiraram-nos da estatística a fim de que os resultados se tornassem os mais representativos possíveis. O novo teste pode ser visto na TAB. 5.9.

Tabela 5.9 – Teste de picnometria II

PICNOMETRIA				
DADOS	TESTE 1	TESTE 2	TESTE 3	MÉDIA
Massa do picnômetro vazio e seco (g)	31,84	29,66	29,20	30,23
Massa do picnômetro com água (g)	81,66	80,48	81,13	81,09
Massa de água (g)	49,82	50,82	51,93	50,86
Volume real do picnômetro (cm ³)	50,09	51,05	52,37	51,17
Densidade da água (g/cm ³)	0,99461	0,995	0,992	0,99
Massa do picnômetro com amostra (g)	33,39	32,41	32,93	32,91
Massa da amostra (g)	1,550	2,750	3,730	2,68
Massa do picnômetro com água e amostra (g)	82,68	82,22	83,57	82,82
Massa de água adicionada ao picnômetro com amostra (g)	49,29	49,81	50,64	49,91
Volume de água adicionado ao picnômetro (cm ³)	49,56	50,04	51,07	50,22
Volume de minério (cm ³)	0,533	1,015	1,301	0,95
Densidade do minério (g/cm ³)	2,909	2,711	2,867	2,83

Portanto, com o novo teste de picnometria, a densidade média do minério foi de 2,83 g/cm³.

Essa densidade foi utilizada para os cálculos de densidade de polpa.

5.3 Testes de Flotação em Célula Mecânica

5.3.1 Dosagem de reagentes

Os dados referentes aos teores do concentrado e rejeito, recuperações mássicas e metalúrgicas podem ser visualizados na TAB. 5.10.

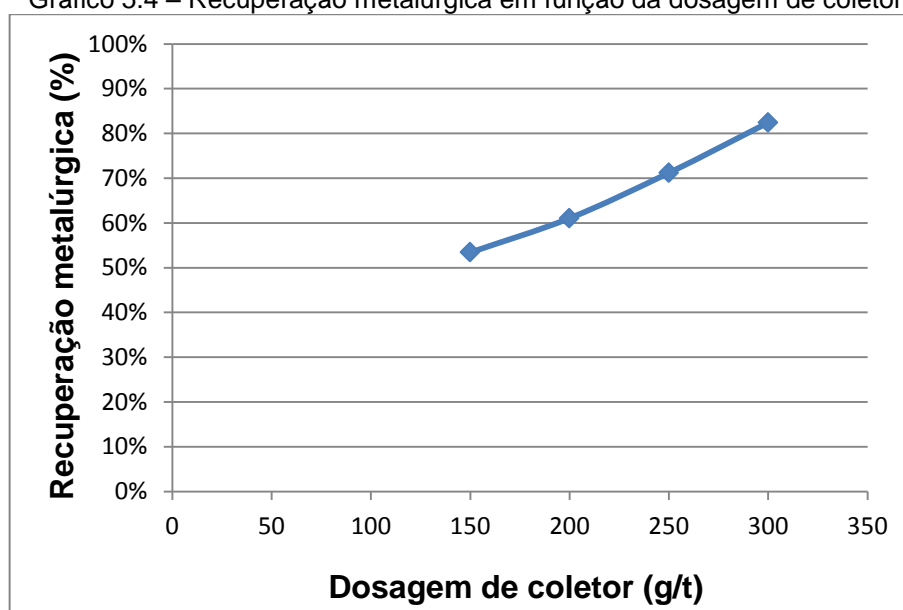
Tabela 5.10 – Teores do concentrado, rejeito e recuperações mássicas e metalúrgicas para as diferentes dosagens de coletor

TESTE	DOSAGEM DE COLETOR (g/t)	TEOR CONCENTRADO (%)	TEOR REJEITO (%)	REC. MÁSSICA (%)	REC. METALÚRGICA (%)
1	150	32,06	6,12	17,96	53,41
2	200	28,36	5,47	23,21	61,06
3	250	29,25	4,21	26,24	71,19
4	300	28,57	2,75	31,19	82,42

De acordo com o GRÁF. 5.4 observou-se que a recuperação metalúrgica aumentou com o aumento da dosagem de coletor. O teste com valor de dosagem de coletor de 300 g/t apresentou a maior recuperação metalúrgica para uma dosagem de depressor constante de 500 g/t.

Isso se deve ao fato de que baixas dosagens de coletor tendem a recuperar menos partículas minerais hidrofóbicas, enquanto que, dosagens de coletor maiores tendem a hidrofobizar mais partículas minerais, com isso obtém-se maior recuperação de partículas minerais hidrofobizadas.

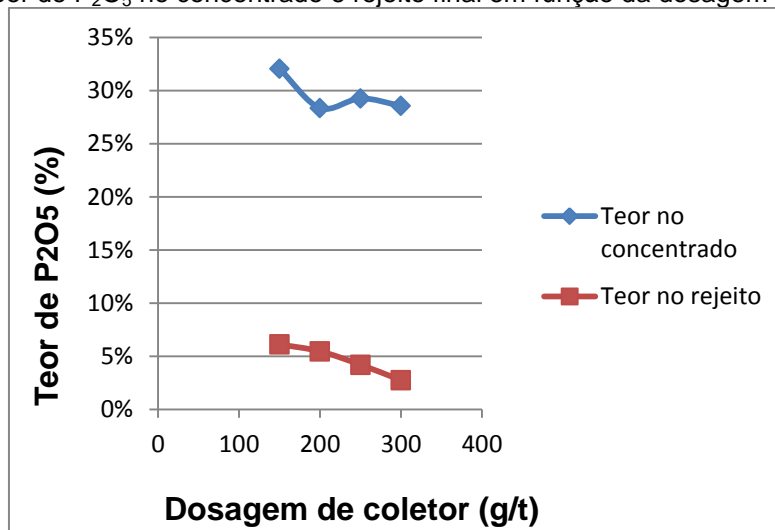
Gráfico 5.4 – Recuperação metalúrgica em função da dosagem de coletor



Com relação ao efeito da variação de coletor sobre o teor de P_2O_5 no concentrado, notou-se no GRÁF. 5.5 que a dosagem de coletor de 150 g/t mostrou-

se superior em relação a esse parâmetro, seguida da dosagem de 250 g/t com um valor intermediário e, por fim, as dosagens de 200 g/t e 300 g/t que mantiveram-se próximas. E com relação ao teor de P_2O_5 no rejeito final, observou-se que a dosagem de coletor de 150 g/t também mostrou-se superior em relação a esse parâmetro, seguida das dosagem de 200 g/t, 250 g/t e 300 g/t.

Gráfico 5.5 – Teor de P_2O_5 no concentrado e rejeito final em função da dosagem de coletor



O parâmetro que apresentou maior teor de P_2O_5 no concentrado final e menor recuperação metalúrgica foi a de 150 g/t. Porém, essa dosagem também apresentou o maior teor de P_2O_5 no rejeito final. Essa baixa dosagem de coletor deixou de carregar partículas minerais de interesse, aumentando-se assim, o teor de P_2O_5 no rejeito final e reduzindo recuperação metalúrgica.

Por apresentar uma recuperação metalúrgica expressiva, com teor de P_2O_5 no concentrado final satisfatório e baixo teor de P_2O_5 no rejeito final, escolheu-se a dosagem de 250 g/t como ótima para a realização dos próximos testes. É válido lembrar que essa dosagem é próxima à utilizada na usina de beneficiamento do CMT, de 225 g/t de coletor.

Notou-se pelo teor dos concentrados a eficiência dos testes, visto que alcançaram-se teores próximos de 30% com uma única etapa de flotação. Além disso, a dosagem de coletor teve uma influência mais significativa na recuperação

metalúrgica do que em relação aos teores, visto que o coletor promove a recuperação ou coleta das partículas minerais de interesse.

5.3.2 Tempo de condicionamento

A partir da escolha da dosagem de coletor ótima, realizaram-se os testes de flotação variando-se os tempos de condicionamento tanto do depressor quanto do coletor e mantendo-se a dosagem de depressor constante.

Os dados referentes aos teores do concentrado e rejeito, recuperações mássicas e metalúrgicas podem ser visualizados na TAB. 5.11.

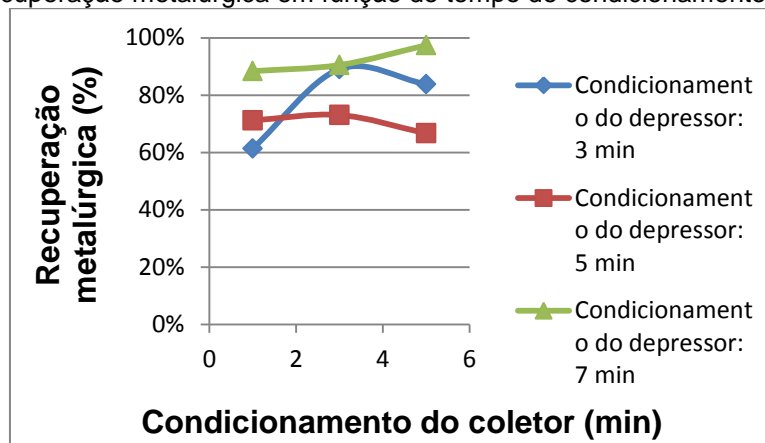
Tabela 5.11 - Teores do concentrado, rejeito e recuperações mássicas e metalúrgicas para os diferentes tempos de condicionamento de coletor e depressor

Teste	Tempo Cond. Depressor	Tempo Cond. Coletor	Teor do Concentrado (%)	Teor do Rejeito (%)	Recup. Mássica (%)	Recup. Metalúrgica (%)
1	3	1	29,65	5,36	22,32	61,38
2	3	3	25,08	1,91	38,29	89,09
3	3	5	24,13	2,79	37,44	83,81
4	5	1	29,25	4,21	26,24	71,19
5	5	3	24,95	4,24	31,57	73,07
6	5	5	24,46	5,01	28,23	66,67
7	7	1	23,01	2,14	41,39	88,36
8	7	3	25,85	1,64	37,74	90,50
9	7	5	24,83	0,48	42,29	97,41

De acordo com o GRÁF. 5.6, observou-se que os tempos de condicionamento do depressor de 3 e 5 minutos apresentaram seu valor ótimo de recuperação metalúrgica para o tempo de condicionamento de coletor igual a 3 minutos. Já o tempo de condicionamento do depressor de 7 minutos apresentou seu ponto ótimo de recuperação metalúrgica para um tempo de condicionamento de coletor igual a 5 minutos. A justificativa está no fato de que tempos de condicionamento elevados fazem com que partículas minerais de ganga sejam hidrofobizadas e arrastadas

juntamente com as partículas minerais de interesse, diminuindo-se assim a seletividade do processo, porém ganhando-se em recuperação metalúrgica.

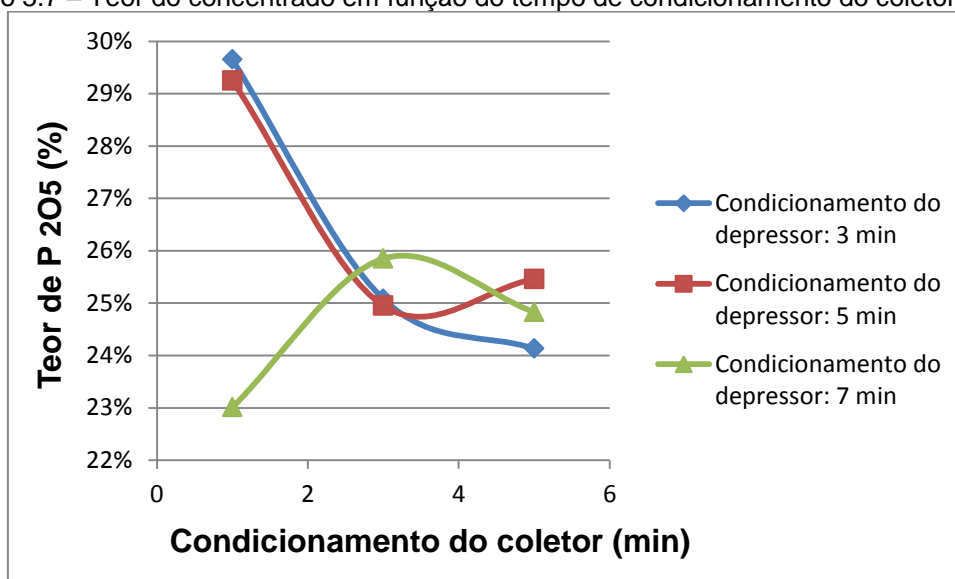
Gráfico 5.6 – Recuperação metalúrgica em função do tempo de condicionamento do coletor



Com relação ao teor de P_2O_5 no concentrado final, notou-se no GRÁF. 5.7 que, em praticamente toda a faixa de tempo de condicionamento do coletor analisada, os tempos de condicionamento de depressor de 3 e 5 minutos mostraram-se próximos, porém o tempo de 3 minutos mostrou-se um pouco superior ao de 5 minutos. Esse padrão muda no tempo de condicionamento do coletor de 3 minutos, onde a curva do tempo de condicionamento do depressor de 5 minutos elevou-se significativamente enquanto que a curva do tempo de condicionamento do depressor de 3 minutos apresentou uma queda acentuada.

Embora a curva do tempo de condicionamento do depressor de 7 minutos apresente uma pequena faixa com alto teor de P_2O_5 no concentrado final, ainda é a curva que apresenta o menor destaque com relação ao parâmetro de teor. A justificativa está no fato de provavelmente o amido de milho deprimiu a apatita, diminuindo-se assim a seletividade do processo, porém ganhando-se em recuperação metalúrgica.

Gráfico 5.7 – Teor do concentrado em função do tempo de condicionamento do coletor



Por apresentar uma recuperação metalúrgica mais expressiva, com teor de P_2O_5 no concentrado final satisfatório e baixo teor de P_2O_5 no rejeito final, escolheu-se o tempo de condicionamento de coletor de 1 minuto e de depressor de 5 minutos como ótimos para a realização dos próximos testes. Isso pode ser justificado devido ao fato da cinética de adsorção da apatita do CMT ser rápida e o tempo de 1 minuto ser suficiente para realizar a adsorção da mesma.

5.4 Testes de Flotação em Coluna

Os dados referentes aos teores do concentrado, recuperações mássicas e metalúrgicas podem ser visualizados na TAB. 5.12.

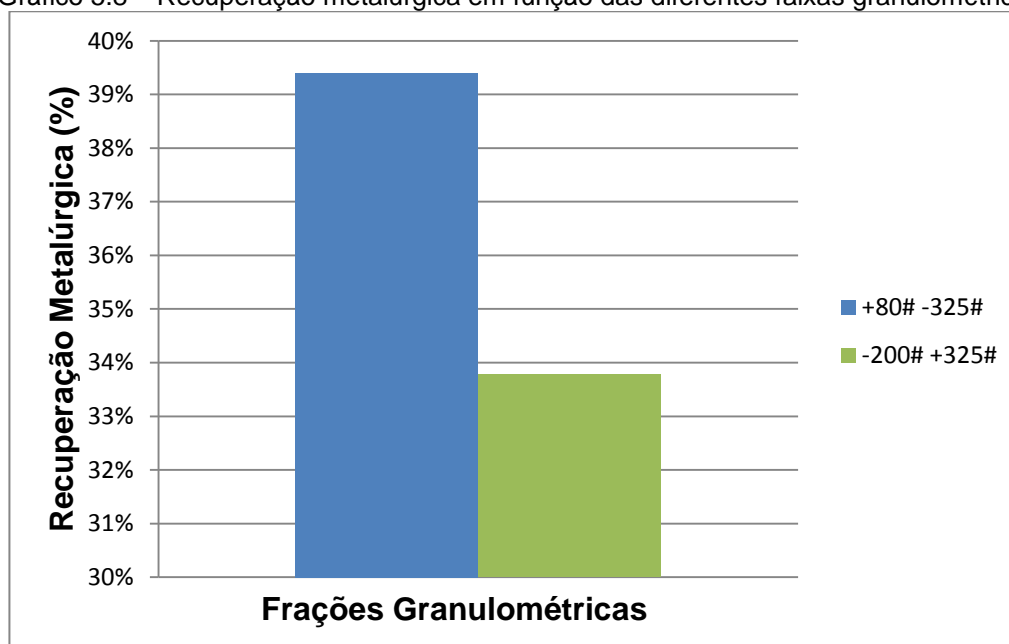
Tabela 5.12 - Teores do concentrado e recuperações mássicas e metalúrgicas para as diferentes faixas granulométricas

Teste	Frações granulométricas	Teor do concentrado(%)	Recuperação Mássica (%)	Recuperação Metalúrgica %
1	-80# +325#	36,91	11,51	39,40
2	-80# +200#	25,30	46,87	110,00
3	-200# +325#	35,20	10,35	33,78

O teste 2 apresentou um resultado equivocado por uma razão desconhecida. Em razão da falta de tempo para repeti-lo, acabou por eliminá-lo das análises.

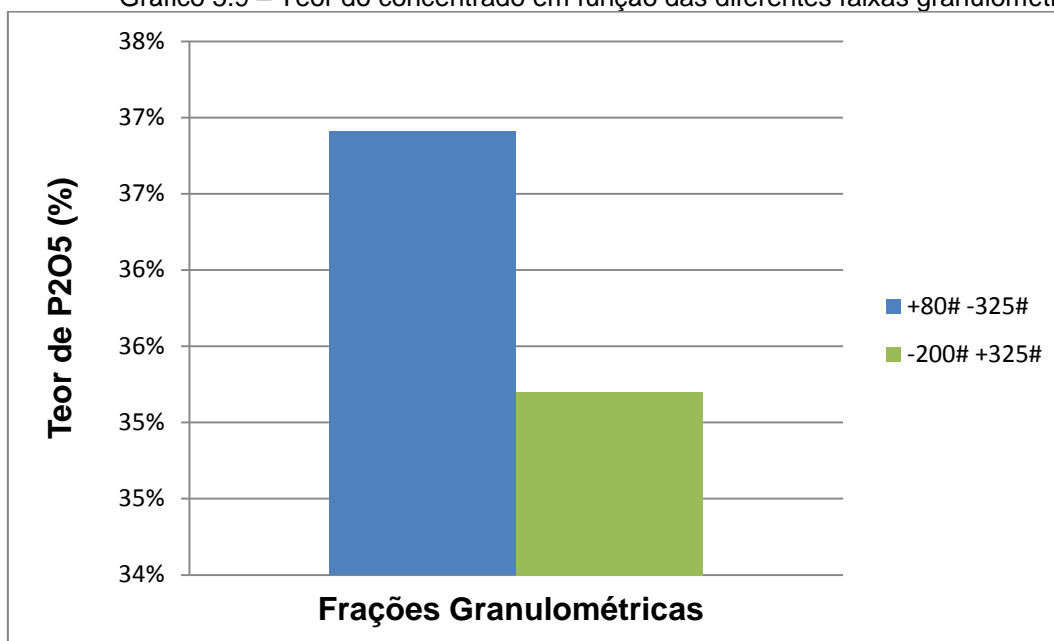
De acordo com o GRÁF. 5.8, observou-se que o teste que apresentou maior recuperação metalúrgica foi o da alimentação da coluna de ultrafinos do CMT, cuja fração corresponde a -80# +325#. Isto pode ser explicado pelo fato das partículas finas apresentarem maior área superficial específica com relação às partículas grossas, e por isso, apresentam grande adsorção de reagentes e consomem uma significativa quantidade de coletor. Como a quantidade de coletor utilizada foi a mesma, a recuperação da fração fina foi menor.

Gráfico 5.8 – Recuperação metalúrgica em função das diferentes faixas granulométricas



De acordo com o GRÁF. 5.9, observou-se que o teste 3 apresentou menor teor de P_2O_5 com relação ao teste 1. Isso pode ser justificado em razão do fenômeno denominado *entrainment*, que corresponde ao arraste de partículas hidrofílicas para a espuma a partir da existência de uma quantidade de água entre as bolhas de ar ou nos interstícios dos agregados de partículas com as bolhas (FUERSTENAU, 1980; NGUYEN, 2003 *apud* SANTANA, 2007, p. 105). O fenômeno é mais evidenciado nas partículas finas, pois elas são mais suscetíveis ao arraste pela água em relação às partículas grosseiras.

Gráfico 5.9 – Teor do concentrado em função das diferentes faixas granulométricas



6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados dos testes de flotação pode-se concluir que o coletor Flotigam 5806 hidrofobizou a apatita de forma seletiva, aumentando-se assim o teor de P_2O_5 em todos os testes realizados.

As condições operacionais ótimas dentro da faixa de dosagem de reagentes e tempo de condicionamento exploradas foram: dosagem de depressor de 500 g/t, dosagem de coletor de 250 g/t, tempo de condicionamento total de 6 minutos (sendo 5 minutos de depressor e 1 minuto de coletor), vazão de ar de 1,2 L/min, vazão de reciclo de 51 Hz e vazão de água de lavagem de 0,1 L/min. A partir das condições listadas, conseguiu-se uma recuperação metalúrgica de 71,19% e um teor de P_2O_5 no concentrado final de 29,25%.

Com relação à granulometria, para as mesmas condições operacionais listadas acima, o melhor resultado foi a fração granulométrica de -80# +325# que corresponde à alimentação da coluna de ultrafinos do CMT.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

- Realizar a atrição da amostra de minério antes da realização dos testes de flotação;

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Rodrigo Oscar de. **Alternativas de Processo para Concentração do Minério Fósforo-Uranífero de Itataia**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. 200 p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

ALVES, Luciana Pereira. **Implantação de coluna de flotação no laboratório de tratamento de minérios do CEFET/MG, Unidade Araxá e realização de estudo exploratório**. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

AMORIM, Isabella Boaventura de Souza Frezza. **Influência do Tamanho das Partículas na Flotação**. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

ARAUJO, Ramon Veras Veloso de.; SOBRAL, Luis Gonzaga Santos.; SANTOS, Ronaldo Luiz. **Produção de Fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira/Fosfertil**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 19, 2002, Recife. Anais. Recife: CETEM/MCT, 2002. p. 439-445.

BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. **Flotação no Tratamento de Minério**. Recife: [s.n.], 2008. 209 p.

BARROS, Luiz Antônio Fonseca de. **Caracterização Tecnológica de Minério Fosfático de Salitre – Patrocínio – MG**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 446 p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

BARROS, Luiz Antônio Fonseca de. Flotação de Minérios Fosfáticos. In: CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 5, p. 116-157.

CALDARA, Julio Athanazio; CORREIA, Julio Cesar G. **Abordagem sobre a aplicação da flotação em coluna em beneficiamento mineral**. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18., 2010, Rio de Janeiro. Anais. São Paulo: CETEM, 2010. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XVIII_jic_2010/Julio_Caldara.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2015.

CARVALHO, William Ricardo de. **Flotação Colunar Reversa de Minério de Ferro: O Efeito da Granulometria da Sílica**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2003. 80 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios).

CHAVES, Arthur Pinto.; FILHO, Laurindo de Salles Leal.; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Flotação. In: LUZ, Adão Benvindo da.; SAMPAIO, João Alves.; FRANÇA, Sílvia Cristina. **Tratamento de Minérios**. 5 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 11, p. 465-513.

COUTO, Hudson Jean Bianquini.; FRANÇA, Sílvia Cristina Alves.; SAMPAIO, João Alves. **Recuperação de Finos na Indústria Mineral utilizando os Processos de Flotação em Coluna e por Ar Dissolvido**. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INSTITUCIONAL, 1., 2007, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/SERIES_PC|completa_para_HP.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2015.

GUIMARÃES, R.C.; ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C. **Reagents in igneous phosphate ores flotation**. Minerals Engineering, Araxá, v. 18, p. 199-204, 2005.

JÚNIOR, Gerson Martins Bastos. **Uso de Analisadores Químicos Online para Controle de Processos na Concentração de Minérios de Ferro**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2010. 85 p. (Monografia, Especialização, Tratamento de Minérios).

LOUREIRO, F.E.L.; MONTE, M.B.M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais – Fosfato. In: LUZ, Adão Benvindo da.; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. Cap. 7, p. 141-174.

LUZ, Adão Benvindo da.; LINS, Fernando Freitas. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: LUZ, Adão Benvindo da.; SAMPAIO, João Alves.; ALMEIDA, Salvador. **Tratamento de Minérios**. 4 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 1, p. 3-16.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A.; ANDRE, A.C.; GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. **Enciclopédia Multimídia de Minerais. [on-line]**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>

MATIOLO, Elvies. **Recuperação Otimizada de Finos de Minério de Cobre e Molibdênio por Flotação Não Convencional**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2005. 84 f. (Dissertação, Mestrado, Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral).

NUNES, Aline Pereira Leite. Reagentes depressores de carbonatos: uma revisão. In: NUNES, Aline Pereira Leite.; PERES, Antônio Eduardo Clark. **Série Tecnologia Mineral**. v. 89. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011. Cap. 1, p. 1-47.

NUNES, Tiago Caixeta. **Práticas Industriais para Instrumentação e Controle em Circuitos de Flotação Mecânica**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2010. 38 p. (Monografia, Especialização, Beneficiamento Mineral).

OLIVEIRA, Jardel Alves de. **Grau de Saponificação de Óleos Vegetais na Flotação Seletiva de Apatita de Minério Carbonatítico**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2005. 187 p. (Dissertação, Mestrado, Tratamento de Minérios).

OLIVEIRA, Michelly dos Santos. **Flotação em Coluna do Rejeito Remoído do Processo de Concentração da Apatita**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química, 2004. 123 p. (Dissertação, Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos).

OLIVEIRA, Michelly dos Santos. **Minério Fosfático Sílico-Carbonatado: Estudo Fundamental**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 207 p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

OLIVEIRA, Michelly dos Santos.; SOUZA, Marlúcio Dias de. **Tratamento de Minérios**. Araxá: [s.n.], 2008. 219 p.

PAIVA, Paulo Renato Perdigão de. **Propriedades de Superfície de Apatita Provenientes de Rochas de Filiação Carbonatítica e sua Concentração por Flotação**. Brasília: Instituto de Geociências da UnB, 2011. 160 f. (Tese, Doutorado).

PAPINI, Claudemir José. **Estudo Comparativo de Métodos de Determinação do Tamanho de Partícula**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2003. 121 p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Nuclear – Materiais).

RESENDE, Ítalo Augusto. **Influência da Aplicação de Ferramentas da Qualidade: Um Estudo de Caso na Usina de Beneficiamento de Minérios da Vale Fertilizantes do Município de Tapira**. 250 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

SAMPAIO, João Alves.; SILVA, Fernanda Arruda Gomes da. Análise Granulométrica por Peneiramento. In: SAMPAIO, João Alves.; FRANÇA, Silvia Cristina Alves.; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios; Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 3, p. 53-72.

SAMPAIO, João Alves.; SILVA, Fernanda Arruda Gomes da. Determinação das Densidades de Sólidos e de Polpas. In: SAMPAIO, João Alves.; FRANÇA, Silvia Cristina Alves.; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios; Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 2, p. 37-51.

SAMPAIO, João Alves.; BALTAR, Carlos Adolpho Magalhães. Ensaio de Flotação. In: SAMPAIO, João Alves.; FRANÇA, Silvia Cristina Alves.; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios; Práticas Laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 13, p. 237-252.

SANTANA, Ricardo Corrêa de. **Análise da Influência do Tamanho da Partícula na Flotação da Apatita em Coluna**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química, 2007. 166 f. (Dissertação, Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SANTANA, Ricardo Corrêa de. **Efeito da Altura da Coluna na Flotação de Minério Fosfático em Diferentes Granulometrias**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química, 2011. 169 f. (Tese, Doutorado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SANTOS, Everton Pedroza dos. **Alternativa para o Tratamento de Ultrafinos de Minério de Ferro da Mina do Pico/MG por Flotação em Coluna**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2010. 136 f. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa).

SANTOS, Leandro Henrique. **Avaliação dos Efeitos da Dosagem de Depressor e do pH da Polpa na Flotação de Minério Fosfático: Um Estudo Experimental de Caso**. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SANTOS, Mariana Alves dos. **Estudo da Influência de Íons Contaminantes na Flotação de Apatita em Coluna**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química, 2010. 149 f. (Dissertação, Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SILVA, Alessandra Achcar Monteiro Silva. **Estudo sobre a Flotação de Silicatos em Coluna para o Processo de Concentração da Apatita**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química, 2005. 121 p. (Dissertação, Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SILVA, Lucas Pereira da. **Estudo da Utilização de Coluna de Flotação nas Etapas Cleaner e Recleaner de Concentração de Minério Fosfático**. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

SILVEIRA, João Paulo Barcelos. **Cinética de Flotação e Equipamentos: Conceitos e Comparações**. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

SOUZA, Antônio Eleutério de.; FONSECA, David Siqueira. Fosfato. In: NERY, Miguel Antônio Cedraz. **Sumário Mineral 2009**. v. 29. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4003>. Acesso em 16 abr. 2015.

TESTA, Francisco Gregianin. **Avanços na Flotação de Finos de Minério com Condicionamento em Alta Intensidade**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2008. 82 f. (Dissertação, Mestrado, Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral).

VERAS, Moacir Medeiros. **Influência do Tipo de Espumante nas Características de Espuma produzida na Flotação**. Recife: Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, 2010. 64 p. (Dissertação, Mestrado, Minerais Industriais).

VIEIRA, Ana Maria. **Efeito da Granulometria na Flotação de Quartzo**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 167 p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).