



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

LUCIANA PEREIRA ALVES

IMPLANTAÇÃO DE COLUNA DE FLOTAÇÃO NO LABORATÓRIO DE  
TRATAMENTO DE MINÉRIOS DO CEFET/MG, UNIDADE ARAXÁ E REALIZAÇÃO  
DE ESTUDO EXPLORATÓRIO

ARAXÁ – MG

2015

LUCIANA PEREIRA ALVES

IMPLANTAÇÃO DE COLUNA DE FLOTAÇÃO NO LABORATÓRIO DE  
TRATAMENTO DE MINÉRIOS DO CEFET/MG, UNIDADE ARAXÁ E REALIZAÇÃO  
DE ESTUDO EXPLORATÓRIO

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

Orientador: Prof. Dra. Michelly dos Santos  
Oliveira

ARAXÁ – MG

2015

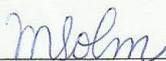
LUCIANA PEREIRA ALVES

IMPLANTAÇÃO DE COLUNA DE FLOTAÇÃO NO LABORATÓRIO DE  
TRATAMENTO DE MINÉRIOS DO CEFET/MG, UNIDADE ARAXÁ E REALIZAÇÃO  
DE ESTUDO EXPLORATÓRIO

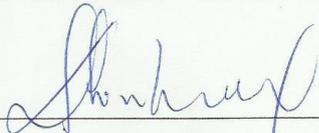
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Centro Federal de Educação Tecnológica de  
Minas Gerais, Unidade Araxá, como requisito  
parcial para obtenção do título de Engenheiro  
de Minas.

Data de aprovação: 14 / 08 / 2015

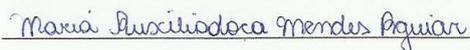
Banca Examinadora:



MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA – Presidente da Banca Examinadora  
Professora Doutora – CEFET-MG – Orientadora



ALEXANDRE DIAS LINHARES  
Professor Mestre – CEFET-MG



MARIA AUXILIADORA MENDES AGUIAR  
Professora Mestre – CEFET-MG

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me oferecido todas as condições para a realização deste trabalho, por todas as oportunidades que encontrei pelo caminho e pela saúde e determinação que pude empregar na realização dos meus objetivos.

Aos meus professores que me ajudaram a construir uma base de conhecimento técnico imprescindíveis para minha formação acadêmica. Em especial agradeço a minha orientadora Prof. Michelly dos Santos Oliveira, pelo apoio, paciência, incentivo e por tudo o que me ensinou até aqui. Ao Prof. Leandro Henrique Santos por sua disponibilidade e atenção de sempre. Vocês são exemplos pra mim.

Ao Prof. Alexandre Linhares, ao João Victor e demais envolvidos, por todo o empenho na montagem da unidade experimental utilizada neste estudo tornando-o possível, meu muito obrigada! A Prof. Maria Auxiliadora (Dodora) pela colaboração na execução dos ensaios com tanta disponibilidade.

A Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, na pessoa do Engenheiro Fabiano Capponi, pelo projeto e doação da coluna de flotação implantada.

A Vale Fertilizantes (CMT) pela disponibilização das amostras utilizadas neste trabalho.

Aos meus colegas de turma, em especial ao Luís Alberto, pela parceria durante todo este trabalho, pela paciência e amizade. Muito obrigada por tudo, Pato!

Aos meus pais Edivaldo e Rosângela, e ao meu irmão Fábio, que são a razão de todas as minhas conquistas. Por vocês, pelo apoio de uma vida inteira, é que estou aqui. Amo vocês incondicionalmente!

## RESUMO

A flotação é um dos métodos de concentração mais empregados na indústria mineral. A coluna de flotação é um dos equipamentos de destaque neste processo e tem apresentado crescente aplicação em escala industrial. Destaca-se sua potencialidade quanto à concentração de minérios complexos e de menores teores, obtenção de melhores concentrados, maior rendimento metalúrgico e o menor investimento de capital. Logo, o domínio do equipamento e variáveis operacionais, proporcionando melhor aproveitamento da coluna de flotação de acordo com as necessidades de cada empresa, é parte essencial da formação acadêmica de estudantes que atuarão na área de tratamento de minérios. O sucesso na sua utilização depende de alguns fatores, dentre os quais: a definição de parâmetros obtidos em testes de laboratório, além do estudo e entendimento das variáveis operacionais deste tipo de equipamento. Desta forma, a implantação de uma coluna de flotação de bancada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG – Unidade Araxá e a realização de ensaios exploratórios no equipamento, utilizando minério fosfático, são objetivo deste trabalho. Foram realizados ensaios utilizando minério fosfático proveniente da Unidade Industrial de Beneficiamento de Minérios da empresa Vale Fertilizantes, instalada no município de Tapira, MG, onde as concentrações dos reagentes, bem como o tempo de condicionamento, basearam-se na prática da Vale Fertilizantes. Observou-se que, os resultados obtidos apresentaram maior relevância para o *startup* da unidade experimental instalada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, do que em relação à pertinência das características dos produtos obtidos nos ensaios.

**Palavras-chave:** concentração de minérios, flotação, coluna, ensaios exploratórios, fosfato.

## ABSTRACT

Flotation is one of the most used concentrating methods in mineral industry. The flotation column is one of the featured equipment in this method, and it has shown increased use in industrial scale. It stands out for its potential for complex and low-grade ores concentration, obtaining better concentrated, higher metallurgical performance and lower capital investment. Thus, the domain of the equipment and operational variables, providing better use of the flotation column according to the needs of each company, is an essential part of the academic education of students who will work in mineral processing area. The successful use depends on several factors, among them: defining parameters obtained in laboratory tests, in addition to the study and understanding of the operating variables of this type of equipment. Thereby, the implementation of a column batch flotation in the Mineral Treatment Laboratory of CEFET - Araxá/MG, and performing tests in the equipment, using phosphatic ore, are the purpose of this study. The tests were conducted using phosphatic ore from the Mineral Processing Industrial Unit of Vale Fertilizantes company, located in the city of Tapira, MG. The concentrations reagents used, as well as the conditioning time, were based on the practice of Vale Fertilizantes. It was observed that the results showed greater relevance to the startup of the experimental unit, installed in the Mineral Treatment Laboratory of CEFET/MG in Araxá, than in relation to the relevance of the characteristics of the products obtained in the tests.

**Keywords:** mineral processing, flotation, column, exploratory tests, phosphate.

## LISTA DE FIGURAS

### A. Quadros

Quadro 3.1: Técnicas de concentração de minerais. ....	8
Quadro 3.2: Evolução dos Sistemas de Flotação.....	9
Quadro 3.3: Etapas da Flotação.....	13

### B. Figuras

Figura 3.1: Mineral Apatita. ....	5
Figura 3.2: Circuito de Flotação. ....	14
Figura 3.3: Máquina de Flotação (Modelo Wemco). ....	15
Figura 3.4: Arranjo de Células de Flotação.....	16
Figura 3.5: Representação Esquemática da Coluna de Flotação. ....	18
Figura 4.1: Fluxograma do circuito do minério friável de Usina de Beneficiamento da Vale Fertilizantes de Tapira-MG. ....	25
Figura 4.2: Esquema detalhado da unidade experimental. ....	27
Figura 4.3: Coluna de Flotação implantada.....	28
Figura 4.4: Aerador. ....	29
Figura 4.5: Gotejador.....	30
Figura 4.6: Sistema de alimentação e reciclo. ....	31
Figura 4.7: Sistema de descarga do flotado e afundado. ....	31
Figura 4.8: Célula de flotação Denver.....	32
Figura 5.1: Ensaio sem formação de camada de espuma. ....	36
Figura 5.2: a) Vazão de ar 1,2 L/min; b) Vazão de ar 2,0 L/min. ....	37
Figura 5.3: Vazão de ar 3,2 L/min.....	38
Figura 5.4: Ensaio 4.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.2: Variáveis do Planejamento Preliminar. ....	35
Tabela 4.3: Variáveis do Planejamento Executado .....	35
Tabela 5.1: Massa dos produtos e perdas de massa por ensaio .....	39
Tabela 5.2: Teores e Recuperações Metalúrgica e Mássica por ensaio.....	40

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Fósforo e o Mineral Apatita.....	4
3.2	Tratamento de Minérios.....	5
3.3	Concentração de Minérios .....	6
3.4	Concentração de Minérios Por Flotação .....	8
3.4.1	Elementos da Flotação .....	9
3.4.2	Fases e Interfaces da Flotação.....	10
3.4.2.1	Fases.....	10
3.4.2.2	Interfaces .....	12
3.4.3	Etapas e Circuitos de Flotação .....	13
3.4.4	Equipamentos de Flotação .....	14
3.4.4.1	Células Mecânicas de Flotação .....	14
3.4.4.2	Colunas de Flotação .....	16
3.4.4.2.1	Controle do Processo de Flotação em Coluna – Variáveis Manipuladas e Variáveis de Controle.....	18
3.4.4.2.2	Variáveis Operacionais de Flotação em Coluna .....	19
3.4.4.3	Colunas x Células Mecânicas .....	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
4.1	Amostra de Alimentação .....	25
4.1.1	Caracterização da Amostra de Alimentação .....	26
4.2	A Unidade Experimental .....	26
4.2.1	Descrição dos Sistemas Operacionais da Unidade Experimental .....	29
4.3	Preparação e Condicionamento da Polpa.....	32
4.4	Operação da Coluna de Flotação .....	33

4.5	Planejamento Experimental .....	34
4.5.1	Planejamento Preliminar .....	34
4.5.2	Planejamento Executado .....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
5.1	Resultado dos Ensaioes Preliminares .....	36
5.2	Planejamento Executado .....	38
5.3	Fatores Dificultantes nos Ensaioes .....	41
6	CONCLUSÃO .....	43
	REFERÊNCIAS .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

Desenvolvido no início do século XIX, o processo de flotação baseia-se nas propriedades físico-químicas de superfície para a separação de diferentes espécies de partículas minerais. Aplicado como um método de concentração no tratamento de minérios, este processo avançou tecnologicamente, ao longo do tempo, ganhando grande importância no cenário industrial. A utilização de reagentes específicos permite a manipulação do grau de hidrofobicidade das partículas de minério, o que caracteriza a seletividade do processo.

Os processos físicos tradicionais, gravimétricos, magnéticos e eletrostáticos, em grande parte baseados nas propriedades naturais dos minerais, não teriam possibilitado a escala de produção necessária dos metais básicos (cobre, chumbo, zinco e níquel) a partir dos sulfetos minerais. Também não teria sido possível a produção atual dos metais nobres, nem a produção do fosfato necessário ao desenvolvimento da agricultura. Até mesmo grande parte da produção mundial de minério de ferro, necessário à produção de aço nos níveis de consumo atual, só se tornou possível nas últimas décadas com a utilização em larga escala do processo de flotação (OLIVEIRA, 2007, p. 133).

Neste sentido, a coluna destaca-se como um equipamento de flotação que apresenta características eficazes na concentração de minérios cada vez mais complexos, de baixos teores e granulometrias de liberação muito finas, considerando que o crescimento acelerado das demandas por recursos minerais vem gerando desafios, pois as jazidas mais ricas e menos complexas têm chegado à exaustão.

Além disso, pode-se destacar:

As melhorias substanciais na qualidade dos concentrados obtidos nas colunas em diversas unidades industriais, operando com diferentes tipos de minérios, somados aos ganhos no desempenho metalúrgico e à economia nos custos de capital e de operação, demonstram a importância desse equipamento para a indústria mineral. Tais fatores tem sido decisivos para a aplicação das colunas em processos de flotação, tanto para novos projetos, como para expansões industriais (CALDARA; CORREIA, 2010, p. 2).

Realizou-se no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, a implantação de uma coluna de flotação dentro dos padrões e características

requeridos para este tipo de equipamento. Desta forma, é possível que os ensaios sejam realizados dentro dos princípios de funcionamento ideais. Este tipo de ensaio, em escala laboratorial, é usual para a determinação de parâmetros para escala industrial, apresentando resultados satisfatórios.

Com finalidade acadêmica, a implantação desta coluna de flotação se fez necessária para a formação prática dos alunos desta unidade quanto ao domínio do equipamento e variáveis operacionais, proporcionando melhor aproveitamento da coluna de flotação de acordo com as necessidades de cada empresa. Além da implantação, foram realizados ensaios exploratórios com caráter preliminar, utilizando minério fosfático, que permitiram a observação da eficiência do equipamento implantado.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Realizar a implantação de uma coluna de flotação no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, bem como ensaios exploratórios no equipamento, utilizando minério fosfático.

### **2.2 Objetivos Específicos**

São objetivos específicos deste trabalho:

2.2.1 Discutir a importância da realização de concentração de minérios por flotação em coluna;

2.2.2 Implantar coluna de flotação de bancada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá;

2.2.3 Realizar ensaios exploratórios no equipamento implantado, considerando as seguintes variáveis: vazão de ar; vazão de água de lavagem e vazão de reciclo de polpa.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fósforo e o Mineral Apatita

O elemento fósforo (símbolo químico “P”) apresenta diversas aplicações, mas se encontra na agricultura sua principal utilização por ser o grande responsável pela geração de energia para produção vegetal. Por se oxidar com facilidade, o fósforo não é encontrado livre na natureza, estando este presente mais comumente nos fosfatos (SOUZA, *et al.*, 2009).

Este elemento desempenha função chave na fotossíntese, no metabolismo de açúcares, no armazenamento e transferência de energia, na divisão celular e na transferência da informação genética. É essencial para que a planta cresça e reproduza-se, promovendo a formação inicial, o desenvolvimento da raiz e o crescimento do vegetal. Também contribui para aumentar a resistência da planta a algumas doenças, acelera a cobertura do solo para proteção contra erosão, afeta a qualidade das frutas, dos vegetais e dos grãos, sendo vital para a formação de sementes (SANTANA, 2007, p. 8).

A rocha fosfática é a única fonte viável de fósforo, estando contida nos depósitos de origem sedimentar, ígnea e biogenética. Os depósitos de origem sedimentar compõe aproximadamente 85% da oferta mundial, os de origem ígnea representam cerca de 15% e os de origem biogenética (formados por concentrações orgânicas nitrogenadas originadas pelo dejetos de aves) tem menor representatividade econômica. Cerca de 80% das jazidas fosfáticas naturais brasileiras são de origem ígnea (SOUZA; FONSECA, 2009).

Embora o fósforo esteja presente em diversos minerais e, muitos deles apresentem teores superiores aos observados na apatita, apenas os componentes da série deste mineral apresentam-se como minerais-minérios de fósforo. A apatita apresenta teores variáveis entre 5% e 15%  $P_2O_5$  e encontra-se, em grande parte, em rochas carbonatíticas. Sua principal aplicação é na fabricação de ácido fosfórico, como matéria-prima de fertilizantes.

Com fórmula química  $Ca_5(PO_4)_3(F, OH, Cl)$ , este mineral possui dureza 5, densidade relativa entre 3,1 e 3,2. Possui hábito hexagonal, granular, tabular ou compacto, fratura conchoidal, brilho vítreo a subresinoso e é usualmente incolor, podendo ser branco, azul esverdeado, violeta azulado, amarelo, marrom, cinza e vermelho. Ocorre associada a quartzo, feldspato, turmalinas, muscovita, berilo entre outros (MACHADO *et al.*, 2015). A Figura 3.1 apresenta um cristal de apatita.

Figura 3.1: Mineral Apatita.



Fonte: OLIVEIRA, 2004, p. 8.

O estado de Minas Gerais é detentor da maior reserva brasileira de fosfato, no qual 32,6% do total nacional está contida no município de Tapira, onde o teor médio de fosfato é de 7,5% e a composição mineralógica de sua assembleia é considerada como sendo das mais complexas no contexto nacional.

O complexo de Tapira é composto, principalmente, de rochas ultrabásicas, com predomínio de piroxênio (em torno de 80%). Enquanto as jazidas de fosfato e nióbio são constituídas por apatita e pirocloro (minerais primários), a de titânio é formada por anatásio, um produto secundário, gerado a partir da perovskita. As jazidas de titânio, nióbio e terras raras são residuais e localizam-se no manto de intemperismo (ARAÚJO et al. 2002, p. 3).

### 3.2 Tratamento de Minérios

As substâncias minerais apresentam-se à sociedade moderna como insumos indispensáveis à sua sustentação e progresso. Qualquer atividade agrícola ou industrial seja no campo da metalurgia, da indústria química, da construção civil ou do cultivo da terra, utiliza os minerais ou seus derivados. (SANTANA, 2011 *apud* LUZ e LINS, 2004).

Na maioria dos casos, os minerais apresentam-se na natureza de forma a necessitar da aplicação de técnicas às quais se visa sua preparação para processos químicos ou de metalurgia extrativa, possibilitando aplicações industriais. Esta preparação é a incumbência do tratamento de minérios e tem finalidade econômica. Segundo Lins e Luz (2004, p. 3), “Tratamento ou Beneficiamento de Minérios consiste de operações (aplicadas aos bens minerais) visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais”.

Com base em um fluxograma típico de tratamento de minérios, as operações unitárias recebem a seguinte classificação (OLIVEIRA; SOUZA, 2012):

- **Fragmentação ou Cominuição:** São as operações que visam a redução do tamanho das partículas do minério, com o objetivo de obter a individualização das espécies minerais a serem separadas. As principais operações são britagem e moagem;
- **Classificação:** São as operações que visam a separação das partículas por ordem de tamanho. As principais operações são peneiramento e classificação em meio fluido;
- **Concentração:** São as operações que visam o enriquecimento de um minério, fazendo uso de suas propriedades físicas e físico-químicas, tendo como produtos, o concentrado e o rejeito;
- **Desaguamento:** São as operações que visam a redução ou eliminação da água para obtenção de um produto com menor umidade ou seco. As principais operações são espessamento, filtração e secagem.

Estas etapas são aplicadas às partículas minerais de forma a se obter, no final do processo, dois produtos distintos: um concentrado de mineral-minério, composto pela porção economicamente útil do minério. E um rejeito, formado, idealmente, pelas partículas não aproveitáveis do minério, denominadas minerais de ganga. Ambos acatando, dentre outras, as especificações de teor e recuperação preestabelecidas.

Historicamente, registra-se a utilização de métodos gravíticos na recuperação de ouro há 400 a.C. pelos egípcios, em depósitos aluvionares. A partir do século XVIII, com a invenção da máquina a vapor, ocorreram inovações mais significativas na área de tratamento de minérios. Em 1864, o emprego do tratamento de minérios se limitava praticamente àqueles de ouro, cobre nativo e chumbo. Os grandes desenvolvimentos na área de beneficiamento de minérios ocorreram no final do século XIX e início do século XX, onde os avanços se orientaram, do ponto de vista tecnológico, pelo desenvolvimento de equipamentos e pela otimização de processos por automação e computação (LINS; LUZ, 2004).

### **3.3 Concentração de Minérios**

As operações de concentração – separação seletiva de minerais – baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas propriedades se destacam: peso específico (ou

densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma, etc. (LINS e LUZ, 2004, p. 3).

Essa separação torna-se efetiva, caso as três seguintes condições sejam atendidas (OLIVEIRA, 2004 *apud* GUIMARÃES, 1995):

- Liberação das espécies minerais, isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica;
- Existência de propriedade diferenciadora seja ela natural ou induzida;
- Separabilidade dinâmica, correspondendo à característica necessária ao equipamento no qual está ocorrendo a concentração do mineral.

“No processamento mineral pode-se fazer o uso de técnicas de concentração gravítica, centrífuga, magnética ou físico-química para separar os minerais de interesse dos demais que não agregam valor comercial” (VERAS, 2010, p. 1). Para tanto, necessita-se da liberação física entre os minerais. Este fato é atendido através das operações de fragmentação (ou cominuição) onde o minério é submetido à britagem e/ou moagem, resultando em diminuição granulométrica das partículas minerais na ordem de centímetros a micrômetros.

Embora o grau de liberação aumente com a redução do tamanho das partículas, a seletividade da separação diminui. Isto porque os equipamentos de concentração operam em faixas granulométricas específicas e características, mas geralmente a seletividade desses equipamentos é maior para partículas de granulometria mais grosseira (SANTANA, 2011).

Uma vez liberadas e apresentando granulometria adequada, as partículas podem ser submetidas às operações de concentração, de onde serão obtidos dois produtos distintos: um concentrado e um rejeito. O Quadro 3.1 apresenta técnicas de concentração de minerais.

A separação de minerais pode ser muito fácil ou complexa, dependendo do minério. Quando a diferença de propriedade física (densidade ou susceptibilidade magnética, por exemplo) entre os minerais que se quer separar não existe ou é insuficiente, utilizam-se técnicas que tomam como base propriedades físico-químicas de superfície dos minerais (SANTANA, 2011). Neste caso, a concentração é realizada mais amplamente por flotação.

Quadro 3.1: Técnicas de concentração de minerais.

<b>Propriedades</b>	<b>Métodos</b>
Ópticas	Escolha óptica (manual ou automática)
Densidade	Meio denso, jigues, mesas, espirais, cones, ciclones, ciclones de meio denso, etc.
Forma, Peso específico	Idem 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.

### 3.4 Concentração de Minérios Por Flotação

A flotação é um método de concentração mineral baseado nas propriedades físico-químicas de superfície das partículas. É atualmente uma das tecnologias mais versáteis e eficientes utilizadas no beneficiamento de minérios. “A sua utilização tem permitido a exploração de minérios de baixos teores e jazidas de composição mineralógica complexa, que de outra forma teriam sido considerados sem valor econômico” (SARAIVA, 1999, p. 4). O Quadro 3.2 apresenta a evolução dos sistemas de flotação.

O desenvolvimento da indústria mineral nas últimas décadas não teria sido possível sem a descoberta do processo de flotação, principalmente devido à redução das reservas de alto teor e ao aumento da demanda mundial de metais e outros bens minerais.

Quadro 3.2: Evolução dos Sistemas de Flotação.

<b>ANO</b>	<b>PESSOA / PAÍS</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>
1860	Hayness / Inglaterra	Flotação em óleo, avaliação das diferenças de flotabilidade de minerais.
1898	Elmore / Inglaterra	Primeiro processo industrial de flotação em óleo (País de Gales).
1901-2	Potter / Austrália Froment / Itália	Flotação por espuma com pouco óleo, espuma gerada por acidulação (carbonato).
1905	Bavais / Austrália	Primeiro processo industrial de flotação pelicular na Austrália.
1910	Houwer / Inglaterra	Criação da máquina de flotação por espuma com agitação mecânica e aspiração de ar.
1929	Gaudin / EUA	Controle de pH na flotação por espuma.
1910-30	Vários	Desenvolvimento de diversos reagentes, coletores, espumantes e aditivos.
1961	Tremblay e Boutin / Canadá	Desenvolvimento da coluna de flotação.
1980	Canadá, Austrália, América do Sul e África do Sul	Aplicação da coluna de flotação em escala industrial.

Fonte: MARIA, 2009, p. 5.

#### 3.4.1 Elementos da Flotação

A flotação por espuma é um dos mais importantes métodos de concentração e é caracterizado pela presença de três fases distintas: sólida (formada pelas partículas minerais a serem separadas), líquida (formada por água) e gasosa (composta geralmente por ar). Neste sistema, as fases líquida e sólida são preparadas a fim de formarem uma polpa mineral e a fase gasosa é utilizada para a formação de bolhas de ar.

A seletividade do processo de flotação baseia-se no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água, tem sua superfície essencialmente não-polar, tendo maior afinidade por ar. O conceito oposto à hidrofobicidade é designado como hidrofiliabilidade. A substância hidrofílica é aquela cuja superfície é polar, indicando maior afinidade com a água. A importância da polaridade reflete-se no fato de que existe afinidade entre substâncias ambas polares ou ambas apolares, não havendo, geralmente, afinidade entre uma substância polar e outra apolar (OLIVEIRA, 2004, p. 12).

De forma teórica, um fluxo de ar passando por uma suspensão aquosa composta por partículas naturalmente hidrofóbicas e hidrofílicas, seria o suficiente para que a separação

ocorresse. Dessa forma, as hidrofóbicas acompanhariam o fluxo de ar e as hidrofílicas permaneceriam em suspensão. Entretanto, as espécies minerais hidrofóbicas são exceções na natureza.

Para que esta propriedade seja alterada, faz-se necessária a introdução de reagentes específicos, denominados coletores, que introduzem o caráter hidrofóbico em minerais naturalmente hidrofílicos. Contudo, o carregamento das partículas hidrofóbicas nos equipamentos de flotação não ocorre suficientemente com a mera passagem de um fluxo de ar através da polpa mineral composta pelas espécies a serem separadas.

A adição de reagentes denominados espumantes proporciona ao sistema a formação de uma espuma estável que efetiva o transporte das partículas minerais ao concentrado. Sua função está na formação de bolhas apresentando tamanho adequado, na diminuição da tensão superficial na interface líquido/ar e na cinética de interação partícula-bolha. Modificadores ou reguladores são reagentes que podem ser incluídos no sistema de modo a aumentar sua seletividade através de ajuste de pH, controle de dispersão da polpa e ativação ou depressão da ação do coletor, dentre outras funções.

Antecedendo ao processo de flotação, a polpa mineral é submetida a uma etapa de condicionamento onde se promove o contato entre reagentes específicos e partículas de minério. “As polpas condicionadas com os reagentes são introduzidas em seguida nas máquinas de flotação, onde o produto nobre normalmente é separado no flotado e os de ganga no afundado (rejeito), denominada flotação direta” (OLIVEIRA, 2004, p. 13). Na flotação reversa a ganga é retirada na espuma e os minerais úteis no afundado.

“Os principais mecanismos envolvidos na flotação podem ser considerados como sendo o condicionamento dos minerais com coletores e moduladores de coleta (depressores), a aeração da polpa, a captura das partículas a serem flotadas pelas bolhas de ar e a separação da espuma” (SILVA, 2005, p. 12).

### 3.4.2 Fases e Interfaces da Flotação

#### *3.4.2.1 Fases*

“Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea, fisicamente distinta e mecanicamente separável de um sistema, em outras palavras, é uma região do espaço em que a composição química é uniforme e as propriedades físicas e mecânicas são as mesmas”

(FAGURY NETO, 2012, p. 4). O processo de flotação ocorre compreendendo três fases: gasosa, líquida e sólida, sendo apenas as duas primeiras sempre invariáveis.

### **Fase Gasosa**

A flotação industrial, exceto em algumas situações de caráter experimental, é realizada exclusivamente com ar, tendo por finalidade a formação de bolhas que desempenham a função de transporte das partículas minerais à superfície da polpa (SANTANA, 2007).

Desta forma, o controle da aeração é de fundamental importância para o processo de flotação, uma vez que, vazão de ar e tamanho de bolhas são exemplos de variáveis que exercem influência direta na qualidade da separação e desempenho do processo.

### **Fase Líquida**

“A água é o elemento no qual se realiza a flotação devido a sua abundância e ao baixo preço. Ela também possui certas propriedades específicas que a torna de considerável interesse teórico no processo de flotação. As moléculas de água são solvente forte além apresentarem grande polaridade” (OLIVEIRA, 2004, p. 14).

A polaridade é a causa da hidratação dos íons em soluções aquosas. Os íons metálicos se associam ativamente com as moléculas de água. Estas propriedades são de particular importância para o processo de flotação, pois explicam o comportamento distinto dos sólidos frente ao fenômeno da “molhabilidade”. Se a matéria não possui polaridade ou ligações livres, é evidente que não tem condições de atrair as moléculas de água e molhar-se, pois a associação entre moléculas de água é mais forte que a interação entre as moléculas de sólido e água (OLIVEIRA, 2004 *apud* MATIS, 1994, p. 14).

A flotabilidade de certos minerais pode sofrer modificações pela presença de contaminantes e impurezas como, sais de magnésio, cálcio e sódio, presentes na água, seja natural ou industrial. É esta, geralmente, a razão de aumento no consumo de reagentes de flotação, formando sais insolúveis.

## Fase Sólida

As partículas minerais apresentam modificação em suas propriedades superficiais quando submetidas a processos mecânicos, como moagem, ou químicos, por meio de reagentes, uma vez que nestes casos uma nova superfície é criada. Segundo Santana (2007, p. 20), a reatividade de superfície das partículas minerais é a propriedade que permite a concentração por flotação.

Os fatores de importância na flotação referentes aos sólidos são o caráter da superfície criada na ruptura do sólido, as imperfeições na rede cristalina e contaminações (SANTANA, 2007 *apud* SUTULOV, 1963, p. 23).

O tipo de superfície criada nas etapas de fragmentação das partículas é determinado pelo sistema cristalino do mineral. É este o fator determinante do desempenho das partículas minerais quando submetidas ao processo de flotação. Pode-se observar mudanças na superfície dos sólidos devido a adesão de colóides formados por contaminações orgânicas. Neste caso, pode haver, também, modificações nos reagentes de flotação.

A flotabilidade dos minerais relaciona-se à sua polaridade. Minerais apolares são também hidrofóbicos por não apresentarem reação com os dipolos da água. Já os minerais polares, são também hidrofílicos, por apresentarem extraordinária atividade química em geral.

### 3.4.2.2 *Interfaces*

“A transição de propriedades entre duas fases se faz de maneira gradual ao longo de uma região espacial, que apresenta uma de suas dimensões extremamente reduzida, designada como interface” (FAGURY NETO, 2012, p. 4). O processo de flotação ocorre compreendendo as seguintes interfaces: sólido/sólido, sólido/líquido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás. Segundo Santana (2007):

- Interface sólido/sólido: Pode-se observar mudanças na superfície dos sólidos devido a adesão de colóides formados por contaminações orgânicas. Neste caso, pode haver, também, modificações nos reagentes de flotação.
- Interface sólido/líquido: caracterizada por uma partícula mineral imersa em meio aquoso.
- Interface sólido/gás: uma bolha de gás aderida a uma partícula mineral exemplifica esta interface, supondo-se que no momento do contato partícula/bolha a película líquida que circunda a bolha sofre um processo de afinamento até a ruptura.

- Interface líquido/líquido: pode ser visualizada quando são utilizados alguns reagentes de flotação imiscíveis em água.
- Interface líquido/gás: pode ser exemplificada pela película que envolve uma bolha ou por uma bolha imersa em meio aquoso.

### 3.4.3 Etapas e Circuitos de Flotação

A flotação ocorre respeitando uma sequência de etapas, envolvendo mecanismos de transporte de massa que podem ou não apresentar seletividade. O Quadro 3.3 apresenta os processos e subdivisões das referidas etapas:

Quadro 3.3: Etapas da Flotação.

<b>ETAPA</b>	<b>PROCESSO</b>	<b>SUBPROCESSO</b>
I	Introdução do material de alimentação	Introdução da polpa
		Introdução do ar
II	Coleta seletiva: agregado partícula-bolha	Colisão entre partículas e bolhas
		Adesão na superfície das bolhas de partículas hidrofóbicas que colidiriam
		Separação das partículas presas às bolhas pela quebra do agregado formado ou permanência estável do conjunto
III	Transporte entre a polpa e a espuma	Flotação verdadeira: transporte de bolhas mineralizadas com partículas hidrofóbicas para a espuma
		Flotação por arraste (independente da hidrofobicidade): arraste hidráulico, aprisionamento mecânico e recobrimento de superfícies
		Retorno de água e de partículas da espuma para a polpa
IV	Remoção dos produtos de flotação	Remoção da espuma
		Remoção do rejeito

Fonte: SANTANA, 2011, p. 19.

Como em toda etapa de concentração, também para a flotação é difícil obter o teor e a recuperação desejados numa única etapa.

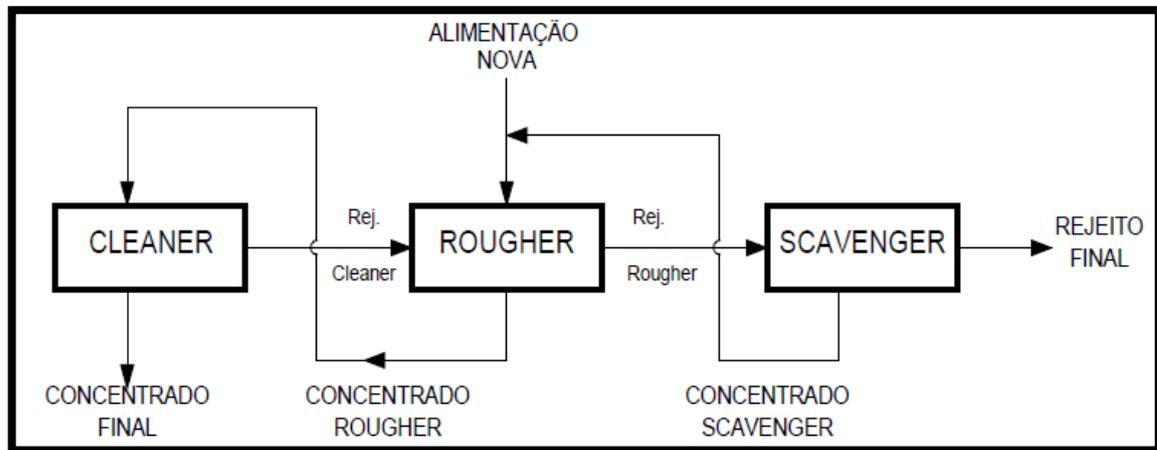
Genericamente, executa-se uma primeira flotação, chamada “*rougher*”, onde se obtém um concentrado pobre e um rejeito que ainda contém teores dos minerais úteis. O concentrado é re-lavado numa segunda flotação, denominada “*cleaner*”, onde é produzido um concentrado final e um rejeito de teor elevado. O rejeito *rougher* é repassado numa outra flotação, chamada “*scavenger*”, onde se obtém um rejeito muito pobre (rejeito final) e um concentrado que reúne os minerais úteis que

estavam no rejeito *rougher*, mas que é pobre para ser considerado produto final. Tanto o rejeito como o concentrado *scavenger* ainda contém minerais úteis e por isso são retornados à célula *rougher* (LUZ et al., 2004, p. 426).

Este circuito é apresentado na Figura 3.2.

Nestes circuitos, é possível se realizar dois tipos de flotação: uma onde o concentrado é retirado na espuma, chamada flotação direta, e utilizada na concentração de fosfato, por exemplo. Outra, onde o concentrado é obtido no afundado, denominada flotação reversa, comum, por exemplo, na concentração de minério de ferro.

Figura 3.2: Circuito de Flotação.



Fonte: LUZ et al., 2004, p. 426.

### 3.4.4 Equipamentos de Flotação

#### 3.4.4.1 Células Mecânicas de Flotação

Células mecânicas de flotação são os equipamentos mais empregados na concentração de minérios ao redor do mundo. “O principal motivo para sua ampla utilização se baseia no fato de que, entre os primórdios do processo, em 1906, e o ano de 1981 (advento das colunas em escala industrial), somente este tipo de equipamento foi utilizado na indústria em larga escala” (LIMA, 2009, p. 31).

A máquina de flotação é instalada dentro da célula e consiste em um rotor, no fundo da célula, suspenso por um eixo conectado a um acionamento girando dentro de um tubo (SANTANA, 2007). O rotor, segundo (LIMA, 2009 *apud* EK, 1992), realiza as seguintes tarefas:

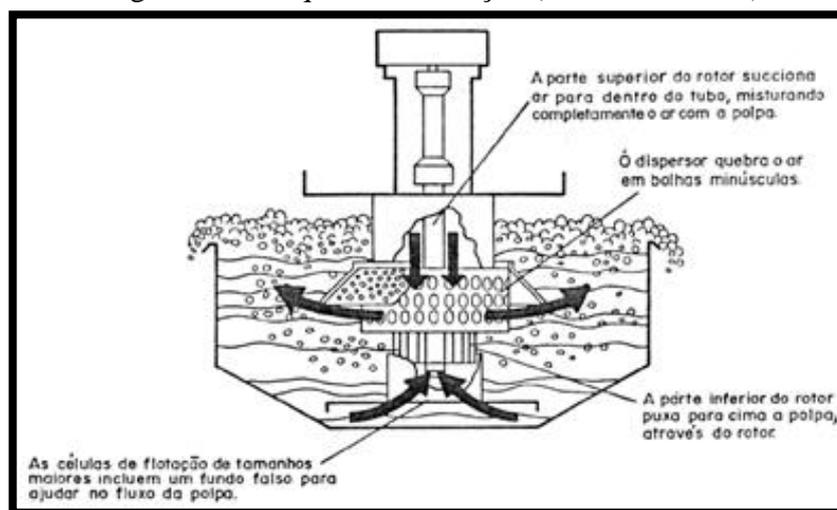
- Suspensão dos sólidos;
- Dispersão do ar introduzido em pequenas bolhas;
- Agitação turbulenta, proporcionando a colisão partícula-bolha;
- Transferência de polpa de uma célula para outra num circuito em série;
- Formação de uma camada de espuma no topo das células.

Nas células autoaeradas, a exemplo do equipamento apresentado na Figura 3.3, a sucção de ar atmosférico para o interior da célula é resultado de uma pressão negativa gerada devido ao movimento de rotação do impelidor. Ao alcançar a região do rotor, o ar se dispersa na forma de bolhas após sofrer cisalhamento. Ao redor do rotor, uma peça chamada estator realiza a função de quebrar as bolhas de ar gerando inúmeras pequenas bolhas. Nos equipamentos onde a aeração é forçada, compressores externos realizam a injeção de ar.

Podem ser usadas células individualizadas, mas a regra é agrupar conjuntos de duas ou mais (Figura 3.4).

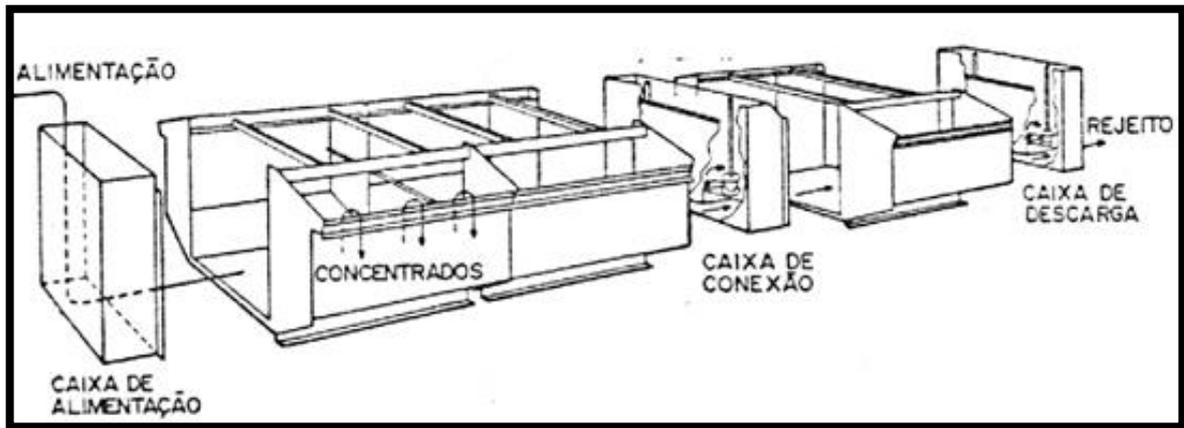
Numa extremidade do conjunto é instalado um compartimento de alimentação e na extremidade oposta, um compartimento de descarga. A espuma sobe e é descarregada pela frente, transbordando sobre calhas dispostas ao longo da extensão do conjunto de células. O material deprimido é arrastado pela corrente de água e sai pelo fundo da célula, passando para a célula seguinte e, finalmente, sendo descarregado pela caixa de descarga (LUZ et al., 2004, p. 415).

Figura 3.3: Máquina de Flotação (Modelo Wemco).



Fonte: LUZ *et al.*, 2004, p. 416.

Figura 3.4: Arranjo de Células de Flotação.



Fonte: LUZ et al., 2004, p. 415.

#### 3.4.4.2 Colunas de Flotação

A importância desse tipo de equipamento pode ser constatada através das melhorias substanciais dos concentrados obtidos nas colunas em diversas unidades industriais, com aplicação a diferentes tipos de minérios. Frequentemente, soma-se às melhorias no desempenho metalúrgico, uma economia nos custos de capital e de operação. Tais fatores tem sido decisivos para a aplicação de colunas em processos de flotação, tanto para novos projetos como para expansões industriais (SANTANA, 2007 *apud* QUEIROZ, 2003).

Os cientistas canadenses Tremblay e Boutin foram os responsáveis pelas primeiras patentes em 1961. A partir de então, foram realizados esforços no sentido de viabilizar a implantação dessa tecnologia em escala industrial, dentre os quais se destacam as aplicações realizadas pelo prof. Wheeler (1966), considerado o pai da coluna canadense. Em 1982, Coffinn e Miszczak relataram que as primeiras colunas de flotação industrial de sucesso foram instaladas em uma planta de concentração de molibdenita em Les Mines Gaspé no Canadá (CALDARA; CORREIA, 2010, p.1).

“No Brasil, os primeiros trabalhos em laboratório ocorreram em 1985 e a primeira implantação industrial data de 1990. A partir daí foram registrados, no Brasil, cerca de 15 novos projetos industriais com utilização de colunas de flotação” (LUZ et al., 2004, p.460). No ano de 2006, cerca de 19 usinas operavam com flotação em coluna sendo que em 4 destas, as colunas substituíram as máquinas mecânicas (ARAÚJO; PERES, 2013).

As colunas de flotação apresenta duas zonas distintas: zona de recuperação (ou de coleta), localizada entre a interface polpa-espuma e o sistema de aeração e zona de limpeza (ou de espuma), localizada entre a interface polpa-espuma e o transbordo.

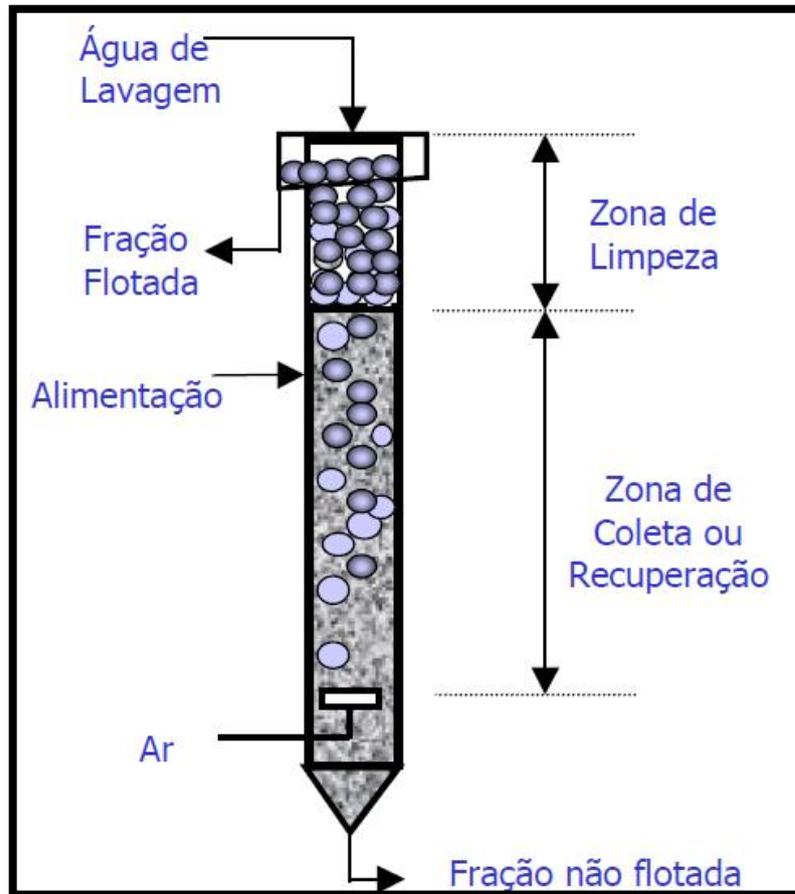
Na zona de recuperação, as partículas alimentadas entram em contato em fluxo contracorrente com as bolhas de ar geradas e distribuídas pelo aerador instalado na parte inferior do equipamento. As partículas hidrofóbicas aderidas às bolhas de ar são transportadas até a zona de limpeza ou espuma, enquanto as partículas hidrofílicas são retidas pela base da coluna.

Água de lavagem é adicionada na zona de espuma por um chuveiro que pode ser interno ou externo com finalidade de diminuir o arraste de partículas de ganga e estabilizar a espuma. O fluxo líquido de água entre a água de lavagem da camada de espuma e a água do concentrado, expresso em termos de velocidade superficial, recebe o nome de “bias”. Quando o fluxo é descendente tem-se “bias” positivo, garantindo uma melhor eficiência na lavagem do flotado (OLIVEIRA, 2004 *apud* GUIMARÃES, 1995 p. 38).

A Figura 3.5 apresenta em desenho esquemático uma coluna de flotação. Neste tipo de equipamento, a polpa é alimentada a aproximadamente dois terços da altura total da coluna na seção de recuperação ou coleta.

As partículas minerais interagem com as bolhas de ar ascendente, introduzido na base da coluna, resultando no processo de coleta das partículas hidrofóbicas. O agregado partícula-bolha formado é então transportado até a seção de limpeza, onde é contactado em contracorrente com a água de lavagem introduzida no topo da coluna. A água de lavagem tem o objetivo de promover a estabilidade e limpeza da espuma, eliminando as partículas carradas por arraste mecânico. As partículas minerais hidrofóbicas coletadas constituem a fração flotada, sendo separadas das partículas hidrofílicas, que saem pela base da coluna e constituem a fração não flotada (AQUINO; OLIVEIRA, 2006, p. 46).

Figura 3.5: Representação Esquemática da Coluna de Flotação.



Fonte: SILVA, 2005 *apud* LUZ, 1998, p. 31

#### 3.4.4.2.1 Controle do Processo de Flotação em Coluna – Variáveis Manipuladas e Variáveis de Controle

As variáveis manipuladas são aquelas que podem ser alteradas através da ação de atuadores, que por sua vez recebem o comando do controlador. Como exemplos de atuadores estão as válvulas, acionadores elétricos, bombas e inversores de frequência. Entre as variáveis manipuladas estão: vazão de água de lavagem, vazão do não flotado e vazão da alimentação de ar. A manipulação de variáveis permite o controle de certos parâmetros no processo, denominadas variáveis controladas. As variáveis controladas dividem-se em primárias (recuperação, porcentagem de sólidos no concentrado e teor do metal ou composto de interesse no concentrado) e secundárias (*bias*, a altura da camada de espuma e *holdup* do ar) (LIMA, 2008).

### 3.4.4.2.2 Variáveis Operacionais de Flotação em Coluna

A concentração por flotação apresenta múltiplas variáveis. Elas se apresentam de forma inter-relacionada e causam efeitos importantes em teores e recuperações no processo.

As principais variáveis da coluna no processo de concentração por flotação são (BATISTELA, 2009 *apud* AQUINO *et al.*, 2004):

- Vazão de ar;
- *Hold up* do ar;
- Vazão de água de lavagem;
- Altura da camada de espuma;
- *Bias*;
- Tempo de residência;
- Tamanho das bolhas;
- Tamanho das partículas minerais.

Estas variáveis podem ter efeito significativo sobre o teor e a recuperação do mineral de interesse. Os efeitos destas variáveis podem estar inter-relacionados e, portanto, dificilmente serão avaliados isoladamente.

#### **Vazão de Ar**

A vazão de ar é uma das variáveis mais importantes no controle do processo de flotação em coluna e tem efeito significativo sobre a recuperação do mineral flotado.

Dentro dos limites de estabilidade da coluna, a recuperação do mineral flotado é normalmente crescente com o aumento da vazão de ar até atingir o seu valor máximo. Este ganho na recuperação deve-se ao aumento do número e da área superficial total de bolhas introduzidas na coluna. Entretanto, um acréscimo significativo da vazão de ar pode prejudicar o processo de flotação devido à turbulência ou formação de espuma na zona de recuperação da coluna (BATISTELA, 2009).

A velocidade superficial do ar ( $J_g$ ) é definida pela relação entre a vazão de ar ( $Q_g$ ) e a área da seção transversal da coluna ( $A_c$ ):

$$J_g = \frac{Q_g}{A_c} \quad (1)$$

### ***Hold up do Ar***

O *hold up* do ar é definido como uma fração volumétrica de ar contida em uma determinada zona da coluna. Constitui um parâmetro que depende da vazão de ar, do tamanho das bolhas, da densidade da polpa, do carregamento dos sólidos nas bolhas e na velocidade descendente da polpa. Através de sua medida é possível estimar o diâmetro médio das bolhas utilizando modelos matemáticos (LUZ et al., 2004).

O *hold up* do ar pode ser medido utilizando manômetros de coluna de água, transdutores ou transmissores de pressão.

### **Água de Lavagem**

Uma das grandes alterações da coluna de flotação em relação às células mecânicas é a introdução da água de lavagem na camada de espuma e esta tem três funções básicas:

- Substituir a água de alimentação na fração flotada minimizando o arraste hidráulico de partículas hidrofílicas;
- Aumentar a altura e a estabilidade da camada de espuma;
- Reduzir a coalescência das bolhas através da formação de um packed bubble bed.

Com a adição de água de lavagem a coluna de flotação tem possibilidade de aumentar a seletividade do processo.

A eficiência da água de lavagem está diretamente relacionada com a distribuição que deve abranger toda a área da seção da camada de espuma sem prejudicar o transbordo do material flotado (SANTANA, 2007).

### **Altura da Camada de Espuma**

A altura da camada de espuma é medida da interface polpa-espuma até a zona de transbordo. A maior parte da bibliografia recomenda o uso de uma camada de espuma, que

pode variar entre 0,5 e 1,5 m, com o objetivo de auxiliar na remoção das partículas de ganga que tenham sido arrastadas.

Segundo pesquisadores canadenses, a altura da camada de espuma é uma variável importante na seletividade da flotação. Geralmente as colunas industriais trabalham com uma altura da camada de espuma que pode variar entre 0,5 a 1,5 m. Não existe uma regra geral para a determinação de sua altura, porém uma camada relativamente baixa pode ser o suficiente em muitos casos, principalmente devido ao fato de que o arraste de partículas normalmente é eliminado próximo à interface polpa-espuma (BATISTELA, 2009).

### ***Bias***

Sob o ponto de vista de controle, a definição mais usada é a diferença entre a vazão do rejeito e a vazão da polpa de alimentação, expressa em termos de velocidade superficial. Normalmente, uma coluna de flotação é operada de tal forma que a vazão volumétrica do rejeito é maior que a vazão de alimentação. A diferença entre estas vazões é compensada por um fluxo de água descendente através da espuma à zona de coleção. Nestas condições, a coluna está operando em *bias* positivo.

A coluna de flotação também pode trabalhar com *bias* negativo, quando a vazão volumétrica de alimentação é maior que a do rejeito. Esta forma de operação tende a favorecer o tratamento de partículas grossas, sendo que se pode reduzir ou mesmo eliminar a zona de espuma, obtendo com isso uma alta cinética de flotação. A velocidade superficial do fluxo de *bias* está entre 0,1 e 0,3 cm/s (BATISTELA, 2009).

O *bias* ( $Q_b$ ) pode ser estimado através da diferença entre a vazão de água de lavagem ( $Q_w$ ) e a vazão de água no flotado ( $Q_{wf}$ ).

$$Q_b = Q_w - Q_{wf} \quad (2)$$

### **Tempo Médio de Residência**

A distribuição do tempo de residência para a zona de recuperação se enquadra perfeitamente no modelo de dispersão de reatores tubulares conforme verificado por Dobby e Finch (1985) (BATISTELA, 2009). Esta curva é o resultado dos aspectos hidrodinâmicos de transferência de fluxo bem como do diâmetro das partículas. As partículas mais finas

apresentam distribuição de tempo de residência bastante similar ao da água. As partículas mais grossas apresentam tempo médio de residência bastante inferior devido à sua maior velocidade de sedimentação (BATISTELA, 2009).

### **Tamanho das Bolhas de Ar**

Um dos avanços significativos na utilização das colunas de flotação é a possibilidade de controlar o tamanho das bolhas através de ajuste das condições operacionais do sistema de aeração e da adição de agentes tensoativos (LUZ *et al.*, 2004).

O tamanho médio das bolhas e sua distribuição são importantes na flotação, devido ao seu efeito na eficiência da coleta e no transporte das partículas. A utilização de bolhas pequenas, com elevada área superficial, permite a obtenção de níveis mais elevados da cinética de coleta e transporte dos sólidos por volume de ar. Entretanto as bolhas de tamanho muito reduzido apresentam uma velocidade de ascensão baixa podendo ser inferior à velocidade descendente da polpa acarretando por consequência, perdas de partículas hidrofóbicas coletadas no fluxo de material não flotado (BATISTELA, 2009).

Portanto, existe um tamanho médio ideal de bolhas em função do tamanho médio das partículas, que poderá ser ajustado através das variáveis operacionais do sistema de aeração e da adição de agentes tensoativos (espumantes).

#### *3.4.4.3 Colunas x Células Mecânicas*

As células mecânicas e as colunas são os equipamentos mais empregados na flotação em escala industrial, sendo as colunas constituintes de tecnologia mais recente. A coluna de flotação tem sido amplamente utilizada e se difere da célula mecânica convencional principalmente em quatro aspectos básicos (SILVA, 2005 *apud* LUZ *et al.*, 1998):

- a) Geometria (maior relação altura/diâmetro);
- b) Existência da água de lavagem;
- c) Ausência de agitação mecânica;
- d) Sistema de geração de bolhas.

Próximo ao topo da coluna, a polpa mineral é alimentada de forma a mater fluxo contracorrente em relação às bolhas de ar, uma vez que estas são geradas na base do

equipamento. A altura favorece, desta forma, a probabilidade de coleta, pois todo o tempo de residência das partículas dentro da coluna (na zona de recuperação), é produtivo para a formação dos agregados partícula-bolha. Estes apresentam menor probabilidade de serem desfeitos devido a baixa agitação mecânica ao longo do equipamento, conferindo maior rendimento.

As células apresentam-se desfavoráveis à colisão e adesão de partículas fora da zona de agitação do equipamento, uma vez que o tempo de residência só é efetivamente produtivo nessa região, onde o agitador trabalha no sentido de provocar a suspensão das partículas, já que a polpa é alimentada por baixo, e conseqüentemente sua colisão com as bolhas, que também são geradas na parte inferior do equipamento. Contudo, esta agitação pode promover a liberação das partículas já aderidas, fatos que deixam em desvantagem a recuperação nas células em relação às colunas (PITTA, 2001).

A obtenção de concentrados com teores elevados é mais favorável quando se aplica flotação em coluna, devido a presença da zona de limpeza. Nessa região, os agregados formados encontram a camada de espuma e a ação da água de lavagem, que neste sentido atuam no controle do arraste de partículas hidrofílicas. Além disso, se na interface polpa-espuma ou na zona de limpeza, ocorrer o desprendimento de partículas hidrofóbicas, elas retornarão à zona de recuperação e encontrarão nova probabilidade de serem coletadas.

De forma geral, as colunas apresentam mais vantagens do que desvantagens em relação às células mecânicas. Estas são apresentadas, segundo Oliveira (2004):

- Aumento da recuperação das partículas finas e grosseiras através da presença de pequenas bolhas de ar com dimensões controladas,
- Fluxo contracorrente que garante uma maior probabilidade de adesão partícula-bolha e condições hidrodinâmicas adequadas ao processo de flotação na zona de recuperação;
- Aumento da 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;
- 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 construtiva e à ausência de partes moveis;
- Necessidade de espaço reduzida por ser uma unidade predominantemente vertical;
- Simplicidade e baixo custo de instrumentação e controle;

- Minimização de custos com operadores pela possibilidade de controle centralizado;
- Redução do consumo de energia;
- Diminuição de peças de reposição;

Algumas desvantagens podem ser citadas, tais como:

- 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. Este efeito pode ser minimizado pela possibilidade de instalação de calhas internas.

As desvantagens apresentadas não comprometem a utilização da coluna de flotação, sendo necessário seu conhecimento para que sejam tomadas providências tais como a utilização de subdivisões e calhas internas.

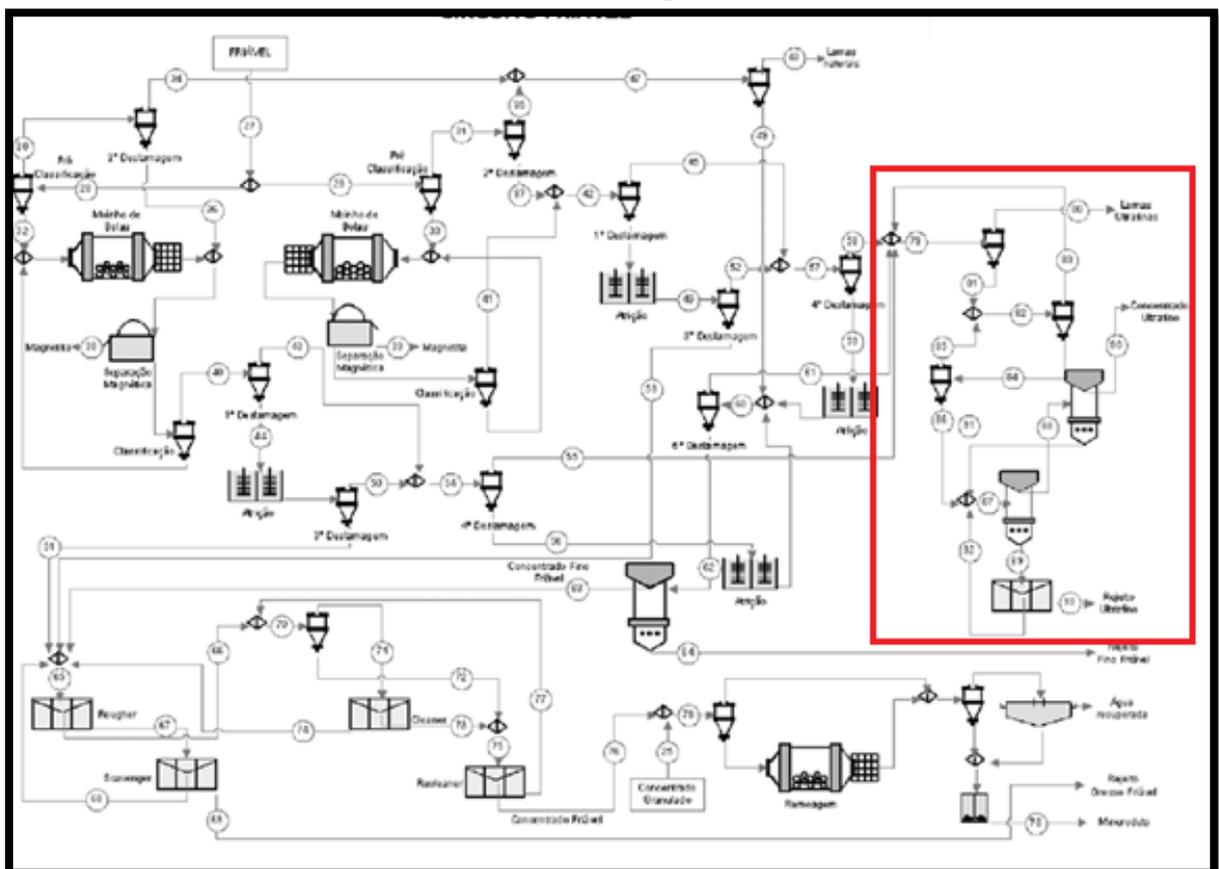
As melhorias substanciais na qualidade dos concentrados obtidos nas colunas em diversas unidades industriais, operando com diferentes tipos de minérios, somadas aos ganhos no desempenho metalúrgico e à economia nos custos de capital e de operação, demonstram a importância desse equipamento para a indústria mineral. Tais fatores tem sido decisivos para a aplicação das colunas em processos de flotação, tanto para novos projetos, como para expansões industriais (CALDARA; CORREIA, 2010, p. 2).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Amostra de Alimentação

A amostra de minério fosfático utilizada provém da Unidade Industrial de Beneficiamento de Minérios da empresa Vale Fertilizantes, instalada no município de Tapira, MG. Os ensaios foram realizados com amostra da alimentação do circuito de flotação de minério ultrafino. Este material é resultante da junção do overflow da 4ª e da 6ª etapas de deslamagem do circuito de minério friável. A Figura 06 apresenta o fluxograma do circuito industrial de beneficiamento de minério fosfático friável desta unidade (a seção em destaque indica o circuito flotação de minério ultrafino). A amostra coletada foi transportada para o Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, onde foi realizado este estudo.

Figura 4.1: Fluxograma do circuito do minério friável de Usina de Beneficiamento da Vale Fertilizantes de Tapira-MG.



Fonte: ARAÚJO *et al.*, 2002, p. 6.

#### 4.1.1 Caracterização da Amostra de Alimentação

O teor das espécies químicas presentes na amostra utilizada neste estudo foi determinado por Espectrômetro de Fluorescência de Raios X, no Laboratório de Análises da Vale Fertilizantes em Tapira, MG. Os resultados são apresentados na tabela 4.1.

A distribuição granulométrica da amostra foi obtida por peneiramento a úmido, onde observou-se o  $d_{50}$  em  $53\mu\text{m}$  (SILVA, 2015).

Tabela 4.1: Análise química da amostra utilizada neste estudo.

<b>Amostra: Alimentação</b>											
<b>Espécie</b>	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{BaO}$	$\text{SrO}$	$\text{MnO}$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$
<b>Teor (%)</b>	10,78	20,21	5,25	17,44	4,42	20,49	7,57	0,58	0,41	0,30	0,16

#### 4.2 A Unidade Experimental

O projeto da coluna de flotação implantada foi desenvolvido na Planta Piloto da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, instalada na cidade de Araxá, MG. Esta empresa patrocinou a compra do equipamento completo e da bomba peristáltica. Um esquema detalhado da unidade experimental é apresentado na Figura 4.2.

A coluna de flotação implantada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, objeto deste estudo, é constituída por dois tubos cilíndricos de 1m cada e um tubo de 0,5 m, com diâmetro externo de 50 mm e diâmetro interno de 42 mm. A seção de aeração possui diâmetro externo de 100 mm e diâmetro interno de 90 mm, com 150 mm de altura. Uma calha de 250 mm de altura foi instalada no topo da coluna, contendo 100 mm de diâmetro externo e 90 mm de diâmetro interno, possuindo uma base inclinada para facilitar a coleta do transbordo. A coluna foi construída em acrílico para possibilitar a visualização do processo de flotação.

A água de lavagem, que atua na lavagem da espuma, é alimentada em um gotejador e tem vazão controlada por um Rotâmetro 1P50302V01 ¼ NPTF ALUMÍNIO. Uma linha de ar comprimido controlada por uma válvula supre o ar utilizado nos ensaios e tem vazão controlada por um Rotâmetro 4T70903X12 ½ NPTF POLIPROPILENO. A polpa para alimentação da coluna é depositada em uma caixa plástica ligada por mangueira a uma bomba peristáltica, que alimenta a coluna. Esta mesma bomba capta o rejeito presente na base da

coluna e recircula-o pela mesma abertura de alimentação. A Figura 4.3 apresenta uma imagem da coluna de flotação implantada.

Figura 4.2: Esquema detalhado da unidade experimental.

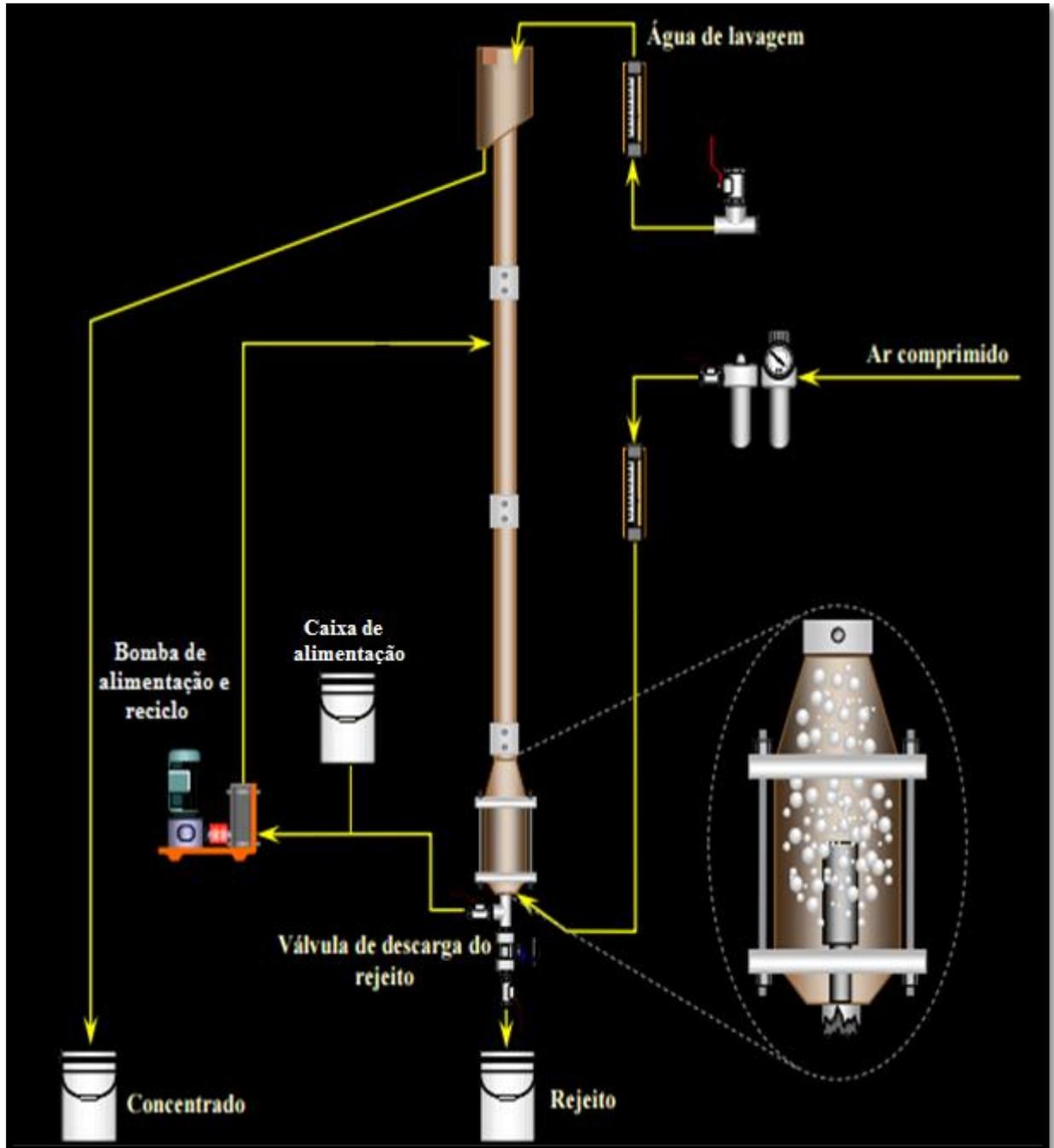


Figura 4.3: Coluna de Flotação implantada.

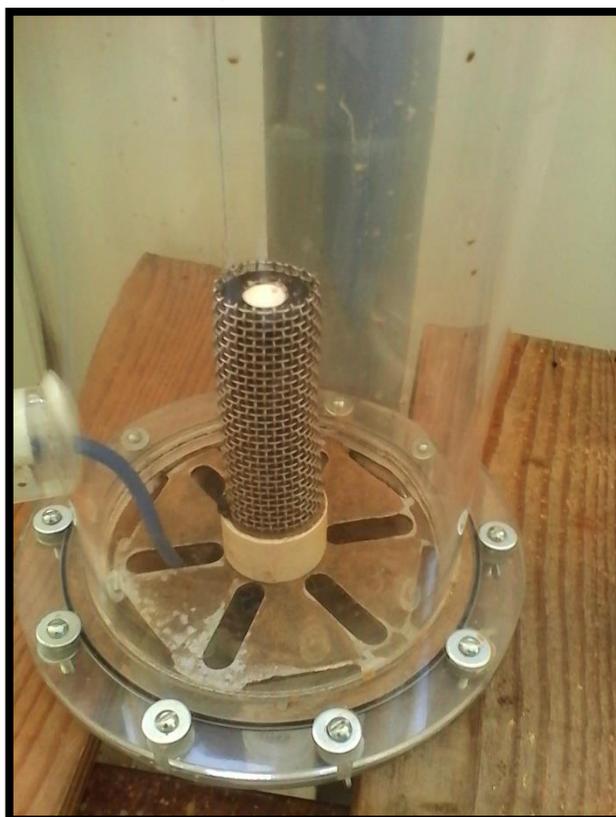


#### 4.2.1 Descrição dos Sistemas Operacionais da Unidade Experimental

##### **Sistema de Aeração**

Um tubo poroso atua como aerador no interior da coluna. Este aerador recebe ar comprimido e realiza sua distribuição na forma de pequenas bolhas, geradas pelo alívio de pressão após a passagem do ar pelos poros do tubo. Está instalado dentro da seção de aeração, localizado abaixo da zona de recuperação e ligada a uma linha de ar, cuja vazão pode ser controlada por rotâmetro. Apresenta-se na Figura 4.4 uma imagem do aerador instalado na coluna implantada.

Figura 4.4: Aerador.



##### **Sistema de Aspersão de Água de Lavagem**

O aspersor de água de lavagem foi instalado externo à espuma, acima do transbordo. O sistema é constituído por um gotejador acoplado a uma mangueira de abastecimento de água, ligada a uma torneira. A vazão de água de lavagem pode ser regulada por rotâmetro de forma

a ser injetada de maneira suave na zona de limpeza promovendo a lavagem da espuma, mas sem provocar turbulência no sistema. A Figura 4.5 apresenta uma imagem do gotejador utilizado na aspersão.

Figura 4.5: Gotejador.



### **Sistema de Alimentação e Reciclo**

A polpa a ser flotada é depositada em uma caixa plástica com uma abertura na base ligada a uma tubulação onde se encontra uma válvula globo. Outra tubulação, utilizada para o reciclo da polpa, está acoplada na base da coluna de forma a captar o material afundado e recirculá-lo. Nesta tubulação também há uma válvula globo. Estas duas tubulações se encontram e ligam-se, por meio de uma mangueira, a bomba peristáltica que realiza a alimentação e o reciclo. A válvula do reciclo é mantida fechada durante a alimentação da polpa. Após, a válvula da alimentação é fechada e a do reciclo é aberta. A vazão do reciclo pode ser manipulada através dos comandos presentes no controle da bomba. Na Figura 4.6 apresenta-se o sistema de alimentação e reciclo.

Figura 4.6: Sistema de alimentação e reciclo.



### Sistema de Descarga do Flotado e do Afundado

A espuma deixa a coluna por transbordo e é coletada em uma calha onde se encontra uma mangueira acoplada. A mangueira possui um comprimento suficiente para que o flotado seja depositado em um balde no chão. O afundado é coletado na base da coluna, ao final dos ensaios, de forma manual através da abertura de uma válvula. A Figura 4.7 apresenta o sistema de descarga de flotado e afundado.

Figura 4.7: Sistema de descarga do flotado e afundado.



### 4.3 Preparação e Condicionamento da Polpa

Para cada ensaio proposto, foi realizada a preparação de polpa respeitando o mesmo procedimento. O mesmo volume de polpa foi utilizado em todos os ensaios, tendo sido calculado com base no volume total do equipamento, considerando o volume que provavelmente seria ocupado por ar. Em uma balança digital, foi pesado em uma bandeja 1000 g de minério fosfático seco. Utilizando provetas de 1000 ml, mediu-se 666.67 ml de água potável para a etapa de condicionamento e 5000 ml de água potável para diluição da polpa (destes 5000 ml, cerca de 500 ml foram transferidos para uma pisseta). O condicionamento foi realizado em uma célula de flotação Denver (Figura 4.8), com o objetivo de promover o contato entre a polpa e os reagentes, mantendo agitação constante.

Primeiramente, o minério e a água de condicionamento foram adicionados na cuba da célula e agitados, formando uma suspensão com 60% de sólidos. Foi realizado o ajuste de pH utilizando solução de NaOH a 10%, mantendo-o em cerca de 9.5, sendo monitorado durante todo o período de condicionamento com o auxílio de um “pHmetro” previamente calibrado.

Figura 4.8: Célula de flotação Denver.



À polpa homogeneizada foi adicionado depressor (fubá de milho gelatinizado), a uma concentração de 250 g/t, cujo tempo de condicionamento foi de 5 minutos, monitorados por um cronômetro. Após este tempo, foi adicionado uma solução com coletor Flotigam 5806 da marca Clariant, a uma concentração de 500 g/t, cujo tempo de condicionamento foi de 1 minuto. As concentrações dos reagentes utilizados, bem como o tempo de condicionamento, foram baseados na prática da Vale Fertilizantes e sua preparação realizada pelo procedimento segundo Oliveira (2004).

Ao final do condicionamento, a polpa foi diluída passando a 15% de sólidos, acrescentando-se a água de diluição e sendo mantida sob agitação para a mistura da suspensão. A água da pisseta foi utilizada durante a preparação da polpa para a lavagem dos béqueres utilizados na medição dos reagentes e na cuba da célula para retirada de material remanescente.

#### **4.4 Operação da Coluna de Flotação**

Os ensaios foram realizados em bateladas, seguindo o mesmo procedimento preliminar. Primeiramente, verificava-se o suprimento de ar manipulando-se o rotâmetro de ar. Nesta etapa, a vazão de ar era ajustada ao valor determinado para cada ensaio. As válvulas do reciclo, da alimentação e da descarga de rejeito eram fechadas enquanto a polpa previamente condicionada era depositada na caixa de alimentação.

A seguir, apenas a válvula da alimentação era aberta e então a bomba peristáltica era ligada já ajustando-se o valor de reciclo determinado para cada ensaio. Durante a alimentação, a polpa era agitada manualmente com o auxílio de uma espátula. Ao final da alimentação, a válvula era fechada e a do reciclo era aberta. Neste momento, a torneira que alimenta o sistema de água de lavagem era aberta e a vazão era ajustada no rotâmetro a 0,1 L/min (valor mantido fixo em todos os ensaios realizados neste estudo).

A interface entre a polpa e a espuma era identificada visualmente e quando esta atingia o topo da coluna, a válvula de descarga era aberta finalizando o teste. O rejeito era coletado em um recipiente de metal, identificado e levado à estufa para secagem sob temperatura em torno de 60°C. O concentrado era removido da coluna por transbordo e por ação da gravidade seguia em uma mangueira acoplada à calha de despejo para o balde de coleta de concentrado. Este módulo era enxaguado com água e o material remanescente seguia junto a água para o mesmo balde. O concentrado era transferido para uma bandeja de metal, identificado e levado à estufa para secagem também em temperatura em torno de 60°C.

Água de lavagem a uma maior vazão era utilizada na limpeza da coluna, mantendo-se aberta a válvula de descarga de rejeito para possibilitar essa limpeza.

## **4.5 Planejamento Experimental**

O processo de flotação em coluna conta com diversas variáveis, assim a análise e planejamento dos experimentos é mais confiável utilizando técnicas estatísticas para esse fim (OLIVEIRA, 2004). As condições experimentais deste estudo foram determinadas utilizando a técnica do planejamento fatorial de experimentos. Este é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência. Normalmente codificam-se os níveis dos fatores com os sinais (+) atribuídos ao nível superior e (-) atribuído ao nível inferior (SANTOS, 2006).

### 4.5.1 Planejamento Preliminar

A análise preliminar foi baseada, com maior relevância, nos efeitos percebidos visualmente. Seria observado o tamanho e estabilidade das bolhas até alcançarem o transbordo, presença de turbulência, características das zonas de recuperação e limpeza.

Inicialmente, as variáveis vazão de ar, vazão de água de lavagem e vazão de reciclo foram analisadas de forma a se realizar uma varredura. Os valores de vazão de ar adotados foram determinados respeitando os intervalos de velocidade superficial do ar empregados em condições típicas de operação (entre 1,0 e 3,0 cm/s).

O planejamento fatorial dos ensaios foi realizado em dois níveis, apresentados junto às variáveis, na Tabela 4.2.

Nestes ensaios, não foi possível a obtenção de condições consideradas adequadas ao desenvolvimento deste estudo. Desta forma, um novo planejamento de experimentos foi realizado, sendo abordado no item 4.5.2.

Tabela 4.2: Variáveis do Planejamento Preliminar.

Ensaio	Vazão de Ar (L/min) – X1	Vazão de Água de Lavagem (L/min) – X2	Vazão de Reciclo (%) – X3	X1	X2	X3
1	1,2	0,2	50	-1	-1	-1
2	3,2	0,2	50	+1	-1	-1
3	1,2	0,4	50	-1	+1	-1
4	3,2	0,4	50	+1	+1	-1
5	1,2	0,2	100	-1	-1	+1
6	3,2	0,2	100	+1	-1	+1
7	1,2	0,4	100	-1	+1	+1
8	3,2	0,4	100	+1	+1	+1

#### 4.5.2 Planejamento Executado

Os ensaios anteriores demonstraram a necessidade de adequação nos níveis de vazão de ar e de água de lavagem. O nível mínimo de vazão de ar foi mantido, alterando-se o nível máximo para 2,0 L/min. Para a vazão de água de lavagem, observou-se a necessidade de utilização de valor inferior a 0,2 L/min, sendo fixado em 0,1 L/min. Na Tabela 4.3, estão apresentadas as variáveis e os níveis redeterminados.

Tabela 4.3: Variáveis do Planejamento Executado.

Ensaio	Vazão de Ar (L/min) – X1	Vazão de Reciclo (%) – X3	X1	X3
1	1,2	50	-1	-1
2	2,0	50	+1	-1
3	2,0	100	+1	+1
4	1,2	100	-1	+1

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos apresentaram maior relevância para o *startup* da unidade experimental instalada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, do que em relação à pertinência das características dos produtos obtidos nos ensaios, a seguir apresentados.

### 5.1 Resultado dos Ensaios Preliminares

Os resultados obtidos neste planejamento foram considerados como preliminares e utilizados a título de reconhecimento do funcionamento do equipamento instalado, de forma a adquirir sensibilidade ao processo e tratamento das variáveis.

A grande turbulência gerada na zona de recuperação devido as vazões de água de lavagem consideradas nestes ensaios (0,2 L/min e 0,4 L/min), foi a razão pela qual optou-se pela modificação dos valores utilizados. Observou-se que, mesmo nos ensaios 1, 3, 5 e 7, onde a vazão de ar foi de 1,2 L/min (o valor mínimo), a turbulência era percebida, sendo portanto atribuída aos níveis da vazão de água de lavagem. Considerou-se que o reciclo, assim como a vazão de ar, não foi um fator de influência. Com essa turbulência, percebeu-se a destruição ou não formação de camada de espuma (Figura 5.1).

Figura 5.1: Ensaio sem formação de camada de espuma.



Dois novos ensaios, com valor mínimo de vazão de ar, foram realizados considerando as vazões de água de lavagem 0,15 L/min e 0,1 L/min, com a intenção de avaliar o efeito no processo. Desta forma, foi possível observar que a vazão de 0,1 L/min apresentou um resultado mais satisfatório, assim considerado pela diminuição da turbulência e pela formação de uma camada de espuma estável. Esta vazão foi fixada para o planejamento executado. A presença de coalescência e grande turbulência na polpa no nível máximo de vazão de ar (3,2 L/min) utilizado nestes ensaios, foi determinante para ser desconsiderada no processo. Optou-se pela determinação de outras vazões de ar a serem estudadas. Para isso, o rotâmetro foi manipulado de 0,8 L/min a 3,2 L/min, com intervalos de 0,4 L/min entre as medições. Os efeitos foram observados na água que completava o volume total da coluna, no que se refere a turbulência e coalescência. Durante este teste, apenas a variável vazão de ar foi analisada. O valor 1,2 L/min foi mantido e 2,0 L/min foi definido para utilização no planejamento executado. As Figuras 5.2 a), 5.2 b) e 5.3 apresentam o efeito observado para as vazões de ar 1,2 L/min, 2,0 L/min e 3,2 L/min, respectivamente.

Figura 5.2: a) Vazão de ar 1,2 L/min; b) Vazão de ar 2,0 L/min.



Observa-se nas Figuras 5.2 a) e 5.2 b) que, nas condições executadas, formaram-se bolhas pequenas, aparentemente estáveis, sem presença de coalescência ou turbulência. O

aumento da vazão de ar gera maior quantidade de bolhas, o que pode ser observado comparando-se as respectivas Figuras.

Figura 5.3: Vazão de ar 3,2 L/min.



Espera-se que a recuperação de partículas minerais cresça com o aumento da vazão de ar, contudo, o valor máximo considerado não deve ser excessivo a ponto de gerar a presença de coalescência e turbulência, como observado na Figura, por alterar significativamente a eficiência do processo.

## 5.2 Planejamento Executado

Este planejamento, assim como o planejamento preliminar, foi utilizado a título de reconhecimento do funcionamento do equipamento instalado, de forma a adquirir sensibilidade ao processo e tratamento das variáveis. Contudo, foram considerados executáveis e seus resultados receberam outro tipo de tratamento. Na Tabela 5.1 são apresentadas as massas de sólidos do rejeito e concentrado e as perdas de massa por ensaio.

Tabela 5.1: Massa dos produtos e perdas de massa por ensaio.

Ensaio	Vazão de Ar (L/min) – X1	Vazão de Reciclo (%) – X3	Massa de Rejeito (g)	Massa de Concentrado (g)	Perdas de Massa (%)
1	1,2	50	243,24	135,00	37,82
2	2,0	50	286,84	103,33	39,01
3	2,0	100	299,37	39,52	33,89
4	1,2	100	451,59	58,72	51,03

Por definição, tem-se que a massa da alimentação (A) é a soma entre a massa do rejeito (E) e a massa do concentrado (C).

$$A = E + C \quad (3)$$

Porém, como é possível observar pelos dados inseridos na Tabela 5.1, houveram perdas significativas de massa de sólidos da alimentação em todos os ensaios, que provavelmente foram causadas pelos fatores citados no item 5.3.

Ao reciclo atribui-se o papel de realimentar a coluna com a polpa afundada, promovendo maiores chances de recuperação de partículas hidrofóbicas. Desconsiderando as perdas de massa, observa-se que as maiores massas de concentrado foram obtidas nos ensaios 1 e 2, realizados com reciclo de 50% nas duas vazões de ar consideradas. Observa-se que nos ensaios 3 e 4 a maior vazão de reciclo não foi fator de aumento de massa no concentrado.

Apesar de se esperar que maiores vazões de ar aumentem a área superficial de contato partícula-bolha promovendo maior recuperação de partículas no concentrado, foi obtida maior massa de concentrado no ensaio 1, onde a vazão de ar é 1,2 L/min. Se comparados, nos ensaios 1 e 2 a maior vazão de ar do 2º ensaio não foi fator de aumento de recuperação de massa no concentrado.

Os teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> obtidos por análise química com Espectrômetro de Fluorescência de Raios X no Laboratório de Análises da Vale Fertilizantes em Uberaba, MG, são apresentados na Tabela 5.2, juntamente com as recuperações metalúrgica e mássica de cada ensaio. Os cálculos foram realizados utilizando os teores obtidos, permitindo desconsiderar as perdas de massa.

A recuperação mássica (R) é expressa por:

$$R = \frac{(a-e)}{(c-e)} \times 100 \quad (4)$$

A recuperação metalúrgica ( $R_m$ ) representa a razão, expressa em porcentagem, entre a massa útil obtida no concentrado e a massa útil da alimentação.

$$R_m = \frac{c(a-e)}{a(c-e)} \times 100 \quad (5)$$

Onde “c” representa o teor do composto químico de interesse no concentrado, “a” na alimentação e “e” no rejeito.

Tabela 5.2: Teores e Recuperações Metalúrgica e Mássica por ensaio.

Ensaio	X1	X3	Teor $P_2O_5$ Concentrado (%)	Teor $P_2O_5$ Rejeito (%)	Recuperação Metalúrgica (%)	Recuperação Mássica (%)
1	1,2	50	34,77	6,80	45,89	14,23
2	2,0	50	37,62	4,68	64,62	18,52
3	2,0	100	36,77	4,16	69,24	20,30
4	1,2	100	36,91	3,53	74,36	21,72

Observa-se na Tabela 5.2 que o maior teor de  $P_2O_5$  foi obtido no ensaio 2, onde a coluna foi operada com vazão de ar de 2,0 L/min e reciclo de 50%. O menor foi obtido no ensaio 1, cuja vazão de ar foi de 1,2 L/min e 50% de reciclo. Nos ensaios 3 e 4, onde empregou-se reciclo de 100% foram observadas maiores recuperações e teores muito próximos. Segundo estes resultados, pode-se inferir que a vazão de água de lavagem definida para os ensaios foi satisfatória.

Industrialmente, o objetivo do processo é a obtenção de teores de  $P_2O_5$  no concentrado com cerca de 33,00% e no rejeito em média 4,00%. Este fator demonstra a potencialidade do equipamento instalado, uma vez que foi possível a obtenção de produtos próximos às especificações adotadas na Unidade Industrial de Beneficiamento de Minérios da Vale Fertilizantes. Contudo, as perdas de massa influenciam no processo no sentido de não haver seletividade, pois não é possível determinar quais os tipos de minerais representaram maior perda, fazendo-se necessárias adequações na configuração do equipamento para que o processo seja realizado de forma mais efetiva.

No ensaio 3, ocorreu transbordo da espuma por um certo intervalo de tempo. Contudo, em um determinado momento, a espuma não conseguiu alcançar esta seção, deixando de transbordar. A continuidade do processo se deu após a reposição de volume pela água de

lavagem. Nos outros testes também foi observado este fato, mas com menor intensidade. Conclui-se que, como não é recomendado o aumento da vazão de água de lavagem, o aumento do volume de polpa alimentado deve ser considerado para que, possivelmente o transbordo seja constante. A Figura 5.4 apresenta um exemplo de interface polpa-espuma, observada nos ensaio 4.

Figura 5.4: Ensaio 4.



### 5.3 Fatores Dificultantes nos Ensaio

Durante a execução dos ensaios, alguns fatores foram avaliados como dificultantes para a obtenção de resultados mais satisfatórios. A seguir serão listados, juntamente com sugestões para melhorias no processo.

- Tempo demandado para a alimentação da coluna: observou-se que, através de bombeamento o tempo dispendido para completar a alimentação da coluna é alto, sendo considerado fator que favorece a sedimentação de sólidos no fundo da seção de aeração. Isto influencia negativamente no processo, pois representa perda de partículas minerais e propicia o entupimento da mangueira do reciclo, o que pode danificar a bomba peristáltica também prejudicando o processo.

A alimentação poderia ser realizada no topo da coluna, manualmente, com o auxílio de um funil. Desta forma, haveria diminuição no tempo necessário para a alimentação, atenuando as questões citadas.

- Caixa de alimentação: no centro da base da caixa de alimentação foi instalada uma abertura para saída da polpa, porém o arranjo desfavorece o escoamento completo da polpa que, aliado ao tempo de alimentação, favorecem a deposição de sólidos no fundo da caixa. Isto representa perda de uma quantidade considerável de polpa com alta porcentagem de sólidos, devido à sedimentação das partículas.

O formato da base da caixa de alimentação poderia ser cônico, auxiliando no escoamento da polpa, evitando perdas de material. Além disso, durante a alimentação, recomenda-se agitação manual da polpa dentro da caixa. Contudo, ressalta-se que uma maior eficiência poderia ser observada se houvesse modificação na forma de alimentação da coluna.

- Entupimentos: foram observados na mangueira do reciclo e na saída de material afundado. Na mangueira, os entupimentos ocorreram com constância, a ponto de se fazer necessária sua substituição (uma mangueira com  $\frac{3}{4}$ " de diâmetro interno contendo tela de reforço, foi utilizada na substituição. Não foram observados novos entupimentos, contudo, remonda-se a observação após a realização de maior número de ensaios). Na tubulação, o entupimento foi observado na finalização de um dos ensaios. Este precisou ser desconsiderado, pois a polpa ultrapassou o transbordo. Em ambos os casos, os entupimentos se devem a deposição de partículas no fundo da seção de aeração, que ocorre principalmente durante a alimentação da coluna. Desta forma, é recomendada a modificação na forma de alimentação ou a troca da base desta seção para uma peça que não permita a acumulação de grande quantidade de sólidos, como está ocorrendo.

- Condicionamento da polpa: a polpa mineral foi condicionada em célula de flotação, no entanto, o volume de polpa utilizado nos ensaios não foi compatível ao volume da cuba da célula, sendo necessária a transferência de recipiente no momento da adição de água de diluição. Este fator não é prejudicial ao processo de condicionamento. Contudo, para facilitar o processo, um agitador mecânico de bancada poderia ser utilizado permitindo a utilização de apenas um recipiente com volume razoável ao necessário para o condicionamento e diluição da polpa

## 6 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos nos ensaios exploratórios, foi possível concluir:

- Os resultados obtidos apresentaram maior relevância para o *startup* da unidade experimental instalada no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/MG, unidade Araxá, do que em relação à pertinência das características dos produtos obtidos nos ensaios, a seguir apresentados.
- Houveram perdas de massa de sólidos significativas nos ensaios devido ao tempo demandado para a alimentação, que favoreceu a deposição de sólidos no fundo da seção de aeração da coluna e à configuração da caixa de alimentação, que apresenta um arranjo desfavorecedor ao completo escoamento da polpa, também gerando perdas.
- A configuração da base da seção de aeração favoreceu a acumulação dos sólidos depositados levando-os a gerar constantes entupimentos na mangueira de reciclo.
- Os teores de  $P_2O_5$  obtidos no concentrado e no rejeito dos quatro ensaios demonstraram potencialidade do equipamento instalado, uma vez que foi possível a obtenção de produtos próximos às especificações adotadas na Unidade Industrial de Beneficiamento de Minérios da Vale Fertilizantes.
- A condição operacional adotada no ensaio 4 (vazão de ar de 1,2 L/min e reciclo de 100%) forneceu os resultados mais satisfatórios considerando todos os fatores analisados. Para este ensaio foram obtidos teor de 36,91%  $P_2O_5$  e 74,36% de recuperação metalúrgica.
- As perdas de massa influenciam no processo no sentido de não haver seletividade, pois não é possível determinar quais os tipos de minerais representaram maior perda, fazendo-se necessárias adequações na configuração do equipamento para que o processo seja realizado de forma mais efetiva.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. A Flotação no Brasil. Arthur Pinto Chaves [editor]. Coleção Teoria e Prática do Tratamento de Minérios; v. 4. Oficina de Textos, 3ª ed. São Paulo, 2013.
- ARAÚJO, R. V. V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. Produção de Fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira / Fósforo. Pernambuco, CETEM/MCT.
- AQUINO, J. A.; OLIVEIRA, M. L. M. Aspectos Relevantes das Colunas de Flotação. XXI ENTMME. Rio Grande do Norte, 2006.
- BATISTELLA, M. A. Flotação em Coluna sem a Adição de Água de Limpeza: Fundamentos e Aplicações. PPGEM/UFRGS-Porto Alegre/RS, 2009, 74 p.
- CALDARA, J. A.; CORREIA, J. C. G. Abordagem Sobre a Aplicação da Flotação em Coluna em Beneficiamento Mineral. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010.
- FAGURY NETO, E. Flotação. Universidade Federal do Pará. 2012.
- LIMA, L. B. Controle Ótimo  $H_2$  Para Coluna de Flotação. Dissertação de Mestrado. PPGEM/UFOP-Ouro Preto/SP, 2008, 88 p.
- LIMA, O. A. Suspensão de Partículas Grossas em Células Mecânicas de Flotação. Tese de Doutorado. PPG-PMI/USP-São Paulo/SP, 2009, 230 p.
- LINS, F. A. F.; LUZ, A. B. Introdução ao Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 4ª ed. 2004.
- LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 4ª ed. 2004.
- MARIA, C. R. Otimização Técnico-Econômica de Circuitos de Flotação. Dissertação de Mestrado. PPGEM/UFOP-Ouro Preto/MG, 2009, 123 p.

MACHADO, F. B.; MOREIRA, C. A.; ZANARDO, A.; ANDRÉ, 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. [online]. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/>>. Acessado em: Julho de 2015.

PITTA, F. A. G. Influência do Equipamento na Flotação por Espuma: Célula Mecânica versus Coluna. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 2001.

SANTANA, R. C. Análise da Influência do Tamanho da Partícula na Flotação da Apatita em Coluna. Dissertação de Mestrado. PPG-EQ/UFU-Uberlândia/MG, 2007, 106 p.

SANTANA, R. C. Efeito da Altura da Coluna de Flotação de Minério Fosfático em Diferentes Granulometrias. Tese de Doutorado. PPG-EQ/UFU-Uberlândia/MG, 2011, 192 p.

SANTOS, S. N. Planejamento de Experimentos Aplicado à Linha de Próteses de Joelho. Bauru/SP, XIII SIMPEP. 2006.

SARAIVA, E. T. S. Identificação de uma Planta Piloto de Flotação em Coluna. Tese de Mestrado. PPGEE elétrica/UFMG-Belo Horizonte/MG, 1999, 179 p.

SILVA, A. A. M. Estudo Sobre a Flotação de Silicatos em Coluna Para o Processo de Concentração da Apatita. Dissertação de Mestrado. PPG-EQ/UFU-Uberlândia/MG, 2005, 131 p.

SILVA, L. A. Avaliação do Tempo de Condicionamento, Dosagem de Reagentes e Granulometria Para Flotação de Fosfato em Coluna. Trabalho de Conclusão de Curso. CEFET-Araxá MG, 2015, 85 p.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. Fosfato. In: NERY, M. A. C. Sumário Mineral 2009. V. 29. DNPM, 2009. Disponível em: <<https://sistemas.dnpm.gov.br/>>. Acessado em: Julho de 2015.

OLIVEIRA, J. F. Flotação. Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, CETEM/MCT. 2007.

OLIVEIRA, M. S. Flotação em Coluna do Rejeito Remoído do Processo de Concentração da Apatita. Dissertação de Mestrado. PPG-EQ/UFU-Uberlândia/MG, 2004, 123 p.

OLIVEIRA, M. S.; SOUZA, M. D. Tratamento de Minérios. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. 2012.

VERAS, M. M. Influência do Tipo de Espumante nas Características de Espuma Produzida na Flotação. Tese de Mestrado. PPGEMinas/UFPE-Recife/PE, 2010, 64 p.