



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

LORENN RAPHAELA GONÇALVES MACHADO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA  
SEDIMENTAÇÃO DE REJEITO FOSFÁTICO

ARAXÁ  
2015

LORENN RAPHAELA GONÇALVES MACHADO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA SEDIMENTAÇÃO  
DE REJEITO FOSFÁTICO

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 Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Ms. Leandro Henrique Santos.

Araxá  
2015

LORENN RAPHAELA GONÇALVES MACHADO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA SEDIMENTAÇÃO  
DE REJEITO FOSFÁTICO

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 Engenheira de  
Minas.

Data de aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Me. Leandro Henrique Santos - Presidente da Banca Examinadora  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Orientador

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

---

Prof. Esp. Francisco de Castro Valente Neto  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Dedico este trabalho a Deus, meus pais e meu irmão, que me acompanharam nesta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conduzir, me dar sabedoria e disposição necessária para realizar mais este sonho.

Aos meus pais José Gaspar e Ana Rita, por sempre me apoiarem e nunca me deixar desistir do objetivo de me tornar engenheira. Ao meu irmão Roger, por ser meu espelho, minha inspiração e meu professor. Agradeço minha família por me propiciarem o que há de mais importante na vida: amor, carinho, confiança, entendimento e uma base consolidada.

A todos os meus familiares e amigos, pelos momentos de descontração, pelo incentivo e pelas broncas. E por compreenderem meus momentos de ausência durante a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Leandro Henrique Santos, por acreditar em mim, se dispor diante as minhas dúvidas e conceder gentilmente sua amizade, conhecimento e profissionalismo, indispensáveis para a minha formação profissional. Obrigada pela paciência e dedicação!

À professora Michelly dos Santos Oliveira, por despertar o meu interesse pelo Tratamento de Minérios e pelo apoio durante a realização dos testes desenvolvidos neste trabalho.

Ao professor Natal Junio Pires, pela disponibilidade em me ensinar e auxiliar à executar os equipamentos do Laboratório de Tratamento de Minérios.

A todos os professores do CEFET-MG, pela convivência, pelos ensinamentos, pela contribuição profissional. Estes que terão sempre meu respeito e admiração.

Ao técnico do Laboratório de Tratamento de Minérios, João Victor e a aluna Talytha Coimbra, que participaram da realização dos testes colaborando para a conclusão deste trabalho.

A Vale Fertilizantes S/A, por cederem gentilmente as amostras para os experimentos e a empresa Clariant por fornecerem o reagente utilizado nos testes.

Enfim, agradeço a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

"Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é que alguém acredite que ele possa ser realizado".

Roberto Shinyashiki

## RESUMO

A preocupação envolvendo o reaproveitamento da água utilizada durante as operações do beneficiamento de minérios se apresenta como uma realidade latente nos dias de hoje, concomitante à questão da preservação ambiental. A operação de espessamento, amplamente utilizada na indústria mineral, promove a recuperação da água adicionada às etapas do tratamento de minérios, juntamente com a redução do volume ocupado com a disposição de rejeitos em barragens. A sedimentação de rejeito fosfático e o efeito da variação dos parâmetros porcentagem de sólidos, pH e dosagem de floculante na polpa mineral foram investigados no presente trabalho, através da execução dos testes de sedimentação em proveta e análise do ponto crítico, segundo a metodologia proposta por Roberts. O objetivo principal consistiu na determinação da melhor condição operacional a ser empregada na execução da operação de espessamento, visando a obtenção uma polpa adensada e um líquido clarificado. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET/ MG – Unidade Araxá, em temperatura ambiente, empregando suspensões de material particulado proveniente do rejeito da flotação de minério fosfático. Foi necessária a preparação das amostras fornecidas pela empresa Vale Fertilizantes S/A, realizando as operações precedentes à etapa de separação sólido-líquido (cominuição, classificação, deslamagem e flotação). Na etapa de avaliação das porcentagens de sólidos, variou-se entre 5% e 20% de sólidos. Durante os testes de avaliação de pH, foram empregados valores entre 12,00 e 12,93. Para a avaliação do efeito do floculante foi utilizado um polímero aniônico comercialmente denominado Flotisor FL 7226, variando-se a dosagem entre 0 e 100 g/t. Após a realização dos testes práticos, constatou-se que a melhor condição para promover a sedimentação das partículas de rejeito fosfático corresponde à polpa mineral a 10% de sólidos, em pH = 12,50, empregando o floculante a uma dosagem de 50 g/t. Segundo a metodologia de Roberts, o resultado se mostrou discrepante para a melhor dosagem de floculante aplicada, sendo alcançados melhores resultados quando foi empregada uma dosagem de 75 g/t de floculante.

**Palavras-chave:** minério de fosfato. Floculação. pH. Sedimentação.

## ABSTRACT

The concern involving the reuse of water used during the beneficiation of ores operations is presented as a latent reality these days, concurrent with the issue of environmental preservation. The thickening operation, widely used in the mineral industry, promotes recovery of water added to the steps of treatment of ores together with the reduction of the volume occupied by the disposition of tailings dams. The sedimentation of phosphatic waste and the effect of varying the parameters percent solids, pH and flocculant dosing in mineral pulp were investigated in this work, through the implementation of sedimentation tests in a test tube and analyze the critical point, according to the methodology proposed by Roberts. The main objective was to determine the best operating condition to be used in implementing the thickening operation in order to obtain a thickened pulp and a clarified liquid. The assays were performed in mining treatment Laboratory of CEFET/ MG – Unit Araxa at room temperature using suspensions of particulate material from the phosphate ore flotation tailings. The preparation of the samples supplied by the company Valley Fertilizer A/S was required, performing the above operations to solid-liquid separation step (comminution, classification, desliming and flotation). In step evaluation percentages of solids, it ranged between 5% and 20% solids. During the pH evaluation tests were performed, values between 12.00 and 12.93. To evaluate the effect of the flocculant was used an anionic polymer commercially know as Flotisor 7226 FL, by varying the dosage of between 0 and 100 g/t. After carrying out the practical tests, it was found that the best condition to promote settling of the tailings particles corresponding to phosphatic mineral pulp at 10% solids, pH = 12.50, employing flocculant at a dosage of 50 g/t. According to the Roberts method the result showed discrepancy for better flocculant dosage applied, best results being achieved when applied for a dosage of 75 g/t flocculant.

**Keywords:** phosphate ore. Flocculation. pH. Sedimentation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Vista de um espessador.....	20
Figura 3.1 – Esboço geológico do substrato do complexo de Tapira com base em testemunhos de sondagem. ....	27
Figura 3.2 Perfil geológico da mina de Tapira mostrando o controle vertical dos tipos de minério.....	28
Figura 3.3 – Curva de decantação. ....	32
Figura 3.4 – Etapas de um teste de proveta.....	32
Figura 3.5 – Regime de sedimentação segundo Fitch. ....	34
Figura 3.6 – Esquema de diferentes tipos de aglomeração. ....	35
Figura 3.7 – Representação esquemática do balanço de forças em função da distância entre as partículas.....	36
Figura 3.8 – Mecanismo de floculação por ponte.....	40
Figura 3.9 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.....	40
Figura 3.10 – (A) Vista superior do espessador e (B) Vista lateral do espessador. ..	43
Figura 3.11 – Representação do <i>feedwell</i> .....	44
Figura 3.12 – Esquema operacional de um espessador convencional. ....	45
Figura 3.13 – Espessador de lamelas. ....	46
Figura 3.14 – Representação de um espessador contínuo de alta capacidade com alimentação submersa. ....	48
Figura 3.15 – <i>Slump test</i> realizado em laboratório para um mesmo rejeito e diferentes teores de sólidos em peso.....	49
Figura 3.16 – <i>Flume test</i> sendo realizado para obtenção do ângulo de disposição. .	50
Figura 4.1 – Teste de picnometria. a) picnômetro vazio; b) picnômetro + minério; c) picnômetro + minério + água; d) picnômetro + água.....	56
Figura 4.2 – a) teste de flotação; b) concentrado da flotação; c) rejeito da flotação. .	56
Figura 4.3 – Preparação do floculante. ....	57
Figura 4.4 – pHmetro utilizado nos testes. ....	58
Figura 4.5 – Provetas graduadas milimetricamente. ....	58
Figura 5.1 – Teste de sedimentação em bancada variando a porcentagem de sólidos.....	64

Figura 5.2 – Teste de sedimentação em bancada variando o pH. ....	66
Figura 5.3 – Teste de sedimentação em bancada variando a dosagem de floculante. .....	68
Figura 5.4 – Estudo da variação da porcentagem de sólidos pelo método de Roberts. A) 5% de sólidos, B) 10% de sólidos e C) 20% de sólidos.....	71
Figura 5.5 - Estudo da variação do pH pelo método de Roberts. A) pH 12,00 B) pH 12,50 e C) pH 12,93. ....	72
Figura 5.6 – Estudo da variação da dosagem de floculante pelo método de Roberts. A) 0 g/t, B) 25 g/t, C) 50 g/t, D) 75 g/t e E) 100 g/t. ....	73

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 – Equação para cálculo da razão de espessamento para o modelo de Coe e Clevenger. ....	41
Equação 3.2 – Equação para cálculo do fator de espessamento para o método de Talmage e Fitch.....	41
Equação 3.3 – Equação para cálculo da altura de compressão para o método de Oltman.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Reservas e produções mundiais de concentrado de rocha fosfática. ...	24
Tabela 3.2 - Caracterização dos floculantes orgânicos.....	38
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados na flotação.....	57
Tabela 4.2 – Planejamento dos testes de sedimentação em proveta. ....	60
Tabela 5.1 – Análise granulométrica da alimentação dos testes de sedimentação. .	62
Tabela 5.2 – Estrutura dos Testes variando porcentagem dos sólidos. ....	64
Tabela 5.3 – Estrutura dos Testes variando o pH. ....	65
Tabela 5.4 – Estrutura dos Testes variando a dosagem de floculante.....	67
Tabela 5.5 – Resultados de tempo e altura para o método Roberts variando a porcentagem de sólidos. ....	71
Tabela 5.6 – Resultados de tempo e altura para o método Roberts variando o pH. .	72
Tabela 5.7 – Resultados de tempo e altura para o método Roberts variando a dosagem de floculante. ....	74

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Curva granulométrica de distribuição das partículas. ....	63
Gráfico 5.2 – Variação da porcentagem de sólidos.....	64
Gráfico 5.3 – Variação do pH. ....	66
Gráfico 5.4 - Variação da dosagem de floculante.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Alim. – Alimentação

CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica

CMT – Complexo de Mineração de Tapira

Dens. – Densidade

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DIPLAM – Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento da Mineração

E.g. – *Exempli gratia*

GO – Goiás

MG – Minas Gerais

NPK – *Nitrogen, Phosphate and Potassium*

Rel. – Relação

SP – São Paulo

S/A – Sociedade anônima

UF – underflow

U.S.G.S – *United States Geological Survey*

Vel. – Velocidade

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>23</b>
3.1	MINÉRIO FOSFÁTICO .....	23
3.1.1	<i>Ocorrência</i> .....	25
3.1.2	<i>Apatita</i> .....	26
3.1.3	<i>Complexo de Tapira</i> .....	26
3.2	SEDIMENTAÇÃO .....	29
3.2.1	<i>Fatores que afetam a sedimentação</i> .....	30
3.2.2	<i>Teste de proveta</i> .....	31
3.2.3	<i>Coagulação e floculação</i> .....	34
3.2.4	<i>Espessadores</i> .....	40
3.3	ESPESSAMENTO DE REJEITO FOSFATADO .....	48
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>54</b>
4.1	MATERIAIS.....	54
4.2	MÉTODOS.....	54
4.2.1	<i>Amostras</i> .....	54
4.2.2	<i>Preparação das amostras</i> .....	55
4.2.3	<i>Testes de sedimentação em proveta</i> .....	57
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>62</b>
5.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	62
5.2	ESTUDO DA VARIAÇÃO DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS .....	63
5.3	ESTUDO DA VARIAÇÃO DO PH.....	65
5.4	ESTUDO DA AVALIAÇÃO DA DOSAGEM DE FLOCULANTE.....	67
5.5	ESTUDO DO PONTO CRÍTICO PELO MÉTODO DE ROBERTS.....	70
5.5.1	<i>Variação da porcentagem de sólidos</i> .....	70
5.5.2	<i>Variação do pH</i> .....	72

5.5.3	<i>Variação da dosagem de floculante</i> .....	73
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	76
7	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	79
	<b>ANEXO A – PROCEDIMENTO DE PICNOMETRIA</b> .....	82
	<b>ANEXO B – PREPARAÇÃO DOS REAGENTES E TESTE DE FLOTAÇÃO</b> .....	84
	<b>ANEXO C – PREPARAÇÃO DO FLOCULANTE</b> .....	87
	<b>ANEXO D – FICHA DE PONTOS COLETADOS NO TESTE DE SEDIMENTAÇÃO</b> .....	88

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre as operações de Beneficiamento Mineral, a Separação Sólido-líquido se apresenta como uma das etapas mais importantes. A partir desta operação pode ser alcançada a adequação de porcentagem de sólidos da polpa mineral, proporcionando a redução de custos operacionais. Além disso, a água retirada pode ser reutilizada nas etapas anteriores do beneficiamento. A operação se dá pela sedimentação dos sólidos presentes na suspensão, nos chamados tanques de sedimentação ou espessadores (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Em uma polpa em suspensão, as partículas que apresentam forma esférica apresentam maior facilidade para sedimentarem em relação àquelas que apresentam formato irregular. Assim como as partículas de granulometria maior têm mais agilidade durante a sedimentação em relação às partículas mais finas, devido ao seu maior peso. É comum o uso de reagentes durante as operações de Beneficiamento Mineral, assim como na etapa de sedimentação. O emprego destes reagentes visa contornar essa dificuldade de sedimentação das partículas sólidas. Os reagentes denominados floculantes promovem a aglomeração destas partículas irregulares resultando em uma melhor capacidade de sedimentação destas na suspensão (VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

A agregação ocorre por formação de pontes de ligação entre as moléculas do polímero (floculante) e das partículas, tornando-as propensas a serem adsorvidas. A dosagem excessiva de um floculante pode causar a dispersão das partículas devido à quebra do floco. Além disso, o controle do pH é essencial pela sua influência no potencial de superfície e/ou influência nas características químicas do polímero, podendo causar a alteração da solubilidade deste (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

A floculação é um processo físico que, juntamente com uma lenta agitação imposta ao escoamento da água, promove a aglutinação das partículas facilitando o choque entre elas. O fenômeno pode ocorrer por processos mecânicos ou hidráulicos envolvendo a utilização de reagentes que irão agir como pontes entre as partículas que estão separadas na suspensão. Os reagentes geralmente utilizados

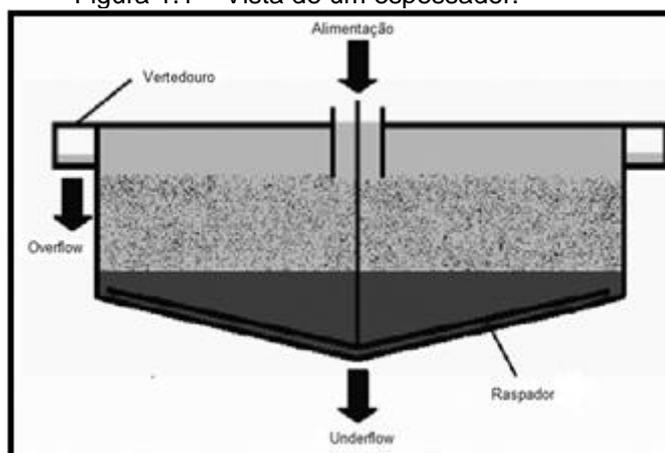
para formar estas pontes são polímeros orgânicos de cadeia longa podendo ser naturais ou sintéticos. Como exemplo, temos amido, goma e gelatina ou polieletrólitos. Geralmente são empregados reagentes de caráter aniônico, podendo também ser utilizados os catiônicos e não iônicos (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Para a escolha do floculante, deve-se levar em consideração o tamanho da cadeia molecular, a natureza iônica e a densidade do polímero, além das características químicas dos grupos ativos das moléculas. Além disso, existem alguns fatores que influenciam diretamente na floculação: o tipo e a qualidade do floculante, o pH da suspensão, a temperatura, o tempo de mistura, a agitação e a presença de núcleos. Para cada tipo de suspensão existe um valor de pH ótimo, encontrado através de experimentação (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

As operações de sedimentação podem ser divididas em duas classes: o espessamento, em que o produto de interesse é o sólido, e a clarificação, no qual o produto de interesse corresponde ao líquido clarificado.

Os espessadores são equipamentos de funcionamento simples e contínuo, caracterizando-se pelo seu baixo custo de operação. Devido à ampla escala de utilização atual, muitos estudos estão sendo desenvolvido no que se diz respeito ao dimensionamento e à operação visando melhor eficiência destes equipamentos (Figura 1.1). São compostos por uma parte cilíndrica (superior) e outra parte cônica (inferior). A primeira é dotada de um vertedouro por onde a corrente de líquido clarificado transborda, apresentando uma alimentação centralizada no topo ou no interior do mesmo (NUNES, 2008).

Figura 1.1 – Vista de um espessador.



Fonte: NUNES, 2008.

Coe e Clevenger (1916) *apud* Nunes (2008), baseando-se na análise de sedimentação em proveta, propuseram uma metodologia para o projeto de sedimentadores. Durante a sedimentação em proveta, observam-se três regiões principais: o líquido clarificado, a zona de sedimentação livre e a zona de compactação. Na zona de sedimentação livre, as partículas não sofrem nenhuma interação entre si, mantendo, assim, uma velocidade de sedimentação considerada constante para uma dada porcentagem de sólidos fixa. Já na zona de compactação, as partículas começam a sofrer interferência entre si, causando desaceleração das partículas, apresentando concentração de sólidos variável.

Estudos anteriores, realizados por Nunes (2008), desenvolvidos em pesquisas de suspensões floculentas, comprovam que o uso de floculante interfere na velocidade de sedimentação para concentrado de caulim, através da obtenção de um pH ótimo e concentração adequada de reagente, a partir de realização de testes experimentais em provetas.

Estudos realizados na área de desenvolvimento de técnicas para disposição de rejeito representam uma importante contribuição no aspecto ambiental, visto que quanto menor o volume ocupado por este tipo de material, menor a necessidade de construção de barragens de rejeito de grande porte. Assim, haverá um menor comprometimento do ponto de vista ambiental, além de menores riscos de acidentes relacionados a deslizamentos e inundações por rompimento destas barragens. A aplicação do método de espessamento de rejeito na escala industrial pode

representar uma enorme mudança no cenário atual da empresa Vale Fertilizantes S/A, uma vez que este tipo de operação não apresenta ampla utilização nos dias atuais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o efeito da variação dos parâmetros operacionais em testes de sedimentação de polpa de rejeito proveniente da concentração de minério fosfático, proveniente da Vale Fertilizantes S/A, visando obter as condições ótimas para a execução de testes em batelada, em escala de bancada.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Avaliar a influência das variáveis porcentagem de sólidos, pH e dosagem de floculante nos testes de sedimentação de polpa de rejeito fosfático;
- ✓ Analisar a melhor condição para se aplicar a operação de espessamento em rejeito fosfático, segundo a metodologia de obtenção do ponto crítico, proposta por Roberts.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Minério Fosfático

O fósforo é o primeiro elemento descoberto, segundo registro histórico. O químico alemão Henning Brad, em 1669, extraiu fósforo elementar a partir de resquícios de urina humana evaporada (OLIVEIRA, 2007). Este elemento químico corresponde ao décimo representante mais abundante encontrado na natureza. Não pode ser encontrado sob sua forma livre, estando sempre combinado com outros elementos químicos formando minerais fosfatados (BEZERRA e BROD, 2009 *apud* SANTOS, 2012).

Considerado um dos elementos vitais para o crescimento e saúde das plantas e dos animais, o fósforo juntamente com o nitrogênio e potássio, se apresenta como um elemento essencial na cadeia produtiva de fertilizantes químicos (NPK). Este tipo de fertilizante se apresenta cada vez mais importante no desenvolvimento da produção agrícola necessária para alimentar a crescente população mundial. Devido ao aumento da demanda por NPK, a produção de concentrados fosfáticos apresentou aumento significativo nos últimos anos (CHULA, 2004). Segundo a USGS (U.S. Geological Survey), a produção mundial de concentrado fosfático no ano de 2012 atingiu 210.000 t, superando a produção dos anos anteriores. Destacaram-se como maiores produtores a China, seguido por Estados Unidos, Marrocos, Rússia e Brasil (Tabela 3.1) (FONSECA e SILVA, 2013).

Tabela 3.1 - Reservas e produções mundiais de concentrado de rocha fosfática.

Discriminação Países	Reservas ( $10^3$ t $P_2O_5$ ) 2012 <sup>(p) (1)</sup>	Produção ( $10^3$ t)		
		2011 <sup>(r)</sup>	2012 <sup>(p)</sup>	%
Brasil <sup>(2)</sup>	270.000	6.738	6.740	3,2
China	3.700.000	81.000	89.000	42,8
Estados Unidos da América	1.400.000	28.100	29.200	14,0
Marrocos e Saara Ocidental	50.000.000	28.000	28.000	13,5
Rússia	1.300.000	11.200	11.300	5,4
Jordânia	1.500.000	6.500	6.500	3,1
Tunísia	100.000	5.000	6.000	2,9
Egito	100.000	3.500	3.000	1,4
Israel	180.000	3.100	3.000	1,4
Peru	820.000	2.540	2.560	1,2
Austrália	1.800.000	2.650	2.600	1,3
Síria	490.000	3.100	2.500	1,2
África do Sul	1.500.000	2.500	2.500	1,2
Outros países	3.840.000	14.072	15.055	7,2
<b>TOTAL</b>	<b>67.000.000</b>	<b>198.000</b>	<b>207.955</b>	<b>100,0</b>

Fonte: DNPM/DIPLAM; USGS – Mineral Commodity Summaries 2013 *apud* FONSECA e SILVA, 2013.

Notas: (1) Nutrientes em  $P_2O_5$ ; (2) reserva lavrável; (r) revisado; (p) dado preliminar.

O Brasil consegue atender praticamente toda a demanda interna de concentrados fosfáticos, porém não se estabiliza na produção de fertilizantes devido à carência de outros insumos, como amônia e enxofre (FONSECA e SILVA, 2013).

A produção interna de rochas fosfáticas se concentra, principalmente, nos complexos localizados nos municípios de Tapira – MG, Araxá – MG, Catalão – GO e Cajati – SP, sendo que seus teores giram em torno de 12% de  $P_2O_5$ . Após a extração e concentração do minério, o teor de  $P_2O_5$  pode atingir o patamar de 35% (FONSECA e SILVA, 2013).

O complexo situado no município de Tapira (MG), atualmente operado pela empresa Vale Fertilizantes, corresponde ao maior produtor de concentrado fosfático no Brasil, sendo responsável no ano de 2012 por 30% da produção nacional. No estado de Goiás, os complexos instalados na cidade de Catalão, operados pelas empresas Anglo/Copebrás e Vale, produziram juntos em 2012, 35% de concentrado no país. Já em Araxá (MG), a Vale Fertilizantes executa suas operações no complexo do Barreiro, dando início em 2012 as operações na mina denominada F4, contribuindo então com um aumento da produção de 16% de concentrado de rocha fosfática. Enquanto isso, em Cajati (SP), a Vale Fertilizantes produziu cerca de 8% do concentrado no mesmo ano (FONSECA e SILVA, 2013).

O estado de Minas Gerais é responsável por 50% da produção interna, enquanto Goiás se encarrega de 35%. Assim, a Vale Fertilizantes detém cerca de 70% da produção nacional de concentrado, deixando sua principal concorrente, a Anglo/Copebrás, com apenas 20% (FONSECA e SILVA, 2013).

Segundo Araújo *et al.* (2002), o Complexo Minerário de Tapira (CMT) ocupa a posição de maior mineração de fosfatado de América Latina e o 5º lugar no ranking de movimentação de minério no Brasil.

### 3.1.1 Ocorrência

Existe uma classe de minerais fosfatados naturais que podem ser aplicados diretamente como material fertilizante ou insumo básico da indústria de fósforo assim como são encontrados na natureza ou passando por um processo de concentração. Estes podem ser classificados como (SILVA e LOPES, 1991 *apud* OLIVEIRA, 2007):

- i. Guanos: composto por material orgânico e pouca importância econômica, utilizados diretamente incorporados em adubos;
- ii. Alumínio-fosfatos: apresenta certa importância econômica, constituído por fosfato de alumínio hidratado, com presença de fosfato de ferro; não necessitam de um pré-tratamento para serem aplicados como fertilizantes;
- iii. Fosfato de cálcio: principal fonte de fósforo e mais importante tipo de rocha de fosfato natural; podem ser encontrados em depósitos de origem sedimentar, biogenética ou ígnea, sendo os sedimentares e ígneos os mais importantes do ponto de vista econômico.

Os depósitos sedimentares são os mais comuns, representando 80% da produção mundial. Depósitos deste tipo correspondem a 70% das reservas mundiais de minério fosfáticos (SOUZA, 2001 *apud* OLIVEIRA, 2007).

### 3.1.2 Apatita

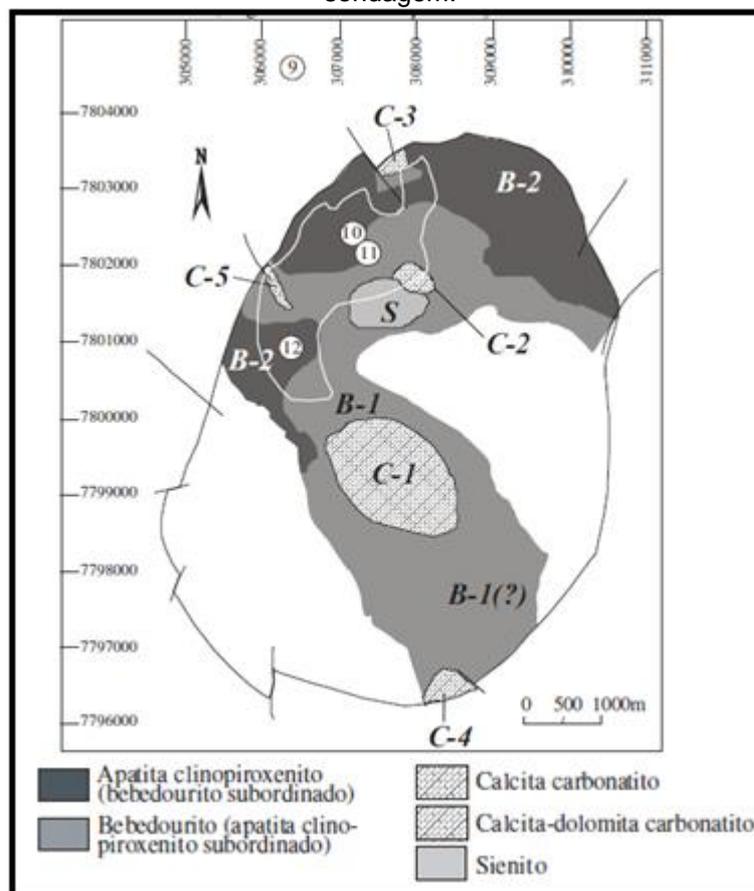
O mineral apatita corresponde à principal fonte natural do elemento fósforo, importante para a indústria química, porém com mineralogia bastante complexa (CHANDER e FUERSTENAU, 1979 *apud* OLIVEIRA, 2007). O elevado número de substituições dos íons da rede cristalina é característico deste grupo de minerais, sendo a cloroapatita, fluorapatita e hidroxiapatita as formas naturais mais comuns. Estas podem ser classificadas de acordo com o conteúdo aniônico: fluoreto  $F^-$ , cloreto  $Cl^-$  e hidroxila  $OH^-$ , respectivamente (TOLEDO e PEREIRA, 2001 *apud* BARROS, 2005).

A ampla variedade de composições químicas das apatitas, alterando suas propriedades de superfície de um minério para outro e de um depósito para outro, pode ser explicado então pelas diversas substituições e mecanismos e/ou ambientes de formação das apatitas (HANNA e SOMASUNDARAN, 1976 *apud* OLIVEIRA, 2007). A utilização destes minérios associados demanda um tratamento para a retirada/redução dos minerais de ganga presentes nos compostos.

### 3.1.3 Complexo de Tapira

O Complexo ultramáfico-alcálico-carbonatítico está situado no município de Tapira, ao oeste do Estado de Minas Gerais, distante 35 km sudeste da cidade de Araxá. Seu formato se apresenta aproximadamente elíptico, com 35 km<sup>2</sup> de área (Figura 3.1). Sua composição engloba, principalmente, clinopiroxenitos e bebedouritos, e em menores quantidades carbonatitos, foscorito, dunito serpentizado, flogopitito, sienito, melilitolito e flogopita picrito (BROD *et al.*, 2004).

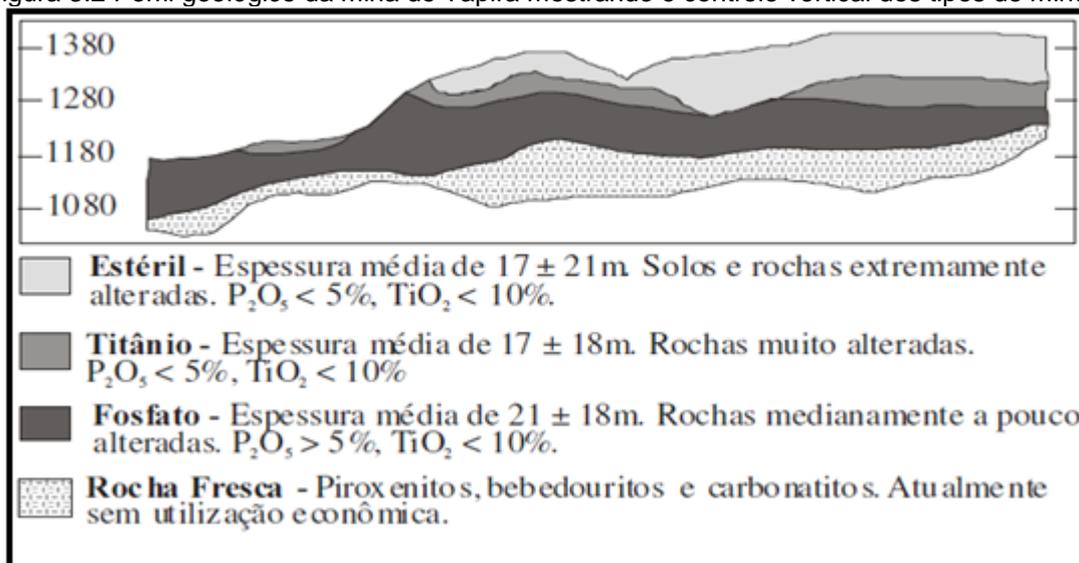
Figura 3.1 – Esboço geológico do substrato do complexo de Tapira com base em testemunhos de sondagem.



Fonte: BROD *et al.*, 2004.

O Complexo de Tapira é resultado do enriquecimento supergênico a partir de rochas ultramáficas (peridotitos e piroxenitos essencialmente) com ocorrências de rochas alcalinas e carbonatíticas. A intensidade do intemperismo condiciona o teor e o tipo de minério através de zonações (Figura 3.2). Logo abaixo do estéril (zona latossólica), ocorre um horizonte rico em anatásio (Titânio) e sotoposto a este o minério fosfatado (apatita) (CHULA, 2004).

Figura 3.2 Perfil geológico da mina de Tapira mostrando o controle vertical dos tipos de minério.



Fonte: BROD *et al.*, 2004.

O Complexo de Tapira é majoritariamente composto por rochas silicáticas alcalinas. Dentre estas podem ser destacados: bebedouritos em maior quantidade e dunitos, wehrlitos, melilitolitos e sienitos em quantidades inferiores – intrudidas por carbonatitos e diques ultramáficos de granulação fina (BROD *et al.*, 2004).

A jazida de Tapira possui uma mineralogia complexa, heterogênea e baixo teor de apatita, principalmente devido à sua origem magmática. Logo, faz-se necessário um processo industrial de beneficiamento bastante complexo. Devido às diferentes composições mineralógicas do minério, os circuitos de beneficiamento foram divididos em: friável e granulado. O material friável constitui 70% do minério fosfático da jazida, sendo composto por minerais intemperizados, enriquecidos em minerais de ganga silicatados, principalmente, mica. Enquanto isso, o minério granulado possui características de maior dureza e apresenta os carbonatos como principais contaminantes (BROD *et al.*, 2004).

Para a execução das rotas distintas, torna-se necessário o emprego de um controle rígido das frentes de lavras a céu aberto e das operações de processamento, como: britagem, moagem, separação magnética, deslamagem e flotação. Quando os dois minérios são concentrados juntamente, o minério granulado possui efeito negativo no processo, ocorrendo então uma redução no teor de  $P_2O_5$  e na recuperação de fósforo (BARROS, 2001 *apud* CHULA, 2004). Isso se

explica pelo comportamento semelhante do carbonato e da apatita quando se utiliza ácidos graxos saponificados como coletores. Com o uso de combinações de reagentes, a seletividade na flotação de apatita pode ser potencializada, evitando a contaminação do concentrado, principalmente por carbonatos.

Uma vez que ocorre a contaminação do concentrado, o teor de CaO elevado causa um aumento no consumo de ácido sulfúrico no processo posterior de obtenção de ácido fosfórico, tendo como consequência o aumento dos custos operacionais (BARROS, 2001 *apud* CHULA, 2004).

Segundo Fusaro *et al.* (1987) *apud* Chula (2004), durante as fases da mineração e da agricultura se concentram as maiores perdas de fósforo (49% e 37%, respectivamente). Diante disto, faz-se necessária a redução destas perdas mediante o aumento da recuperação durante as etapas de beneficiamento do minério.

### **3.2 Sedimentação**

A sedimentação é um processo de separação sólido-líquido que se baseia na diferença de comportamento dos materiais que constituem uma suspensão. O espessamento corresponde à separação sólido-líquido baseada na sedimentação visando: a recuperação/recirculação de água, a preparação de polpas com porcentagens de sólidos adequadas para as etapas posteriores, o desaguamento final do concentrado e a preparação de rejeitos para o descarte. A operação de sedimentação é baseada no transporte vertical descendente das partículas sólidas que estão em suspensão e sujeitas à ação das forças gravitacionais, de empuxo e resistência (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

São diversos fatores que podem afetar a sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas, como: a natureza das partículas (tamanho, distribuição, forma, densidade específica, etc.), porcentagem de sólidos na suspensão, pré-tratamento da suspensão (para auxiliar na sedimentação) e dimensionamento do tanque de suspensão (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

### 3.2.1 Fatores que afetam a sedimentação

#### 3.2.1.1 *Distribuição granulométrica, tamanho e forma das partículas.*

A distribuição granulométrica é um dos fatores que mais podem influenciar tanto no desempenho quanto nos custos de uma operação de separação sólido-líquido. Uma faixa maior de partículas de granulometria reduzida representa uma redução de eficiência no processo. Raciocínio análogo pode ser atribuído a partículas que se diferem da forma esférica (VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

#### 3.2.1.2 *Porcentagem de sólidos*

A porcentagem de sólidos influencia na velocidade de sedimentação, no desempenho da filtragem e na floculação (influência sobre as características dos flocos formados).

Suspensões com altas porcentagens de sólidos apresentam características diferentes daquelas em que uma única partícula se encontra em suspensão. Isso ocorre devido ao fenômeno de sedimentação impedida, que faz com que a taxa de sedimentação das partículas deixe de ser constante e se torne decrescente (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

#### 3.2.1.3 *Pré-tratamento da suspensão*

Segundo França e Massarani (2004), as suspensões floculadas apresentam diversas características diferentes da suspensão de partículas. Uma delas corresponde à taxa de sedimentação, consideravelmente maior em relação à suspensão original. Isto é devido à grande quantidade de água que o floco contém nos seus interstícios. Assim, características como forma e densidade são muito pouco relacionadas com as características das partículas originais. Para a previsão de novas taxas de sedimentação, sendo esta inferência de extrema complexidade, faz-se necessário o conhecimento de um novo fator de forma e valor de densidade, que ainda são determinados por métodos empíricos.

#### 3.2.1.4 Tanque de sedimentação

O dimensionamento e a geometria do tanque são fatores que influenciam a sedimentação de partículas, devido à existência de obstáculos que promovem a redução da taxa de sedimentação. Quando a porcentagem de sólidos se apresenta elevada, necessita-se de tanques com altura suficiente para que a sedimentação ocorra livremente (FRANÇA e MASSARANI, 2004).

Outros fatores podem influenciar na separação sólido-líquido, como: a presença de lamas que apresentam grande superfície específica e se dispersam causando o efeito browniano que dificulta a sedimentação<sup>1</sup>. O emprego de agentes agregantes proporciona um aumento na taxa de sedimentação. A viscosidade do meio fluido aumenta com a redução da temperatura, o que também acarreta diminuição na taxa de sedimentação (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

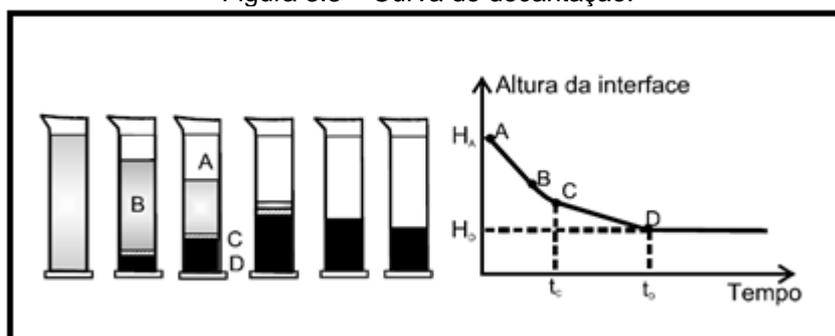
#### 3.2.2 Teste de proveta

Segundo Oliveira *et al.* (2004), o teste de proveta é utilizado para desenvolvimento de espessadores, objetivando estimar a área, a profundidade e a forma do tanque baseando-se na curva de decantação (Figura 3.3). O teste fundamenta-se na movimentação da interface superior da suspensão que se desloca em relação ao tempo. Geralmente estes testes são realizados em provetas de 1000 mL ou 2000 mL. Em função do gradiente da altura desta interface em relação ao tempo, pode-se inferir sobre a operação de sedimentação das partículas em suspensão nesta polpa.

---

<sup>1</sup> O efeito browniano é uma agitação rápida, irregular, contínua e em qualquer direção das partículas de uma suspensão, dependendo da temperatura do fluido (BROWN, 1827 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2004).

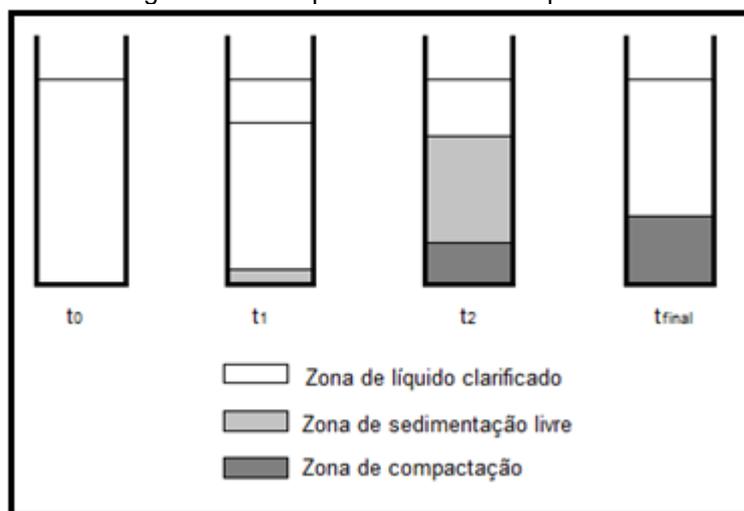
Figura 3.3 – Curva de decantação.



Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2004.

Uma amostra previamente homogênea da suspensão é colocada em um tubo graduado de seção constante (proveta) e deixada em repouso (Figura 3.4). Pode-se verificar que, após certo tempo, as partículas mais grossas depositam no fundo do tubo e as partículas mais finas continuam em suspensão, enquanto as intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas de acordo com a sua granulometria (CHAVES *et al.*, 1996).

Figura 3.4 – Etapas de um teste de proveta.



Fonte: FRANÇA E MASSARANI, 2004.

Inicialmente, a suspensão de partículas minerais em água, sob agitação, encontra-se com composição constante, sendo que a porcentagem dos sólidos se apresenta uniforme ao longo de toda a proveta. Instantaneamente, após o fim da agitação, as partículas maiores começam a se sedimentar, formando uma camada fina de sólidos no fundo da proveta. No decorrer do tempo, as partículas mais finas vão se sedimentando sem interação entre si. Desde o início da sedimentação das

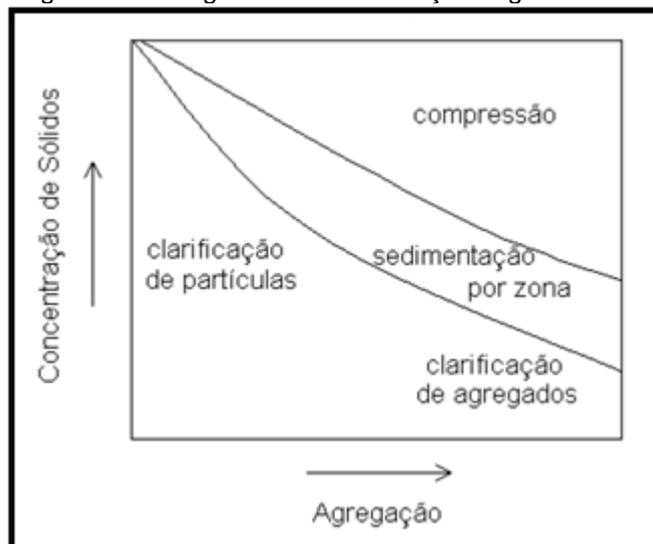
partículas, pode-se observar a criação de uma região de líquido livre de sólido na parte superior da proveta (zona clarificada).

Segundo Sousa (2012), no ensaio de proveta, mede-se a altura da superfície de separação entre o líquido clarificado e a suspensão juntamente com o tempo que foi necessário para que ocorresse esta separação. Com o passar do tempo é possível distinguir cinco zonas diferentes dentro da proveta:

- i. Líquido clarificado: o líquido na parte superior da proveta se torna praticamente livre de partículas. Quando uma sedimentação ocorre de forma rápida essa região pode ficar turva por certo tempo devido a partículas finas que permanecem em suspensão;
- ii. Suspensão com a mesma concentração inicial: consegue-se observar com nitidez a linha que divide a região clarificada e a de sedimentação livre;
- iii. Zona de transição: a concentração de partículas aumenta de cima para baixo nesta zona, gradativamente;
- iv. Suspensão espessada na zona de compressão: zona onde os sólidos sobre a forma de flocos estão decantados e dispostos uns sobre os outros, sem haver compactação devido à presença de água. Nesta região, notam-se canais por onde a água escoava proveniente da zona de compressão.
- v. Sólido grosseiro: sólidos que se decantam logo ao início do ensaio.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), o diagrama representativo de Fitch mostra que as polpas possuem tendências de agregações diferentes (Figura 3.5). Para suspensões de baixa densidade, predomina-se o regime de clarificação (partículas livres para se sedimentarem). Caso aconteça a formação de agregados, a velocidade de sedimentação destes se eleva (clarificação de agregados).

Figura 3.5 – Regime de sedimentação segundo Fitch.



Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2004.

Com o aumento da porcentagem de sólidos da polpa ou maior tendência à formação de agregados, pode-se ocorrer o regime de sedimentação por zona. Neste regime é possível notar a formação de interface entre o sólido em sedimentação e o sólido sobrenadante (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

O regime de compressão ocorre quando se há uma grande densidade de polpa ou elevada tendência de formação de agregados. As estruturas que se formam são capazes de suportar mecanicamente as camadas superiores devido à sua rigidez (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

O ensaio de teste de proveta, apesar de parecer muito simples, serve como base não só para o dimensionamento de espessadores de qualquer tamanho, mas também para o estabelecimento das condições ótimas de aplicação de pH, dosagem de floculante e porcentagem de sólidos (CHAVES *et al.*, 1996).

### 3.2.3 Coagulação e floculação

Os minerais em faixas granulométricas menores (finas) usualmente respondem mal aos processos comuns na separação sólido-líquido. A agregação de partículas, empregada visando melhorar o desempenho desta operação na indústria, pode ser realizada com o uso de coagulantes ou floculantes. Nestas faixas

granulométricas, o fenômeno da dupla camada elétrica e forças intermoleculares controlam a interação entre as partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

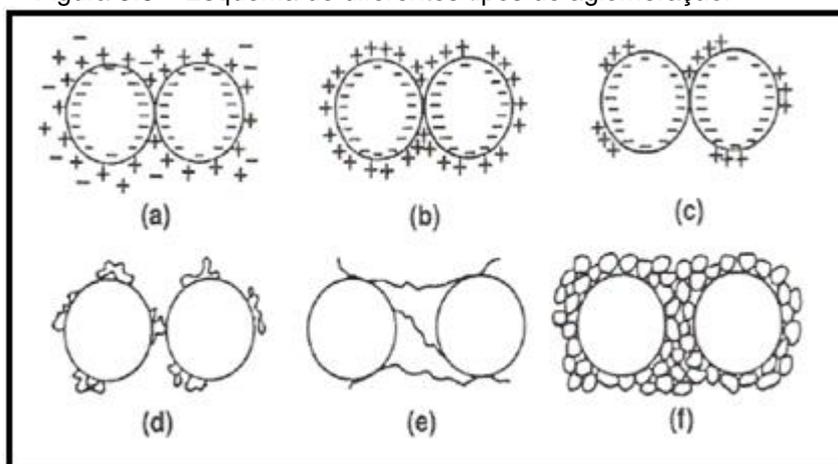
Segundo Netto (1987) *apud* Sousa (2012), as condições necessárias para a floculação e a coagulação são:

- ✓ Reduzir o potencial Zeta próximo de zero;
- ✓ Introduzir agentes químicos para formação de aglomerados e coágulos entre as partículas;
- ✓ Fornecer energia ao meio para haver maior número de choques entre as partículas, mas sem haver quebra dos flocos.

Os mecanismos de aglomeração podem ser:

- i. Representação da rede eletrostática por eletrólitos (Figura 3.6a);
- ii. Rede eletrostática por adsorção de superfície polieletrólitos (Figura 3.6b);
- iii. Rede eletrostática por adsorção de superfície em sítios de polieletrólitos (Figura 3.6c);
- iv. Pontes de adsorção de polímeros (Figura 3.6d);
- v. Adsorção de polímeros livre (Figura 3.6e);
- vi. Imersão na estrutura de gel por ligações de polímeros (Figura 3.6f).

Figura 3.6 – Esquema de diferentes tipos de aglomeração.

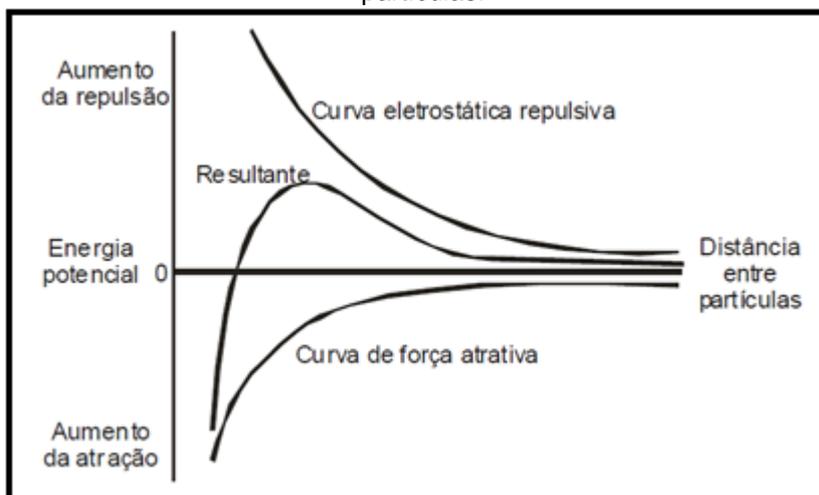


Fonte: PINTO, 2007 *apud* SOUSA, 2012.

A escolha do reagente deve levar em conta o tamanho da cadeia molecular, a natureza iônica do polímero, a densidade iônica e as características químicas dos grupos ativos da molécula. O tipo de floco desejado irá influenciar na escolha do reagente. Enquanto durante a operação de espessamento torna-se importante a presença de flocos grandes, na filtração os flocos devem ser compactos, com o mínimo de água no seu interior. A forma de adição do flocculante influi no seu desempenho. A solução diluída do flocculante deve ser adicionada à polpa sob forte agitação, reduzindo o tempo de homogeneização completa. Após o início de ruptura da molécula do polímero a agitação deve ser reduzida ao máximo (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Segundo Oliveira *et al.* (2004), a coagulação ocorre com a agregação das próprias partículas extremamente finas pelas ligações de London-van der Waals. As partículas se aderem por forças de atrações mútuas, ocorrendo em distâncias pequenas. A agregação das partículas irá depender do balanço entre as forças de atração e repulsão eletrostáticas presentes (Figura 3.7). Quando as partículas estão envolvidas por uma atmosfera carregada eletricamente que, geralmente, acarreta uma repulsão entre as partículas, a agregação não acontece. As forças de repulsão não só impedem que as partículas se agreguem como também dificulta a sedimentação, pois as partículas estarão em constante movimento.

Figura 3.7 – Representação esquemática do balanço de forças em função da distância entre as partículas.



Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2004.

Os coagulantes são eletrólitos que apresentam carga oposta a das superfícies das partículas. Com isso, quando são dispersos em um meio irão neutralizar as cargas existentes, permitindo assim que as partículas possam se aproximar umas das outras. Logo, a adesão ocorre como resultado das forças de atração molecular. Segundo Cohen (1971) *apud* Barreda (2008), todo o processo ocorre em um curto espaço de tempo, sendo que, às vezes, pode atingir menos de um segundo.

Os reagentes utilizados durante o processo de coagulação podem ser divididos em três grupos (GREGORY *et al.*, 1988 *apud* BARREDA, 2008):

- i. Coagulantes: são capazes de produzir hidróxidos gelatinosos insolúveis e englobar as partículas ou impurezas, compostos produzidos geralmente de alumínio ou ferro;
- ii. Alcalinizantes: conferem a alcalinidade necessária para a coagulação (óxido de cálcio, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio, etc.);
- iii. Coadjuvantes: capazes de formar partículas e agregados mais pesados. Compostos de argila, sílica ativa, polieletrólitos, etc.

Os fatores que mais influenciam no processo de coagulação são: tipo de coagulante, características químicas da água, temperatura e agitação. O sulfato de alumínio e o sulfato ferroso são os coagulantes mais empregados na indústria mineira (BARREDA, 2008).

A floculação é um processo que tem como finalidade formar agregados de partículas finamente divididas através da formação de flocos que melhoram a sedimentação e causam a clarificação do sistema (SHARMA *et al.*, 2006 *apud* BARREDA, 2008). Os floculantes atuam em um nível molecular na superfície das partículas reduzindo as forças repulsivas e aumentando as forças atrativas. Assim, favorecem a formação de agregados de partículas muito finas que, conforme elevem as respectivas massas, atingem uma velocidade de sedimentação maior.

Os floculantes podem ser classificados por sua composição química entre: inorgânicos e orgânicos. Os floculantes inorgânicos vêm sendo utilizados há mais tempo. Segundo Sharma *et al.* (2006) *apud* Barreda (2008), nesta classe podem ser

destacados, principalmente, sais de metais multivalentes com afinidade com ferro e alumínio. Porém, a utilização de floculantes inorgânicos apresenta algumas desvantagens, como:

- i. Alta demanda de floculante;
- ii. Grande sensibilidade ao pH;
- iii. Aplicável somente a sistemas de baixa dispersão;
- iv. Baixa eficiência na floculação de partículas muito finas.

Os floculantes orgânicos são relativamente novos (Tabela 3.2), sendo agrupados basicamente em dois tipos (SHARMA *et al.*, 2006 *apud* BARREDA, 2012):

- i. Sintéticos: são baseados em vários monômeros como: acrilamida, ácido acrílico, dialidimetil amônio cloreto, ácido sulfônico;
- ii. Naturais: são baseados em polímeros naturais, como por exemplo: amido, celulose, gomas naturais e seus derivados.

Tabela 3.2 - Caracterização dos floculantes orgânicos.

<b>Floculantes Orgânicos Sintéticos</b>	<b>Floculantes Orgânicos Naturais</b>
Mais efetivo devido à facilidade de emprego dos polímeros. O peso molecular, distribuição do peso molecular, natureza e porcentagem de carga iônica e a adequada estrutura dos polímeros.	Tem um elevado peso molecular com uma constituição molecular fixa e de longas cadeias.
Não-biodegradáveis, podem ser tóxicos para o meio ambiente.	Tem um peso molecular fixo e uma cadeia longa definida, os grupos funcionais podem ser derivados de floculantes efetivos.
Baseado em recursos não-renováveis, tais como petroquímicos, e portanto, de elevado custo.	Baseados em biomassas orgânicas renováveis, biodegradáveis, não-tóxicas e de baixo custo.

Fonte: SHARMA *et al.*, 2006 *apud* BARREDA, 2008.

Para que a agregação ocorra são necessárias as colisões entre as partículas, que podem ser provenientes do movimento browniano das partículas coloidais. Para aumentar a frequência e intensidade das colisões, podem-se usar sistemas externos de agitação, provocando uma agitação ortocinética<sup>2</sup> das partículas. Para cada tamanho de partícula existe um peso molecular mínimo, a partir do qual a floculação torna-se possível. O peso molecular mínimo aumenta com o tamanho da partícula. A expansão da molécula favorece a formação de flocos e acarreta um aumento na viscosidade do fluido. Partículas extremamente finas possuem maior área superficial a ser coberta, demandando, assim, maior emprego de floculante (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

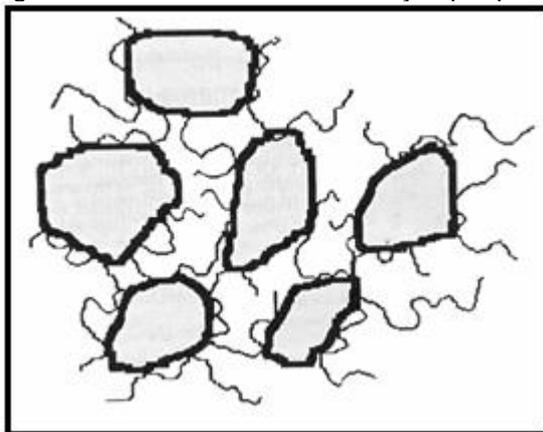
### 3.2.3.1 *Mecanismos de floculação*

A floculação pode ocorrer por dois mecanismos principais: formação de pontes ou floculação por reversão de carga localizada. A floculação por formação de pontes ocorre quando são utilizados polímeros de alto peso molecular, não iônicos ou com carga elétrica de mesmo sinal em relação à superfície do mineral. Somente uma parte da molécula interage diretamente com o sólido, sendo que o restante da cadeia estende-se em forma de braços que poderá fazer contato com outras partículas (Figura 3.8). Assim, os flocos formados podem se unir aos outros formando agregados maiores. Os flocos produzidos a partir da floculação por pontes apresentam estruturas abertas, onde as partículas não se tocam e a ligação ocorre por meio da macromolécula floculante. O crescimento dos flocos ocorre de maneira rápida, formando flocos grandes e flexíveis, de forma helicoidal, retendo quantidade expressiva de água. Apesar da presença de água acarretar uma redução na densidade média do floco, a velocidade de sedimentação é compensada pelo grande tamanho do mesmo (BARREDA, 2008).

---

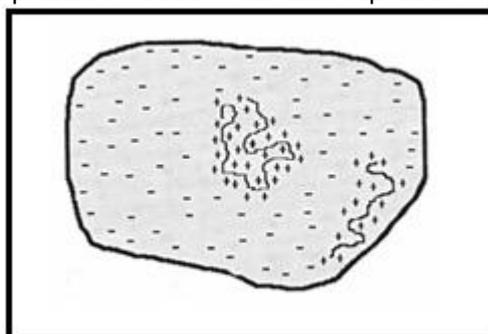
<sup>2</sup> Mecanismo promotor das colisões promovido principalmente por um gradiente de velocidade de cisalhamento gerado por agitação ou turbulência.

Figura 3.8 – Mecanismo de floculação por ponte.

Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2004.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), quando um polímero de baixo ou médio peso molecular, com carga oposta à da superfície do mineral, se espalha sobre o sólido, revertendo a carga elétrica da superfície nas regiões de adsorção, ocorre a floculação por reversão localizada de carga (Figura 3.9). A superfície passa a apresentar uma distribuição heterogênea de cargas, com áreas distintas positivas e negativas. Os flocos formados através deste mecanismo têm crescimento lento, apresentam tamanho uniforme e forma esférica. São flocos pequenos, compactos, rígidos, densos e permeáveis.

Figura 3.9 – Adsorção de um polímero catiônico em uma superfície com excesso de carga negativa.

Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2004.

### 3.2.4 Espessadores

#### 3.2.4.1 Dimensionamento de espessadores

Coe e Clevenger desenvolveram um método de dimensionamento de espessadores baseado nos fenômenos de espessamento observados nos ensaios

de sedimentação em proveta. O método propõe que a razão de espessamento corresponde a uma função única da velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre. Ou seja, o valor da velocidade de sedimentação será o mesmo tanto para o ensaio descontínuo como na operação contínua (CHAVES *et al.*, 1996). Portanto, um bom projeto de espessador deve ter uma seção transversal com área suficiente para que a velocidade de sedimentação na concentração crítica (profundidade crítica que limita a vazão de sólidos por unidade de área) atenda a vazão de sólidos necessária.

Experimentalmente, executam-se ensaios de espessamento variando apenas a diluição inicial, definindo a partir destes testes a diluição crítica. Em cada ensaio calcula-se a velocidade de sedimentação e a razão de espessamento (Equação 3.1).

Equação 3.1 – Equação para cálculo da razão de espessamento para o modelo de Coe e Clevenger.

$$\text{razão de espessamento} = \text{fator} \times \frac{\text{rel. } \frac{\text{água}}{\text{sólido}} \text{ da alim.} - \text{rel. } \frac{\text{água}}{\text{sólido}} \text{ do UF}}{\text{vel. sedimentação} \times \text{dens. polpa}}$$

Fonte: CHAVES *et al.*, 1996.

Kynch (1952) desenvolveu um modelo matemático para o espessamento descontínuo, considerando também que a razão de espessamento é função exclusiva da diluição da polpa. Talmage e Fitch (1953) estenderam este modelo para espessadores contínuos. A prática experimental consistia em realizar um único ensaio de sedimentação, nas condições desejadas de porcentagem de sólidos na polpa. Assim, é possível definir alguns parâmetros obtidos a partir da curva de sedimentação, como: concentração de sólidos ( $C_A$ ) e altura ( $H_A$ ) inicial, tempo ( $t_f$ ) e altura ( $H_f$ ) finais – *underflow* completamente espessado -, ponto crítico da curva (C) (CHAVES *et al.*, 1996). A razão de espessamento é calculada através da Equação 3.2.

Equação 3.2 – Equação para cálculo do fator de espessamento para o método de Talmage e Fitch.

$$\text{razão de espessamento} = \frac{t_u}{C_A \times H_A} \times \text{fator}$$

Fonte: CHAVES *et al.*, 1996.

Por sua vez, Oltman desenvolveu um ensaio que visa determinar uma estimativa de porcentagem de sólidos no *underflow* e tempo necessário para atingir este ponto. Neste ensaio usa-se um *rake* que gira em uma velocidade baixa, uma vez a cada hora, intermitentemente. Durante os testes são empregados floculantes e reguladores para aproximar o ensaio da prática mais real possível. A altura da interface é medida de 15 em 15 minutos durante 12 horas, e finalmente, após 24 horas. Ao final do ensaio, descarta-se a água, seca-se a amostra e pesa-se os sólidos. Assim, é possível determinar com máxima precisão o ponto de início da compressão e também o tempo ( $t_c$ ). Caso o *underflow* possa ser manuseado na porcentagem de sólidos final, determina-se o  $t_f$ , que corresponde ao ponto onde a curva se torna horizontal e não sofre compressão adicional (CHAVES *et al.*, 1996). O tempo que leva para ocorrer a compressão desejada é dada pela diferença ( $t_f - t_c$ ). Assim, a altura necessária para que ocorra a compressão requerida pode ser calculada pela equação apresentada abaixo (Equação 3.3).

Equação 3.3 – Equação para cálculo da altura de compressão para o método de Oltman.

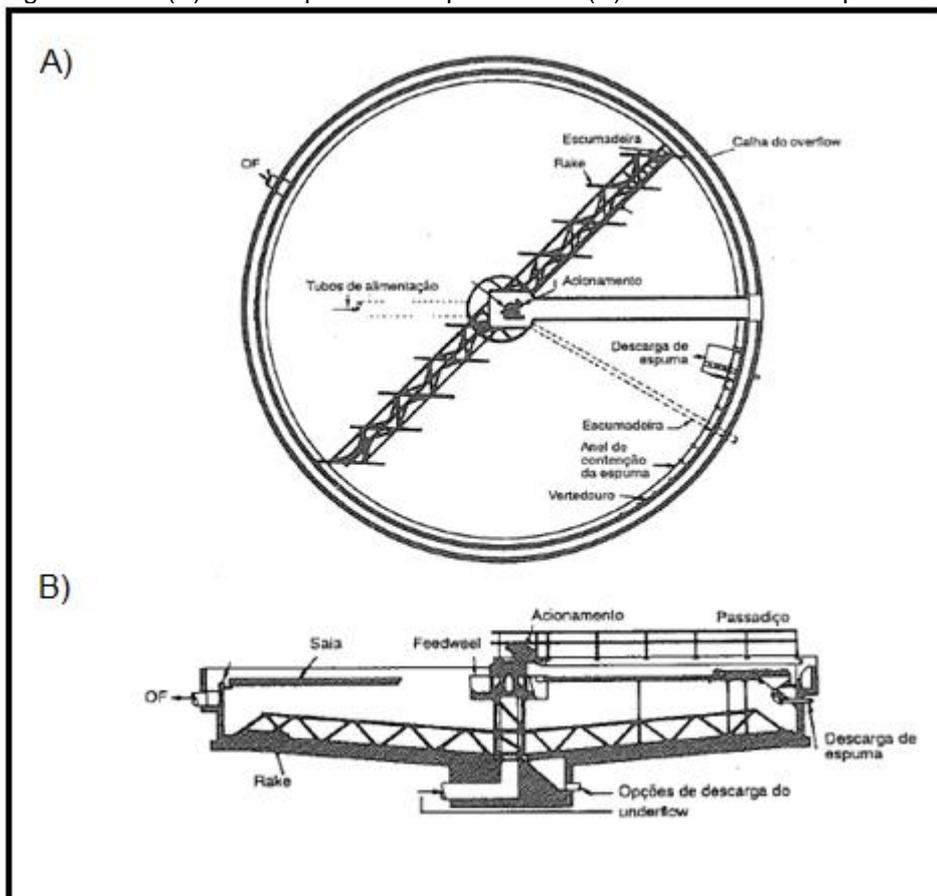
$$\text{altura de compressão} = \frac{(t_f - t_c) \times V}{\text{peso dos sólidos} \times \text{razão de espessamento}}$$

Fonte: CHAVES *et al.*, 1996, p. 78.

#### 3.2.4.2 Tipos de espessadores

Os espessadores são equipamentos de grande porte, apresentando custos elevados, geralmente instalados fora da usina (Figura 3.10).

Figura 3.10 – (A) Vista superior do espessador e (B) Vista lateral do espessador.



Fonte: adaptado catálogo da EIMCO apud CHAVES *et al.*, 1996.

Estes equipamentos são constituídos por um tanque cilíndrico-cônico, possuindo um sistema de alimentação central. Usualmente são construídos de concreto ou aço, sendo dotados de um mecanismo de raspagem (*rakes*) do material sedimentado até o seu ponto de saída. As partículas sólidas se sedimentam, sendo retiradas pelo fundo, no ápice da porção cônica (*underflow*), enquanto o líquido clarificado é transbordado e recolhido por uma calha que envolve o tanque (*overflow*). Espessadores construídos em aço são mais econômicos para tanques de pequenos diâmetros. Os espessadores podem receber polpas bastante diluídas (5 a 10% de sólidos) e desaguam-nas até 65 ou 75% de sólidos. Este valor pode ser definido pela capacidade da bomba de *underflow* em manusear o material adensado (CHAVES *et al.*, 1996).

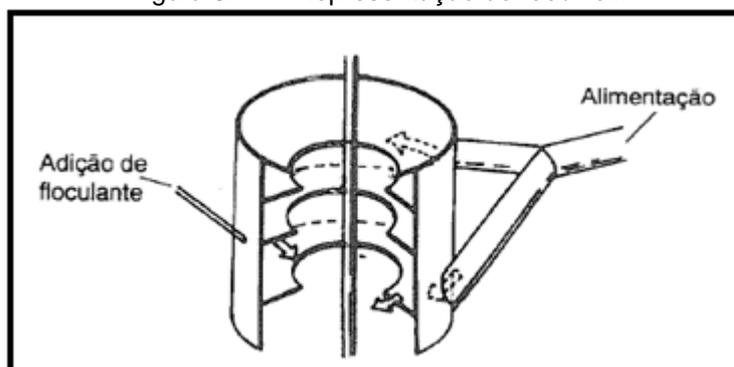
Os *rakes* giram lentamente no fundo do tanque, tendo como função principal arrastar o material sedimentado para o centro do tanque. Além disso, os *rakes* apresentam a função de: aumentar a densidade do espessado, desprender bolhas

de ar e bolsas de água pressas no espessado, arrumar as partículas sólidas umas sobre as outras ocupando o mínimo de volume e manter os sólidos em suspensão evitando o atorro do espessador. Todos os espessadores possuem uma passarela que permitem o acesso ao mecanismo central de acionamento e também suporta a tubulação que transporta a alimentação (CHAVES *et al.*, 1996).

Uma observação feita por Chaves *et al.* (1996) relata que os espessadores são projetados essencialmente para trabalhar com materiais de granulometria fina, portanto, materiais grosseiros não são admitidos no espessamento.

A alimentação é dividida em fluxos de direções opostas por um dispositivo chamado *feedwell*, de modo que a velocidade e turbulência sejam reduzidas, sendo assim as partículas possam sedimentar serenamente. A alimentação é realizada, geralmente, por gravidade por calhas ou tubos, com uma velocidade média entre 2,5 e 3,0 m/s (velocidade suficiente para manter a alimentação em suspensão), conforme apresentado na Figura 3.11 (CHAVES *et al.*, 1996).

Figura 3.11 – Representação do *feedwell*.



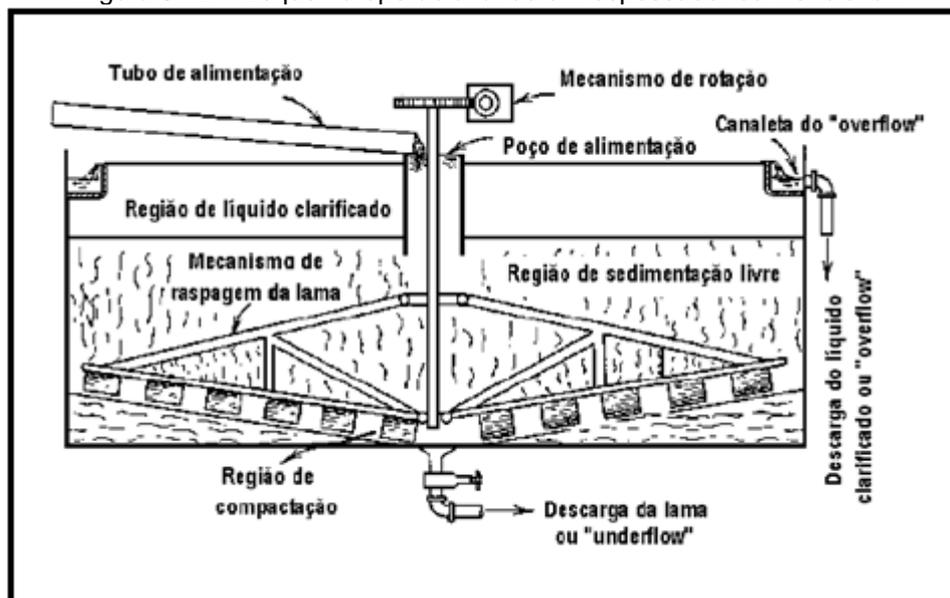
Fonte: CHAVES *et al.*, 1996.

Segundo Chaves *et al.* (1996), os espessadores podem ser destacados na recirculação de água, podendo trazer grandes reduções de custo operacional e consumo de energia elétrica, pois a necessidade de bombear a água desde a captação é minimizada. Um espessador de porte médio pode recuperar vazões superiores a 300 m<sup>3</sup>/h. A capacidade de um espessador está diretamente ligada a sua área e é determinada em função da taxa de sedimentação dos sólidos. Os tipos de espessadores variam em função da sua geometria ou forma de alimentação.

### 3.2.4.2.1 Espessador convencional

Os espessadores convencionais são aqueles compostos por um tanque cilíndrico-cônico, provido de um sistema de alimentação, de retirada do espessado (raspadores) e dispositivos de descarga para o *overflow* e o *underflow* (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Esquema operacional de um espessador convencional.



Fonte: FRANÇA E CASQUEIRA, 2007.

Este tipo de equipamento é o mais utilizado atualmente na indústria. Tem como característica apresentar um diâmetro muito maior que a altura. Em volta do tanque circular pode ser observado um anel que o envolve, correspondendo à uma calha que irá coletar o líquido clarificado. A parte inferior do tanque se apresenta como um cone raso.

O espessador contínuo apresenta constituição simples e custo de operação reduzido. Em compensação, o custo de implantação se apresenta elevado. Os primeiros espessadores convencionais foram projetados para acontecer à operação de espessamento sem adição de reagente (CHAVES *et al.*, 1996).

### 3.2.4.2.2 Espessador de alta capacidade

Este equipamento consiste em um espessador bastante semelhante ao convencional, porém com algumas modificações estruturais que promovem o

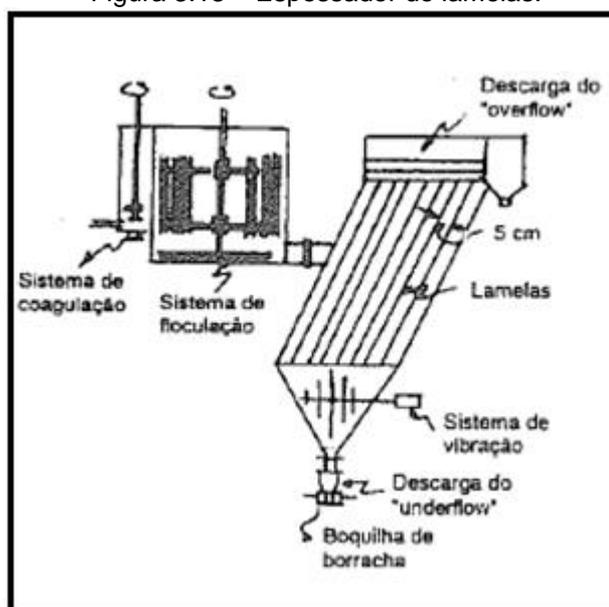
aumento da capacidade do equipamento. Os espessadores de alta capacidade surgiram devido a algumas limitações encontradas pelos espessadores convencionais, como: área de construção e o custo inicial de implantação.

Os espessadores de alta capacidade ocupam uma área aproximadamente 20 vezes menor, em relação ao equipamento convencional. São construídos por aço, sendo quase sempre instalados suspensos. Outra diferença notável corresponde à alimentação, sendo realizada na metade da altura do equipamento, ao contrário dos espessadores convencionais, onde a alimentação ocorre pela superfície. Uma das vantagens deste equipamento, além de aumentar a capacidade, está relacionada à característica de promover um aumento na área de espessamento, sem que haja aumento de seu diâmetro, o que o torna muito atraente industrialmente (CHAVES *et al.*, 1996).

#### 3.2.4.2.3 Espessador de lamelas

Os espessadores de lamelas também são espessadores de alta capacidade, mas possuem um sistema operacional distinto, além do alto custo. Consiste em uma série de placas inclinadas (lamelas), dispostas paralelamente, anexas a um tanque, formando canais (Figura 3.13) (SOUSA, 2012).

Figura 3.13 – Espessador de lamelas.



Fonte: CHAVES *et al.*, 1996.

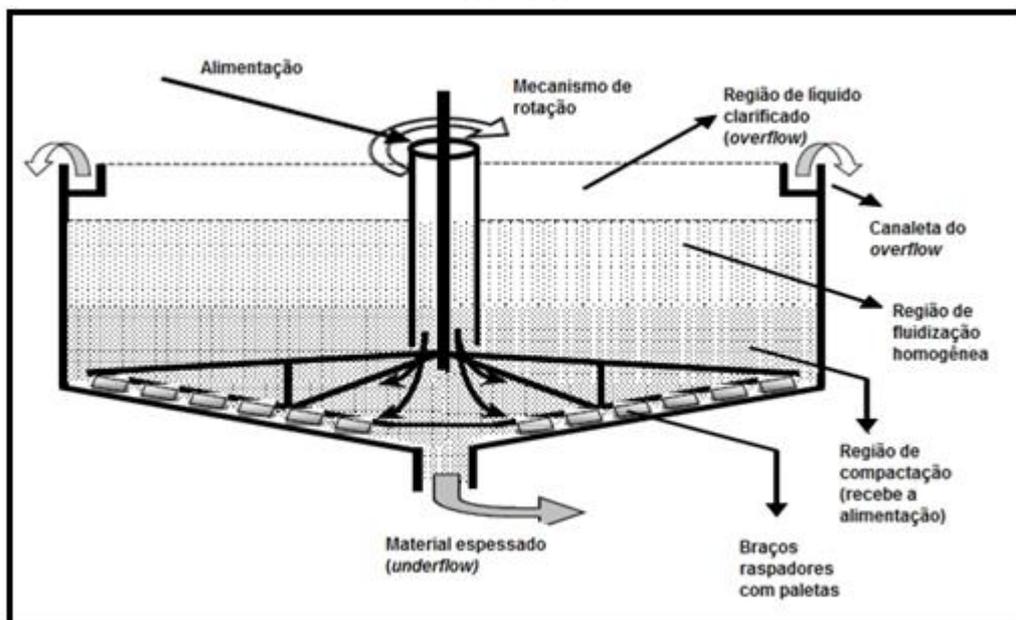
Neste tipo de equipamento, a alimentação da polpa é realizada em um tanque onde ocorre a floculação sendo, em seguida, direcionada para o espessador. Entre as placas pode ser encontrada uma caixa de alimentação. Esta caixa não apresenta fundo, logo o material vai ser distribuído pelo espessador. As partículas iniciam a sedimentação, formando agregados que irão afundar encontrando uma placa, escorregando através desta até a zona de compressão. Na região de compressão, o peso das camadas superiores, além de um sistema de vibração, favorece a compressão (aumentando o adensamento) da polpa. A água é direcionada em fluxo vertical ascendente. Enquanto isso, as partículas levadas pela água, irão encontrar a placa escorregando novamente. Como consequência deste cenário, é obtido um *overflow* apresentando maior clarificação (CHAVES *et al.*, 1996).

A vantagem desta configuração corresponde à economia de espaço, uma vez que a capacidade de sedimentação nestes equipamentos se apresenta superior, em relação aos espessadores convencionais. Tal característica pode ser atribuída à área efetiva de sedimentação, que é dada pela soma das áreas projetadas de cada lamela. Outra vantagem da configuração lamelar está relacionada à rápida sedimentação das partículas sólidas. Ou seja, como o tempo de sedimentação é proporcional à altura de queda vertical, este tempo pode ser reduzido, diminuindo-se o espaçamento entre as lamelas (SOUSA, 2012).

#### 3.2.4.2.4 Espessador com alimentação submersa

Este equipamento corresponde a outro tipo de espessador de alta capacidade, sendo que a alimentação é realizada no interior da região de compactação (Figura 3.14).

Figura 3.14 – Representação de um espessador contínuo de alta capacidade com alimentação submersa.



Fonte: FRANÇA E CASQUEIRA, 2007 *apud* SOUSA, 2012.

O aumento em sua capacidade pode ser atribuído às partículas já serem alimentadas no leito de sólidos sedimentado previamente, onde as partículas estão presas. O líquido percola através do leito das partículas, em direção da região do líquido clarificado. Nem todas as partículas são mantidas aprisionadas no leito de sólidos. Logo, acima da interface da região de compactação forma-se uma região de porcentagem de sólidos constante, chamada de região de fluidização, uma vez que as partículas são mantidas suspensas pelo movimento ascendente do líquido (SOUSA, 2012).

### 3.3 Espessamento de Rejeito Fosfatado

Rejeitos são consequências que não podem ser evitadas no processo pelo qual os minérios são submetidos durante seu beneficiamento. São produzidos em grandes escalas e geram expressivos impactos ao meio ambiente se não forem corretamente descartados. A forma como o rejeito será disposto está diretamente ligada ao tipo de minério e ao processo empregado no seu tratamento (FIGUEIREDO, 2007). Segundo Portes (2013), entre as diversas formas de disposição de rejeitos, existe uma preferência pelas mineradoras em dispor o rejeito em superfícies na forma de polpa, empregando os espaços denominados barragens.

Os espessadores utilizados com maior frequência na indústria mineral produzem polpas com elevada porcentagem de sólidos e geralmente possuem a função de espessar produtos com algum valor comercial e rejeitos. Estes últimos podem ser dispostos em barragens, cavas de minas, ou *backfill* em galerias subterrâneas (FRANÇA e CASQUEIRA 2007). Todas as considerações geotécnicas utilizadas para o projeto do sistema de disposição de rejeito sob a forma de polpa devem ser aplicadas no caso de rejeitos espessados. Assim, devem ser avaliados os parâmetros de resistência do material, condições de adensamento e condutividade hidráulica, bem como estudos de liquefação e determinação de condições de disposição (PORTES, 2013).

Portes (2013) cita que os parâmetros relacionados à fluidez e consistência dos rejeitos espessados, podem ser obtidos através de um teste denominado *slump test* (Figura 3.15), padronizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Figura 3.15 – *Slump test* realizado em laboratório para um mesmo rejeito e diferentes teores de sólidos em peso.



Fonte: GRABINSKY, THERIAULT E WELCH, 2002 *apud* PORTES, 2013.

Entretanto, a partir do teste *flume test* (Figura 3.16) é possível conhecer o ângulo final de disposição, importante para se observar que com o aumento do teor de sólidos é possível obter um aumento nos ângulos de disposição, e conseqüentemente, maior volume disposto.

Figura 3.16 – *Flume test* sendo realizado para obtenção do ângulo de disposição.



Fonte: Slottee, JOHNSON E CROZIER, 2008 *apud* PORTES, 2013.

Robinsky (1999) *apud* Portes (2013) demonstrou através de ensaios laboratoriais que os rejeitos exibem uma mudança gradual única do estado não-segregável para segregável no seu ângulo de disposição.

A disposição de rejeito em forma de polpa consiste no espessamento (retirada da água) do rejeito gerado na flotação. Essa técnica que vem sendo vista como viável e necessária para disposição dos grandes volumes gerados nos empreendimentos mineiros, apesar dos potenciais riscos intrínsecos a sua disposição em barragens convencionais e seus grandes impactos ambientais em casos de ruptura. Entretanto, os rejeitos granulares não-segregáveis irão atingir um ângulo de pico a um certo teor de sólidos, e as partículas finas juntamente com a água não irá influenciar no fenômeno de segregação. Devido ao aumento do teor de sólidos, uma massa homogênea se formará, onde os finos passarão a influenciar no ângulo de disposição. Após atingir a condição de não-segregável, o ângulo de disposição tende a aumentar de acordo com o aumento do teor de sólidos (PORTES, 2013).

Segundo Robinsky (1999) *apud* Portes (2013), uma observação importante a ser feita diz que, o teor de sólidos obtidos na planta de espessamento de rejeitos nem sempre será uniforme, podendo ser explicado pela composição do rejeito, mudanças do pH do rejeito, manutenções e falhas eventuais de equipamentos.

A utilização de alguns aditivos como a cal, podem alterar a condição do pH da polpa ou da pasta espessada, alterando as interações que ocorrem entre as partículas. Estas alterações geram um ganho de incremento no ângulo de disposição, além de, em alguns casos, ocasionar uma redução na dosagem de floculantes, e no tamanho/número de espessadores (BARREDA, 2008 *apud* PORTES, 2013).

No Brasil, a solução comumente adotada são as barragens de rejeito e demais bacias de contenção. O grande problema deste cenário está relacionado ao fato de que as bacias de contenção ocupam uma enorme área, que são disputadas com outros usos da terra (agricultura e conservação). Já os barramentos de corpos d'água naturais promovem alterações na dinâmica das águas, prejudicando o desenvolvimento da fauna aquática. Falhas no projeto, dimensionamento, construção, operação e manutenção destes sistemas podem causar grandes danos como: alteração da água a jusante, comprometendo seu uso pelas populações ao seu entorno; rompimento, gerando enorme volume de lamas e rejeitos liberados, criando desastres a todos os ocupantes da terra a jusante, etc (DIAS e LAJOLO, 2010).

A resistência à adoção destes tipos de sistemas de disposição vem sendo alimentada pelos casos de rupturas de barragens e suas consequências para as vidas existentes à jusante. Com isso, o estudo para desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de espessamento que permitam que as lamas e rejeitos gerados sejam dispostos em espaços menores (*e.g.* pilhas) vem apresentando aprimoramento significativo (DIAS e LAJOLO, 2010).

As várias etapas presentes na operação de beneficiamento de rochas fosfáticas objetivam a produção de concentrado de  $P_2O_5$  com teores adequados para alimentar a indústria química. Segundo Dias e Lajolo (2010), citando Lapido-Loureiro *et al.* (2008), devido ao fato dos maiores produtores de concentrados fosfáticos serem complexos alcalinos-carbonatíticos com baixos teores de minério, a produção de lamas e rejeitos por estes empreendimentos apresentam expressiva importância. No Complexo de Tapira, estima-se que 85% da massa que alimenta a usina de beneficiamento são descartados em forma de lamas, rejeitos magnéticos e

rejeitos da flotação. Assim, para que seja produzido 1,60 toneladas por ano de concentrado (capacidade de produção do complexo), seriam gerados em torno de 9 milhões de toneladas por ano de lamas e rejeito em geral (DIAS e LAJOLO, 2010).

Os rejeitos geralmente são lançados em bacias de contenção (exceto os rejeitos magnéticos que comumente são depositados em pilhas), onde ocorre a sedimentação dos sólidos e clarificação da água. Porém, para que ocorra a sedimentação adequada destes sólidos, é demandada uma grande área, que por várias vezes sofre limitações do relevo e drenagens naturais, e acabam sendo obtidas mediante o barramento de drenagens naturais (DIAS e LAJOLO, 2010). Com isso, a grande quantidade de rejeitos e lamas produzidos no beneficiamento de minério fosfático demanda soluções de tratamento e disposição em grande escala.

A recente evolução na tecnologia de espessamento de rejeito é decorrente a sua disposição no subsolo como material de preenchimento em galerias de minas subterrâneas e também a disposição em superfície, devido à redução dos riscos associados quando da disposição de rejeitos em polpas através de barragens. Os rejeitos espessados tem se apresentado como um método eficaz de disposição de rejeitos devido à segurança na estrutura e também pela recuperação de água. Em países onde a mineração é destaque, como Austrália, Canadá e Peru, esta técnica vem sendo aplicada, sendo alcançado grande sucesso em relação à redução de custos no descomissionamento e reaproveitamento de água (PORTES, 2013).

Do ponto de vista ambiental, os benefícios estão relacionados às características físicas do rejeito espessado, disposto em superfície, além das vantagens operacionais associadas a esta disposição. O grande destaque se dá nos processos de desaguamento e espessamento dos rejeitos, proporcionando maior densidade e menor risco às estruturas onde ocorre a disposição.

Conseqüentemente, esta técnica proporciona menor potencial de contaminações hidrogeológicas, ocasionando reduzida susceptibilidade à liquefação e as rupturas catastróficas. Entretanto, há de se considerar alguns aspectos negativos e limitadores da aplicação do método de espessamento de rejeitos, como: a reologia do rejeito deve permitir a aplicação do espessamento, a taxa de produção

deve ser pertinente com o método de espessamento adotada, aumento do consumo de energia, limitações topográficas, necessidade de construção de uma barragem para conter a água extraída dos rejeitos e coleta da água da chuva juntamente com os sedimentos, etc (PORTES, 2013).

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Materiais**

Para a realização dos Testes de sedimentação foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ Amostras de rejeito de minério fosfático;
- ✓ Floculante aniônico;
- ✓ Hidróxido de sódio;
- ✓ Provetas de 1000 mL;
- ✓ pHmetro com eletrodo de medida;
- ✓ Balança semi-analítica;
- ✓ Agitador magnético;
- ✓ Cronômetro
- ✓ Béquers, espátulas, picetas, pipetas.

### **4.2 Métodos**

#### **4.2.1 Amostras**

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho corresponde à amostra de minério fosfático fornecida pela Vale Fertilizantes, proveniente do Complexo de Mineração de Tapira (CMT). Tal amostra representa a alimentação da usina de beneficiamento do Complexo. Logo, o material recebido não havia sido submetido a nenhuma etapa de beneficiamento na usina. Com isso, foi necessário proceder a sua preparação, antes de empregá-lo nos testes de sedimentação em proveta. Esta preparação foi executada no Laboratório de Tratamento de Minérios – CEFET/MG, envolvendo operações de fragmentação, adequação granulométrica, deslamagem, homogeneização e quarteamento.

#### 4.2.2 Preparação das amostras

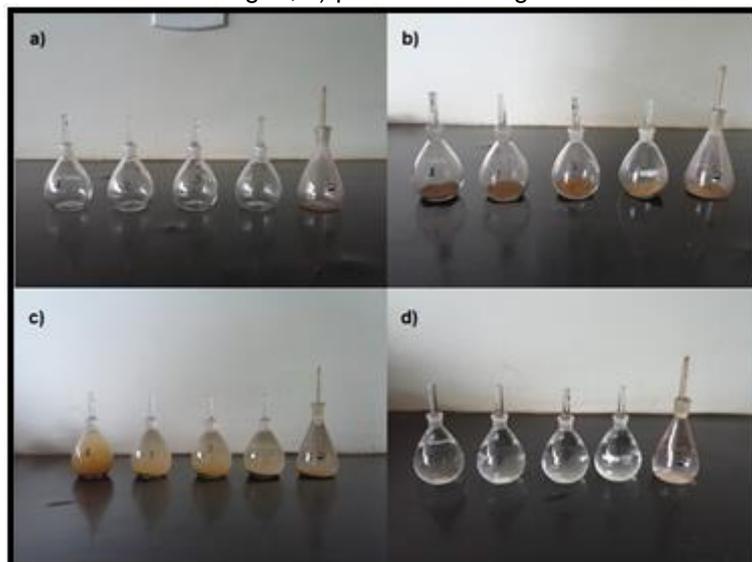
Durante a preparação da amostra, a mesma foi submetida à etapa de fragmentação por moagem a seco, empregando um moinho de bolas com dimensões de 590 x 570 milímetros, volume de 151 litros, para a redução da sua granulometria.

Em seguida, foi realizada a adequação granulométrica do material, considerando as especificações operacionais da etapa de flotação, etapa a ser realizada posteriormente. Tal adequação foi executada através de uma operação de peneiramento manual, com o auxílio de peneiras circulares da marca Granutest, cuja malha corresponde à abertura de 0,21 mm (65 mesh – pela Série Tyler).

Após o peneiramento, o material foi submetido à etapa de deslamagem para a retirada das partículas finas, sendo estas prejudiciais às operações seguintes, principalmente a flotação pelo efeito de recobrimento das partículas minerais, chamado *slime coating*. A deslamagem foi realizada em um balde onde a amostra foi colocada e adicionou-se água. Agitou-se a mistura com um agitador manual por 30 segundos e ao fim do tempo de agitação deixou-se o material em decantação por 30 minutos para o efeito na deslamagem. Após o tempo de decantação, retirou-se a água com as lamas e o material decantado foi submetido à secagem em estufa, sendo mantido a 100 °C por 24 horas.

A determinação da densidade da amostra, após a deslamagem, foi obtida a partir de teste de picnometria, empregando picnômetros de 50 mililitros e balança semi-analítica da marca Gehaka, modelo BG 2000 (0,01 g) (Figura 4.1). A metodologia dos testes de picnometria se encontra descrita no Anexo A.

Figura 4.1 – Teste de picnometria. a) picnômetro vazio; b) picnômetro + minério; c) picnômetro + minério + água; d) picnômetro + água.



Durante a etapa de flotação, foi empregada uma célula de flotação do tipo Darma-Denver, modelo D12, equipada com sistema de sucção de ar para geração de bolhas (Figura 4.2).

Figura 4.2 – a) teste de flotação; b) concentrado da flotação; c) rejeito da flotação.



Durante a execução dos testes foram mantidos parâmetros operacionais similares aos empregados industrialmente (Tabela 4.1). A metodologia de preparação dos reagentes empregados e execução do teste de flotação se encontram descrita no Anexo B.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados na flotação.

% Sólidos no condicionamento	% Sólidos na flotação	Massa de polpa (g)	Dosagem de depressor (g/t)	Dosagem de coletor (g/t)	pH
50	29,45	121,25	300	300	9,50

Os Testes de sedimentação em bancadas foram realizados empregando-se o rejeito gerado na etapa de flotação.

#### 4.2.3 Testes de sedimentação em proveta

Para a realização dos experimentos de sedimentação em proveta foi utilizado o reagente floculante fornecido pela empresa Clariant. O reagente testado corresponde a um polímero aniônico líquido solúvel em água, apresentando nome comercial Flotisor FL 7226. Para a sua utilização nos testes, o mesmo foi preparado em solução aquosa de concentração 0,10% p/p, com o auxílio de vidraria específica, balança semi-analítica e agitador magnético (Figura 4.3). A metodologia de preparo da solução de floculante se encontra descrita no Anexo C.

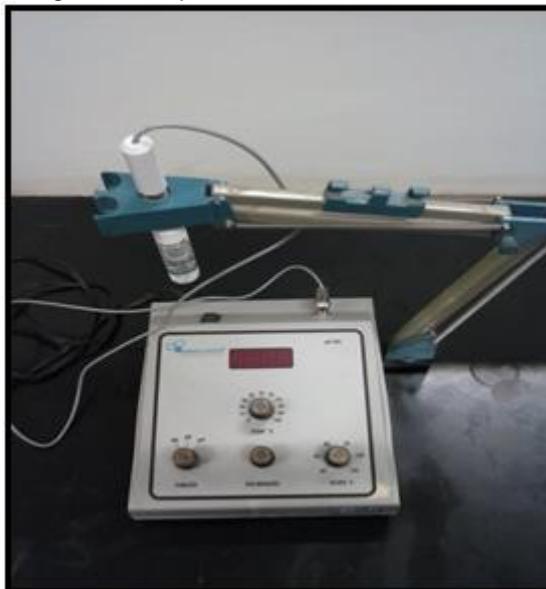
Figura 4.3 – Preparação do floculante.



Para o ajuste de pH foi empregada uma solução de hidróxido de sódio (10% p/p), sendo que o controle deste parâmetro operacional foi realizado através de um

pHmetro (Analyser, modelo pH 300), equipado com um eletrodo específico (Sensoglass, modelo SC 09) (Figura 4.4).

Figura 4.4 – pHmetro utilizado nos testes.



Os testes de sedimentação foram realizados em provetas de 1000 mililitros, sendo que estas foram previamente graduadas em escala milimétrica para facilitar a visualização da movimentação da interface da polpa (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Provetas graduadas milimetricamente.



Durante o teste de sedimentação, a amostra de rejeito foi pesada em uma balança semi-analítica, assim como a massa de água e a massa de floculante para cada teste. Em seguida, a amostra de rejeito foi adicionada a uma proveta,

completando-se com a massa de água para a preparação da polpa, seguida de uma agitação manual. A leitura do pH foi realizada, sendo que, quando necessário, o ajuste do mesmo era realizado para o valor de pH específico do teste. Com o auxílio de uma pipeta, retirava-se da polpa o volume de floculante que seria adicionado. A solução de floculante era adicionada, de acordo com a dosagem específica do teste a ser realizado. Logo após, era executada a agitação da polpa. Ao fim da agitação era disparado o cronômetro, sendo registrada a altura da interface de clarificação da polpa em intervalos estabelecidos. O último ponto foi coletado após 24 horas decorridas do início do respectivo teste para a confecção da curva granulométrica. A ficha de registro dos pontos a serem coletados durante os testes se encontra apresentada no Anexo D.

Os testes foram divididos em três etapas, visando avaliar a melhor condição operacional para se proceder a sedimentação de rejeito da flotação de minério fosfático. Tais etapas envolviam o estudo da variação da porcentagem de sólidos da polpa mineral a ser espessada, o pH do meio e a dosagem de floculante, respectivamente. Esta metodologia corresponde à execução comumente empregada neste tipo de teste. A Tabela 4.2 apresenta o planejamento realizado para a execução dos testes de sedimentação.

Tabela 4.2 – Planejamento dos testes de sedimentação em proveta.

Teste	% sólidos	pH	Floculante (g/t)
1	5	12,50	50
2	10	12,50	50
3	20	12,50	50
4	M <sup>3</sup>	12,00	50
5	M <sup>3</sup>	12,93	50
6	M <sup>3</sup>	M <sup>4</sup>	0
7	M <sup>3</sup>	M <sup>4</sup>	25
8	M <sup>3</sup>	M <sup>4</sup>	75
9	M <sup>3</sup>	M <sup>4</sup>	100

A primeira etapa, na qual se avaliou a melhor porcentagem de sólidos, foram mantidos constantes os parâmetros operacionais pH da polpa mineral e a dosagem de floculante. As amostras foram colocadas em três provetas distintas, devidamente identificadas. Toda a metodologia descrita anteriormente para o teste foi reproduzida. Foram estudadas polpas minerais com porcentagens de sólidos em massa variando entre 5%, 10% e 20%. Foi obtida a curva de sedimentação para cada teste.

Na segunda etapa, onde se visava avaliar a melhor condição operacional de pH a ser trabalhado com a polpa, foi mantida constante a melhor condição de porcentagem de sólidos obtida na etapa anterior, além da dosagem de floculante fixada no mesmo valor dos testes anteriores. Toda a metodologia descrita anteriormente para o teste foi reproduzida. Foram estudadas polpas minerais com pH variando entre 12,00, 12,50 e 12,93. Estes valores foram alcançados através da experimentação de pH a partir do qual a polpa se sedimentava. Este resultado só foi

<sup>3</sup> Melhor resultado obtido na batelada de testes realizado variando a porcentagem de sólidos.

<sup>4</sup> Melhor resultado obtido na batelada de testes realizado variando o pH.

alcançado utilizando um valor de pH extremamente básico. Foi obtida a curva de sedimentação para cada teste.

Finalizando o trabalho, a terceira etapa tinha como objetivo investigar a melhor dosagem do floculante para o teste, considerando a fixação das condições ótimas de porcentagem de sólidos e pH da polpa mineral, sendo estes parâmetros obtidos nas etapas anteriores. Toda a metodologia descrita anteriormente para o teste foi reproduzida. Foram estudadas polpas minerais com dosagem de floculante variando entre 0 g/t, 25 g/t, 75 g/t e 100 g/t. Novamente, foi obtida a curva de sedimentação para cada teste.

Após realizar todos os testes, foram determinados os parâmetros ótimos a serem trabalhados quando se deseja realizar o espessamento de uma polpa de rejeito fosfático. Além disso, através dos resultados obtidos, foram construídos os gráficos pela metodologia de Roberts para a determinação do ponto crítico na sedimentação das polpas minerais.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo principal do presente trabalho consiste na análise da influência da variação da porcentagem de sólidos e pH da polpa, além da dosagem de floculante na etapa de separação sólido-líquido da polpa de rejeito fosfático.

Foram realizados testes de sedimentação em bancada com amostras de minério fosfático oriundos do Complexo de Mineração de Tapira, fornecidas gentilmente pela empresa Vale Fertilizantes S/A.

Segundo informações da empresa, não existe hoje um processo ativo para a realização da operação de espessamento de rejeito, sendo esta executada apenas para o concentrado fosfático e a lama (fração de partículas mais finas do material). Estas etapas geralmente ocorrem com o pH compreendido entre 9,00 e 9,50, valor de pH ajustado durante a etapa anterior (flotação).

### 5.1 Análise granulométrica

Foi realizado o teste de análise granulométrica (Tabela 5.1) com a alimentação do teste de sedimentação.

Tabela 5.1 – Análise granulométrica da alimentação dos testes de sedimentação.

Abertura (mm)	Massa Retida (g)	%		
		Retida	Retida Acumulada	Passante Acumulada
0,208	31,33	15,78	15,78	84,22
0,147	27,60	13,90	29,68	70,32
0,104	33,85	17,05	46,73	53,27
0,074	26,40	13,30	60,03	39,97
0,052	25,88	13,03	73,06	26,94
0,037	2,82	1,42	74,48	25,52
Fundo	50,67	25,52	100,00	0,00
Total	198,55	100,00	399,75	

A partir dos dados obtidos na análise granulométrica, foi construída a curva granulométrica representando a distribuição granulométrica das partículas (Gráfico 5.1).

Gráfico 5.1 – Curva granulométrica de distribuição das partículas.



Observa-se que a abertura na qual passam 50% das partículas corresponde a um diâmetro igual a 0,097 mm.

Pela análise granulométrica pode ser observado que 25,52% da amostra corresponde à partículas finas (abaixo de 0,037 mm). Tal cenário corresponde a uma dificuldade técnica para os testes de sedimentação. Isto porque, como já discutido, partículas de granulometria fina apresentam dificuldade de sedimentação, reduzindo a eficiência da operação.

## 5.2 Estudo da variação da porcentagem de sólidos

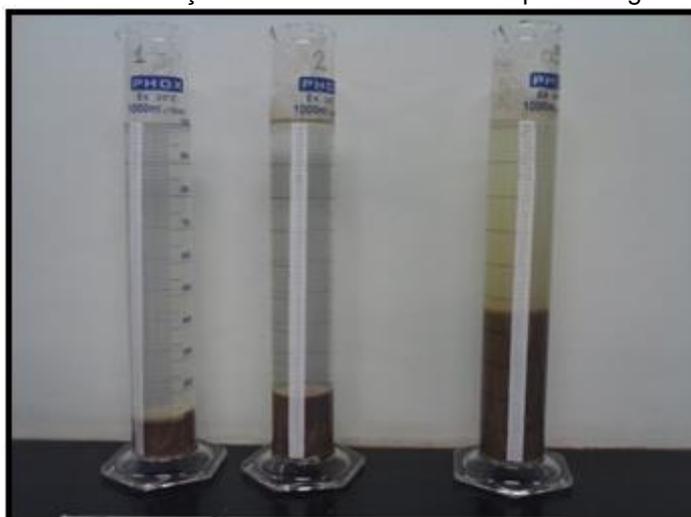
Durante a etapa para análise da variável porcentagem de sólidos para se trabalhar em uma etapa de espessamento com o rejeito de minério fosfático, foi executado o procedimento padrão de testes de sedimentação em bancada, como descrito na metodologia deste trabalho (4.2.3). O teste foi executado a partir de polpas minerais apresentando três porcentagens de sólidos distintas, sendo estas 5%, 10% e 20%. Os parâmetros pH e dosagem de floculante foram mantidos constante em 12,5 e 50 g/t, respectivamente (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Estrutura dos Testes variando percentagem dos sólidos.

	% de sólidos	pH	Dosagem de floculante (g/t)	Densidade da polpa (g/cm <sup>3</sup> )
Teste 1	5	12,50	50	1,03
Teste 2	10	12,50	50	1,06
Teste 3	20	12,50	50	1,14

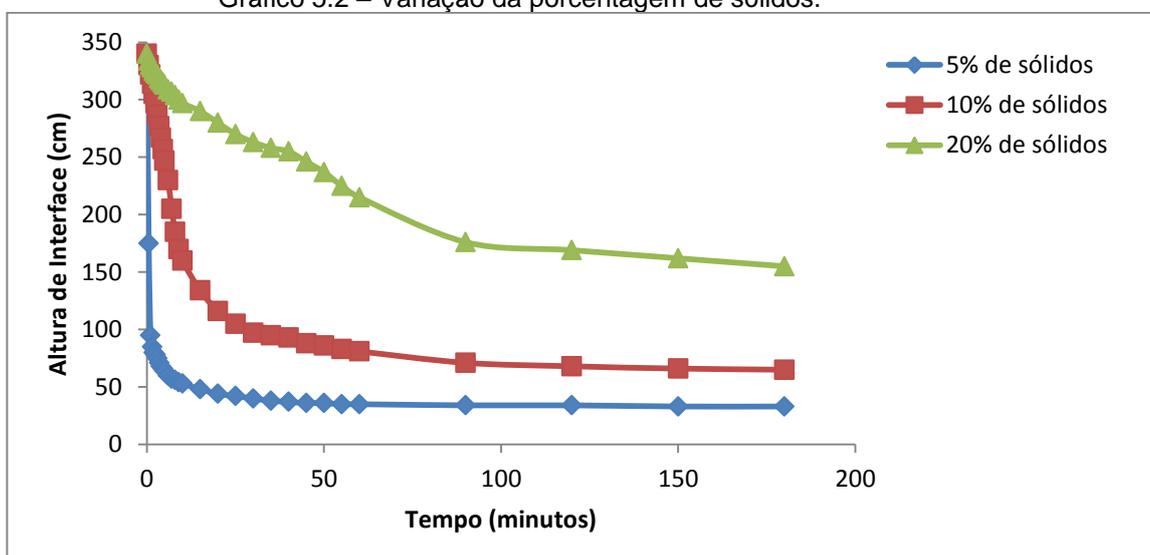
A Figura 5.1 apresenta o aspecto visual obtido após o término dos testes (após 24 horas) para cada uma das percentagens de sólidos empregadas (5%, 10% e 20% respectivamente).

Figura 5.1 – Teste de sedimentação em bancada variando a percentagem de sólidos.



As curvas de sedimentação foram plotadas a partir dos valores de altura da interface da polpa (Gráfico 5.2).

Gráfico 5.2 – Variação da percentagem de sólidos.



Os resultados mostram uma rápida sedimentação das partículas para o Teste com 5% de sólidos. Porém, por se tratar de uma porcentagem tão baixa, provavelmente este cenário operacional demandaria uma etapa precedente de adição de água para adequação deste parâmetro.

Analisando o cenário para a polpa com 10% de sólidos, o tempo no qual as partículas se sedimentaram foi satisfatório, apresentando uma sedimentação uniforme durante o teste. Juntamente, a clarificação do líquido foi visualmente apropriada.

Para a polpa com 20% de sólidos, a decantação das partículas ocorreu de forma bem mais lenta e o aspecto final do líquido clarificado também não foi satisfatório. Esse fato pode ser explicado devido ao efeito da sedimentação impedida decorrente do aumento da porcentagem de sólidos

Diante dos resultados obtidos, aquele que apresentou melhores condições para ser trabalhado nos testes subsequentes corresponde a polpa com 10% de sólidos.

### 5.3 Estudo da variação do pH

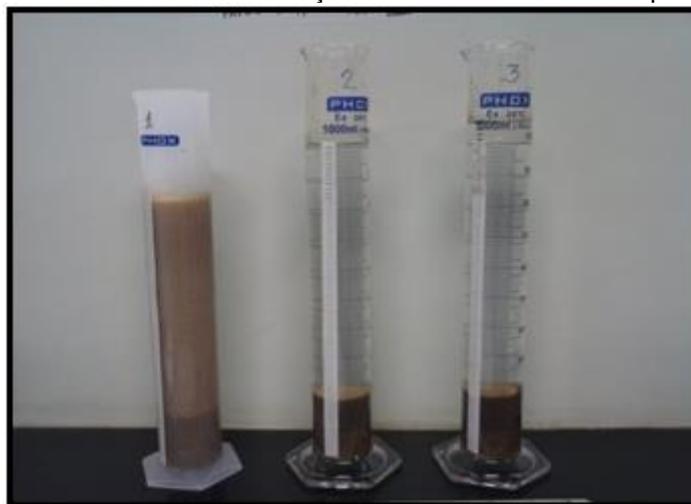
Para se obter o pH dito ótimo no qual a operação de sedimentação das partículas do rejeito proveniente da operação de concentração via flotação de minério fosfático deve ser executada, foram realizadas três bateladas de estes de sedimentação, onde em cada proveta foi avaliado o efeito dos valores de pH distintos (Tabela 5.3), mantendo constante a melhor porcentagem de sólidos obtida nos testes anteriores.

Tabela 5.3 – Estrutura dos Testes variando o pH.

	% de sólidos	pH	Dosagem de flocculante (g/t)	Densidade da polpa (g/cm <sup>3</sup> )
Teste 4	10	12,00	50	1,06
Teste 2	10	12,50	50	1,06
Teste 5	10	12,93	50	1,06

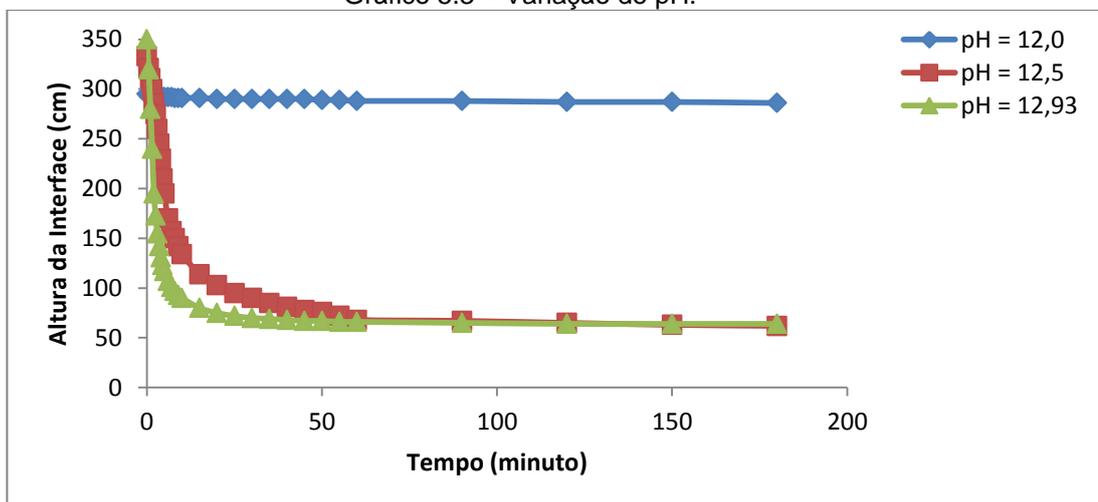
A Figura 5.2 apresenta o aspecto visual obtido após o término dos testes (após 24 horas) para cada um dos valores de pH da polpa empregados (12,00, 12,50 e 12,93 respectivamente).

Figura 5.2 – Teste de sedimentação em bancada variando o pH.



As curvas de sedimentação foram plotadas baseando-se nos dados de altura de interface da polpa (Gráfico 5.3).

Gráfico 5.3 – Variação do pH.



Através dos resultados dos testes executados variando o pH da polpa, nota-se que utilizando um pH de 12,00 as partículas mais finas do rejeito não conseguem sedimentar, impossibilitando a efetiva clarificação do líquido. Este resultado não seria interessante do ponto de vista industrial, uma vez que um dos objetivos

principais do espessamento corresponde à promoção da clarificação da água para que a mesma possa ser reutilizada no processo de beneficiamento.

Utilizando uma polpa mineral apresentando pH 12,93 a sedimentação das partículas ocorreu de forma rápida. Porém, para se obter este resultado implicou-se um consumo relativamente alto de reagente. O consumo excessivo de reagente se justifica pela fundamentação do parâmetro pH. Ou seja, por se tratar de uma escala logarítmica, uma variação de 0,50 no valor deste parâmetro corresponderia a um aumento de mais de 300% no consumo de reagentes durante a operação.

O resultado encontrado para pH 12,50 foi satisfatório, tanto para a velocidade de sedimentação das partículas como para a clarificação do líquido, apesar de ser um pH extremamente básico e que possa gerar problemas ambientais durante o descarte de efluentes.

Diante dos resultados obtidos, aquele que apresentou melhores condições para ser trabalhado nos testes subsequentes corresponde a polpa com pH igual a 12,50.

#### 5.4 Estudo da avaliação da dosagem de flocculante

Após ser determinado o valor do pH dito ótimo para a sedimentação das partículas de rejeito fosfático, foram realizados testes para avaliar o efeito das variações de dosagem de flocculante na polpa (Tabela 5.4), mantendo-se constante a porcentagem de sólidos e pH obtidos nos testes anteriores.

Tabela 5.4 – Estrutura dos Testes variando a dosagem de flocculante.

	% de sólidos	pH	Dosagem de flocculante (g/t)	Densidade da polpa (g/cm <sup>3</sup> )
Teste 6	10	12,50	0	1,06
Teste 7	10	12,50	25	1,06
Teste 2	10	12,50	50	1,06
Teste 8	10	12,50	75	1,06
Teste 9	10	12,50	100	1,06

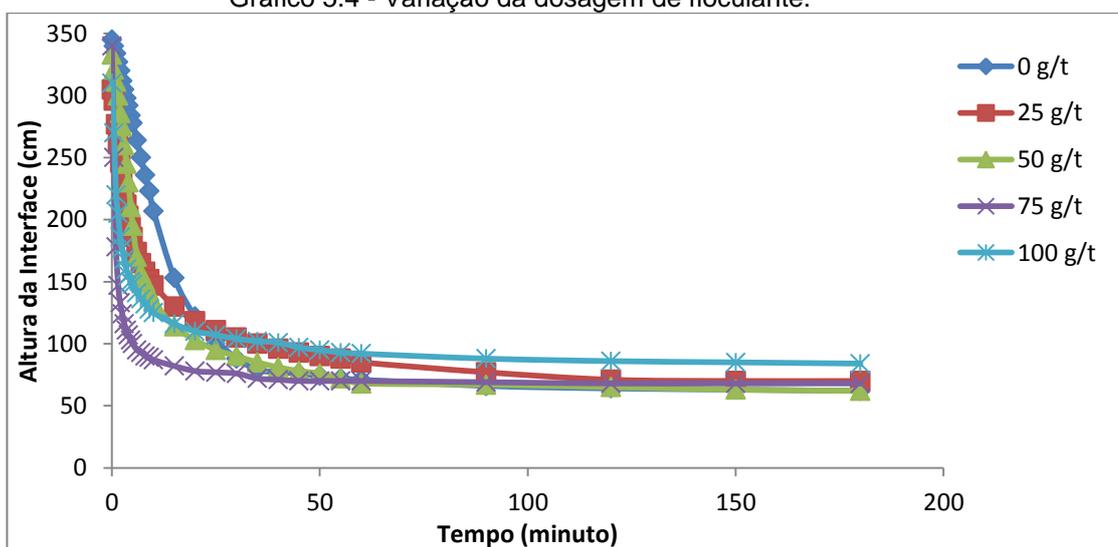
A Figura 5.3 apresenta o aspecto visual obtido após o término dos testes (após 24 horas) para cada um dos valores de dosagem de flocculante empregados (0 g/t, 25 g/t, 75 g/t e 100 g/t respectivamente).

Figura 5.3 – Teste de sedimentação em bancada variando a dosagem de flocculante.



As curvas de sedimentação foram plotadas a partir dos valores obtidos com a altura da interface das polpas (Gráfico 5.4).

Gráfico 5.4 - Variação da dosagem de flocculante.



O teste inicial foi realizado sem a adição de flocculante, ocorrendo a sedimentação das partículas apenas pelo ajuste de pH. Não houve a formação de flocos, por isso a altura final do leito compactado não foi elevada. As partículas mais

finas que não conseguiram se sedimentar, deixaram o aspecto do líquido levemente turvo.

Empregando a dosagem de 25 g/t de floculante, a sedimentação das partículas ocorreu de forma mais rápida em relação ao teste anterior (ausência de floculante). Tal comportamento pode ser atribuído à aglomeração das partículas, formando flocos de massa maior, provocando um aumento na velocidade de queda das partículas.

Comparado os testes com 50 e 75 g/t de reagente, aumentando a dosagem de floculante acarretou uma maior velocidade de estabilização da interface clarificado/espessado. Além disso, pode ser ressaltado o fato de quanto maior a dosagem do floculante, maior a massa dos flocos formados, gerando uma velocidade ainda maior de sedimentação das partículas. Em relação à altura final, o teste de 75 g/t formou flocos maiores e maior altura de compactação (leito menos compactado) devido a água agregada aos flocos. Enquanto que no teste com 50 g/t de floculante, formou-se uma camada mais compacta de sólidos, explicado pela menor quantidade da água agregada aos flocos.

Devido ao aumento da adição de floculante ainda maior que nos testes anteriores, o tamanho dos flocos que se formaram contribuiu para que, na dosagem de 100 g/t, a sedimentação ocorresse muito rapidamente. Porém, ao analisar a altura final de compactação, o aumento do tamanho dos flocos e a alta absorção de água, pode ser observada uma maior altura de compactação das partículas, sendo bem superior aos testes anteriores (cerca de 30% de aumento). Além destes fatores, do ponto de vista industrial, não seria interessante um consumo tão alto de reagente para tratar o rejeito do minério devido, principalmente, aos custos envolvidos na operação.

Diante dos resultados obtidos, aquele que apresentou melhores condições para ser trabalhado corresponde à polpa em que foi empregada a dosagem de 50 g/t de floculante.

## 5.5 Estudo do ponto crítico pelo método de Roberts

Em 1949, Roberts propôs a partir dos estudos realizados por Coe e Clevenger, um modelo matemático através de função logarítmica, para aplicação no gráfico “altura *versus* tempo” para ensaios de espessamento descontínuo. Através do método gráfico, o log da diferença das alturas na interface sólido-líquido, é possível evidenciar o ponto crítico do espessamento, ou seja, onde se inicia o processo de compressão dos sólidos (PINTO, 2007).

Em alguns casos, o método de Roberts não é considerado um método para dimensionamento de espessadores, mas sim uma ferramenta que auxilia na identificação do ponto crítico da curva “altura *versus* tempo”, como foi o caso deste trabalho.

Através do método de Roberts foram plotados os gráficos logarítmicos que possibilitaram a visualização do ponto crítico das suspensões. Ou seja, o ponto em que existe a presença de apenas duas fases no sistema: líquido clarificado e sólido sedimentado.

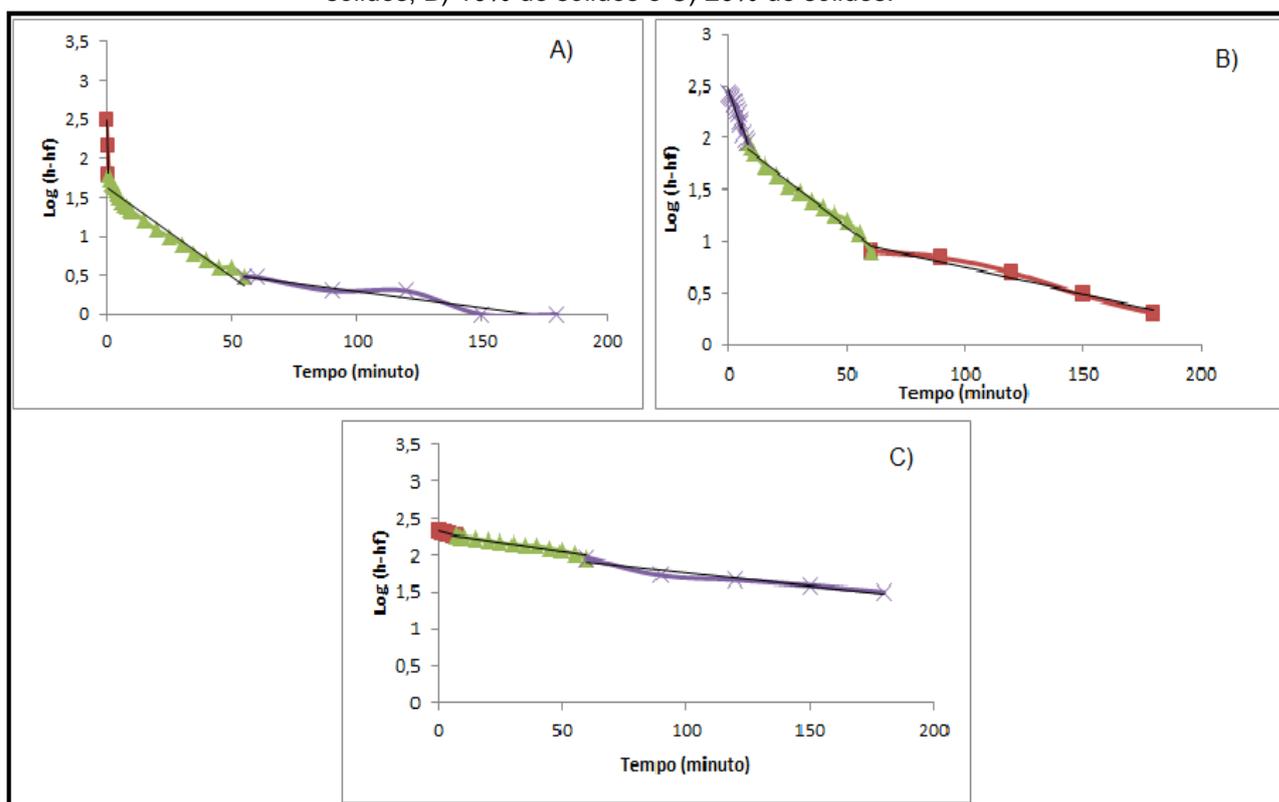
O gráfico é confeccionado a partir da evolução temporal do logaritmo da diferença entre as cotas de interface da polpa no ponto analisado ( $h$ ) e o ponto final ( $h_{\infty}$ ) (PINTO, 2007). Ou seja, ao ser realizado o teste de sedimentação em provetas são observados os intervalos de altura em que a interface clarificado/espessado se encontra. Quando se realiza o cálculo do logaritmo da diferença entre a altura final da interface (fim do teste) e as alturas decorrentes ao longo do teste, é possível construir um gráfico em que ficam evidentes os pontos no qual o gráfico muda abruptamente o seu sentido. O segundo ponto evidenciado no gráfico é denominado ponto crítico.

A partir das equações das retas de cada trecho do gráfico é obtido o valor da altura e do tempo em que o ponto crítico ocorre.

### 5.5.1 Variação da porcentagem de sólidos

Baseando-se nos testes realizados anteriormente, foram plotados os gráficos dos experimentos empregando diferentes porcentagens de sólidos da polpa mineral, segundo a metodologia Roberts (Figura 5.4).

Figura 5.4 – Estudo da variação da porcentagem de sólidos pelo método de Roberts. A) 5% de sólidos, B) 10% de sólidos e C) 20% de sólidos.



A partir da análise dos dados obtidos no gráfico para as equações linearizadas, foi possível calcular os valores do tempo e altura em que se encontra o ponto crítico de cada teste (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Resultados de tempo e altura para o método Roberts variando a porcentagem de sólidos.

	Teste A	Teste B	Teste C
t (s)	49,13	59,6	118,87
H (cm)	35,23	69,2	172,38

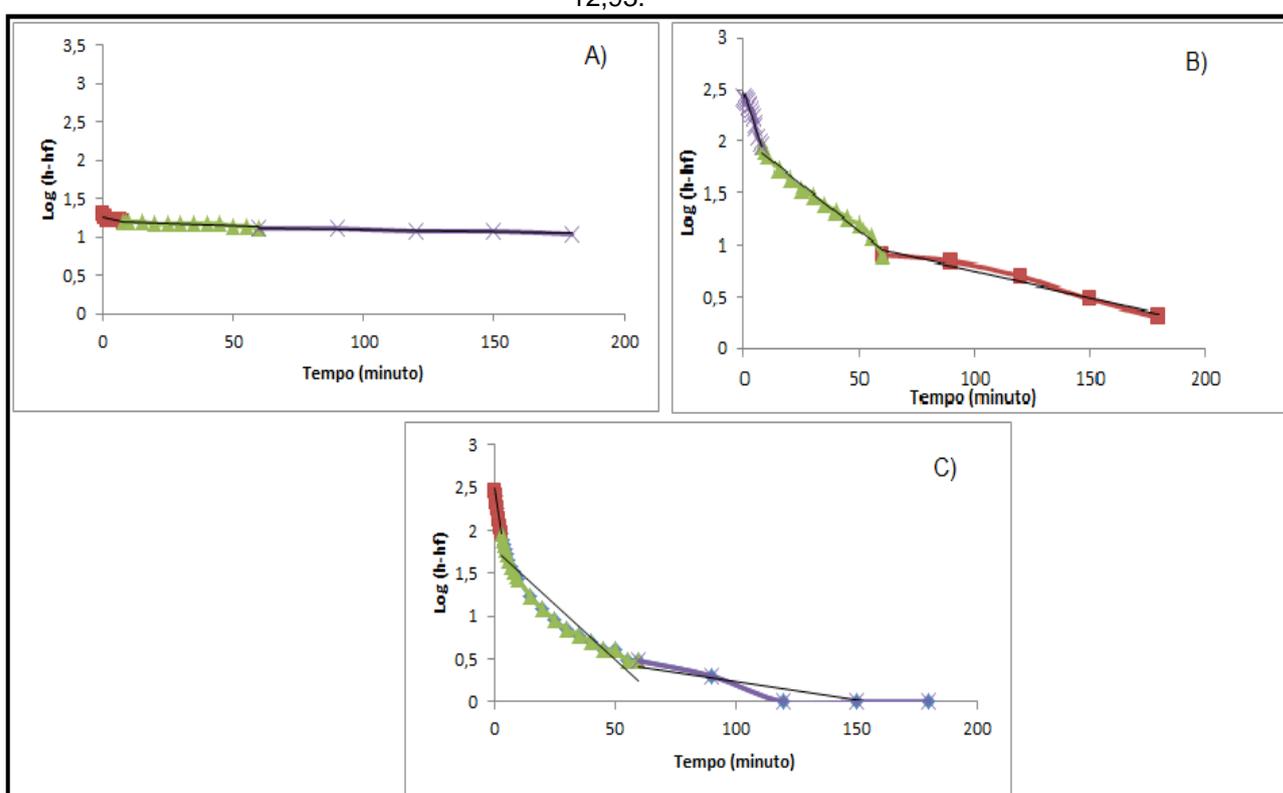
Analisando os gráficos nota-se que o aumento no tempo foi diretamente proporcional ao acréscimo da porcentagem de sólidos da polpa. Tal observação pode ser atribuída para os testes A e B em relação à altura. Sendo a relação entre a altura atingida no ponto crítico e a porcentagem de sólidos da polpa diretamente proporcional entre si, segundo um critério de linearidade. Porém, para o teste C, este

aumento não foi linear devido ao acúmulo de água entre os interstícios das partículas, causando um aumento no volume final dos flocos depositados.

### 5.5.2 Variação do pH

Para a análise dos pontos críticos dos testes variando o pH, foram plotados os gráficos pelo método de Roberts (Figura 5.5).

Figura 5.5 - Estudo da variação do pH pelo método de Roberts. A) pH 12,00 B) pH 12,50 e C) pH 12,93.



Ao variar o pH das polpas, mantendo a porcentagem de sólidos em 10% foram obtidos os valores dispostos na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados de tempo e altura para o método Roberts variando o pH.

	Teste A	Teste B	Teste C
t (s)	75,12	59,60	52,84
H (cm)	287,95	69,20	65,72

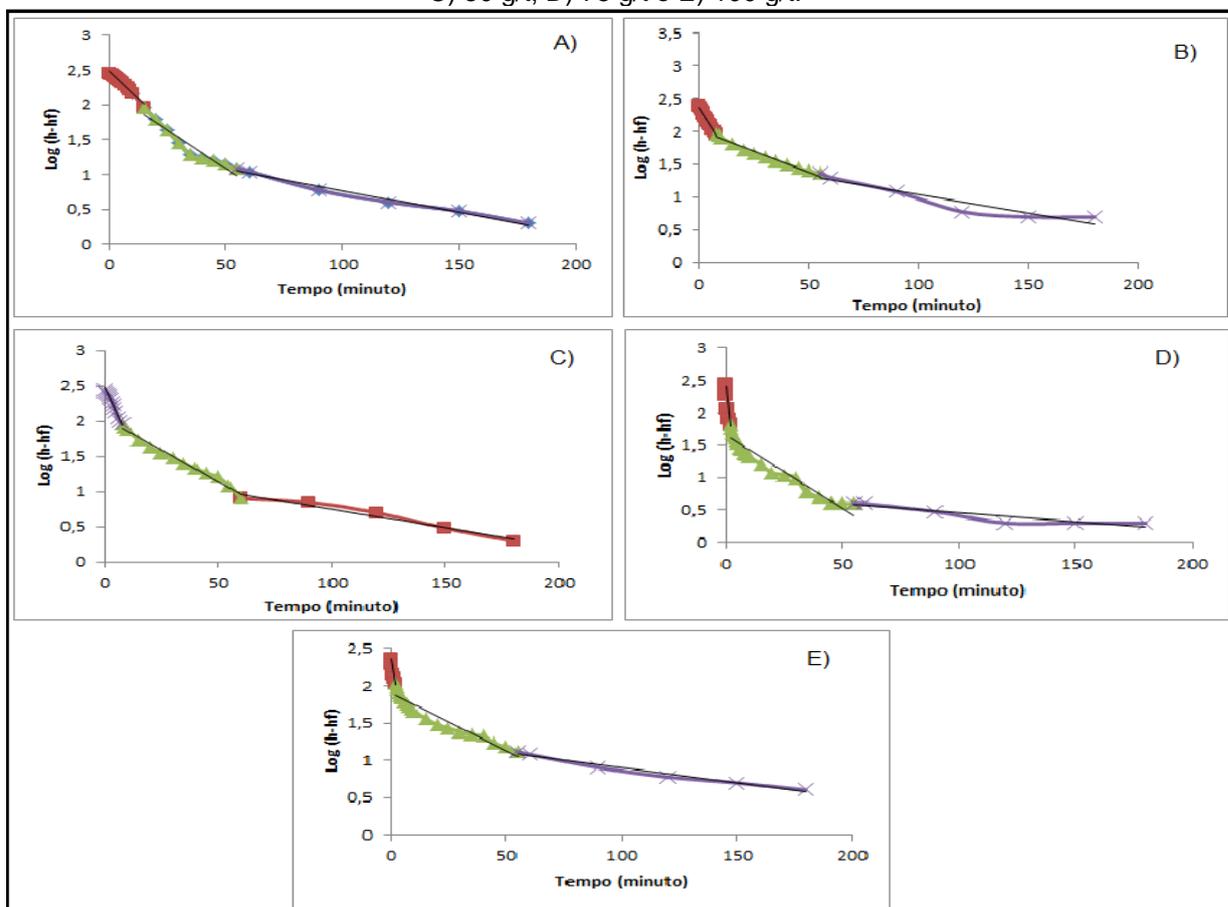
O teste A não houve uma boa apreciação, pois no mesmo não houve clarificação do líquido, sendo assim descartado para análise dos resultados. Como

já foi dito anteriormente, quando se trata da avaliação do pH devemos considerar que a representação do pH é feita em escala logarítmica. Assim, comparando os Testes B e C, o aumento do pH 12,50 para 12,93 apresenta uma variação de aproximadamente 270% no consumo do reagente para uma redução de 3,55% no tempo onde está localizado o ponto crítico, o que não justifica utilizar um pH excessivamente elevado. Em relação à altura do ponto crítico, o aumento do pH reduziu 9,20% da altura do teste B. Tal acontecimento pode ser atribuído ao fato de o pH favorecer a formação dos flocos, uma vez que não favorece o acúmulo de água entre eles.

### 5.5.3 Variação da dosagem de floculante

Através dos resultados obtidos nos testes variando a dosagem de floculante, foram construídos os gráficos para análise do ponto crítico por meio do método de Roberts (Figura 5.6).

Figura 5.6 – Estudo da variação da dosagem de floculante pelo método de Roberts. A) 0 g/t, B) 25 g/t, C) 50 g/t, D) 75 g/t e E) 100 g/t.



Os resultados obtidos através dos gráficos encontram-se na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resultados de tempo e altura para o método Roberts variando a dosagem de floculante.

	Teste A	Teste B	Teste C	Teste D	Teste E
t (s)	50,96	56,79	59,60	46,92	51,59
H (cm)	71,76	84,48	69,20	69,98	92,48

Os testes B e E apresentaram as piores alturas do ponto crítico. Tal cenário pode ser justificado pelo acúmulo de água entre os interstícios dos flocos sedimentados e pela alta absorção de água pelos flocos formados. O tempo de ambos os testes também não foi considerado satisfatório. Para o teste B, a sedimentação ocorreu com uma baixa dosagem de floculante (25 g/t), formando assim aglomerações que não adquiriam massa suficiente para sofrerem uma rápida sedimentação. Ao contrário do teste E (100 g/t), que devido à alta dosagem de floculante, formaram-se flocos tão grandes, que os mesmos podem ter provocado uma maior turbulência no meio, afetando negativamente a sedimentação das partículas.

O teste A ocorreu apenas pelo ajuste de pH, sem a ação de nenhum floculante. A altura e o tempo do ponto crítico deste teste foram considerados satisfatórios. Porém, sem o auxílio do floculante, partículas mais finas não conseguiram se sedimentar, ficando suspensas na polpa e mantendo o líquido com um aspecto turvo.

Nos testes C e D os resultados para a altura e tempo obtidos para o ponto crítico foram considerados os mais adequados, considerando ainda o aspecto clarificado do líquido após o final dos testes. A formação de flocos favoreceu uma sedimentação em tempo satisfatório, pois os mesmos mantiveram um tamanho apropriado para que não houvesse expressiva turbulência no meio. Apesar da formação dos flocos terem sido mais favorecida utilizando uma dosagem de 75 g/t, estes flocos tiveram uma interação maior, conseguindo reduzir a quantidade de água agregada a estes.

Diante dos resultados obtidos aplicando-se a metodologia de Roberts, aquele que apresentou melhores condições para ser trabalhado corresponde à polpa em que foi empregada dosagem de 75 g/t de floculante.

## 6 CONCLUSÃO

Pela análise dos resultados obtidos a partir dos testes de sedimentação, observou-se que, para o parâmetro de porcentagem de sólidos, o melhor resultado obtido correspondeu à polpa mineral apresentando 10% de sólidos. Isso pode ser atribuído a uma porcentagem de sólidos intermediária, a qual não é necessária a introdução de uma etapa prévia de adição de água, além de uma menor perturbação no meio, durante a operação de sedimentação, favorecendo o escoamento das partículas sólidas.

Em relação ao parâmetro pH, obteve-se melhor resultado para o pH = 12,50, visto que para pH = 12,00 não houve a sedimentação das partículas, enquanto que para o pH = 12,93 a sedimentação ocorre de forma muito rápida. Porém, se comparado o tempo que as partículas levaram para se sedimentar, não há grande favorecimento ao se elevar o valor de pH.

Pela análise do efeito do floculante nas suspensões de polpa mineral, concluiu-se que a dosagem de 50 g/t seria considerada ideal a ser aplicada na sedimentação de rejeito fosfático, uma vez que as demais dosagens não atingiram um resultado satisfatório para os parâmetros velocidade de sedimentação e altura do leito compactado.

Avaliando os resultados obtidos para a determinação do ponto crítico através dos gráficos elaborados pelo método de Roberts, a melhor porcentagem de sólidos e pH para aplicação da metodologia de sedimentação seria 10% e 12,5, respectivamente. Tais resultados corroboram com as conclusões obtidas na análise anterior. Já para o parâmetro dosagem de floculante, o resultado que mais se destacou, segundo a metodologia Roberts correspondeu a 75 g/t de floculante, pois o ponto crítico foi atingido em um menor intervalo de tempo e em uma altura final inferior aos demais testes realizados. Este resultado não corrobora com a análise anterior.

Com isso, o estudo realizado durante a execução dos testes se mostra eficaz para a sedimentação do rejeito fosfático, uma vez que o resultado esperado seria promover a sedimentação das partículas, obtendo uma polpa adensada, além do líquido clarificado. Porém, os estudos mostraram que provavelmente, o principal motivo pelo qual não é realizada essa operação com o rejeito fosfático, seja o alto consumo de reagentes e a forma que ocorreria a disposição desse material com um pH de caráter extremamente básico.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Análise da eficiência de sedimentação de rejeito fosfático empregando outros tipos de floculantes;
- Determinação do ponto crítico pelo método Bornea comparando com a metodologia de Roberts.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R.V.V.; SOBRAL, L.G.S.; SANTOS, R.L.C. **Produção de fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira/Fosfertil**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios de Metalurgia Extrativa, 19, 2002, Recife. Anais... Recife: D2D Studios, 2002. V1, p. 439 – 445.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, São Paulo. NBR NM 67, São Paulo, 1998. 8p.

BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 150p. (Tese, Mestrado, Tecnologia Mineral).

BARROS, L.A.F. **Caracterização tecnológica de minério fosfático de Salitre - Patrocínio – MG**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 446p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

BROD, J.A.; RIBEIRO, C.C.; GASPAR, J.C.; JUNQUEIRA-BROD, T.C.; BARBOSA, E.S.R.; RIFFEL, B.F.; SILVA, J.F.; CHABAN, N.; FERRARI, A.J.D. **Excursão 1. Geologia e mineralizações dos complexos alcalino-carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 42, 2004, Araxá, MG.

CHAVES, A.P.; OLIVEIRA, A.H.; CORDEIRO, R.A.C.; CHIAPPA, R.; MASINI, E.A.; GANIME, J.F.; GUIMARÃES, R.C.; FERNANDES, C. Espessamento. In: CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2ª ed. São Paulo: Signus, 1996. V2, cap.2, p. 49 – 116.

CHULA, A.M.D. **Caracterização mineralógica do minério fosfático da Mina de Tapira – MG**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2004. 336p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

DIAS, E.G., LAJOLO, R.D. O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. IN: FERNANDES, F.R.C., LUZ, A.B., CASTILHOS, Z.C. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 105 – 124.

FIGUEIREDO, M.M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. Ouro Preto: Escola de Minas de Ouro Preto, 2007. 100p. (Dissertação, Mestrado, Geotecnia Aplicada a Mineração).

FONSECA, D.S.; SILVA, T.H.C. **Fosfato**. In: SOUSA, S.A.D. Sumário Mineral 2013. V. 33. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2013. Disponível em: <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8987](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8987)>. Acesso em: 14 de maio. 2015.

FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, R.G. Ensaios de sedimentação. In: SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A., BRAGA, P.F.A. **Tratamento de minérios; Práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap. 23, p. 391 – 408.

FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G. Separação Sólido-líquido. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Tratamento de minérios**. 4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 14, p. 573 – 609.

NUNES, J.F. **Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões flocculentas**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química, 2008. 81p. (Dissertação, Mestrado).

OLIVEIRA, M.L.M.; LUZ, J.A.M.; LACERDA, C.M.M. **Espessamento e filtragem**. Ouro Preto: [s.n.], 2004. 122p.

OLIVEIRA, M.S. **Minério fosfático sílico-carbonatado: estudo fundamental**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. 207p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

PINTO, T.C.S. **Aplicação de técnicas clássicas para polpas não flocculadas de dimensionamento de espessadores aplicadas a suspensões de salmoura e**

**lodo biológico.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 92p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia Mineral).

PORTES, A.M.C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 154p. (Dissertação, Mestrado, Geotecnia).

SANTOS, L.H. **Avaliação dos efeitos da dosagem de depressor e do pH da polpa na flotação de minério fosfático: Um estudo experimental de caso.** 76f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOUSA, P.A. **Espessamento de polpas.** 49f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

VALADÃO, G.E.S.; ARAÚJO, A.C. Espessamento. In: VALADÃO, G.E.S. **Introdução ao tratamento de minérios.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 7, p. 142 – 152.

## ANEXO A – Procedimento de picnometria

Recursos necessários:

- Picnômetro de 50 mililitros;
- Balança analítica (0,01 g);
- Piceta;
- Amostra de minério fosfático;
- Água.

Cuidados especiais:

- Manter o picnômetro sempre seco em seu exterior e se atentar aos pesos na balança.
- Verificar se não há aderência de bolhas de ar às partículas ou à superfície interna do picnômetro.

Cálculo de densidade a partir dos dados obtidos:

$$ds = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)}$$

Onde:

ds: densidade dos sólidos;

A<sub>1</sub>: massa do picnômetro;

A<sub>2</sub>: massa do picnômetro + amostra;

A<sub>3</sub>: massa do picnômetro + amostra + água;

A<sub>4</sub>: massa do picnômetro + água.

Atividades:

- Pesar o picnômetro seco e vazio (A<sub>1</sub>).
- Encher o picnômetro com água até transbordar, secar a água que molhar a superfície externa do mesmo e, em seguida, pesar o picnômetro com água.
- A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa utilizada. Conhecido o volume de água colocada no picnômetro, determina-se a densidade da água.

- Adiciona-se a amostra de minério fosfático no picnômetro e, em seguida, pesa-se o conjunto, obtendo-se  $A_2$ . A massa de minério é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com a amostra e sem a amostra.
- A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com o fosfato + água ( $A_3$ ) e a massa do picnômetro + fosfato ( $A_2$ ).
- O volume de água adicionado é calculado pela relação entre a densidade da água e a massa de água adicionada no picnômetro.
- O volume do minério é determinado pela diferença entre o volume do picnômetro e o volume de água adicionada.
- A densidade do minério é obtida pela relação entre a massa da amostra adicionada e o volume desta.

## **ANEXO B – Preparação dos reagentes e teste de flotação**

### **Saponificação do coletor: óleo vegetal (solução 2,50%)**

Recursos necessários:

- Balança analítica (0,01 g);
- Béquer;
- Agitador magnético;
- Água;
- Óleo vegetal (Hidrocol);
- Hidróxido de sódio (10%).

Cuidados especiais:

- Atenção no peso dos componentes e no estado físico do reagente.

Resultado esperado:

- Solução homogênea.

Atividades:

- Pesar: 5 g de óleo, 7,85 g de água, 7,15 g de hidróxido de sódio e 180 g de água (diluição).
- Mistura-se em um béquer o óleo, 7,85 g de água e o hidróxido de sódio e mantêm-se em agitação durante 10 minutos em um agitador magnético.
- Após o tempo inicial de agitação, adiciona-se 180 g de água de diluição, e mistura-se por mais 10 minutos com o agitador magnético.

### **Gelatinização do depressor: amido de milho (solução 3,0%)**

Recursos necessários:

- Balança analítica (0,01 g);
- Béquer;
- Agitador magnético;
- Água;

- Amido de milho;
- Hidróxido de sódio (10%).

Cuidados especiais:

- Atenção no peso dos componentes e no estado físico do reagente.

Resultado esperado:

- Solução gelatinosa e sem grumos.

Atividades:

- Pesar: 5 g de óleo, 45 g de água, 12,50 g de hidróxido de sódio e 104,16 g de água (diluição).
- Mistura-se em um béquer o amido, 45 g de água e o hidróxido de sódio e mantêm-se em agitação durante 10 minutos em um agitador magnético.
- Depois de decorrido o tempo, adiciona-se 104,16 g de água de diluição, e mistura-se por mais 10 minutos com o agitador magnético.

Ação corretiva:

- Se houver grumos na solução final, repetir toda a operação.

### **Teste de flotação em bancada**

Recursos necessários:

- Célula de flotação com acessórios;
- Reagentes (coletor, depressor e regulador de pH);
- Amostra de minério fosfático (fragmentada e classificada);
- Bandejas;
- Piceta;
- pHmetro;
- Proveta;
- Cronômetro.

Cuidados especiais:

- Atenção na preparação dos reagentes e na operação de flotação.

Atividades:

- Colocar o minério na cuba e diluir com água para 50% de sólidos (1000 mililitros de água).
- Ligar o rotor e ajustar a rotação para 1200 rotações por minuto.
- Regular o pH para 9,50 com o auxílio do hidróxido de sódio e adicionar o depressor (condicionar por 5 minutos contados no cronômetro).
- Adicionar o coletor e condicionar por 2 minutos (contados no cronômetro).
- Colocar a água de diluição (1395,14 mililitros).
- Abrir a aeração e coletar toda a espuma.
- Secar o flotado e o afundado.

## ANEXO C – Preparação do floculante

Recursos necessários:

- Balança analítica (0,01 g);
- Béquer;
- Agitador magnético;
- Floculante aniônico;
- Água;

Cuidados especiais:

- Atenção no estado físico do reagente.

Atividades:

- Pesar em um béquer 1 g do floculante e adicionar 999 g de água na mistura.
- Agitar a mistura por 30 minutos com um agitador magnético.

Ação corretiva:

- Se houver grumos na solução, repetir toda a operação.

## ANEXO D – Ficha de pontos coletados no teste de sedimentação

Teste de sedimentação		
Teste:		
Floculante:		
dp:		
%s:		
Massa seca:		
Dosagem:		
Volume de floculante adicionado:		
Tempo (minutos)	Altura (cm)	Observação
0		
0,5		
1,0		
1,5		
2,0		
2,5		
3,0		
3,5		
4,0		
4,5		
5,0		
6,0		
7,0		
8,0		
9,0		
10,0		
15,0		
20,0		
25,0		
30,0		
35,0		
40,0		
45,0		
50,0		
55,0		
60,0		
90,0		
120,0		
150,0		
180,0		
1440,0		

LORENN RAPHAELA GONÇALVES MACHADO

AVALIAÇÃO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA SEDIMENTAÇÃO  
DE REJEITO FOSFÁTICO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais / Campus IV – Araxá, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas.

Data de aprovação: 11 / 08 / 2015

Banca Examinadora:



Prof. Me. Leandro Henrique Santos - Presidente da Banca Examinadora  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Orientador



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Michelly dos Santos Oliveira  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Esp. Francisco de Castro Valente Neto  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais