



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ

LARISSA MOREIRA LOPES

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE  
MINÉRIO DE FERRO DE ITATIAIUÇU-MG**

ARAXÁ/MG

2017

LARISSA MOREIRA LOPES

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE  
MINÉRIO DE FERRO DE ITATIAIUÇU-MG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Natal Junio Pires

ARAXÁ

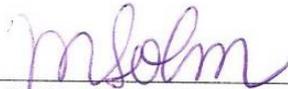
2017

LARISSA MOREIRA LOPES

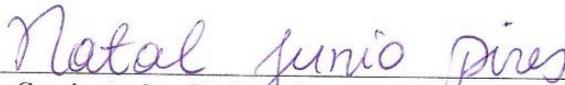
## OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ESPESSAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO DE ITATIAIUÇU-MG

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
de Minas do Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais - CEFET/MG, como requisito  
parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia de Minas.

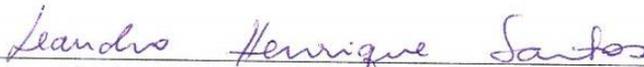
Araxá, 09 de maio de 2017.



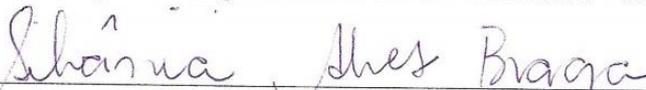
**Presidente e Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Michelly dos Santos Oliveira**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Coorientador: Prof. Dr. Natal Junio Pires**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Membro Titular: Prof. Me. Leandro Henrique Santos**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



**Membro Titular: Prof. Me. Silvana Alves Braga**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*A minha mãe, Silvana Moreira de Miranda,  
que sempre me fez acreditar na realização dos meus sonhos e nunca mediu  
esforços para que eu pudesse realizá-los.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me conceder a oportunidade e capacidade para alcançar mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais por sempre me apoiarem e me ensinarem a respeitar a todos. Ao meus irmãos por estarem sempre presentes na minha vida, dividindo as tristezas e multiplicando as alegrias.

A toda minha família e amigos que também nunca mediram esforços para me apoiar e incentivar durante toda essa caminhada.

Em especial, gostaria de agradecer aos meus queridos professores, Michelly dos Santos Oliveira e Natal Junio Pires, pela orientação, paciência, confiança e concederem tanto conhecimento para minha formação profissional. A vocês toda minha gratidão e admiração.

Ao meu querido amigo e técnico de mineração do laboratório de tratamento de minérios do CEFET-MG, João Victor da Silva Alves, disposto a ajudar sempre que foi preciso com muita dedicação e paciência. Você foi essencial para realização deste trabalho.

Aos meus queridos amigos, Fabiana Cabrine e Guilherme Pedrosa, que mesmo com tantos empecilhos não mediram esforços para ajudar na preparação das amostras e na realização dos testes.

A todos os professores e funcionários do CEFET-MG, pela convivência, ensinamentos e contribuição profissional.

A empresa Minerita pela oportunidade de realização deste trabalho, através das amostras e informações cedidas.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, me ajudaram na realização deste trabalho.

*“Se enxerguei longe é porque estive apoiada em ombros de gigantes.”*

Isaac Newton

## RESUMO

O desaguamento é amplamente empregado na indústria mineral, dentre as operações mais utilizadas está o espessamento, que é baseado na sedimentação por gravidade. O mesmo envolve diversas variáveis, dentre elas: pH da polpa, reagentes utilizados e porcentagem de sólidos. A empresa Minerita, localizada em Itatiaiuçu-MG faz o beneficiamento do minério de ferro sendo que o desaguamento do rejeito gerado no operação é realizado por espessamento. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo otimizar o processo de espessamento do rejeito de minério de ferro da empresa. Para tal foram realizados testes de sedimentação em proveta alterando os valores das variáveis operacionais. O pH foi empregado nos valores de 5 e 6,5, já o floculante, uma poliacrilamida aniônica, foi utilizado nas dosagens de 15 g/t e 30 g/t e a porcentagem de sólidos adotada nos testes de sedimentação foi 25% e 40%. A partir dos resultados obtidos nos testes foi feita uma análise estatística no *software* Minitab 17 com o intuito de otimizar o operação como um todo, ou seja, minimizar a turbidez e maximizar a velocidade de sedimentação, além disso, obter um espessado com pelo menos 60% de sólidos. O resultado do espessamento ideal foi a dosagem no nível máximo (30 g/t), o pH ( 5,0) e a porcentagem de sólidos (25%) no nível mínimo, gerando valores ótimos de respostas: turbidez de 89 FTU e velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) de 1,725 m/h. Dentre os 16 testes realizados, o que mais se adequou às variáveis e as respostas ótimas obtidas foi o teste 2, que apresenta a dosagem no nível máximo, o pH e a porcentagem de sólidos no nível mínimo, gerando respostas de turbidez e velocidade de sedimentação de 61 FTU e 1,78 m/h, respectivamente. A porcentagem de sólidos do espessado do teste 2 seria de 63,42%, considerando o espessador e dados operacionais da empresa.

**Palavras-chave:** Sedimentação, rejeito, minério de ferro, floculação.

## ABSTRACT

The dewatering is widely used in the mineral industry, among the most used operations is the thickening, that is based on gravity sedimentation. Which involves several variables, among them: pH of the pulp, reagents used and percentage of solids. The company Minerita, located in Itatiaiuçu-MG, processes the iron ore and the dewatering of the tailings generated in the process is carried out by thickening. Thus, this work aimed to optimize the thickening process of the company's iron ore tailings. For that, sedimentation tests were carried out on the test tube, altering the values of the operational variables. The the values used for pH were 5 and 6.5, and the flocculant, an anionic polyacrylamide, was used in the dosages of 15 g/t and 30 g/t and the percentage of solids adopted in the sedimentation tests were 25% and 40%. From the results obtained in the tests, a statistical analysis was done using the software Minitab 17 in order to optimize the process as a whole, that is, to minimize turbidity and to maximize sedimentation velocity. Also, get a thickened with at least 60% solids. The ideal thickening was the dosage at the maximum level (30 g/t), the pH at the minimum level (pH 5) and the solids percentage at the minimum level (25% solids), generating responses with optimum values: 89 FTU and sedimentation velocity ( $V_s$ ) of 1,725 m/h. Among the 16 tests performed, the one that best suited the variables and the optimal answers obtained was test 2, which presents the dosage at the maximum level, the pH and the percentage of solids at the minimum level, generating turbidity and sedimentation velocity responses of 61 FTU and 1.78 m / h, respectively. The percentage of solids of the thickening of tests 2 would be 63.42%, considering the thickener and operational company's data.

**Keywords:** Sedimentation, talling, iron ore, flocculation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### A) FIGURAS

FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO DO BRASIL. 1 – SERRA DOS CARAJÁS (PA); 2 – QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG; 3 – URUCUM (MT); 4 – MORRO DO PILAR E CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO (MG); 5 – REGIÃO DE PORTEIRINHA (MG). .....	4
FIGURA 2.2 – MAPA GEOLÓGICO DA MINA LAGOA DAS FLORES. ....	5
FIGURA 2.3 – ESTRUTURA DO ESPESSADOR. ....	7
FIGURA 2.4 – ESQUEMA OPERACIONAL DE UM ESPESSADOR CONTÍNUO CONVENCIONAL. ....	8
FIGURA 2.5 – ESPESSADOR DE ALTA CAPACIDADE. ....	9
FIGURA 2.6 – ESPESSADOR DE LAMELAS. ....	10
FIGURA 2.7 – ESQUEMA OPERACIONAL DE UM ESPESSADOR COM ALIMENTAÇÃO SUBMERSA. ....	11
FIGURA 2.8 – ETAPAS DE UM TESTE DE PROVETA E A CURVA TÍPICA DO ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO EM BATELADA. ....	12
FIGURA 2.9 – REGIÕES DE SEDIMENTAÇÃO DE UM ESPESSAMENTO CONTÍNUO. ....	13
FIGURA 2.10 – CURVA DE ENERGIA DE INTERAÇÃO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE DUAS PARTÍCULAS. ....	16
FIGURA 2.11 – MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO. ....	17
FONTE: BRAGANÇA (2008, P. 11). ....	17
FIGURA 2.12 – ADSORÇÃO DOS FLOCULANTES SEGUNDO O MECANISMO DE PONTES. ....	20
FIGURA 2.13 – (A) POLÍMERO COMO PONTE ENTRE PARTÍCULAS; (B) RESTABILIZAÇÃO DAS SUSPENSÕES COLOIDAIS. ....	21
FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO QUARTEAMENTO EM PILHA CÔNICA. ....	25
FIGURA 3.2 – EMPILHADEIRA. ....	25
FIGURA 3.3 – PILHA ALONGADA. ....	26
FIGURA 3.4: FLUXOGRAMA DA PREPARAÇÃO DA AMOSTRA. ....	27
FIGURA 3.5– PICNÔMETRO COM AMOSTRA E ÁGUA. ....	29
FIGURA 3.6 – PENEIRADOR VIBRATÓRIO SUSPENSO, ADAPTADO PARA O PENEIRAMENTO A ÚMIDO. ....	30
FIGURA 3.7 – PENEIRADOR VIBRATÓRIO DE BANCADA. ....	31
FIGURA 3.8 – TURBIDÍMETRO AFERINDO A TURBIDEZ DA ÁGUA. ....	34
FIGURA 4.1 – CURVA GRANULOMÉTRICA. ....	41
FIGURA 4.2: REPRESENTAÇÃO DO TESTE PRELIMINAR 6. ....	42
FIGURA 4.3 – GRÁFICO PARETO. ....	45
FIGURA 4.4 – GRÁFICO NORMAL. ....	45
FIGURA 4.5 – GRÁFICO DE OTIMIZAÇÃO. ....	47
FIGURA 4.6 – GRÁFICO PARETO. ....	48
FIGURA 4.7 – GRÁFICO NORMAL. ....	49
FIGURA 4.8 – GRÁFICO DE OTIMIZAÇÃO. ....	50
FIGURA 4.9 – GRÁFICO DE OTIMIZAÇÃO. ....	51
FIGURA 4.10: REPRESENTAÇÃO DO TESTE RÉPLICA 2 (R2). ....	52
FIGURA A1: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO. ....	60

### B) GRÁFICOS

GRÁFICO A1: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE PRELIMINAR 1. ....	61
GRÁFICO A2: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE PRELIMINAR 2. ....	62
GRÁFICO A3: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE PRELIMINAR 3. ....	62
GRÁFICO A4: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE PRELIMINAR 4. ....	63
GRÁFICO A5: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE PRELIMINAR 5. ....	64
GRÁFICO A6: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 1. ....	65
GRÁFICO A7: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 1. ....	66

GRÁFICO A8: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 2 .....	67
GRÁFICO A9: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 2. ....	67
GRÁFICO A10: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 3. ....	68
GRÁFICO A11: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 3. ....	69
GRÁFICO A12: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 4. ....	69
GRÁFICO A13: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 4. ....	70
GRÁFICO A14: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 5. ....	71
GRÁFICO A15: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 5. ....	71
GRÁFICO A16: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 6. ....	72
GRÁFICO A17: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 6. ....	73
GRÁFICO A18: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 7. ....	73
GRÁFICO A19: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 7. ....	74
GRÁFICO A20: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE 8. ....	75
GRÁFICO A21: CURVA DE SEDIMENTAÇÃO TESTE RÉPLICA 8. ....	75

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – FÓRMULA QUÍMICA E CONTEÚDO TEÓRICO DE FERRO (EM %) DOS PRINCIPAIS PORTADORES DE FERRO.....	3
TABELA 2.2 – PRINCIPAIS COAGULANTES INORGÂNICOS E SUAS FAIXAS DE PH ÓTIMAS PARA APLICAÇÃO.....	19
TABELA 2.3 – PRINCIPAIS FLOCULANTES E RESPECTIVAS FAIXAS DE PH ÓTIMAS PARA APLICAÇÃO.....	22
TABELA 3.1: TEMPOS MENSURADOS. ....	33
TABELA 3.2 – DADOS DOS TESTES PRELIMINARES. ....	34
TABELA 3.3 – VALORES DE MASSAS E VOLUME CALCULADOS PARA OS TESTES PRELIMINARES. ....	35
TABELA 3.4 – DADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL (DOE). ....	36
TABELA 3.5 – VALORES DE MASSAS E VOLUME CALCULADOS PARA OS TESTES OFICIAIS.....	37
TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA. ....	39
TABELA 4.2 –RESULTADOS DA DENSIDADE DO MINÉRIO. ....	40
TABELA 4.3 – VALORES DE TURBIDEZ E VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO DOS TESTES PRELIMINARES. ....	41
TABELA 4.4 – VALORES DAS VARIÁVEIS PARA OS TESTES OFICIAIS.....	43
TABELA 4.5 – VALORES DE NÍVEIS MAIS E MENOS, DE VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO E TURBIDEZ. ....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u></b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>MINÉRIO DE FERRO</b>	<b>3</b>
2.1.1	<u>VISÃO GERAL</u>	3
2.1.2	<u>PANORAMA NACIONAL</u>	4
2.1.3	<u>PANORAMA REGIONAL</u>	5
<b>2.2</b>	<b>SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO</b>	<b>6</b>
2.2.1	<u>ESPESAMENTO</u>	6
<b>2.3</b>	<b>TESTE DE SEDIMENTAÇÃO</b>	<b>11</b>
2.3.1	<u>VARIÁVEIS OPERACIONAIS</u>	13
<b>2.4</b>	<b>TEORIA DLVO</b>	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b>AGREGAÇÃO E DISPERSÃO</b>	<b>17</b>
2.5.1	<u>DISPERSÃO</u>	17
2.5.2	<u>AGREGAÇÃO</u>	18
<b>2.7</b>	<b>PLANEJAMENTO FATORIAL</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b><u>METODOLOGIA</u></b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>AMOSTRAS</b>	<b>24</b>
<b>3.2</b>	<b>PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS</b>	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA</b>	<b>27</b>
3.3.1	COMPOSIÇÃO	27
3.3.2	DENSIDADE	28
3.3.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	29
<b>3.4</b>	<b>FLOCULANTE</b>	<b>31</b>
<b>3.5</b>	<b>TESTES DE SEDIMENTAÇÃO EM PROVETA</b>	<b>32</b>
3.5.1	PROCEDIMENTOS	32
3.5.2	TESTES PRELIMINARES	34
3.5.3	PLANEJAMENTO FATORIAL	36
3.5.4	AValiação DOS RESULTADOS	37
<b>4</b>	<b><u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u></b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA</b>	<b>39</b>
4.1.1	COMPOSIÇÃO	39
4.1.2	DENSIDADE	40
4.1.3	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	40
<b>4.2</b>	<b>RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>ANALISE ESTATÍSTICA</b>	<b>44</b>
4.4.1	TURBIDEZ	44

4.4.2 VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO	47
4.4.3 TURBIDEZ E VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO	50
<b><u>5 CONCLUSÃO</u></b>	<b>53</b>
<b><u>6 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO</u></b>	<b>55</b>
<b><u>REFERÊNCIAS</u></b>	<b>56</b>
<b><u>ANEXO A – VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO</u></b>	<b>60</b>
<b><u>APÊNDICE A – CURVAS DE SEDIMENTAÇÃO</u></b>	<b>61</b>
TESTES PRELIMINARES	61
TESTES OFICIAIS	65

# 1 INTRODUÇÃO

O beneficiamento do minério de ferro visa uma separação seletiva entre o mineral-minério (hematita) e os minerais de ganga (quartzo). Na empresa Minerita localizada em Itatiaiuçu-MG, o rejeito obtido após a etapa de concentração segue para o espessamento onde se objetiva reaproveitar a água do processo e aumentar a porcentagem de sólidos na polpa para o posterior descarte. Esta etapa apresenta um consumo considerável de energia e reagentes. Assim, é necessário que a operação seja bem projetada de modo a se obter um ótimo desempenho dos equipamentos, além de parâmetros de funcionamento potencializados.

O presente trabalho aborda a otimização da etapa de espessamento executada pela empresa por meio da execução de testes de sedimentação com o material fornecido. Busca-se as melhores condições de operação maximizando a recuperação de água e a porcentagem de sólidos na polpa, sem impossibilitar a movimentação da polpa adensada para o local de disposição, já que polpas com uma alta taxa de sólidos dificultam a movimentação em tubulações e/ou dutos, necessitando de maquinários extras, bombas, para que a mesma consiga entrar em movimento.

Levando-se em conta as circunstâncias descritas, o principal problema enfrentado pela empresa é atingir a porcentagem de sólidos de 60% no material espessado, apresentando como consequência uma alta perda de água de recirculação e elevados custos de operação, uma vez que parte da água que devia ser recirculada no processo é encaminhada para o rejeito final. Uma vez que o reúso da água funciona como um importante instrumento de gestão ambiental, devendo ser aplicados critérios e padrões de qualidade quando considerada a questão de saúde pública, a aceitação da água pelo usuário, a preservação do ambiente, a qualidade da fonte da água para reúso e a adequação da qualidade ao uso pretendido (PHILIPPI, 2006).

Conhecendo o problema, a estratégia elaborada para a sua solução foi a execução de testes de sedimentação em proveta com o material que alimenta o espessador de rejeito. Uma análise detalhada da influência das variáveis de processo no espessamento possibilita a estipulação dos parâmetros que fornecem o funcionamento ideal para o equipamento, de modo a atingir as especificações previstas pela companhia.

Assim, o principal objetivo deste estudo foi obter através dos testes de espessamento os parâmetros operacionais que possibilitem que o material espessado atinja a porcentagem de sólidos prevista. Dentre os objetivos específicos buscou-se encontrar os valores ótimos para o pH da polpa, a dosagem de floculante e a porcentagem de sólidos na alimentação visando mínima turbidez do produto clarificado e máxima taxa de sedimentação.

Este trabalho está dividido em 4 capítulos, sendo que o segundo aborda uma revisão bibliográfica apresentando os principais temas ligados ao trabalho, como minério de ferro, mecanismos de agregação, espessamento, e planejamento fatorial. O terceiro capítulo apresenta a metodologia do trabalho, especificando e justificando os parâmetros escolhidos. E por fim, mostra-se os resultados obtidos nos testes com a análise dos melhores parâmetros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Minério de Ferro

#### 2.1.1 Visão Geral

O ferro (do latim *ferrum*) é um elemento químico metálico, símbolo *Fe*, e massa atômica 56 u, à temperatura ambiente se encontra em estado sólido. O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre (aproximadamente 5%) e, o segundo mais abundante entre os metais, ficando atrás somente do alumínio (DEVANEY, 1985 *apud* SOUZA, 2010, p. 1).

É extraído da natureza na forma de minério de ferro e são encontradas em diferentes composições, que são economicamente viáveis, como: óxidos, sulfetos, silicatos e carbonatos (VIEIRA, 2016).

O minério de ferro do tipo óxido é o que tem maior relevância econômica, sendo os tipos mais comuns a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), os teores de ferro atingem cerca de 72%, 70% e 60%, respectivamente. Outros teores de minerais que contenham ferro podem ser vistos na Tabela 2.1 (CARVALHO *et al.*, 2014).

Tabela 2.1 – Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais portadores de ferro.

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	72,4
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	69,9
Goethita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	62,9
Limonita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,8
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	36,8
Siderita	$\text{FeCO}_3$	48,2
Pirita	$\text{FeS}_2$	46,5
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	61,0

Fonte: CARVALHO *et al.*, (2014, p.198).

A gama de aplicação do minério de ferro é enorme, uma vez que pode ser utilizado na fabricação de diversos materiais, empregado em indústrias. Porém, a

maior parte é destinado a indústria do aço, que sozinha, é responsável por mais de 97% do consumo desse minério (MAIA, 2011).

### 2.1.2 Panorama Nacional

O Brasil se destaca mundialmente no que diz respeito às reservas de minério de ferro. Em 2011 o país possuía cerca 29 bilhões de toneladas de minério de ferro, aproximadamente 18% das reservas mundiais, estimadas em 160 bilhões de toneladas. As reservas brasileiras contêm altos teores de ferro nos minérios hematita, predominante no Pará, e itabirito, predominante em Minas Gerais (IBRAM, 2011). Os principais depósitos brasileiros de minério de ferro podem ser ilustrados pela Figura 2.1.

O estado de Minas Gerais tem cerca de 67% das reservas de minério de ferro, seguido pelo Pará com 16%, Mato Grosso do Sul com 15,5%, além dos estados de Alagoas, Amazonas, Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte e São Paulo (DNPM, 2011).



Figura 2.1 – Distribuição dos Principais Depósitos de Minério de Ferro do Brasil. 1 – Serra dos Carajás (PA); 2 – Quadrilátero Ferrífero, MG; 3 – Urucum (MT); 4 – Morro do Pilar e Conceição do Mato Dentro (MG); 5 – Região de Porteirinha (MG).

Fonte: BIZZI, 2001 *apud* SANTOS, 2016, p.10.

### 2.1.3 Panorama Regional

Na região central do estado de Minas Gerais, está situado o Quadrilátero Ferrífero que destaca-se como uma região de grande concentração das reservas de minério de ferro. No Quadrilátero, o minério de ferro pode ser dividido, basicamente, em minérios do tipo itabirítico e hematítico, ambos de alto teor. Esses minérios podem ser classificados de acordo com a composição mineralógica e textura que apresentam. O minério itabirítico é definido pelos bandamentos de óxidos de ferro e sílica. Já o minério hematítico apresenta composição mais homogênea, sendo constituídos pelo mineral hematita (CARVALHO *et al.*, 2014).

Presente no Quadrilátero Ferrífero a mina de Lagoa das Flores, no município de Itatiaiuçu/MG, fica localizada em uma região denominada Complexo Serra Azul, sendo uma unidade fisiográfica-geológica de idade pré-cambriana (VASCONCELOS, 2011). As características e composição da mina Lagoa das Flores, podem ser observada na Figura 2.2.

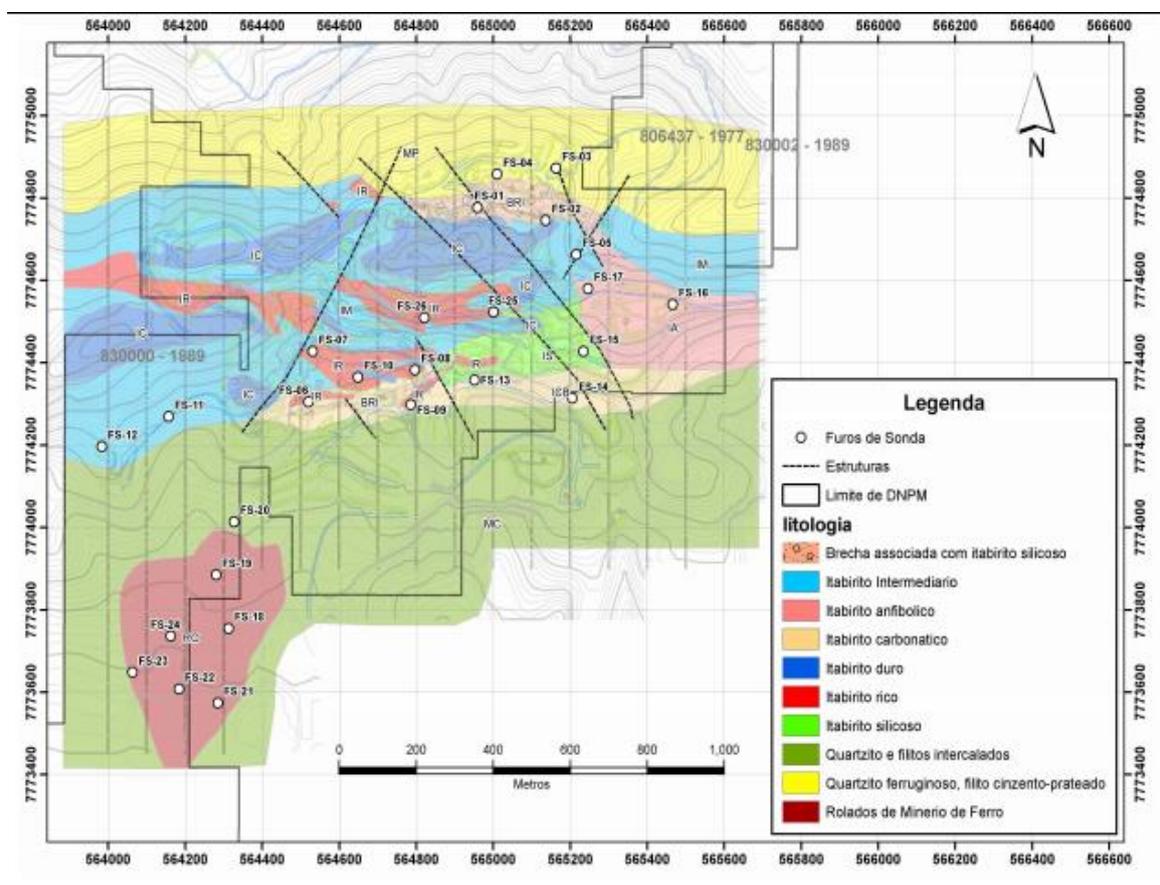


Figura 2.2 – Mapa Geológico da mina Lagoa das Flores.  
Fonte: MINERITA, 2010 *apud* VASCONCELOS, 2011, p.5.

O Complexo Serra Azul caracteriza-se pelo cavalgamento das rochas do Grupo Itabira sobre as rochas mais novas do Grupo Piracicaba em flanco invertido, com estrutura homoclinal, constituído exclusivamente por itabiritos e associados principalmente às formações ferríferas bandadas (GEOMIL, 2007 *apud* VASCONCELOS, 2011, p.3).

## **2.2 Separação Sólido-Líquido**

A separação sólido-líquido é uma fase importante e, algumas vezes crítica, nas usinas de beneficiamento mineral. Geralmente apresenta um alto consumo energético (OLIVEIRA; SOUZA, 2008).

As principais técnicas empregadas na separação sólido-líquido são a secagem, a centrifugação, a filtração e a sedimentação por gravidade (espessamento e clarificação). Nos processos de tratamento observa-se que o desaguamento ocorre em pelo menos duas etapas, primeiro espessamento ou hidrociclonação e logo após a filtração, o produto espessado é filtrado para obtenção de uma torta úmida com 80 a 90% de sólidos. (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

### 2.2.1 Espessamento

O espessamento consiste numa operação de separação sólido-líquido baseada na velocidade de sedimentação. É empregada para recuperar água de polpas de rejeitos ou concentrados, elevar a concentração de sólidos nas polpas de rejeitos para posterior descarte, elevar a densidade de polpa buscando-se melhorar as operações seguintes como filtração e separar os constituintes dissolvidos de resíduos lixiviados em instalações hidrometalúrgicas (LARA, 2011).

O processo consiste na sedimentação das partículas suspensas em meio aquoso através da ação da gravidade. Como resultado, são obtidos dois produtos distintos: clarificação e espessamento. O objetivo da clarificação é produzir um produto clarificado, *overflow*, ou seja, um líquido com o mínimo ou nenhum vestígio de sólidos presente. Já o espessamento, *underflow*, se dá ao inverso da clarificação, em que o objetivo é produzir um produto extremamente adensado, até o valor máximo permitido a operação subsequente (PIMENTA, 2015).

Os espessadores são feitos de aço ou concreto, e podem ser revestidos por argila compactada para a construção do fundo. Espessadores com diâmetros relativamente pequenos são feitos de aço que o torna mais rentável, porém à medida que o diâmetro aumenta essa situação se inverte (CHAVES *et al.*, 2013).

### 2.2.1.1 Tipos de Espessadores

- Espessador contínuo convencional

Consiste em um tanque, onde o fundo é um cone raso, provido de um sistema de alimentação de suspensão e outro de retirada do espessado (raspadores), dispositivos para descarga do *overflow* e do *underflow*. Esse tipo de espessador contínuo é o mais utilizado industrialmente. A Figura 2.3 mostra detalhes sobre a sua estrutura e mecanismos de operação, nela é possível observar que sua altura em relação ao seu diâmetro é pequena (LUZ *et al.*, 2002).

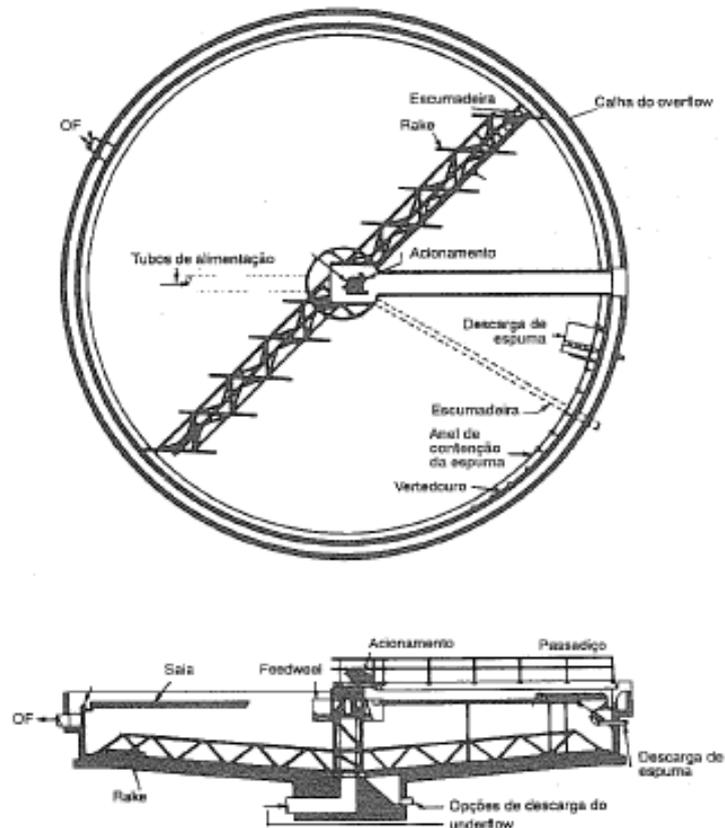


Figura 2.3 – Estrutura do espessador.  
Fonte: CHAVES *et al.*, (2013, p. 56).

A alimentação é introduzida no espessador por tubulações centrais, em que se encontra uma peça denominada *feedwell*, que tem como função dividir o fluxo de polpa em inúmeros fluxos de direções contrárias (CHAVES *et al.*, 2013).

No fundo do tanque se encontra um rastelo, denominado *rake*, que tem a função de arrastar o material espessado para o centro de onde é retirado, *underflow*. Além dessa função, o *rake* também aumenta a densidade do espessado; desprende as bolhas de ar e bolsas d'água, que podem ficar presas no espessado; organiza as partículas umas sobre as outras, ocupando o mínimo de volume possível; mantém os sólidos depositados em suspensão, evitando o aterramento do espessador (CHAVES *et al.*, 1996). A Figura 2.4 representa a operação de um espessador.

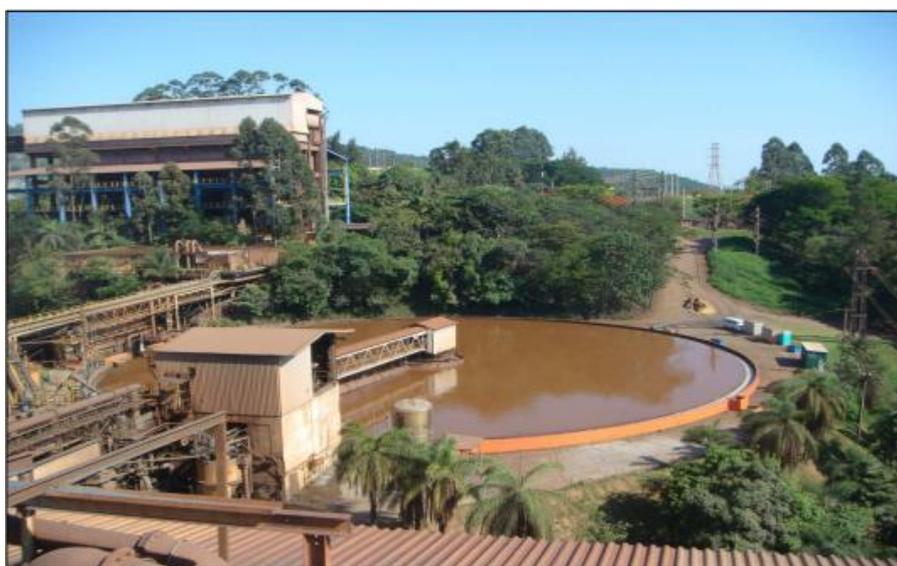


Figura 2.4 – Esquema operacional de um espessador contínuo convencional.  
Fonte: PEIXOTO, 2012, p.13.

O espessador, em hipótese alguma, poderá ser empregado para estoque de material no seu interior, uma vez que isto levará a problemas operacionais, paradas e limpezas inevitáveis, acarretando perda de tempo, de material e de produção (CHAVES *et al.*, 2013).

- Espessadores de Alta Capacidade

É bastante semelhante ao contínuo convencional, porém com alguma modificação estrutural de projeto, como a inserção de lamelas ou modificação no posicionamento da alimentação da suspensão, que promove o aumento da

capacidade do equipamento (LUZ *et al.*, 2002). Isso se deve ao sistema de adição de agregantes, já que esse tipo de espessador foi desenvolvido especialmente para que seja utilizado reagentes (VALADÃO; ARAUJO, 2012).

A alimentação entra no espessador via um poço onde é adicionado flocculantes, que é dispersado por um agitador mecânico fazendo com que a eficiência do flocculante aumente (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004). De acordo com Machado (2015, p.46), "os espessadores de alta capacidade surgiram devido a algumas limitações encontradas pelos espessadores convencionais, como: área de construção e o custo inicial de implantação." A Figura 2.5 representa um espessador de alta capacidade.



Figura 2.5 – Espessador de alta capacidade  
Fonte: DELKOR, 2010 *apud* LARA, 2011, p.12.

- Espessador de Lamelas

Também é um espessador de alta capacidade, consiste numa série de placas inclinadas (lamelas), dispostas lado a lado, formando canais, de acordo com a Figura 2.6. As vantagens dessa configuração são a economia de espaço e a rápida sedimentação das partículas sólidas (LUZ *et al.*, 2002).

A alimentação é introduzida num ponto entre as bordas superior e inferior das placas principais, assim as partículas se sedimentam até encontrar a superfície de uma placa e, a partir daí, passam a escorregar sobre a mesma. Já que no espessador de lamelas existe uma grande quantidade de placas, dispostas umas sobre a outras e as partículas começam a se depositar sobre estas placas,

tornando assim cada vez menor o percurso que cada partícula percorre, o que acarreta um aumento no volume disponível e uma menor área ocupada diminui consideravelmente (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

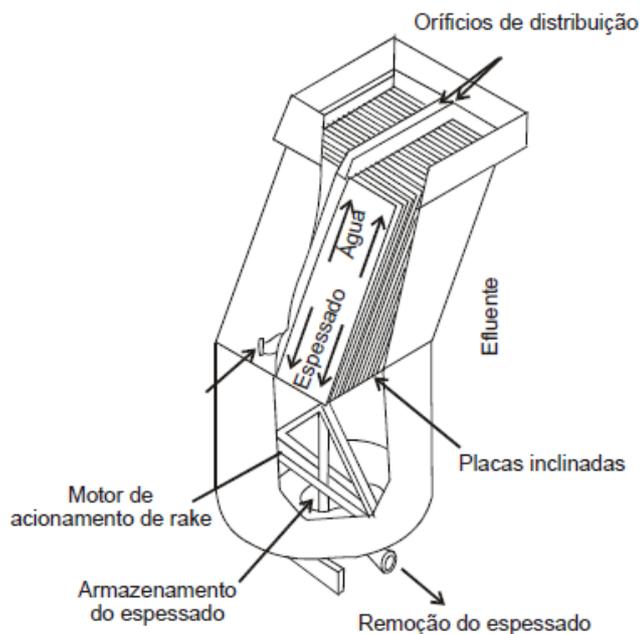


Figura 2.6 – Espessador de Lamelas.  
Fonte: OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004, p.73.

- Espessador com Alimentação Submersa

Nesse tipo de espessador, a alimentação da suspensão é feita dentro da região de compactação. Isso elimina a necessidade da sedimentação livre das partículas sólidas, pois essas são alimentadas dentro do leito de lama já existente, que aprisiona as partículas sólidas, enquanto o líquido percola o leito em movimento ascendente, em direção à região de líquido clarificado (LUZ *et al.*, 2002). A Figura 2.7 demonstra a operação de um espessador com alimentação submersa.

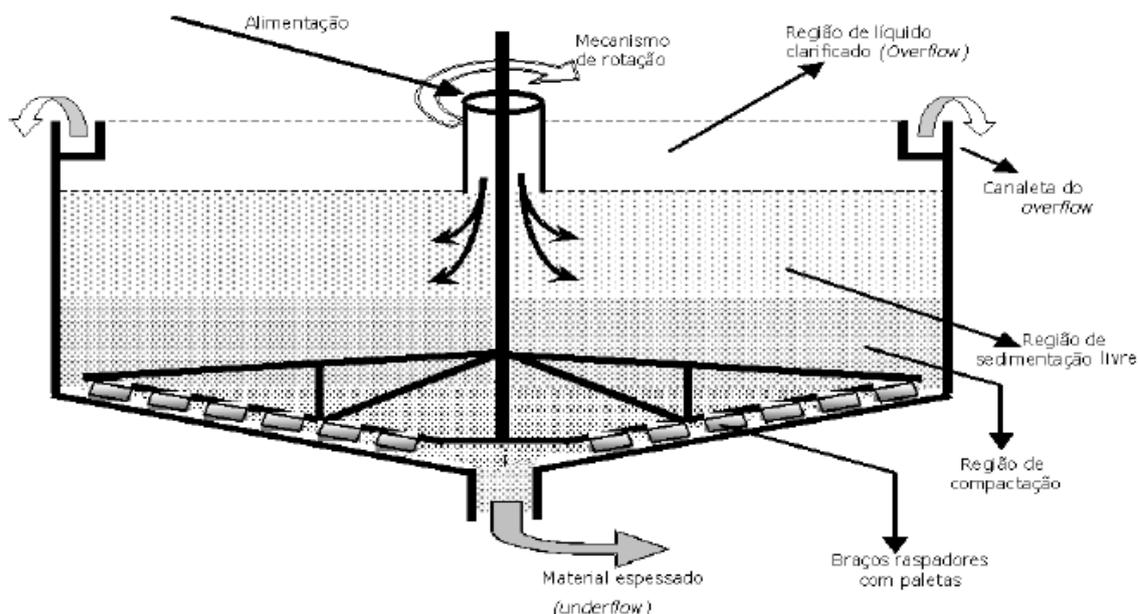


Figura 2.7 – Esquema operacional de um espessador com alimentação submersa.  
 Fonte: FRANÇA; CASQUEIRA, 2007, p.406.

### 2.3 Teste de Sedimentação

Segundo Luz *et al.*, (2002, p. 577), “a operação de sedimentação é baseada em fenômenos de transporte, onde a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento.” É possível entender o mecanismo da sedimentação, a partir de testes de proveta, que se baseiam no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo. Durante esse teste pode-se observar a existência de três regiões distintas: a região de líquido clarificado, a de sedimentação livre e a de compactação (NETO, 2016).

Na Figura 2.8 são apresentadas as etapas de um teste de proveta. No início do teste, apresenta uma polpa homogênea com concentração de sólidos constantes em todos os pontos da proveta. Com o tempo, as partículas maiores começam a sedimentar e formar uma camada no fundo da proveta, e assim acontece também com as partículas finas de forma mais lenta, até que forma-se uma região de sólidos no fundo e uma região de líquido clarificado, livre de partículas sólidas. Observa-se também uma curva que apresenta a variação da altura da interface contendo sólidos com a variação do tempo (FRANÇA; CASQUEIRA, 2007).

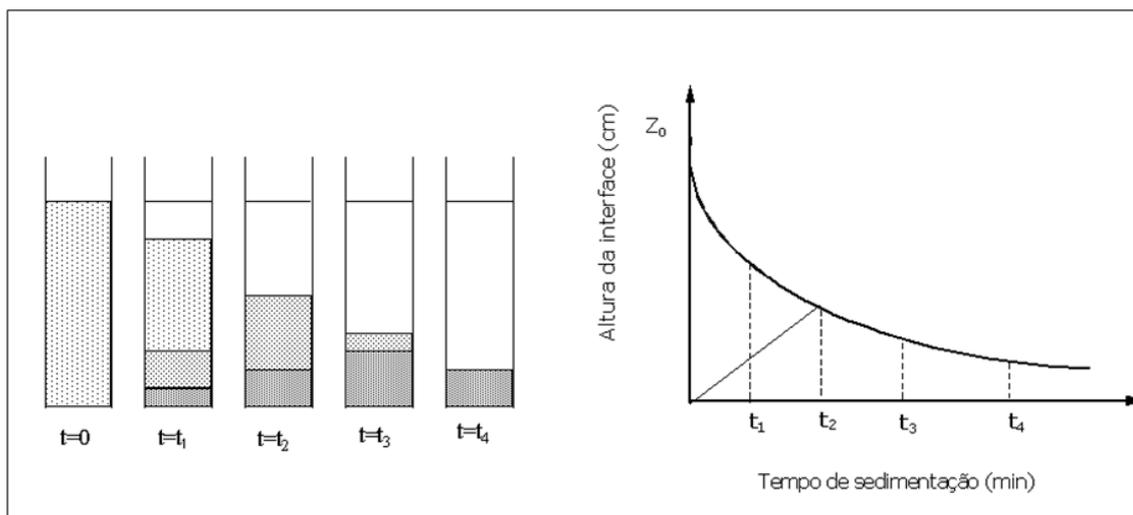


Figura 2.8 – Etapas de um teste de proveta e a curva típica do ensaio de sedimentação em batelada  
 Fonte: FRANÇA; CASQUEIRA, 2007, p.395.

Na região de líquido clarificado, ou clarificação, observa-se a formação de uma interface entre a polpa e a água sobrenadante, onde predomina uma alta diluição da polpa já que as partículas que se encontram longe uma das outras, podem sedimentar sem que haja interferências entre elas mesmas. A região de sedimentação livre, onde as partículas sedimentam pela ação da gravidade, da densidade e diâmetro da partícula, e a sedimentação por fase, onde cada partícula entra em contato com as partículas que estão ao seu redor, assim, estas partículas afundam em conjunto, provocando aprisionamento das mesmas, fazendo com que todas desçam com velocidade igual, onde é possível perceber uma interface nítida entre o líquido e a fase que está sendo sedimentada. A região de compactação, ou regime de compressão, é caracterizada pelas partículas que se sedimentam apenas pela ação do seu próprio peso e das camadas de partículas que se encontram acima (CHAVES *et al.*, 2013).

A Figura 2.9, representa o mesmo esquema em escala industrial, ou seja, as regiões de sedimentação em um espessador contínuo, com apenas uma diferença essencial de que o *underflow* e o *overflow* descarregam continuamente (CHAVES *et al.*, 2013).

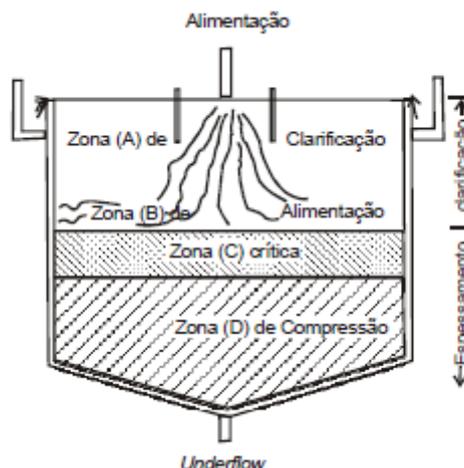


Figura 2.9 – Regiões de sedimentação de um espessamento contínuo.  
 Fonte: OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004, p.51.

### 2.3.1 Variáveis Operacionais

As variáveis que afetam a sedimentação são:

- Distribuição granulométrica, tamanho e forma das partículas

Segundo Souza (2012), partículas que possuem maiores diâmetros se sedimentam com mais facilidade e rapidez do que as demais, já que as partículas com diâmetros mais finos tendem a ficar em suspensão na polpa.

Uma das regras fundamentais, de maior importância, é a de que espessadores são projetados para trabalhar com materiais finos e homogêneos. Caso contrário tanto o desempenho quanto os custos de uma operação de separação sólido-líquido podem ser insatisfatórios (CHAVES *et al.*, 2013).

- Porcentagem de sólidos

A porcentagem de sólidos está indiretamente ligada à velocidade de sedimentação, ou seja, aumentando-se a porcentagem de sólidos, a taxa de sedimentação das partículas deixa de ser constante e se torna decrescente.

A porcentagem de sólidos também interfere no desempenho (eficiência) da filtração, como a filtração é alimentada pelo produto espessado a porcentagem de sólidos que deixa o espessador é importante para melhor desempenho da filtração

(FRANÇA; MASSARANI, 2004), e segundo Souza (2012) interfere também na floculação, a porcentagem de sólidos influencia sobre as características dos flocos formados.

- Pré-tratamento da polpa

A adição de flocculantes é necessária para que haja agregação das partículas finas, segundo Lara, (2011), partículas flocculadas em suspensão apresentam características diferentes de partículas, sem adição de flocculantes, em suspensão, uma delas é a maior taxa de sedimentação devido ao maior tamanho do flocculado que acaba tendo uma grande quantidade de água nos seus interstícios. Assim características como forma e densidade são muito pouco relacionadas com a características das partículas originais.

Para a previsão de novas taxas de sedimentação, o que é extremamente complexo, faz-se necessário o conhecimento de um novo fator de forma e valor de densidade, que ainda são determinados por métodos empíricos. A grande dificuldade na determinação destas variáveis é a sua dependência não apenas com o tipo de flocculante utilizado, mas também com as condições físico-químicas sob as quais ocorreu a floculação (LARA, 2011, p. 10).

- pH da polpa

De acordo com Nunes (2011), ter o controle do pH é importante, já que dependendo de seu valor as partículas podem coagular. Uma forma de se obter um resultado ótimo é associando coagulantes e flocculantes. É necessário conhecer a faixa de ionização do flocculante e trabalhar dentro dela, já que a utilização de um pH básico pode afetar as cargas superficiais das partículas e também a ionização do polímero utilizado, deixando principalmente partículas muito finas em dispersão.

Segundo Souza (2012), características de superfície do sólido: influenciam na escolha dos reagentes a serem utilizados, para melhor dispersão/agregação da polpa.

## 2.4 Teoria DLVO

A teoria DLVO foi desenvolvida na década de 1940 pelos cientistas russos Derjaguin-Landau e os holandeses Verwey-Overbeek. Ela trata dos fundamentos da agregação e da dispersão de partículas ultrafinas ( $< 10 \mu\text{m}$ ) e ficou conhecida como

a teoria DLVO clássica. Depois de 50 anos incorporou-se forças estruturais na teoria, resultando na teoria DLVO estendida, também conhecida como X-DLVO (SILVESTRE, 2007).

A teoria DLVO clássica considera que as forças de van der Waals e as forças entre as duplas camadas elétricas (DCE)<sup>1</sup> das partículas são responsáveis por influenciar as energias de interação que agem sobre os mecanismos de agregação e dispersão. As forças atrativas se devem às forças de van der Waals que são sempre de atração em meio aquoso. As forças repulsivas ocorrem pela interação de cargas idênticas entre as duplas camadas elétricas de partículas e a intensidade é dependente da distância entre as partículas e a magnitude da carga (SILVESTRE, 2007).

Bragança (2008) aponta que, na teoria DLVO clássica, a energia total de interação é fornecida de acordo com a Equação (1):

$$V_T = V_A + V_R \quad (1)$$

Onde  $V_T$  é a energia total de interação,  $V_A$  é a energia devido as forças de atração e  $V_R$  a energia devido as forças de repulsão. Silvestre (2007) aponta que  $V_A$  depende da constante de Hamaker que é característica do material e da geometria do sistema. A energia de repulsão,  $V_R$ , depende do potencial zeta<sup>2</sup> ( $\psi\xi$ ) e da espessura da parte difusa da dupla camada elétrica ( $\kappa^{-1}$ ) das partículas.

A Figura 2.10 apresenta um exemplo típico de energia de interação quando duas partículas se aproximam, seguindo a teoria DLVO clássica. Na Figura 2.10, o mínimo apresentado pela curva  $V_T$  para um distanciamento curto entre as partículas é chamado mínimo primário onde o sistema é considerado instável. Assim que as partículas se aproximam o suficiente elas se juntam e essa agregação não é reversível. A circunstância em que as nuvens eletrônicas das partículas virtualmente se tocam é o que determina a profundidade do mínimo primário. Outra condição que pode ocorrer é o mínimo secundário, comum em soluções eletrolíticas concentradas e/ou com partículas mais grossas. Ocorre uma agregação menos forte entre as

---

<sup>1</sup> DCE: Eletricamente neutra e sua existência está condicionada a excesso de carga na superfície mineral.

<sup>2</sup> Potencial Zeta: Potencial Eletroquímico medido após a movimentação mineral.

partículas, e por isto esta junção pode ser revertida por agitação moderada, com redispersão do sistema (BRAGANÇA, 2008).

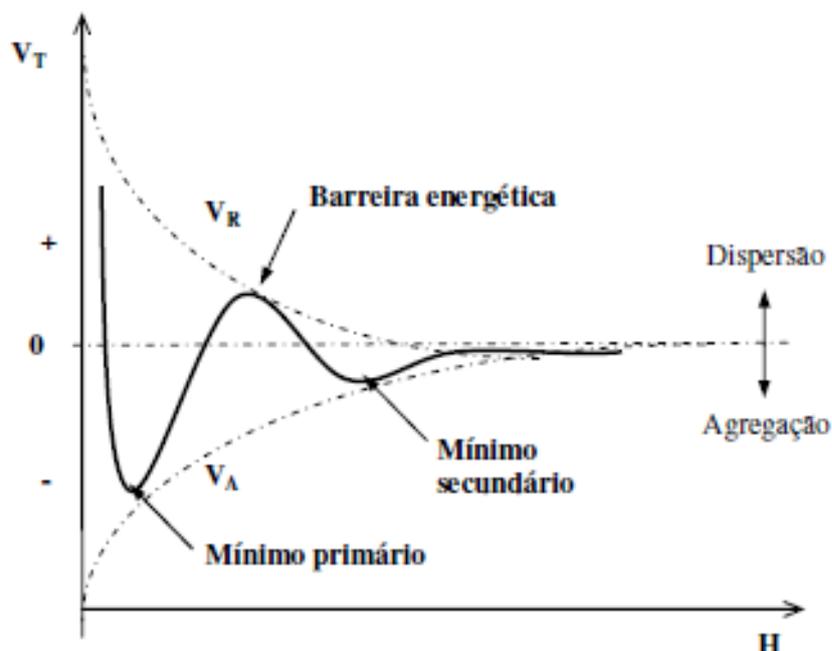


Figura 2.10 – Curva de energia de interação em função da distância entre duas partículas.  
Fonte: BRAGANÇA (2008, p. 11).

A teoria DLVO foi validada com experimentos, no entanto em alguns casos evidenciou-se a chance de existência de forças extras não previstas pela teoria clássica. Assim surgiu a teoria DLVO estendida (X-DLVO) que inclui forças estruturais de hidratação que são repulsivas e hidrofóbicas que são atrativas (SILVESTRE, 2007).

Bragança (2008) ainda menciona que, na teoria DLVO estendida, a energia total de interação é fornecida de acordo com a Equação (2):

$$V_T = (V_A + V_R) + V_S + V_{Ass} + V_{Est} + V_M + \dots \quad (2)$$

Onde  $V_S$  pode ser de repulsão ( $V_{S+}$ ) ou atração ( $V_{S-}$ ). A repulsão se deve a variações na estrutura da água instigadas por superfícies hidrofílicas hidratadas ou por íons hidratados ao redor da superfície das partículas, a atração ocorre pela repelência da água que faz com que partículas hidrofóbicas se agreguem, por causa da estrutura diferente da água na vizinhança das partículas (BRAGANÇA, 2008). O termo  $V_{Ass}$  designa a associação hidrofóbica das cadeias orgânicas dos coletores adsorvidos nas

partículas, para as partículas naturalmente hidrofóbicas há apenas a presença do componente  $V_S$ , já para as partículas hidrofobizadas por coletores tem-se o efeito de  $V_S$  antes do contato das cadeias orgânicas e de  $V_{Ass}$  reforçando a atração a uma distância menor de mútua aproximação. Já os termos  $V_{Est}$  e  $V_M$  estão frequentemente presentes no tratamento de minérios, estes expressam a interação entre partes externas de polímeros adsorvidos (efeito estérico de repulsão) e a interação originária de forças magnéticas (partículas que são submetidas à ação de um campo magnético), respectivamente. Outros efeitos podem ainda ser considerados, como o de ligação de polímeros as partículas (na floculação pelo mecanismo de ponte) e o efeito da ação de forças capilares (processos que se utiliza óleo) (LINS, ADAMIAN, 2000).

## 2.5 Agregação e Dispersão

### 2.5.1 – Dispersão

Bragança (2008) aponta que o mecanismo de dispersão previsto pela teoria DLVO é o de estabilização eletrostática. A teoria X-DLVO ainda prevê outros mecanismos de estabilização de dispersões, como a estabilização estérica, eletroestérica, depleção e solvatação. Estes mecanismos podem ser observados na Figura 2.11.

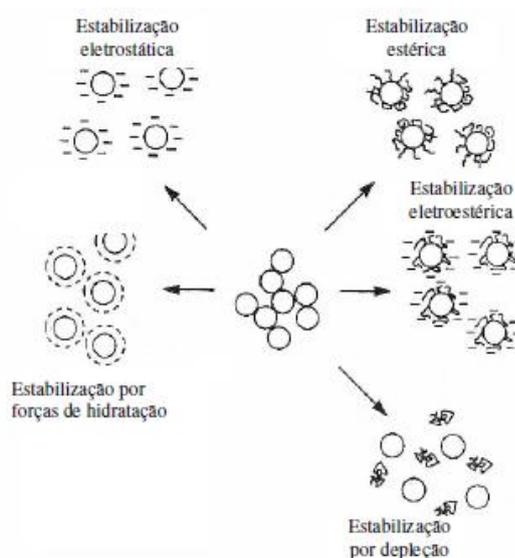


Figura 2.11 – Métodos de estabilização.

Fonte: BRAGANÇA (2008, p. 11).

A estabilização estérica se deve pelos polímeros adsorvidos na superfície das partículas fazendo com que as cadeias se estendam para a solução, assim essas

cadeias devido a seu tamanho impedem fisicamente as partículas a chegarem na região onde as forças de van der Waals atuam (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Na estabilização eletroestérica a adsorção específica de polieletrólitos na superfície das partículas gera as forças de repulsão. É adicionado ao efeito esférico um bloqueio eletrostático devido aos íons gerados na dissociação dos polieletrólitos, assim é produzida uma película que não permite a agregação do composto pelo aumento do espaço mínimo entre as partículas e também a relação de caráter elétrico entre as cadeias carregadas estabiliza as suspensões (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A estabilização por depleção ocorre quando é gerada uma repulsão entre as partículas por um polímero livre fazendo com que elas continuem separadas. Para que as partículas sejam aproximadas o polímero deve ser distanciado criando-se uma camada de solvente entre elas, o que é um procedimento termodinamicamente não favorável (KISSA, 1999 *apud* BRAGANÇA, 2008).

A solvatação acontece quando partículas adsorvidas direcionam seus conjuntos polares para a solução, os quais estão aptos ou não de construir ligações de hidrogênio. A eficiência da dispersão é diretamente proporcional ao momento de dipolo destes grupos funcionais e a sua quantidade (BRAGANÇA, 2008).

### 2.5.2 Agregação

A agregação de partículas finas é uma metodologia empregada na separação destas em meio líquido e pode ser realizada adicionando-se reagentes, como coagulantes ou polímeros floculantes, permitindo a adesão de uma partícula diretamente à outra (GADELHA; ANDRADE; FRANÇA, 2015).

As partículas podem agregar-se a partir de uma desestabilização de uma suspensão devido alguns mecanismos: coagulação por compressão da dupla camada elétrica ou neutralização de cargas e floculação (BRAGANÇA, 2008).

#### 2.5.2.1 Coagulação

A coagulação acontece no momento em que partículas finas se ligam umas às outras por forças atrativas de Van der Waals, que são definitivas se e somente se estiverem à uma distância relativamente pequena. A adesão provocada por estas forças não é válida uma vez que as partículas encontram-se envoltas por uma

atmosfera carregada que, normalmente, ocasiona uma repulsão entre as partículas que se aproximam (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Para se agregar as partículas, empregam-se eletrólitos cujas cargas são contrárias ao da superfície da partícula, neutralizando parte da carga e reduzindo a repulsão eletrostática, fazendo com que as forças de Van Der Waals iniciem a coagulação (GUIMARÃES, 2010).

De acordo com Sousa (2012, p. 13)

Os principais mecanismos que atuam na coagulação são:  
 Compressão da camada difusa: ocasiona a desestabilidade dos finos com adição de íons com carga contrária;  
 Adsorção e neutralização: ocorre desestabilização através de reações de coagulantes com os coloides, mas com uma dosagem menor de coagulante;  
 Adsorção e formação de pontes: utiliza polímeros como reagentes que formam sítios ionizáveis ao longo de suas cadeias;  
 Varredura: há formação de precipitados formados através de reações dos coagulantes com sólidos presentes.

A presença de colisões é de suma importância para o processo de agregação de partículas sólidas, permitindo a aproximação das mesmas e a formação de forças atrativas entre elas. As principais causas que influenciam a frequência dessas colisões são o tipo de coagulante empregado, as características químicas da água, a faixa granulométrica das partículas, a concentração relativa dos sólidos e sua movimentação e a temperatura da polpa (NETO, 2016).

Os coagulantes inorgânicos mais empregados nas indústrias são à base de  $Fe^{+3}$  ou  $Al^{+3}$ . Pode-se evidenciar o polihidroxicloreto de alumínio (PAC), o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o sulfato férrico. Na Tabela 2.2 observa-se a faixa ótima de pH destes coagulantes.

Tabela 2.2 – Principais coagulantes inorgânicos e suas faixas de pH ótimas para aplicação

<b>Coagulante</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Faixa de pH</b>
polihidroxicloreto de alumínio (PAC)	$[Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}]_x$	6,5-7,3
sulfato de alumínio	$Al_2(SO_4)_3.nH_2O$ (n=14-18)	4,5-7,5
cloreto férrico	$Fe_2(SO_4)_3.3H_2O$	6,0-7,5
sulfato férrico	$FeCl_3.6H_2O$	6,0-7,5

Fonte: BRAGANÇA (2008, p. 15).

#### 2.5.2.2 Floculação

A floculação é a agregação causada por formação de pontes de ligação entre as moléculas de polímeros e as partículas. Flóculos formados buscam otimizar a

sedimentação e provocam a clarificação do sistema. A floculação gera uma suspensão não homogênea em uma escala macroscópica (SHARMA *et al.*, 2006 *apud* SOUSA, 2012, p. 10).

Muitas lamas minerais englobam uma ampla faixa granulométrica, e conseqüentemente, não sedimentam com uma interface clara. Suspensões formadas com partículas muito finas normalmente exibem resistência à floculação em razão das forças resultantes das interações entre as partículas em suspensão (GUIMARÃES, 2010).

Os floculantes são reagentes químicos que criam pontes entre as partículas, e para que esse evento ocorra é necessário a adsorção de polímeros diretamente na superfície das partículas ou na camada da interface iônica. A floculação gera flocos com estabilidade e que possam ser incorporados em todas as partículas da suspensão (PINTO, 2007).

O mecanismo de floculação por pontes é realizado por meio da adsorção de segmentos de polímeros em mais de uma partícula mineral, inicialmente dispersa, juntando-as e gerando flocos. Quando a cadeia do floculante entra em contato com as partículas da suspensão, alguns segmentos reativos dos polímeros são adsorvidos no mineral, deixando os demais segmentos orientados para o seio da solução. Os segmentos adsorvidos nos sítios superficiais das partículas são denominados cadeias estiradas, enquanto que os segmentos direcionados para o seio da solução são chamados de laço e cauda. A adsorção de polímeros segundo o mecanismo de ponte é observada na Figura 2.12 (NETO, 2016).

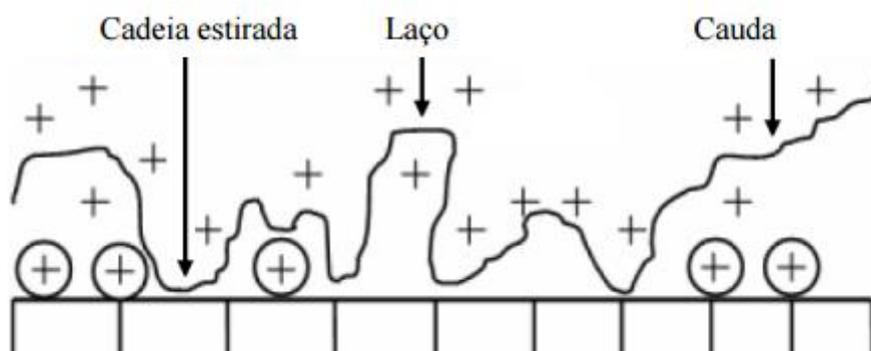


Figura 2.12 – Adsorção dos floculantes segundo o mecanismo de pontes.  
Fonte: SHARMA *et al.*, 2006 *apud* NETO, 2016, p. 16.

Caso uma segunda partícula possua sítios de adsorção que possam formar a extensão dos laços e cadeia estirada, como se apresenta na Figura 2.13 (a), o agregado partícula-polímero-partícula é formado na condição que o polímero serve como uma ponte. Os polímeros adsorvidos precisam se estender a uma distância grande da superfície da partícula para juntar-se a outra partícula efetuando a agregação. Se o polímero for adicionado excessivamente, sendo adsorvido, pode restabilizar a dispersão coloidal por saturação superficial segundo mostrado na Figura 2.13 (b) (BARREDA, 2008).



Figura 2.13 – (a) Polímero como ponte entre partículas; (b) Restabilização das suspensões coloidais.  
Fonte: SHARMA *et al.*, 2006 *apud* BARREDA, 2008, p. 24.

A escolha do reagente deve ser feita levando-se em conta o tamanho da cadeia molecular, a natureza iônica do polímero e as características químicas dos grupos ativos da molécula. Logo, o tipo de floco que deseja-se formar representa uma importante etapa no emprego do reagente mais adequado. Nas operações de separação sólido-líquido, o espessamento requer a formação de flóculos grandes enquanto que na filtração o floco deve ser compacto (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Para a indústria mineral os polímeros neutros mais importantes são as policrilamidas (PAM) e o poli(óxido)etileno (POE). As poliacrilamidas são utilizadas como floculantes numa grande variedade de pesos moleculares. Na Tabela 2.3 observa-se os floculantes mais utilizados e suas respectivas faixas ótimas de pH (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Tabela 2.3 – Principais floculantes e respectivas faixas de pH ótimas para aplicação.

<b>Floculante</b>	<b>Faixa de pH</b>
Poliacrilamida não iônica	0-12
Poliacrilamida aniônica	5-11
Poliacrilamida catiônica	4-12
Oxido de polietileno	3-11
Amido	2-10

Fonte: VALADÃO (2004, p. 16).

## 2.7 Planejamento Fatorial

Planejar experimentos é definir uma sequência de coleta de dados experimentais para atingir certos objetivos. O planejamento é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

O objetivo do planejamento fatorial é obter a influência que cada parâmetro tem sobre a resposta final. Assim, variando todas os parâmetros ao mesmo tempo é possível encontrar valores ótimos para tais, se os mesmos influenciam de forma significativa na resposta, e com base na melhor combinação dos parâmetros se obtém uma otimização do processo.

Segundo Gonçalves (2016, p. 28):

Primeiramente, para iniciar qualquer planejamento, deve-se decidir quais são os fatores e as respostas que serão analisadas. Os fatores, em geral, são variáveis controláveis na realização do experimento. Já as respostas são as variáveis de saída do sistema, nas quais se tem interesse e que serão ou não afetada pelos fatores.

O planejamento dos experimentos é a especificação detalhada de todas as operações experimentais que devem ser realizadas, com base no objetivo particular que se deve atingir (NETO *et al.*, 1996). O planejamento fatorial com dois níveis ( $2^k$ ) é o mais utilizado e mais simples para identificar as influências entre as variáveis de um experimento (NEVES; SCHVARTZMAN; JORDÃO, 2002). O planejamento fatorial,  $2^k$ , utiliza k fatores analisados em 2 níveis. Onde, essa representação mostra que, se em um experimento forem escolhidos 2 diferentes níveis para 4 fatores, o número de experimentos diferentes a serem realizados são 16 ( $2^4=16$ ).

O programa estatístico, MiniTab, trabalha com esse tipo de planejamento fatorial, no qual os níveis são costumeiramente codificados com os sinais (+) e (-). Os níveis tanto superiores quanto inferiores são determinados aleatoriamente de modo a não interferir na realização e interpretação dos experimentos e resultados, respectivamente. Através destes sinais, pode-se esquematizar as variáveis sob matrizes, bem como inferir, por cálculos, a influência das mesmas e suas interações no sistema (BRASIL *et al.*,2007).

Esse tipo de planejamento é empregado no início de um trabalho experimental, uma vez que se tem muitas variáveis a serem trabalhadas. Esse método mostra o menor número de corridas com os quais os k fatores podem ser estudados em um planejamento fatorial completo (GONÇALVES, 2016).

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Amostras**

O material utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi fornecido pela empresa Minerita Ltda, proveniente do Complexo Serra Azul. A amostra representa a alimentação do espessador de rejeitos da usina de beneficiamento, o material recebido estava na forma de polpa. 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 Campus IV, envolvendo operações de sinfonamento, secagem, desagregação, homogeneização e quarteamento.

### **3.2 Preparação das Amostras**

Primeiramente, a amostra foi submetida a operação de sinfonamento, já que o material sólido estava decantado no fundo do balde. Assim, foi retirada a água em excesso dos baldes pela diferença de nível, onde a mangueira funcionou como sifão. Em seguida, a amostra decantada foi submetida à secagem em estufa.

Logo após, o material passou pela etapa de desagregação manual, sendo submetida à homogeneização por tombamento, que tem por objetivo a obtenção de uma distribuição mais uniforme dos constituintes da amostra. Para tal procedimento, foi utilizada uma lona quadrada, onde despejou-se 42 Kg do rejeito de minério de ferro e alternadamente levantou-se seus vértices, de forma que o rejeito da base da pilha de um dos lados fosse alocado no topo da pilha em cada passada, completando oito ciclos de tombamento ao redor da pilha.

No final da homogeneização, arranhou-se o rejeito na lona de forma que assumisse a forma cônica, achatou-se o seu vértice e dividiu-se o material em quatro partes iguais com o auxílio de uma placa metálica. Em seguida, reuniram-se as frações opostas formando-se duas amostras (Figura 3.1).

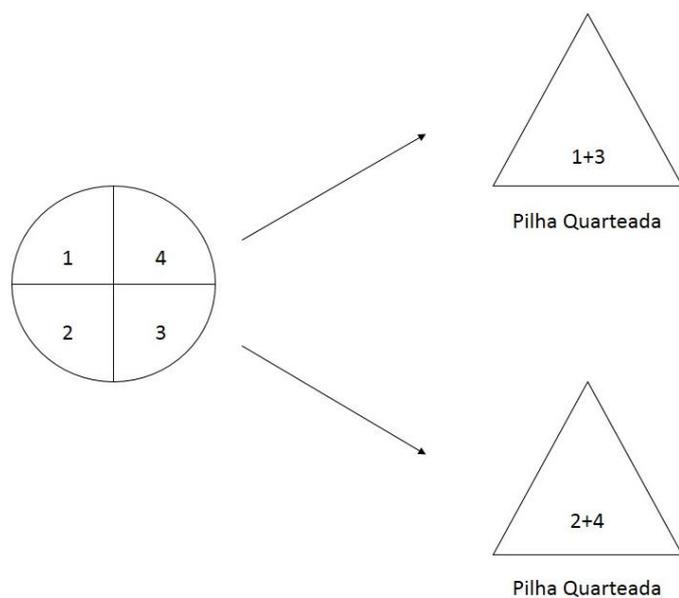


Figura 3.1 – Representação esquemática do quarteamento em pilha cônica.

A fração de números pares, cerca de 18,5 kg, foi levada para o equipamento empilhadeira (Figura 3.2), onde foi construída uma pilha alongada, representada pela Figura 3.3.



Figura 3.2 – Empilhadeira.



Figura 3.3 – Pilha Alongada.

A pilha, de aproximadamente 172 cm, foi dividida em dez partes iguais onde retirou-se as duas extremidades e distribuiu-se o material novamente na pilha. Mediu-se novamente o tamanho com uma trena e dividiu a pilha ao meio longitudinalmente. Estas duas partes foram divididas novamente em 18 partes iguais, obtendo-se 36 frações de aproximadamente 0,5 kg. Numerou-se as frações e recolheu-se o material alternadamente, todas as amostras foram pesadas e armazenadas em sacos plásticos. Uma das amostras estocada foi novamente homogeneizada e disposta sobre a bancada em forma de uma pequena pilha cônica. Dessa forma, de maneira aleatória e em vários pontos da pilha, foi coletado pequenas quantidades de minério formando três alíquotas de aproximadamente 100g para a caracterização da amostra.

A Figura 3.4 representa um fluxograma com toda a preparação da amostra.

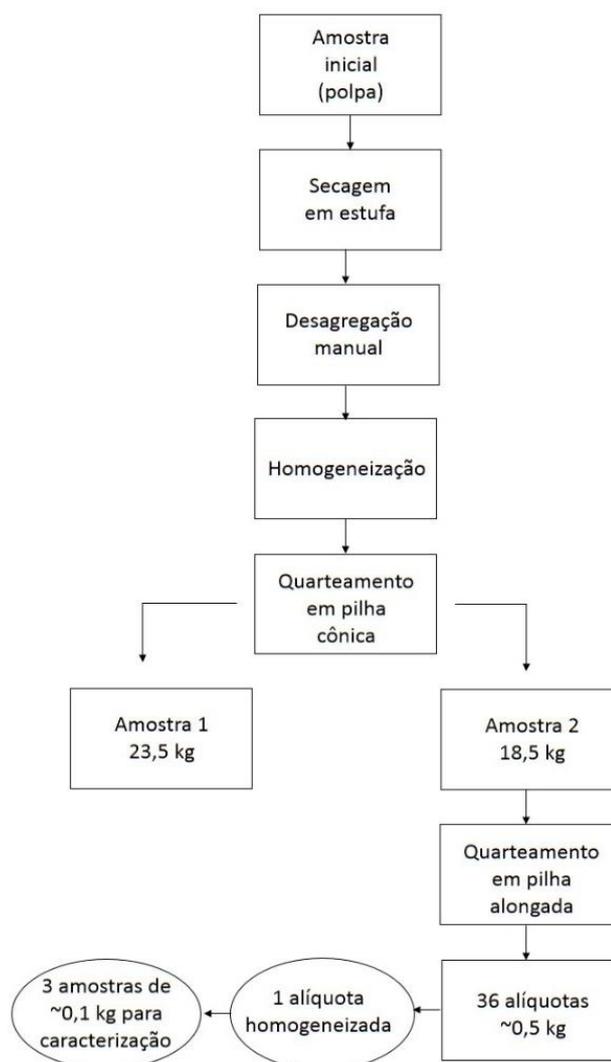


Figura 3.4: Fluxograma da preparação da amostra.

### 3.3 Caracterização da Amostra

#### 3.3.1 Composição

Para execução da caracterização química, uma alíquota foi encaminhada para o Laboratório de Caracterização do CEFET/MG, em Belo Horizonte, onde foi realizado a análise de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX).

A técnica monitora quantitativamente e qualitativamente os materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos e se baseia na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas como elétrons, prótons ou íons (MELO JÚNIOR, 2007). A quantificação

dos elementos é identificada conforme o ângulo de reflexão e as intensidades da radiação emitida pela amostra.

### 3.3.2 Densidade

Para a determinação da densidade real do rejeito de minério de ferro utilizou-se o método da picnometria, descrito a seguir.

Primeiro foi pesado o picnômetro vazio, foi adicionado uma pequena quantidade de minério no picnômetro, pesando-o. Em seguida, com o auxílio de uma pisseta, completou-se o volume do picnômetro com água, assim, foi pesado o picnômetro completo de minério e água. O picnômetro foi esvaziado e lavado. Logo após, completou-se seu volume total com água e o pesou novamente. Com os valores de massa do picnômetro vazio, picnômetro com amostra, picnômetro com amostra e água, e picnômetro com água calculou-se a densidade real do minério pela Equação 3.1.

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

$d_s$  densidade dos sólidos;

$A_1$  massa do picnômetro;

$A_2$  massa do picnômetro + amostra;

$A_3$  massa do picnômetro + amostra + água;

$A_4$  massa do picnômetro + água

O teste de picnometria foi realizado em triplicata, como mostra a Figura 3.5, obtendo-se por fim um valor médio de densidade.



Figura 3.5– Pícnômetro com amostra e água.

### 3.3.2 Análise Granulométrica

Para a análise granulométrica da amostra, foi realizado o peneiramento combinado. A primeira parte do peneiramento se deu no peneirador vibratório suspenso com uma das alíquotas de aproximadamente 100 g.

No peneirador foram organizadas peneiras de 325# (0,044 mm) e 400# (0,037 mm), completando-se com outras quatro peneiras de aberturas aleatórias para que o equipamento pudesse fechar e funcionar perfeitamente. Despejou-se a amostra, cerca de 100,5 g, na primeira peneira, com auxílio de uma mangueira e um balde foi realizado o peneiramento a úmido para retirada do excesso de finos, como mostra a Figura 3.6. O peneiramento foi executado até que a fração passante na última peneira estivesse límpida.



Figura 3.6 – Peneirador vibratório suspenso, adaptado para o peneiramento a úmido.

A massa passante, *undersize (US)*, menor que 400# (0,037 mm) foi despejada em uma bandeja e levada para estufa para posterior análise. As massas retidas nas peneiras de 325# (0,044 mm) e 400# (0,037 mm) foram colocadas em um recipiente e também foram levadas para estufa, para serem utilizadas em outro peneiramento, agora a seco.

A segunda etapa do peneiramento foi realizada a seco em um peneirador vibratório de bancada (Figura 3.7) e foram utilizadas as seguintes malhas 100# (0,149 mm), 150# (0,104 mm), 200# (0,074 mm), 270# (0,053 mm), 325# (0,044mm) e 400# (0,037 mm). O peneirador de bancada foi alimentado com os materiais retidos nas faixas do primeiro peneiramento. O peneiramento a seco foi realizado permaneceu ligado por 30 minutos para que todas as partículas tivessem a probabilidade de atravessar as malhas. Após o tempo determinado, foram aferidas as massas retidas

em cada faixa granulométrica, e também, somada à última faixa (- 400#), a massa passante do peneiramento úmido, por fim foi confeccionada a curva granulométrica.



Figura 3.7 – Peneirador vibratório de bancada.

### 3.4 Floculante

Para a realização dos experimentos de sedimentação em proveta foi utilizado o reagente floculante, fornecido pela empresa Minerita, corresponde a uma poliacrilamida aniônica, um sólido solúvel em água, com nome comercial SUPERFLOC 8566.

Para a utilização nos testes, o floculante foi preparado em uma solução aquosa com concentração de 0,05% p/v, representado pela Figura 3.7. Na balança analítica foi pesado 0,5 g do floculante e transferido para um balão volumétrico de 1000 mL. Assim, completou-se o mesmo com água até a marca definida de 1000 mL. Logo após, o balão volumétrico foi vedado para que pudesse ser agitado cuidadosamente, para

que não houvesse quebra na cadeia do polímero, até que não houvesse mais grumos na solução, eviciando a solubilização total do reagente.

### **3.5 Testes de Sedimentação em Proveta**

#### **3.5.1 Procedimentos**

Para a realização de cada teste, foi pesada a amostra de rejeito e a massa de água. O volume da solução de floculante, calculado a partir da sua dosagem e a massa de sólido, foi aferido com auxílio de uma pipeta graduada (30 mL) e uma pêra.

Assim, as massas de rejeito e água determinadas foram pesadas e transferidas para uma proveta de 1000 mL. Com ajuda de agitador as massas foram agitadas até que se formasse uma polpa totalmente homogênea e suas partículas estivessem todas em suspensão.

Com as partículas em suspensão foi aferido o pH da polpa através de um pHmêtro modelo HANNA M-7962. Caso houvesse necessidade de manipular os valores de pH para ácido ou básico, foram utilizadas soluções de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH), respectivamente.

Ainda com as partículas em suspensão foi adicionado o volume determinado da solução de floculante, completando os exatos 1000 mL de polpa, e novamente com a ajuda de um agitador, a polpa foi cuidadosamente agitada para dispersão dos polímero e formação dos flocos. Ao fim da agitação, o cronômetro foi disparado, sendo registrada a altura da interface de clarificação da polpa em intervalos de tempo estabelecidos, o último ponto coletado foi após 60 minutos, decorridos do início do teste. A tabela 3.1 apresenta os intervalos de tempo mensurados.

Tabela 3.1: Tempos mensurados.

| TEMPO (s) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5         | 80        | 155       | 230       | 310       | 540       |
| 10        | 85        | 160       | 235       | 320       | 570       |
| 15        | 90        | 165       | 240       | 330       | 600       |
| 20        | 95        | 170       | 245       | 340       | 630       |
| 25        | 100       | 175       | 250       | 350       | 660       |
| 30        | 105       | 180       | 255       | 360       | 720       |
| 35        | 110       | 185       | 260       | 370       | 780       |
| 40        | 115       | 190       | 265       | 380       | 840       |
| 45        | 120       | 195       | 270       | 390       | 900       |
| 50        | 125       | 200       | 275       | 400       | 1200      |
| 55        | 130       | 205       | 280       | 410       | 1500      |
| 60        | 135       | 210       | 285       | 420       | 1800      |
| 65        | 140       | 215       | 290       | 450       | 2400      |
| 70        | 145       | 220       | 295       | 480       | 3000      |
| 75        | 150       | 225       | 300       | 510       | 3600      |

A proveta utilizada apresentava uma escala milimétrica colada a ela, para facilitar a medida do deslocamento da interface do clarificado com o tempo. As alturas de interface em intervalos de tempo pré-estabelecidos foram anotadas. Assim, foram construídas as curvas de sedimentação e calculadas suas respectivas velocidades de sedimentação pela Equação 3.2.

$$v_s = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde  $\Delta H$  e  $\Delta t$  são as diferenças de altura e tempo, respectivamente, quando a velocidade de sedimentação é constante.

Ao fim do teste de sedimentação, uma alíquota do líquido clarificado foi coletada e submetida a medição de turbidez, realizada em um Turbidímetro portátil da HANNA HI 93703 e comparada com os parâmetros de referência da CONAMA 357/2005. Para que os índices de turbidez respeitem a resolução ambiental, os valores devem ser abaixo de 40 FTU (GADELHA *et al*, 2015). A Figura 3.8, apresenta uma medição da turbidez da água 0,42 FTU.



Figura 3.8 – Turbidímetro aferindo a turbidez da água.

### 3.5.2 Testes Preliminares

A partir dos dados fornecidos pela empresa Minerita, dosagem de floculante, 35g/t, valor de pH 7 e porcentagem de sólidos, 25%, foram realizados testes preliminares para definição de quais valores seriam mais propícios para realização dos demais testes. Assim, os valores definidos para os testes preliminares estão representados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados dos testes preliminares.

<b>Teste</b>	<b>Dosagem floculante (g/t)</b>	<b>pH</b>	<b>% Sólidos</b>
<b>P1</b>	30	6,5	25
<b>P2</b>	35	6,5	25
<b>P3</b>	30	6,5	40
<b>P4</b>	30	5,0	25
<b>P5</b>	20	6,5	25
<b>P6</b>	30	9,0	25

A partir da porcentagem de sólidos pré-determinada e a densidade do rejeito de minério de ferro, calculada pela Equação 3.1, determinou-se a densidade da polpa, pela Equação 3.3. Assim calculou-se a massa de polpa necessária para realização de cada teste, conseqüentemente, foi possível calcular as massas de sólidos e água.

$$\%S = \frac{\text{Densidade de sólidos (Densidade de polpa-1)}}{\text{Densidade de polpa (Densidade de sólidos-1)}} \times 100 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Conhecendo a massa de sólidos e a dosagem de floculante pré-determinada, calculou-se a massa deste. Logo, a partir da massa de floculante e a concentração da solução do mesmo, 0,05% p/v, calculou-se o volume de solução necessária em cada teste.

Os valores calculados, para os testes preliminares, de massa de sólidos, massa de água, massa de floculante e volume de solução do floculante estão representados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores de massas e volume calculados para os testes preliminares.

<b>Testes</b>	<b>Massa de sólidos (g)</b>	<b>Massa de água (g)</b>	<b>Volume de solução (mL)</b>
<b>P1</b>	297,5	874,65	17,85
<b>P2</b>	297,5	871,67	20,83
<b>P3</b>	536,0	771,84	32,16
<b>P4</b>	297,5	874,65	17,85
<b>P5</b>	297,5	880,60	11,9
<b>P6</b>	297,5	874,65	17,85

Os testes foram realizados em ordem e seguiram todos os procedimentos necessários para um teste de sedimentação em proveta consistente, segundo Luz *et al* (2002) para que o mecanismo de sedimentação em proveta auxilie na descrição da operação contínua de um espessador é necessário ter uma visão clara da interface superior de suspensão, ou seja, observar nitidamente um produto clarificado e espessado. As medições da altura da interface em tempos estabelecidos foram aferidas durante os 60 minutos de duração, e anotadas para posteriores análises, com

exceção do teste preliminar 6, já que no mesmo não foi possível observar a interface superior de suspensão nem tão pouco medir, ao final do teste, sua turbidez.

Assim, a partir dos testes preliminares foi possível analisar as melhores condições para a realização dos testes oficiais e definir os níveis avaliados no planejamento fatorial. Essa análise se deu a partir da velocidade de sedimentação e a turbidez de cada teste.

### 3.5.3 Planejamento Fatorial

O planejamento das condições experimentais deste estudo foi realizado através de técnicas do planejamento de experimentos fatoriais (DOE) em dois níveis, sendo realizado em duplicata. O *software* MiniTab 17 foi utilizado para calcular os efeitos das variáveis de entrada (fatores) em variáveis de saída (respostas) ao mesmo tempo.

Os testes de sedimentação em proveta foram realizados com o objetivo de analisar as variáveis estudadas, buscando condições ótimas de operação, com uma redução da turbidez e uma máxima velocidade de sedimentação ( $v_s$ ). Os valores dessas variáveis e seus respectivos níveis, que foram definidos a partir dos testes preliminares, estão representados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Dados do planejamento experimental fatorial (DOE).

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL (DOE)						
TESTES	A - Dosagem (g/t)	B - pH	C - % Sólidos	A	B	C
1	15	5,0	25	-1	-1	-1
R1	15	5,0	25	-1	-1	-1
2	30	5,0	25	+1	-1	-1
R2	30	5,0	25	+1	-1	-1
3	15	6,5	25	-1	+1	-1
R3	15	6,5	25	-1	+1	-1
4	30	6,5	25	+1	+1	-1
R4	30	6,5	25	+1	+1	-1
5	15	5,0	40	-1	-1	+1
R5	15	5,0	40	-1	-1	+1
6	30	5,0	40	+1	-1	+1
R6	30	5,0	40	+1	-1	+1
7	15	6,5	40	-1	+1	+1
R7	15	6,5	40	-1	+1	+1
8	30	6,5	40	+1	+1	+1
R8	30	6,5	40	+1	+1	+1

Utilizando a Equação 3.3 os valores de massa de sólido, massa de água, massa de floculante e volume de solução de floculante foram calculados e estão representados pela Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores de massas e volume calculados para os testes oficiais.

<b>Testes</b>	<b>Massa de sólidos (g)</b>	<b>Massa de água (g)</b>	<b>Volume de solução (mL)</b>
<b>1</b>	297,5	883,575	8,925
<b>2</b>	297,5	874,650	17,850
<b>3</b>	297,5	883,575	8,925
<b>4</b>	297,5	874,650	17,850
<b>5</b>	536,0	787,92	16,080
<b>6</b>	536,0	771,84	32,16
<b>7</b>	536,0	787,92	16,080
<b>8</b>	536,0	771,84	32,16

#### 3.5.4 Avaliação dos Resultados

A partir dos dados coletados nos testes, altura da interface do clarificado em intervalos de tempo estabelecidos, foi construída a curva de sedimentação para cada teste (Apêndice A). Ao analisar a curva de sedimentação, foi possível calcular a velocidade de sedimentação, pela Equação 3.2. A metodologia para cálculo da velocidade de sedimentação se encontra descrita no Anexo A.

Segundo o modelo de Mishler, o fluxo de sólidos é influenciado pela velocidade de sedimentação e pela concentração de sólidos na polpa. Assim o modelo pode ser explicado pela Equação 3.4. (VALADÃO & ARAUJO, 2012)

$$S = \frac{A \cdot (D_A - D_D)}{V_S \cdot \rho} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde:

S – área do espessador;

A - fluxo de massa de sólido da alimentação (massa de sólido/tempo);

$D_A$  - diluição da alimentação (massa de líquido/massa de sólido);

$D_D$  - diluição do underflow (massa de líquido/massa de sólido);

$V_s$  - velocidade de sedimentação;  
 $\rho$  - densidade do fluido

Segundo Cerceau (2017), o diâmetro do espessador da empresa Minerita é igual a 7 m, a taxa de alimentação é de 130 t/h. Durante a realização deste trabalho a empresa Minerita forneceu outro valor para porcentagem de sólidos. A mesma estava trabalhando com uma porcentagem de sólidos na alimentação de 30%. A velocidade de sedimentação ótima, para obter uma polpa espessada com 60% de sólidos, foi calculada a partir da Equação 3.4.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para a caracterização da amostra, turbidez, velocidade de sedimentação e análise estatística estão descritos a seguir.

### 4.1 Caracterização da Amostra

#### 4.1.1 Composição

A composição química da amostra de alimentação utilizada nos testes de proveta foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) e está representada pela Tabela 4.1. Observa-se que o rejeito é composto predominantemente por quartzo, 73%, e hematita, 18%.

Tabela 4.1 – Composição química da amostra.

<b>Espécie Química</b>	<b>Composição (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	72,977
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,941
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,996
MnO	0,484
K <sub>2</sub> O	0,180
SO <sub>3</sub>	0,161
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,147
Cs <sub>2</sub> O	0,113

#### 4.1.2 Densidade

A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de picnometria para especificação da densidade do minério, que foram realizados em triplicata. Através dos testes obteve-se uma densidade média do minério igual a 2,73 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4.2 – Resultados da densidade do minério.

<b>Testes</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1</b>	2,71
<b>2</b>	2,64
<b>3</b>	2,83
<b>Desvio</b>	0,079

#### 4.1.3 Análise Granulométrica

Realizou-se o peneiramento combinado com 100,59 g de amostra. Nota-se uma perda de 1,09 g, que corresponde a 1,08% do montante, o que corresponde a uma metodologia bem executada, admite-se até 5%. Também observou-se que 49,36% das partículas estão com a granulometria abaixo de 400#, 0,037 mm, o que gera uma dificuldade técnica para os testes de sedimentação, já que partículas finas têm dificuldade de sedimentação, reduzindo a eficiência da operação.

A partir dos dados obtidos pelo peneiramento, construiu-se a curva granulométrica, representada pela Figura 4.1. Pela curva granulométrica, nota-se que o d<sub>80</sub>, abertura a qual 80% das partículas atravessam a malha, é de aproximadamente 0,065 mm.

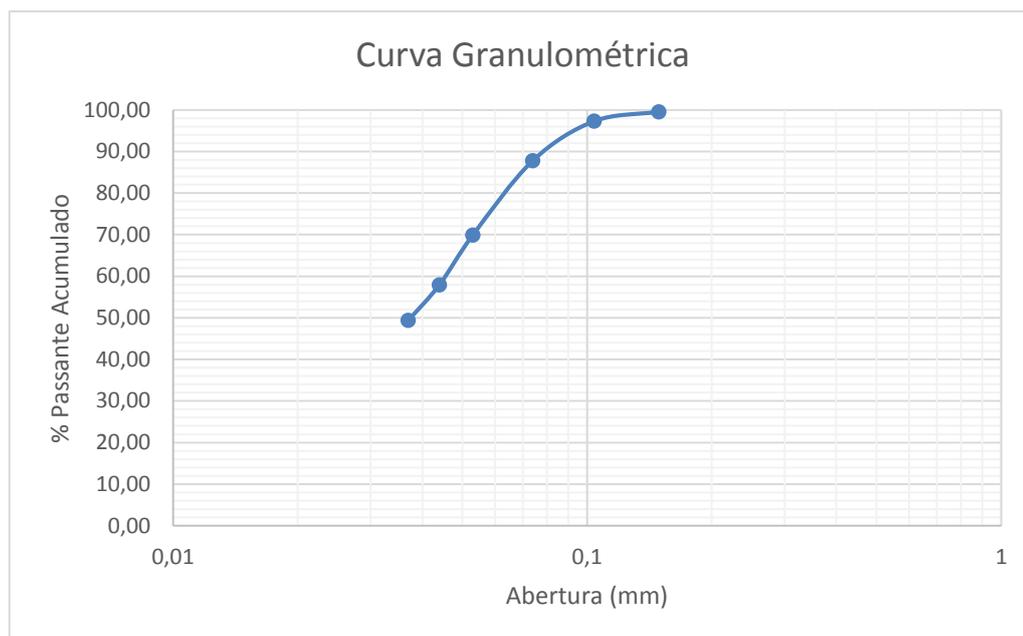


Figura 4.1 – Curva granulométrica.

## 4.2 Resultados dos Testes Preliminares

Os resultados de turbidez e velocidade de sedimentação para os testes preliminares estão apresentados na Tabela 4.3.

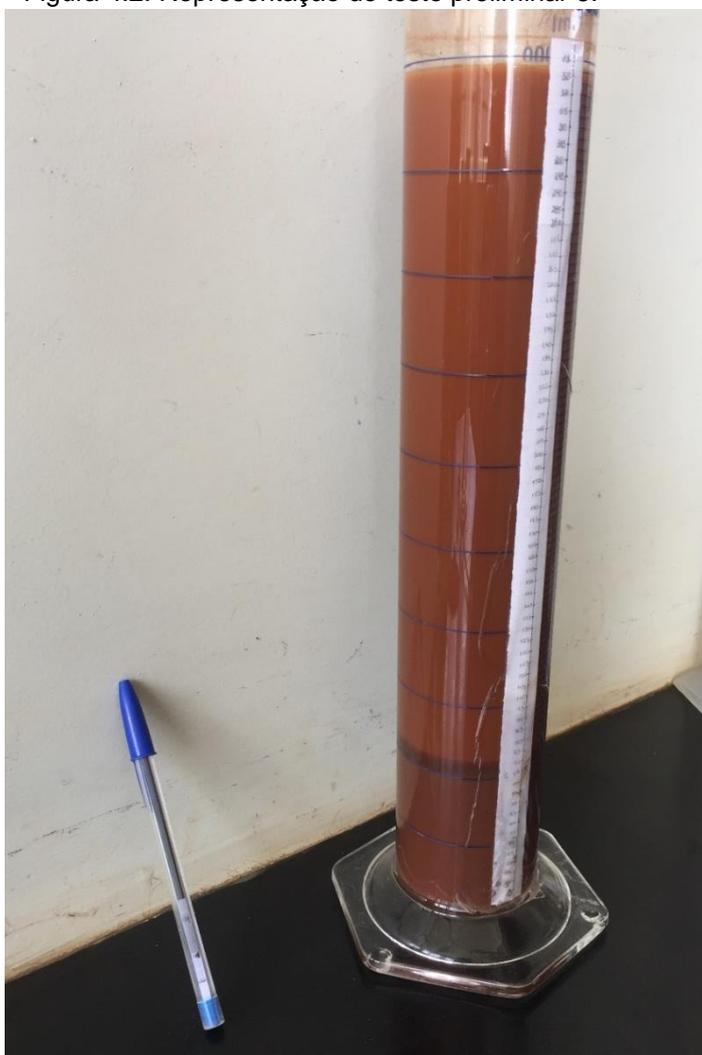
Tabela 4.3 – Valores de Turbidez e velocidade de sedimentação dos testes preliminares.

<b>Testes</b>	<b>Dosagem floculante (g/t)</b>	<b>pH</b>	<b>% Sólidos</b>	<b>Turbidez (FTU)</b>	<b>Velocidade de Sedimentação (V<sub>s</sub>) (m/h)</b>
<b>P1</b>	30	6,5	25	285	2,79
<b>P2</b>	35	6,5	25	388	2,79
<b>P3</b>	30	6,5	40	66	0,69
<b>P4</b>	30	5,0	25	72	3,39
<b>P5</b>	20	6,5	25	284	3,10

O sexto teste preliminar (P6) não foi incluído na tabela 3.4 pois não foi possível visualizar a altura de interface do clarificado nem tão pouco medir sua turbidez, já que

seu valor excedeu o valor limítrofe do aparelho que é de 1000 FTU. O fato ocorreu pela mudança de pH. Foi utilizado um pH básico (pH 9) o que pode ter afetado as cargas superficiais das partículas, favorecendo a repulsão entre as mesmas, e também a ionização do polímero utilizado, onde se favoreceu a reestabilização do sistema e assim a dispersão do mesmo predomina, deixando principalmente partículas muito finas em dispersão. O que acarretou numa altura de interface nenhum pouco nítida, a Figura 4.2 apresenta a situação desfavorável do teste preliminar 6, ao final do teste.

Figura 4.2: Representação do teste preliminar 6.



Analisando os resultados dos testes preliminares foi possível perceber uma possível super dosagem de floculante, já que o aumento da dosagem não promoveu um aumento significativo na velocidade de sedimentação, como era esperado. No

segundo teste preliminar (P2) foi testada a dosagem indicada pela empresa Minerita Ltda, a maior se comparada aos demais testes, o valor da sua turbidez obtido neste ensaio foi o maior dentre os testes preliminares.

Com isso, as melhores condições foram elencadas para os testes oficiais, descartando a utilização de um pH básico e uma alta dosagem de floculante, os valores se encontram na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores das variáveis para os testes oficiais.

<b>Valor</b>	<b>Dosagem</b>	<b>pH</b>	<b>% sólidos</b>
<b>Máximo</b>	30	6,5	40
<b>Mínimo</b>	15	5,0	25

### 4.3 Resultados do Planejamento Experimental

De acordo com o planejamento apresentado anteriormente obteve-se os resultados apresentados na Tabela 4.5 a seguir. Foi realizada a análise estatística do planejamento experimental, onde foram analisadas cada variável e sua influência na turbidez e velocidade de sedimentação.

Tabela 4.5 – Valores de níveis mais e menos, de velocidade de sedimentação e turbidez.

<b>TESTES</b>	<b>A - Dosagem (g/t)</b>	<b>B - pH</b>	<b>C - % Sólidos</b>	<b>Turbidez (FTU)</b>	<b>V<sub>s</sub> (m/h)</b>
1	15	5,0	25	62,00	1,45
R1	15	5,0	25	64,00	1,52
2	30	5,0	25	117,00	1,67
R2	30	5,0	25	61,00	1,78
3	15	6,5	25	292,00	1,73
R3	15	6,5	25	231,00	1,64
4	30	6,5	25	613,00	1,77
R4	30	6,5	25	804,00	1,80
5	15	5,0	40	19,65	0,46
R5	15	5,0	40	18,20	0,46
6	30	5,0	40	17,36	0,55
R6	30	5,0	40	25,41	0,59
7	15	6,5	40	28,78	0,52
R7	15	6,5	40	39,98	0,51
8	30	6,5	40	80,00	0,59
R8	30	6,5	40	59,00	0,55

Segundo a resolução da CONAMA 357/2005 apenas nos testes 5, 6 e 7 os valores de turbidez atendem os limites da especificação, abaixo de 40 FTU. Ambos foram realizados com 40% de sólidos. Alguns valores de turbidez do teste e sua respectiva réplica estão discrepantes, isso se deve a alta sensibilidade na colheita da alíquota do clarificado e equipamento. Porém, esses valores discrepantes são levados em consideração quando se analisa, capítulo 4.4.1, a eficiência do modelo fatorial no experimento.

Considerando que, para o espessado atingir 60% de sólidos, a partir da Equação 3.7, sua velocidade de sedimentação, em uma escala laboratorial, deve ser de aproximadamente 1,69 m/h. Na Tabela 4.5 é possível perceber que a velocidade de sedimentação nos testes 3 e 4, foi maior que 1,69m/h, sendo que eles foram realizados com 25 % de sólidos e pH igual a 6,5.

#### **4.4 Análise estatística**

Com o objetivo de minimizar o valor da turbidez e maximizar a velocidade de sedimentação, todos os testes oficiais e suas réplicas foram analisados usando o *software* Minitab 17.

##### 4.4.1 Turbidez

A figura 4.3 apresenta o gráfico Pareto para turbidez. Esse gráfico mostra se as variáveis de entrada (fatores) influenciam significativamente nas variáveis de saída (respostas). Ou seja, se as mesmas tendem a influenciar na resposta de maneira positiva ou negativa. Assim, foi possível ver que todas as variáveis e suas interações tem significância na resposta, porém a variável C (% sólidos) tem maior efeito e a interação entre ABC (Dosagem\*pH\*%sólidos) tem o menor efeito na resposta.

O gráfico Normal, ilustrado pela Figura 4.4, representa a influência, positiva ou negativa, dos fatores nas respostas. Foi possível observar que todas as variáveis, dosagem, pH e % sólidos, e suas interações influenciam significativamente na

turbidez. Porém a variável B (pH) é a que tem maior efeito positivo e a variável C (% sólidos) é a que tem maior efeito negativo na resposta.

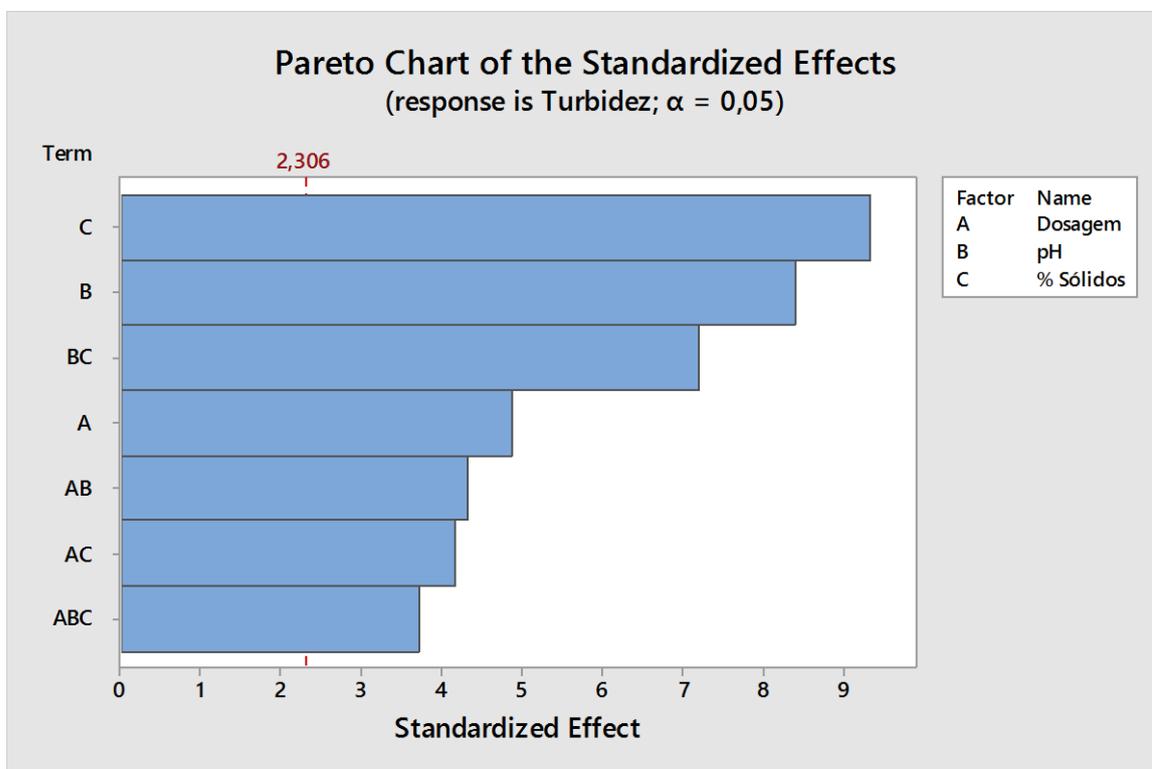


Figura 4.3 – Gráfico Pareto

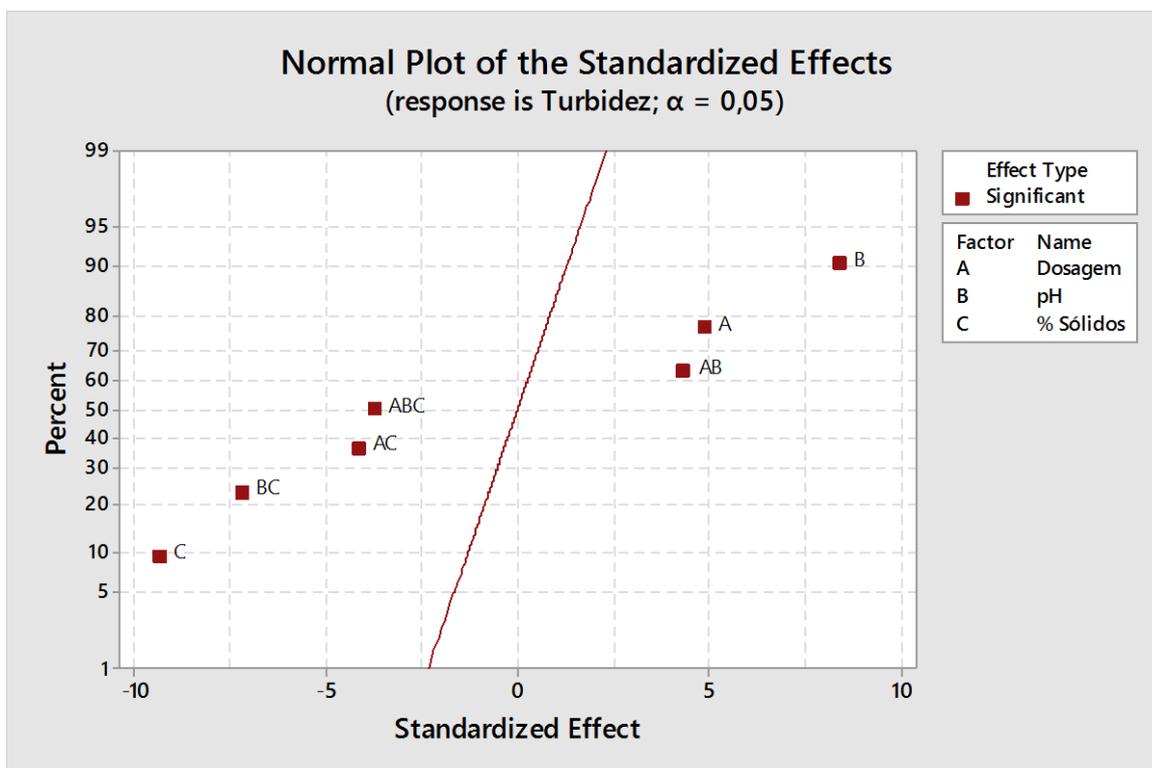


Figura 4.4 – Gráfico Normal.

Como o ideal para turbidez seria trabalhar com o menor valor, ou seja, menos partículas sólidas no líquido clarificado, podemos concluir que se trabalharmos com a variável C (% sólidos) no nível máximo e com a variável B (pH) no nível mínimo ocorre uma minimização da turbidez. Para que a minimização se torne mais eficiente é necessário que se trabalhe com a variável A (Dosagem) no nível mínimo.

Além da identificação das variáveis que influenciam no processo, foi gerada a equação de regressão em unidade codificada, Equação 4.1:

$$\begin{aligned}
 \text{Turbidez} = & 158,3 + 63,8 \text{ Dosagem} + 110,2 \text{ pH} - 122,2 \% \text{ Sólidos} \\
 & + 56,7 (\text{Dosagem} * \text{pH}) - 54,4 (\text{Dosagem} * \% \text{ Sólidos}) \\
 & - 94,3 (\text{pH} * \% \text{ Sólidos}) - 48,5 (\text{Dosagem} * \text{pH} * \% \text{ Sólidos})
 \end{aligned}$$

Eq. 4.1

Pela equação de regressão, Eq. 4.1, também é possível analisar se as variáveis influenciam positivamente ou negativamente na resposta. Na mesma observa-se que apenas a porcentagem de sólidos (% Sólidos) tem efeito negativo na turbidez, ou seja quando utilizada no seu nível máximo diminui o valor da turbidez. As demais variáveis, dosagem e pH, recomenda-se utilizar em níveis mínimos, assim o valor da turbidez diminui.

O modelo fatorial de dois níveis,  $2^k$ , se ajusta perfeitamente no experimento realizado, já que pelo seu coeficiente de correlação linear,  $R - sq = 97,25\%$ , apenas 2,75% das respostas não está explicado pelo modelo.

O *software* MiniTab 17 fornece a otimização do processo, indicando cada nível em que as variáveis devem estar para que a resposta seja ótima. Pela Figura 4.5, é possível analisar que o ideal seria trabalhar com a: dosagem no nível mínimo (15 g/t), pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível máximo (40% sólidos), gerando uma resposta, turbidez, de 18,925 FTU.

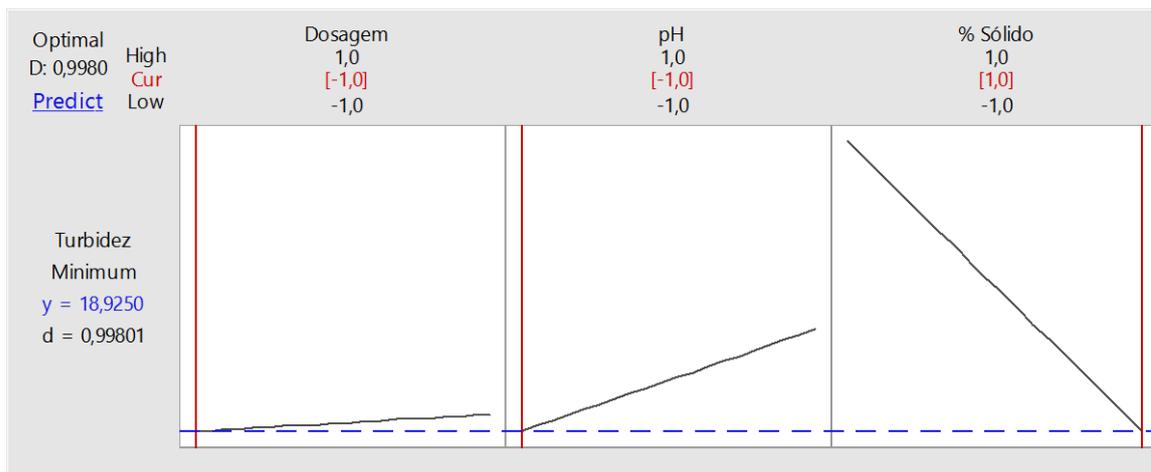


Figura 4.5 – Gráfico de Otimização.

#### 4.4.2 Velocidade de sedimentação

O gráfico de Pareto para a variável de saída, velocidade de sedimentação, mostra se as variáveis de entrada, dosagem; pH e porcentagem de sólidos, influenciam na mesma. Assim, a partir da Figura 4.6 foi possível ver que a variável C (% sólidos) tem maior efeito significativo na resposta ( $V_s$ ), seguidas pelas variáveis A (Dosagem) e B (pH). As interações AC (Dosagem\*%sólidos) e ABC (Dosagem\*pH\*%sólidos) não tem efeito significativo na resposta, já que estão à esquerda da linha limite, as interações BC (pH\*%sólidos) e AB (Dosagem\*pH) têm pequenos efeitos na resposta ( $V_s$ ), porém significativo.

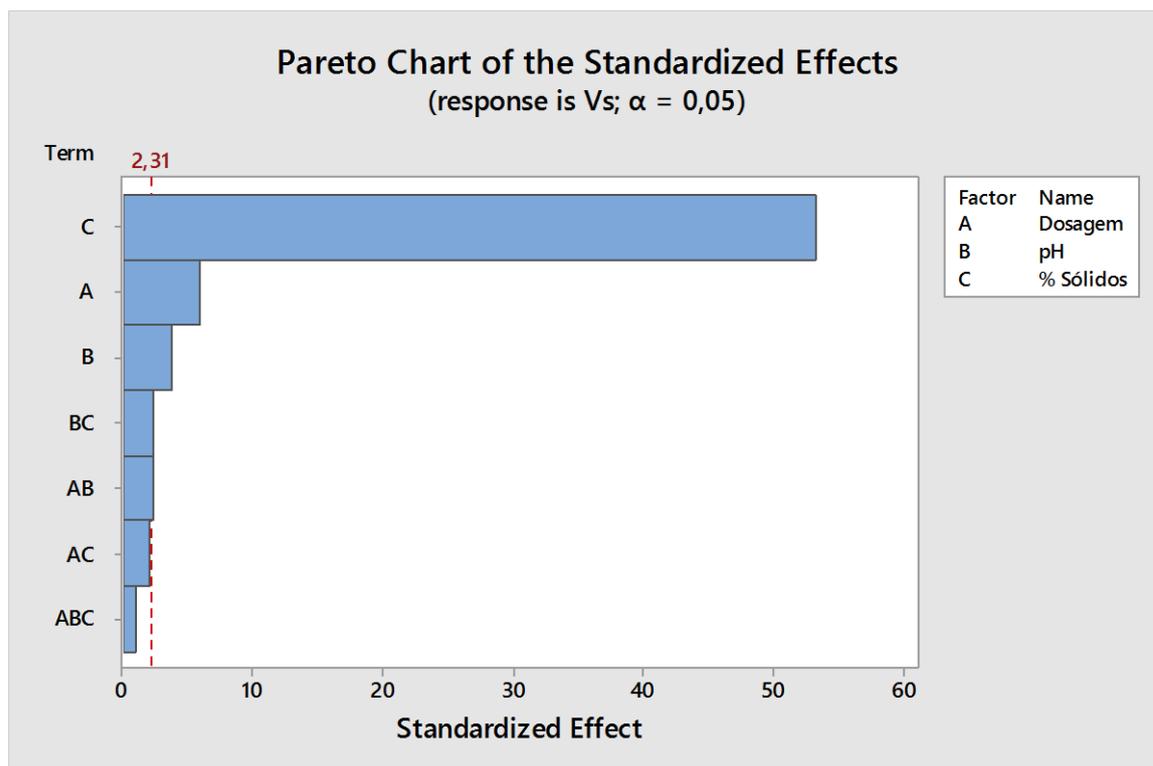


Figura 4.6 – Gráfico Pareto.

Pela Figura 4.7, foi possível observar que todas as variáveis isoladas, dosagem, pH e % sólidos, influenciam significativamente na resposta, velocidade de sedimentação ( $V_s$ ), e apenas a interação da dosagem com pH (BC) tem influência. Porém a variável A (Dosagem) é a que tem maior efeito positivo e a variável C (% sólidos) é a que tem maior efeito negativo na resposta. O que era esperado uma vez que um aumento da dosagem de flocculantes proporciona formação de mais flocos e, conseqüentemente, um aumento da velocidade de sedimentação. Já com o aumento da porcentagem de sólidos, mais partículas estão presentes na polpa, o que causa uma sedimentação retardada, uma partícula interfere na sedimentação das vizinhas.

Como o ideal para velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) é se trabalhar com o maior valor, ou seja, mais rápido as partículas vão sedimentar, podemos concluir que se trabalharmos com a variável C (% sólidos) no nível mínimo e com a variável A (Dosagem) no nível máximo ocorre uma maximização da velocidade de sedimentação ( $V_s$ ), para que a maximização se torne mais eficiente é necessário que se trabalhe com a variável B (pH) no nível máximo.

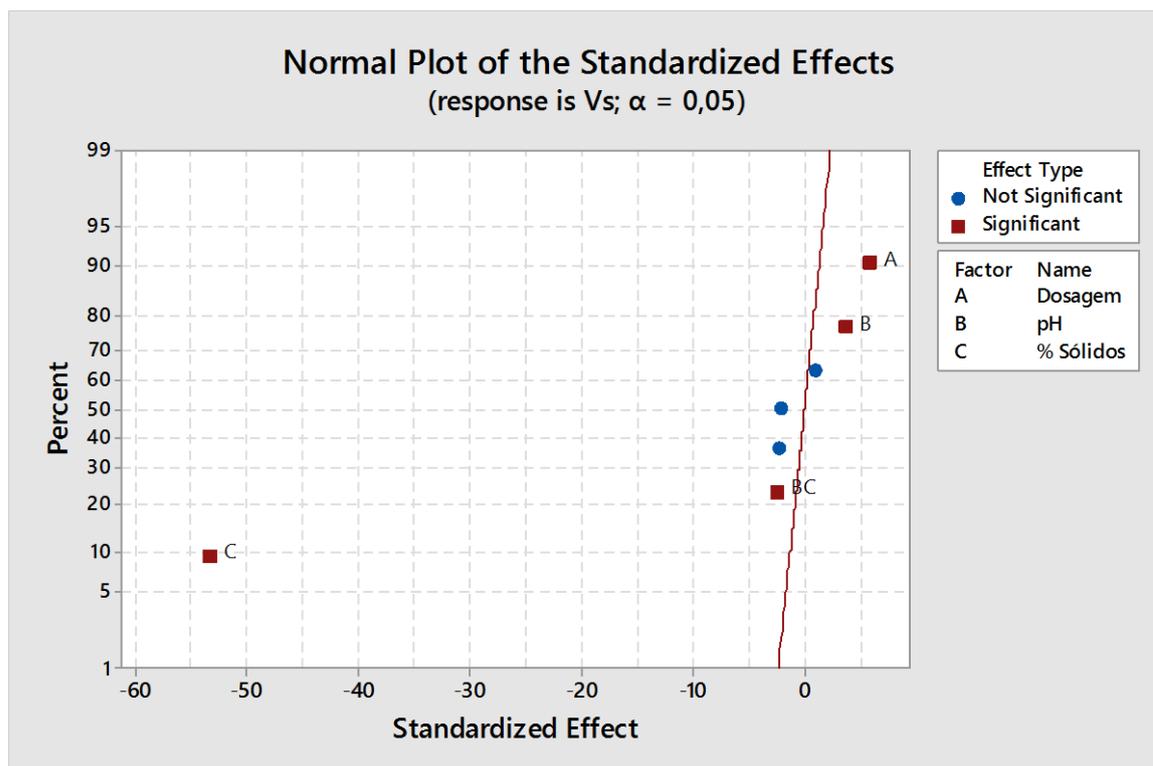


Figura 4.7 – Gráfico Normal.

Além da identificação das variáveis que influenciam no processo, foi gerada a equação de regressão em unidade codificada, Equação 4.2:

$$\begin{aligned}
 V_s = & 1,0994 + 0,0631 \text{ Dosagem} + 0,0394 \text{ pH} - 0,5706 \text{ \% Sólidos} \\
 & - 0,0244 (\text{Dosagem} * \text{pH}) - 0,0219 (\text{Dosagem} * \text{\% Sólidos}) \\
 & - 0,0256 (\text{pH} * \text{\% Sólidos}) + 0,0106 (\text{Dosagem} * \text{pH} * \text{\% Sólidos})
 \end{aligned}$$

Eq. 4.2

Pela equação de regressão, Eq. 4.2, também é possível analisar se as variáveis influenciam positivamente ou negativamente na resposta. Na mesma observa-se que apenas a porcentagem de sólidos (% Sólidos) tem efeito negativo na velocidade de sedimentação ( $V_s$ ), ou seja quando utilizada no seu nível máximo diminui o valor da velocidade de sedimentação, como discutido anteriormente. As demais variáveis, dosagem e pH, recomenda-se utilizar em níveis máximos, assim o valor da velocidade de sedimentação aumenta.

O modelo fatorial de dois níveis,  $2^k$ , se ajusta perfeitamente no experimento realizado, já que pelo seu coeficiente de correlação linear,  $R - sq = 99,73\%$ , apenas 0,27% das respostas não estão explicadas pelo modelo.

O programa estatístico MiniTab 17 fornece a otimização do processo, indicando cada nível em que as variáveis devem estar para que a resposta seja ótima. Pela Figura 4.8, é possível analisar que o ideal é trabalhar com a: dosagem no nível máximo (30 g/t), pH no nível máximo (aprox. pH 6,5) e a porcentagem de sólidos no nível mínimo (25% sólidos), gerando uma resposta, velocidade de sedimentação ( $V_s$ ), de 1,7850 m/h.

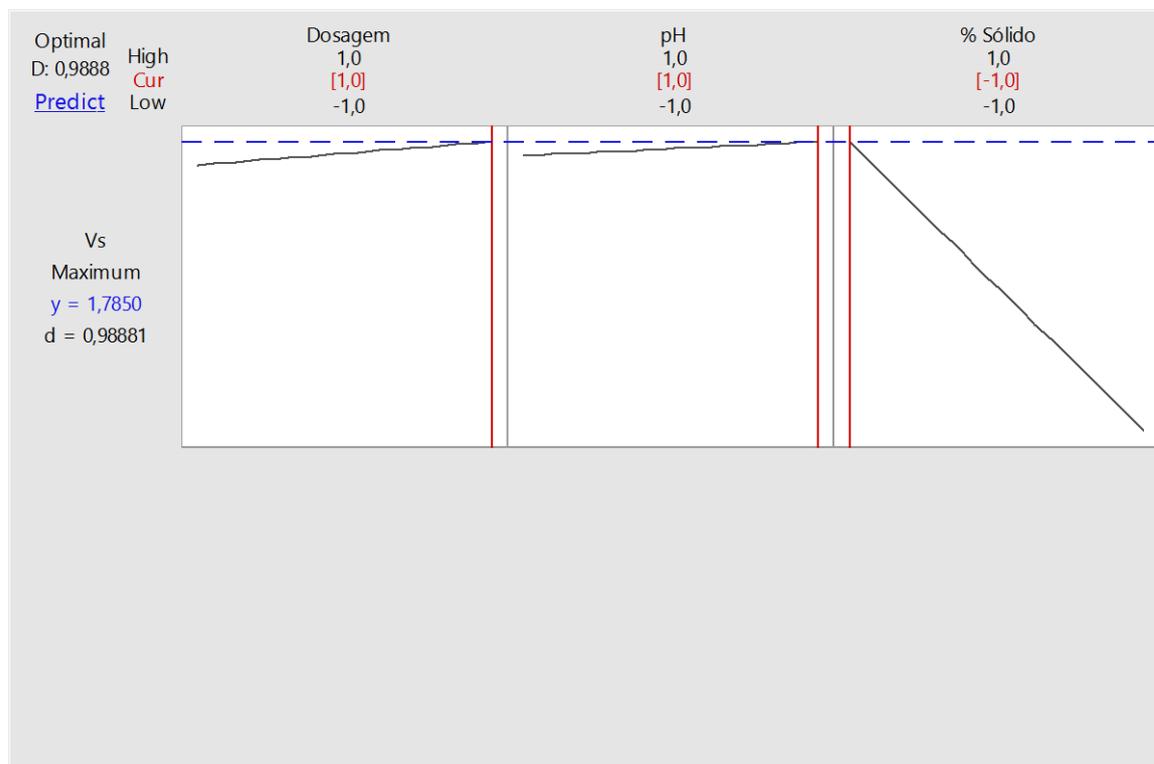


Figura 4.8 – Gráfico de Otimização.

#### 4.4.3 Turbidez e Velocidade de Sedimentação

O principal objetivo deste trabalho é otimizar o processo como um todo, com isso o ideal é analisar as duas respostas simultaneamente, ou seja, minimizar a turbidez e maximizar a velocidade de sedimentação ao mesmo tempo. A Figura 4.9, representa a otimização em conjunto feita pelo programa MiniTab 17.

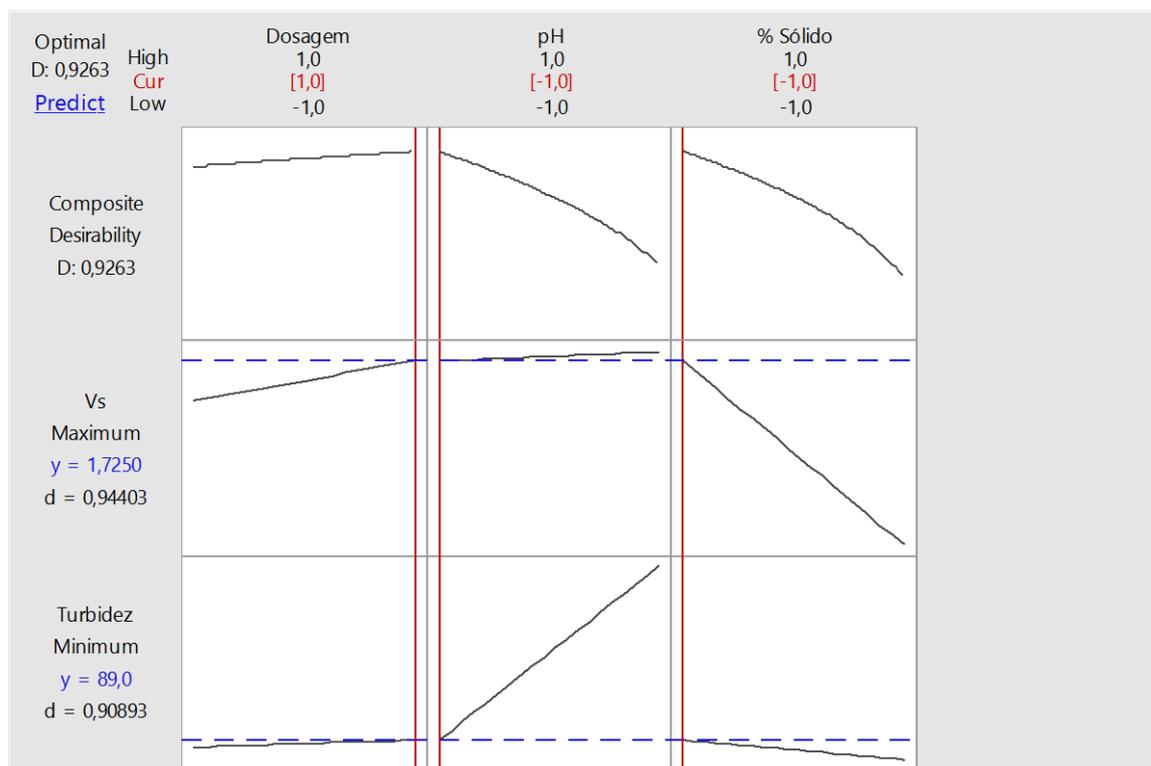


Figura 4.9 – Gráfico de Otimização.

Analisando a Figura 4.8, pode-se perceber que os níveis ótimos para as variáveis quando analisa-se as duas respostas simultaneamente é diferente dos níveis ótimos para as variáveis quando analisa-se cada resposta separadamente.

A Figura 4.9, fornece uma otimização do processo como um todo, assim é possível analisar que o ideal é trabalhar com a: dosagem no nível máximo (30 g/t), pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível mínimo (25% sólidos). Gerando valores ótimos de respostas: turbidez de 89 FTU e velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) de 1,725 m/h.

O teste 2 e sua réplica (R2) se encaixam perfeitamente nos níveis ótimos para as variáveis dosagem, pH e porcentagem de sólidos. Porém o que mais se assemelha quando levado em consideração as variáveis e as respostas ótimas obtidas é o teste réplica 2 (R2), já que o mesmo apresenta dosagem no nível máximo (30 g/t), pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível mínimo (25% sólidos), gerando respostas de turbidez e velocidade de sedimentação de 61 FTU e 1,78 m/h, respectivamente. A maior mudança está relacionada a faixa de pH que é trabalhado na empresa com valor de aproximadamente 7 e, a partir da análise estatística, foi analisado como ideal pH 5. Essa queda no valor de pH, provavelmente, está ligada a

aproximação do ponto isoelétrico das espécies contidas no rejeito o que favorece a aglomeração das partículas. A Figura 4.10 apresenta a situação final do teste réplica 2 (R2).

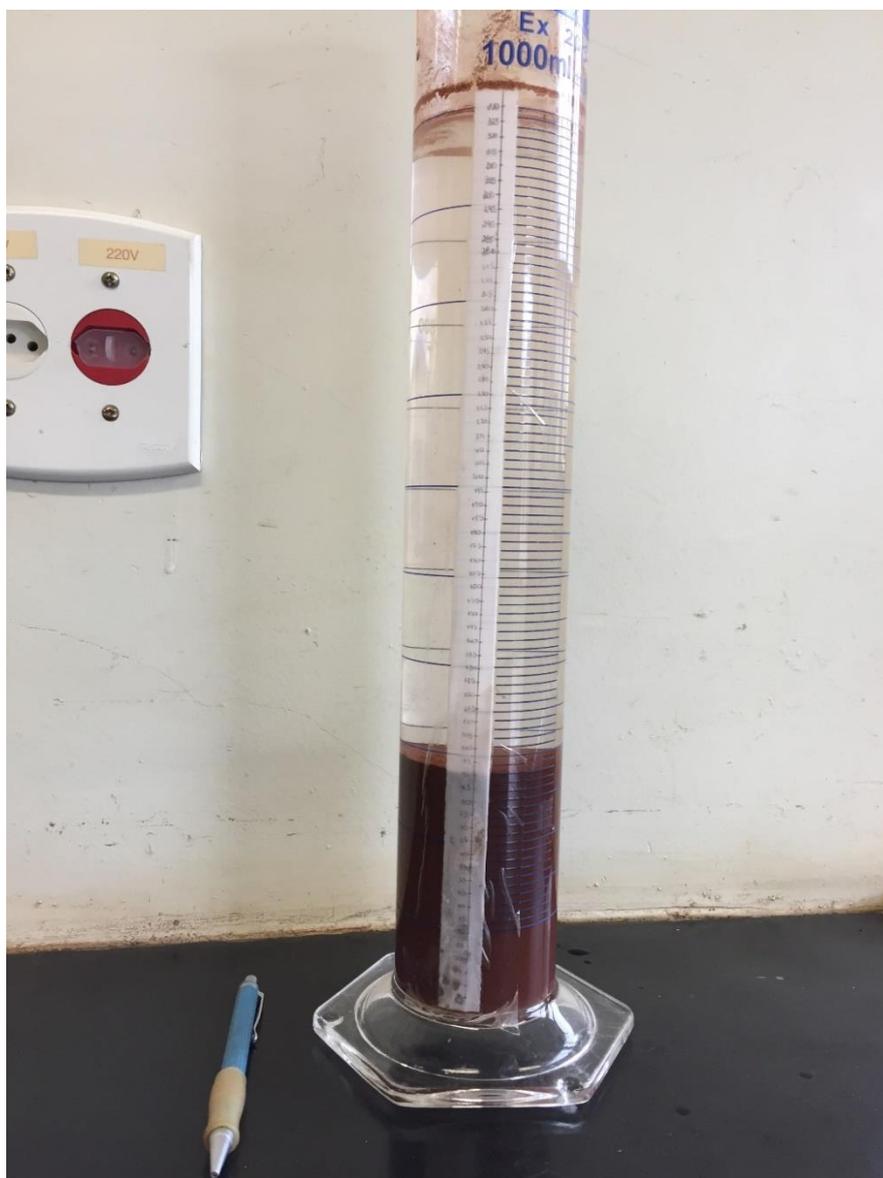


Figura 4.10: Representação do teste réplica 2 (R2).

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado tinha como objetivo obter a otimização dos parâmetros operacionais, dosagem de floculante, pH da polpa e porcentagem de sólidos, em teste de sedimentação, tendo em vista atingir um espessado com 60% de sólidos. O espessado de rejeito gerado influencia diretamente na disposição do mesmo, alocar o rejeito de forma incorreta pode gerar vários impactos ambientais e econômicos, assim quanto maior a porcentagem de sólidos no espessado mais descomplicado será a sua disposição, em relação a área e fatores de segurança. Outro fator em que a porcentagem de sólidos do espessado interfere é a turbidez, já que quanto maior a porcentagem de sólidos no espessado menos partículas solidas estarão no líquido clarificado, garantindo assim uma menor turbidez e por consequência esse líquido clarificado pode ser facilmente recirculado.

Segundo a CONAMA 357/2005, para que os índices de turbidez respeitem a resolução ambiental os valores devem ser abaixo de 40 FTU para que os fluidos possam ser lançado em afluentes. Nos testes 5, 6 e 7, e em suas réplicas, os valores de turbidez obedeceram os limites da especificação, os mesmos foram realizados com 40% de sólidos. O menor valor aferido para turbidez foi encontrado no teste 6, 17,36 FTU, o mesmo foi realizado com uma dosagem de floculante de 30 g/t, pH 5 e 40% de sólidos.

Segundo o modelo de Mishler, para que o espessado atingisse uma porcentagem de sólidos de 60% era necessário uma velocidade de sedimentação de 1,69 m/h. Nos testes 2, 3 e 4 e, a velocidade de sedimentação foi maior que 1,69 m/h, todos foram realizados com 25% de sólidos. A maior velocidade de sedimentação calculada foi encontrada no teste 4, 1,80 m/h, o mesmo foi realizado com uma dosagem de 30 g/t, pH natural (~6,5) e 25% sólidos.

Através da análise estatística realizada no *software* Minitab 17 foi possível observar que todas as variáveis influenciam na turbidez e na velocidade de sedimentação. Assim os valores ótimos para as respostas obtidos, minimizando a turbidez e maximizando a velocidade de sedimentação simultaneamente, foram de 89 FTU e 1,72 m/h, respectivamente. Para isso o ideal é que se trabalhe com a dosagem no nível máximo (30 g/t), pH no nível mínimo (pH 5) e a porcentagem de sólidos no nível mínimo (25% sólidos). O teste 2 se encaixa perfeitamente nos níveis ótimos para

as variáveis e valores ótimos para as respostas, turbidez (61 FTU) e velocidade de sedimentação (1,78 m/h). Segundo o modelo de Mishler, a porcentagem de sólidos do espessado do testes 2 é de 63,42%, considerando o espessador e dados operacionais da empresa.

Assim, os resultados encontrados, para as variáveis operacionais, apresentam sucintas mudanças em relação à operação da empresa Minerita, já que a porcentagem de sólidos ideal é a mesma da utilizada na empresa e a dosagem utilizada é de 35 g/t sendo que o ideal seria de 30 g/t, a mudança mais brusca está relacionada a faixa de pH que é trabalhado na empresa com valor de aproximadamente 7 e, a partir da análise estatística, foi analisado como ideal pH 5.

## **6 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO**

Dentre as possibilidades de realização de trabalhos futuros destacam-se as seguintes linhas de pesquisa:

- Testar outros tipos de floculantes para o espessamento do rejeito do minério de ferro de Itatiaiuçu/MG;
- Avaliar misturas de coagulantes e floculantes para melhorar o desempenho do espessamento.
- Viabilização econômica das mudanças sugeridas.

## REFERÊNCIAS

BARREDA, R.H.O. **Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral**. 2008. 150 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BIZZI L. A., SCHOBENHAUS C., VIDOTTI R. M., GONÇALVES J. H. (Ed). 2003. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil – Texto, mapas e SIG**. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 674 p. In SANTOS, R. G. **Concentração via flotação reversa do minério de ferro do depósito Jambreiro, Guanhães**. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

BRAGANÇA, A. C. C. R. **Avaliação de reagentes alternativos para substituição de cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro**. 2008. 102 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

BRASIL, J. L.; VAGHETTI, J. C. P.; SANTOS JR, B. R. A.; SIMON, N. M.; PAVAN, F. A.; DIAS, S. L. P.; LIMA, E. C. **Planejamento estatístico de experimentos como uma ferramenta para otimização das condições de bio-sorção de Cu(II) em batelada utilizando-se casca de nozes pecã como bio-sorvente**. Química Nova, v.30, n.3, p.548-553, 2007.

CARVALHO P. S. L.; SILVA M. M.; ROCIO M. A. R.; MOSZKOWICZ J. 2014. **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro. p. 197-234.

CERCEAU, L. **Informação pessoal**. Mensagem recebida por <larissalopeslp@hotmail.com> em 09 de maio. 2017.

CHAVES, A.P.; OLIVEIRA, A.H.; CORDEIRO, A.C.; CHIAPPA, R. **Espessamento**. In: CHAVES, A.P. Desaguamento, Espessamento e Filtragem. 4ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2013. v. 2. Cap. 2. p. 54-158.

DEVANEY, F.D., **Introduction – SME Mineral Process Handbook**, 1985. In SOUZA, N. A. F. de. **Análise Crítica de Rotas de Processamento de Minérios de Ferro**. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

DNPM (2011). Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia. Ferro/Aço. 99-116 pp.

FRANÇA, S. C. A; MASSARANI, G. Separação Sólido- Líquido. In: FRANÇA, S. C. A; MASSARANI, G. **Tratamento de Minérios**. 4ª edição. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. Cap. 14. P-573-609.

FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, R.G. Ensaio 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.

GADELHA, T. S.; ANDRADE, L. S.; FRANÇA, S. C. A. **Desempenho de flocculantes no desaguamento de polpas de minério de níquel**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 26, 2015, Poços de Caldas. Anais. Poços de Caldas: CETEM/MCT, 2015. p. 398-406.

GONÇALVES, T. C. **Avaliação da dosagem de coletor na flotação do minério fosfático de Tapira/MG utilizando o planejamento fatorial**. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

GUIMARÃES, F. A. V. **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais**. 2010. 221 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

IBRAM (2011). **Informações e análises da economia mineral brasileira**, 6ª edição. Instituto Brasileiro de Mineração, disponível em <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>. Acessado em 01 de Maio de 2017.

LARA, A. F. M. **Espessamento e Transporte de Pasta Mineral**. 2011. 66 p. (Monografia, Especialização, Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LINS, F.F.; ADAMIAN, R. Minerais Coloidais, Teoria DLVO Estendida e Forças Estruturais. In: Série Tecnologia Mineral. 29 p. 2000.

LUZ, A.B. da; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. de M.; ALMEIDA, S. L. M. de; **Tratamento de Minérios**. 3 ed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2002.

MACHADO, L. R. G. **Avaliação do efeito das variáveis operacionais na sedimentação de rejeito fosfático**. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

MAIA, E.S. **Pelotização e Redução de Concentrado Magnetítico**. 2011. 144 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

MELO JÚNIOR, A. S. **Análise quantitativa do material particulado na região de campinas através das técnicas de microfluorescência de raios-X e reflexão total usando radiação síncrotron**. Tese (Doutorado em Química) - Unicamp, Campinas, São Paulo, 2007.

NETO, B. D. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4 ed. ARTMED, 2010. 413p.

NETO, M. C. R. de. **Estudo de pastas minerais a partir do espessamento de lammas de processamento fosfático**. 2016. 122 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

NEVES, C. F. C., SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; JORDÃO, E. **Variables search technique applied to gas separation**. Química Nova. v.25, n 2, p.327-329, 2002.

NUNES, A. S. **Espessamento de polpas minerais contendo elevado teor de finos**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 24, 2011, Salvador. Anais. Salvador: CETEM/MCT, 2011. p. 756-763.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas; princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224p.

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

OLIVEIRA, M. S.; **Apostila de Prática Experimental de Tratamento de Minérios - CEFET-MG**. Araxá, 2015.

OLIVEIRA, M. S.; SOUZA, M. D. de. **Tratamento de Minérios**. Araxá: [s.n.], 2008. 219 p.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. 93 p. Dissertação (Mestrado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

PIMENTA, L. L. **Metodologia alternativa de otimização das variáveis operacionais em testes de sedimentação para rejeito fosfático**. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2015.

PINTO, T. C. S. **Aplicações de Técnicas Clássicas para Polpas não Floculadas de Dimensionamento de Espessadores Aplicadas a Suspensões de Salmoura e Lodo Biológico**. 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado, Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

PHILIPPI, C.T. **Avaliação de um sistema de reuso de água: o caso de um parque temático**. 2006. 67 p. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública. Universidade de São Paulo. São Paulo.

SANTOS, R. G. **Concentração via flotação reversa do minério de ferro do depósito Jambreiro, Guanhães**. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

SILVESTRE, M. O. **Estudo do estado de dispersão das partículas em polpa de minério sulfetado de chumbo-zinco**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SOUSA, P. A. **Espessamento de polpas**. 2012. 49 p. (Monografia, Especialização, Engenharia de Recursos Minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SOUZA, N. A. F. de. **Análise Crítica de Rotas de Processamento de Minérios de Ferro**. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VALADÃO, G. E. S. **Apostila de Separação Sólido Líquido**. DEMIN- Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. de. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012. 234 p.

VASCONCELOS, J. A. **Rotas De Processo Para Concentração De Rochas Itabiríticas Da Mina Lagoa Das Flores, Itatiaiuçu, Mg**. 2011. 204 p. Dissertação (Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

VIEIRA, B. A. **Concentração via jigagem do minério de ferro do depósito Jambreiro, Guanhães**. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2016.

## ANEXO A – VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO

Nas curvas de sedimentação é possível verificar uma velocidade de sedimentação maior no início do teste, seguido por um período de transição, até a estabilização da altura da interface no final do teste. Assim é possível identificar as três seções do gráfico: a de velocidade constante, seção de transição e seção de queda de velocidade (compressão). Estas seções estão divididas de acordo com a figura a seguir.

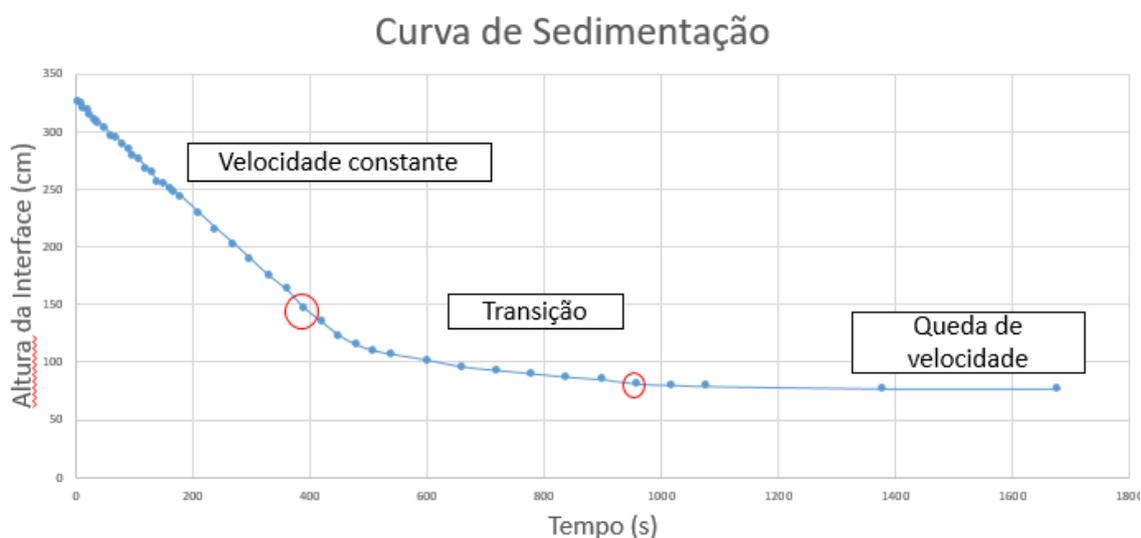


Figura A1: Curva de sedimentação.

A velocidade de sedimentação ( $V_s$ ) é calculada a partir da equação a seguir.

$$v_s = \frac{\Delta H}{\Delta t}$$

Assim, a partir das curvas de sedimentação é necessário encontrar o ponto de compressão, ou seja, quando começa a seção de transição, para que a diferença de altura seja calculada. A diferença do tempo se dá no tempo em que acontece o ponto de compressão.

## APÊNDICE A – CURVAS DE SEDIMENTAÇÃO

### Testes Preliminares

#### Teste 1

%Sólidos = 25%    Dosagem=30g/t    pH natural	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,925 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 17,85 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 874,65 \text{ g}$

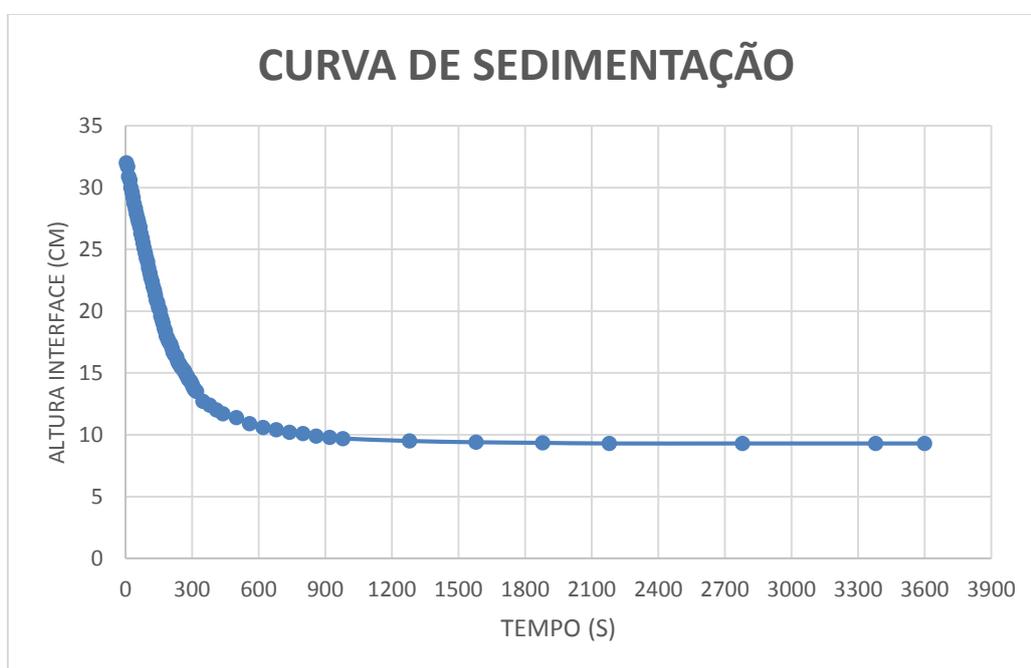


Gráfico A1: Curva de sedimentação teste preliminar 1.

#### Teste 2

%Sólidos = 25%    Dosagem=35g/t    pH natural	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 0,010413 \text{ g}$
$V_{sol} = 20,83 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 871,67 \text{ g}$

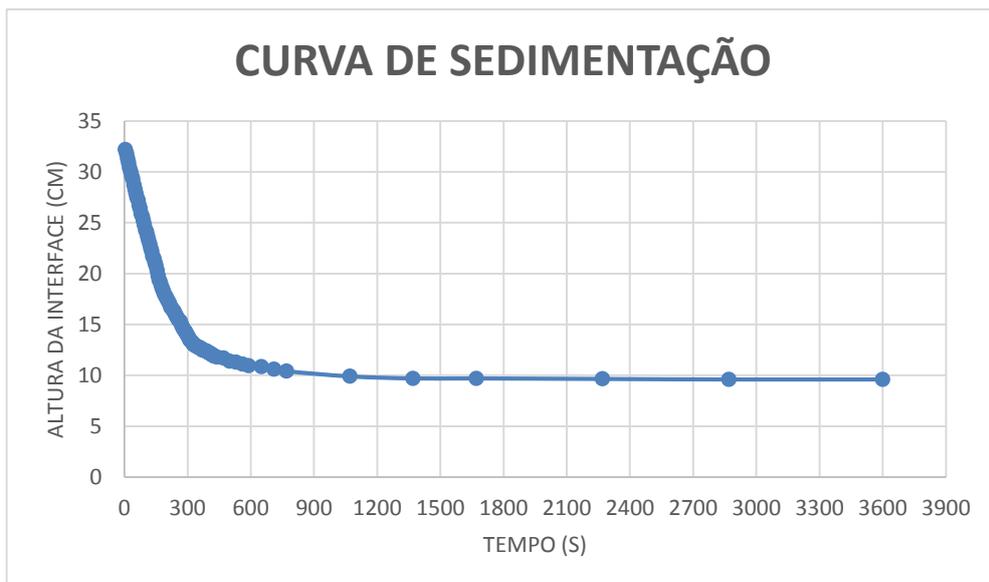


Gráfico A2: Curva de sedimentação teste preliminar 2.

## Teste 3

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem=30g/t    pH natural</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 0,01608 \text{ g}$
$V_{sol} = 32,16 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 771,84 \text{ g}$

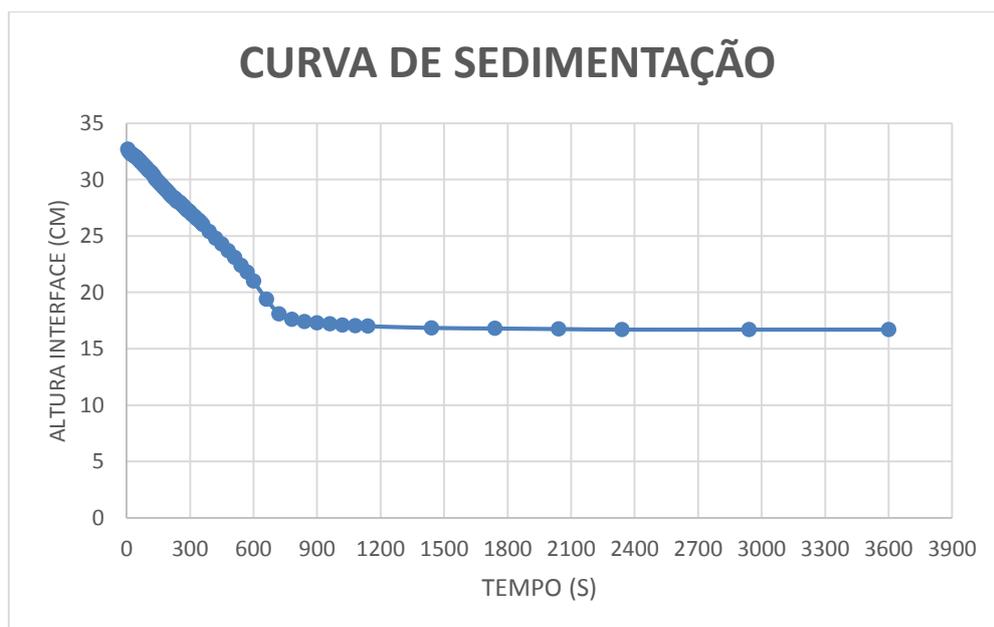


Gráfico A3: Curva de sedimentação teste preliminar 3.

## Teste 4

%Sólidos = 25%    Dosagem=30g/t    pH 5	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,925 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 17,85 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 874,65 \text{ g}$

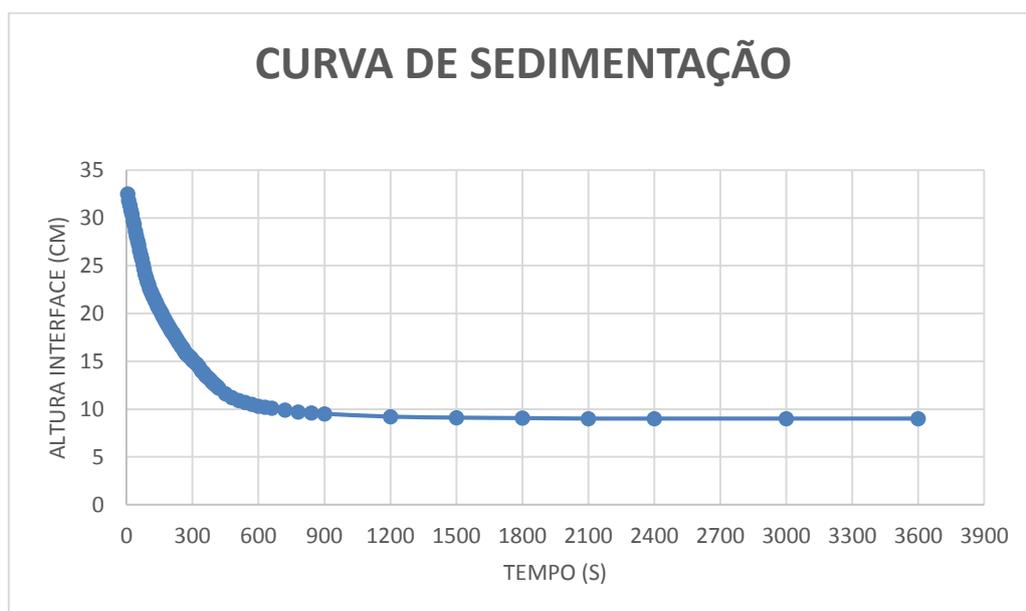


Gráfico A4: Curva de sedimentação teste preliminar 4

## Teste 5

%Sólidos = 25%    Dosagem=20g/t    pH natural	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 5,95 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 11,9 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 880,6 \text{ g}$

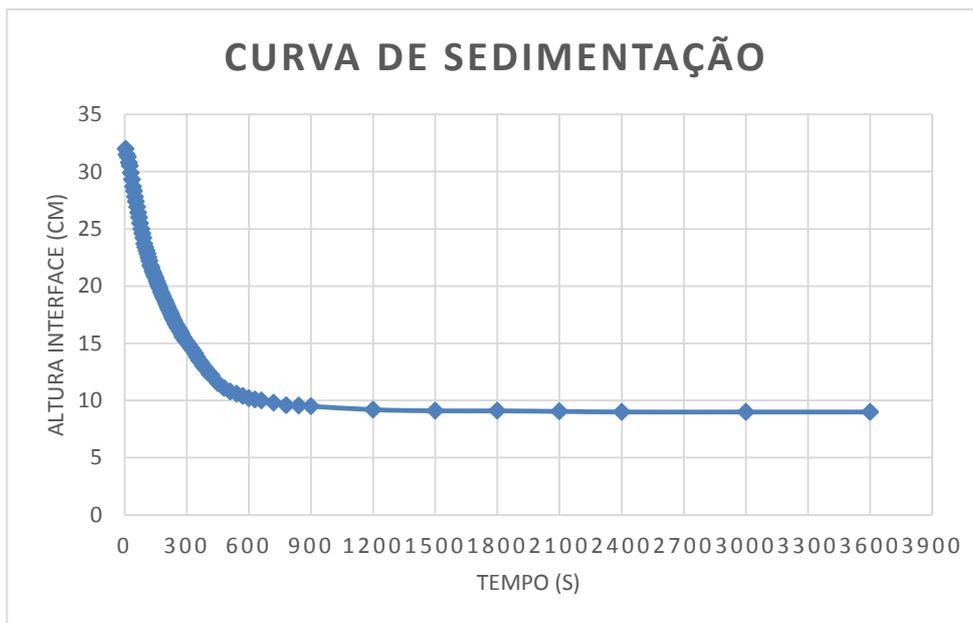


Gráfico A5: Curva de sedimentação teste preliminar 5.

## Testes Oficiais

### Teste 1

<b>%Sólidos = 25%    Dosagem=15 g/t    pH 5,04</b>	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 4,4625 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 8,925 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 883,575 \text{ g}$

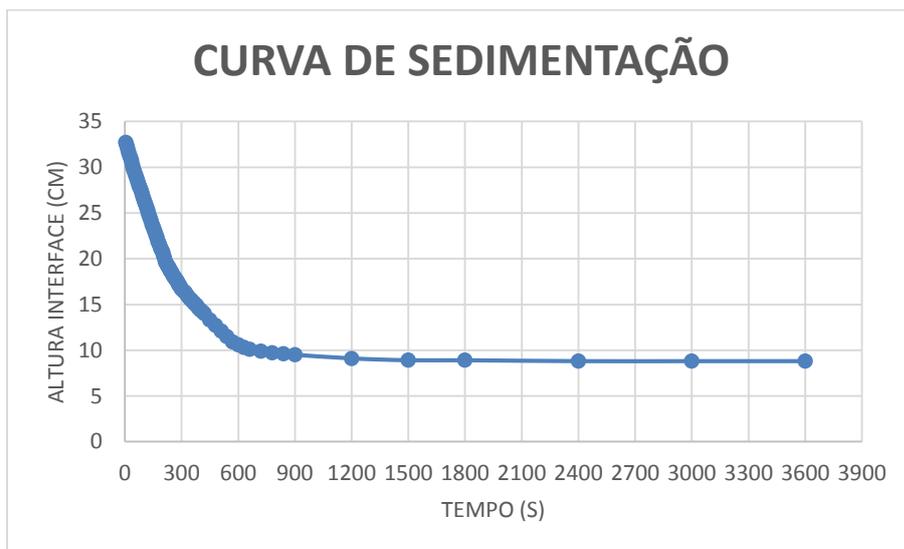


Gráfico A6: Curva de sedimentação teste 1.

### Réplica 1

<b>%Sólidos = 25%    Dosagem=15 g/t    pH 5,14</b>	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 4,4625 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 8,925 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 883,575 \text{ g}$

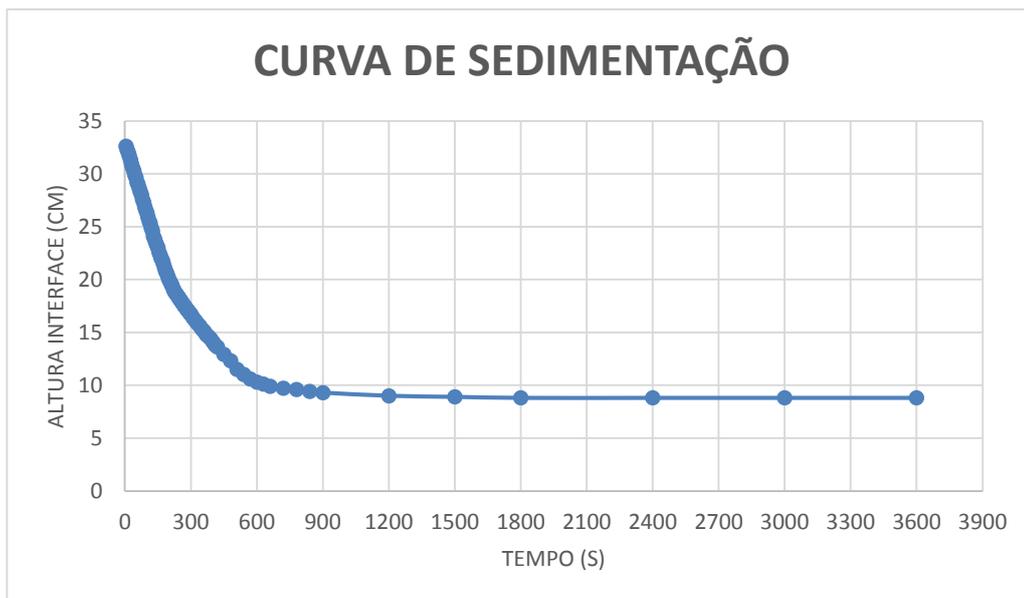


Gráfico A7: Curva de sedimentação teste réplica 1.

## Teste 2

<b>%Sólidos = 25%    Dosagem=30g/t    pH 5,12</b>	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,925 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 17,85 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 874,65 \text{ g}$

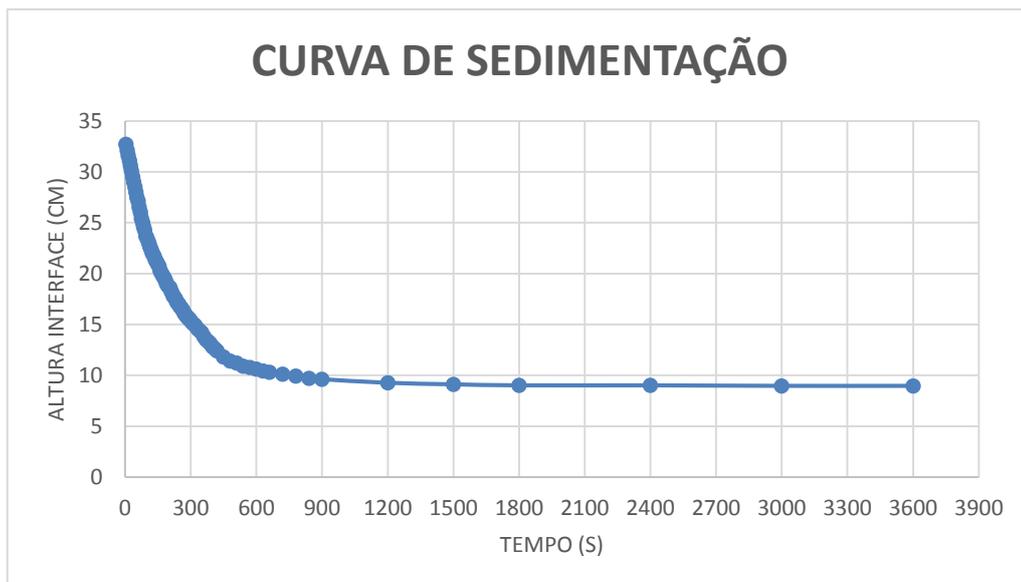


Gráfico A8: Curva de sedimentação teste 2

Réplica 2

<b>%Sólidos = 25%    Dosagem=30g/t    pH 5,14</b>	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,925 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 17,85 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 874,65 \text{ g}$

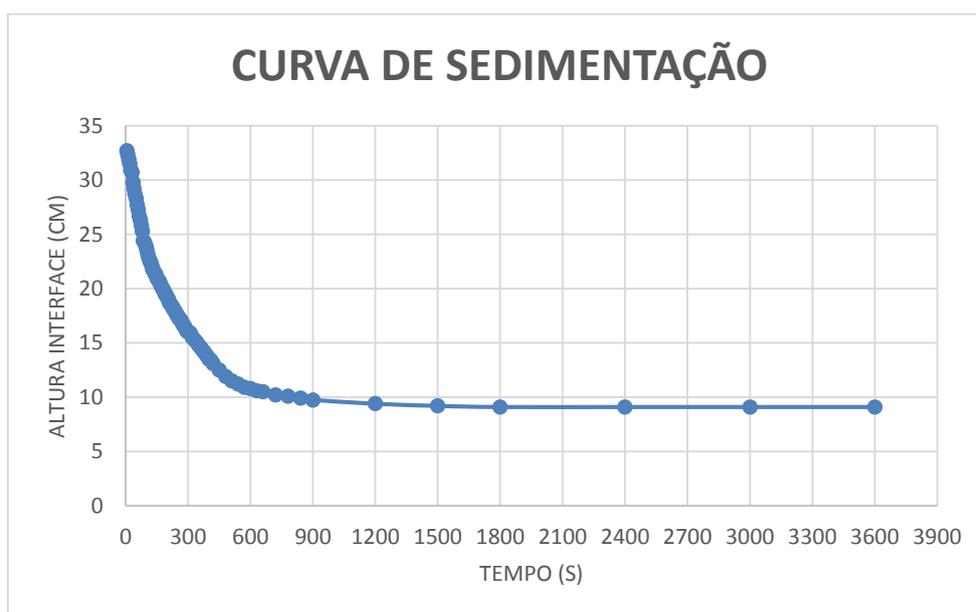


Gráfico A9: Curva de sedimentação teste réplica 2.

## Teste 3

%Sólidos = 25%    Dosagem= 15 g/t    pH 6,45	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 4,4625 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 8,925 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 883,575 \text{ g}$

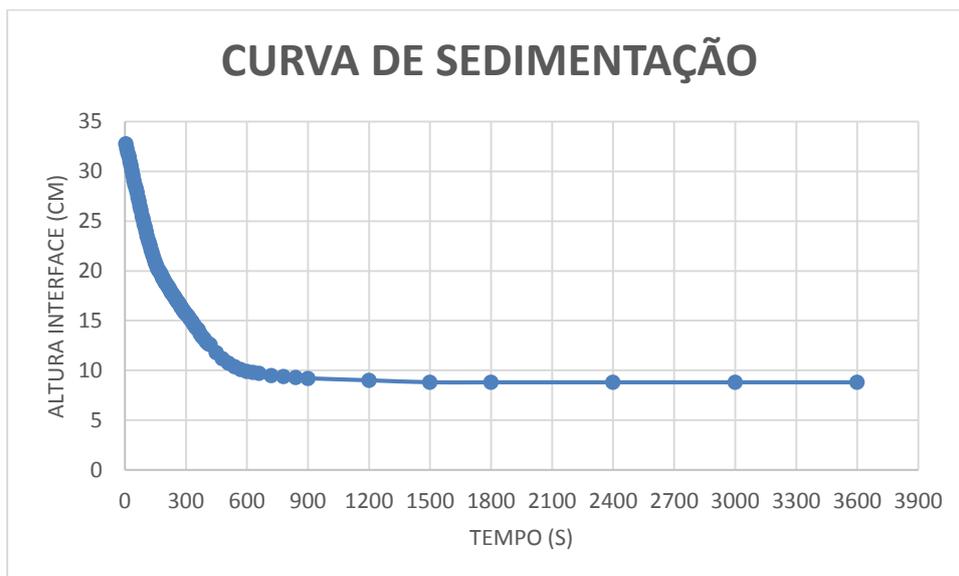


Gráfico A10: Curva de sedimentação teste 3.

## Réplica 3

%Sólidos = 25%    Dosagem= 15 g/t    pH 6,43	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 4,4625 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 8,925 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 883,575 \text{ g}$

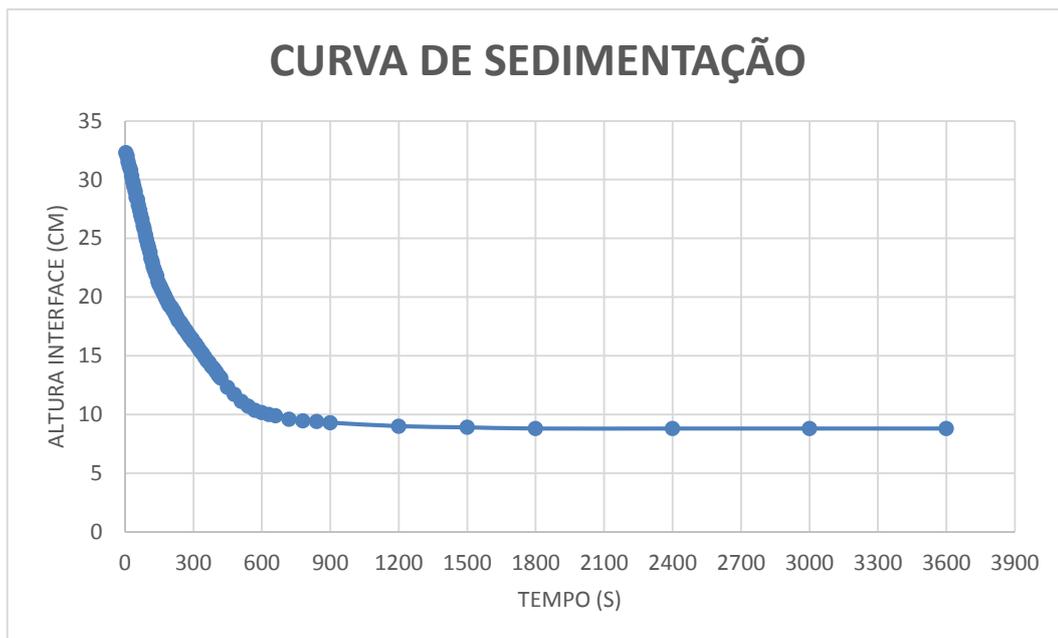


Gráfico A11: Curva de sedimentação teste réplica 3.

## Teste 4

%Sólidos = 25%    Dosagem=30g/t    pH 6,44	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,925 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 17,85 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 874,65 \text{ g}$

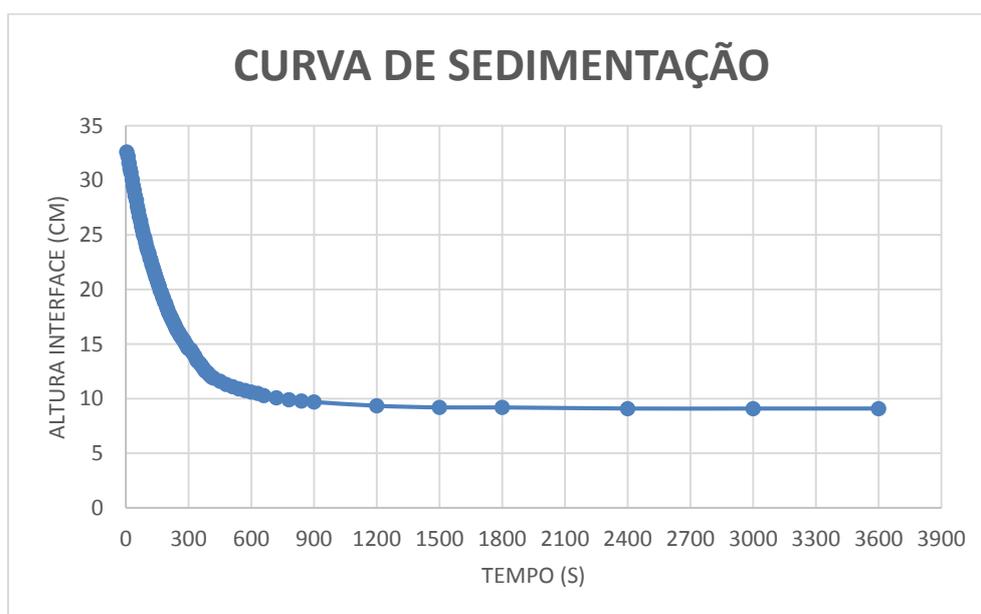


Gráfico A12: Curva de sedimentação teste 4.

## Réplica 4

<b>%Sólidos = 25%    Dosagem=30g/t    pH 6,44</b>	
$M_s = 297,5 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,925 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 17,85 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 874,65 \text{ g}$

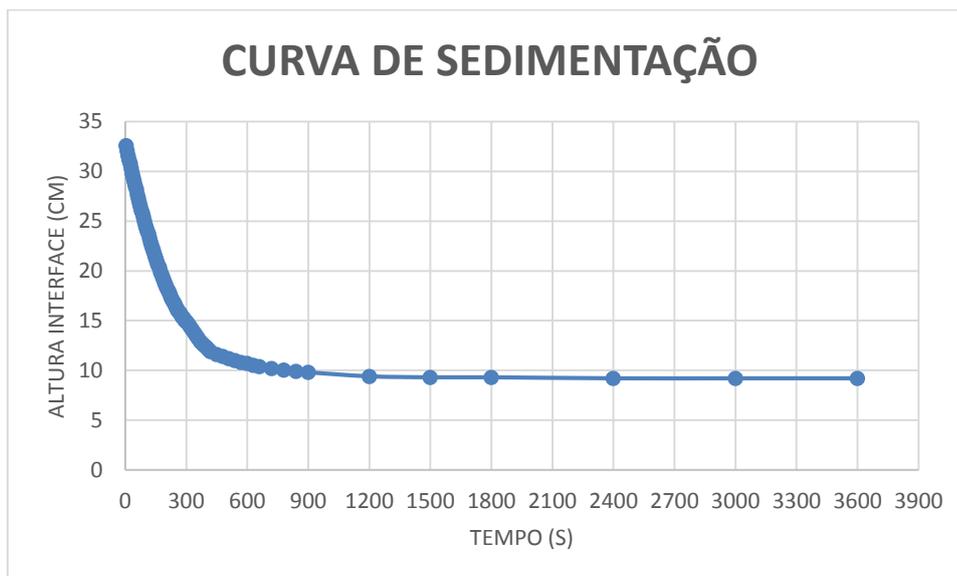


Gráfico A13: Curva de sedimentação teste réplica 4.

## Teste 5

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem= 15 g/t    pH 5,05</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,04 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 16,08 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 787,92 \text{ g}$

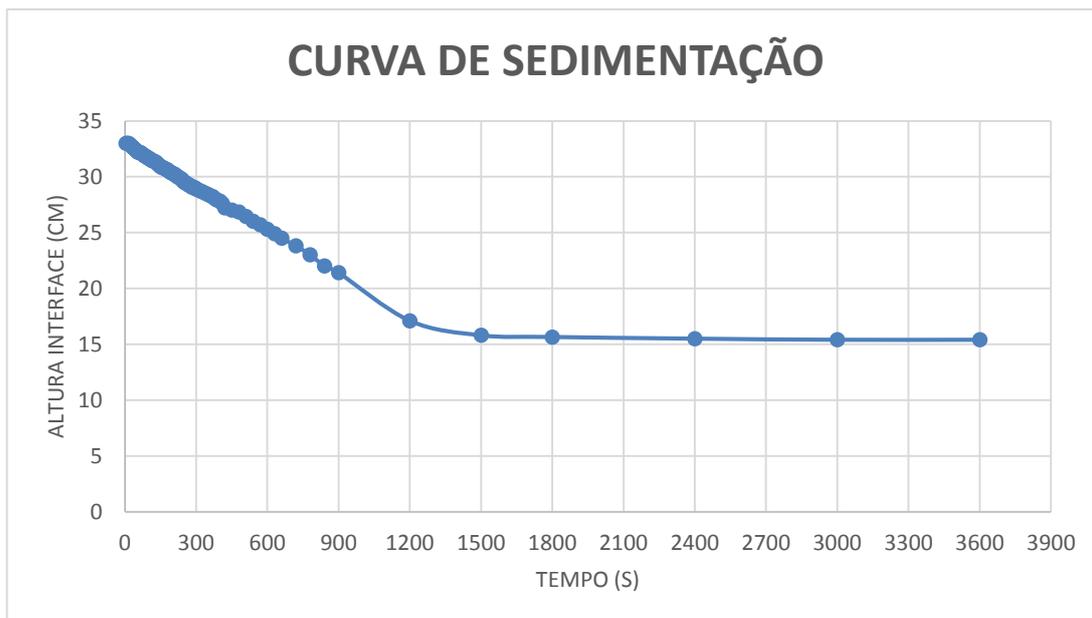


Gráfico A14: Curva de sedimentação teste 5.

## Réplica 5

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem= 15 g/t    pH 5,10</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,04 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 16,08 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 787,92 \text{ g}$

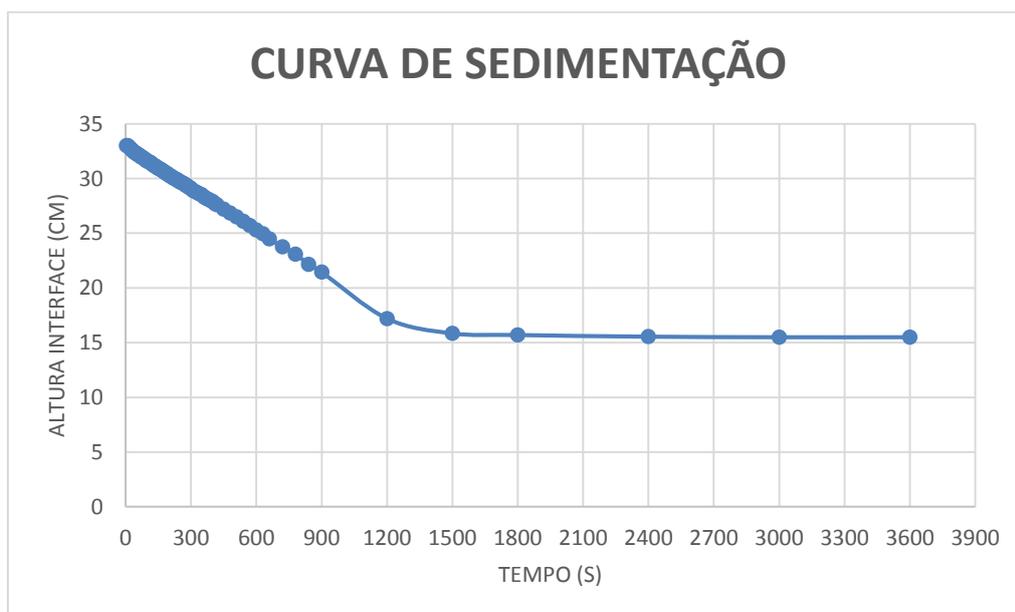


Gráfico A15: Curva de sedimentação teste réplica 5.

## Teste 6

%Sólidos = 40%    Dosagem= 30 g/t    pH 5,01	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 0,01608 \text{ g}$
$V_{sol} = 32,16 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 771,84 \text{ g}$

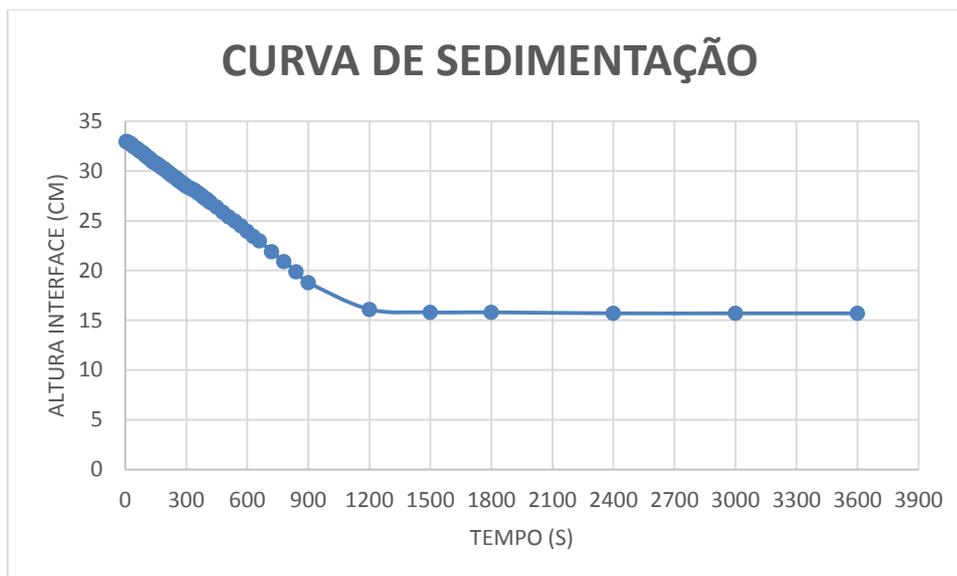


Gráfico A16: Curva de sedimentação teste 6.

## Réplica 6

%Sólidos = 40%    Dosagem= 30 g/t    pH 5,02	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 0,01608 \text{ g}$
$V_{sol} = 32,16 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 771,84 \text{ g}$

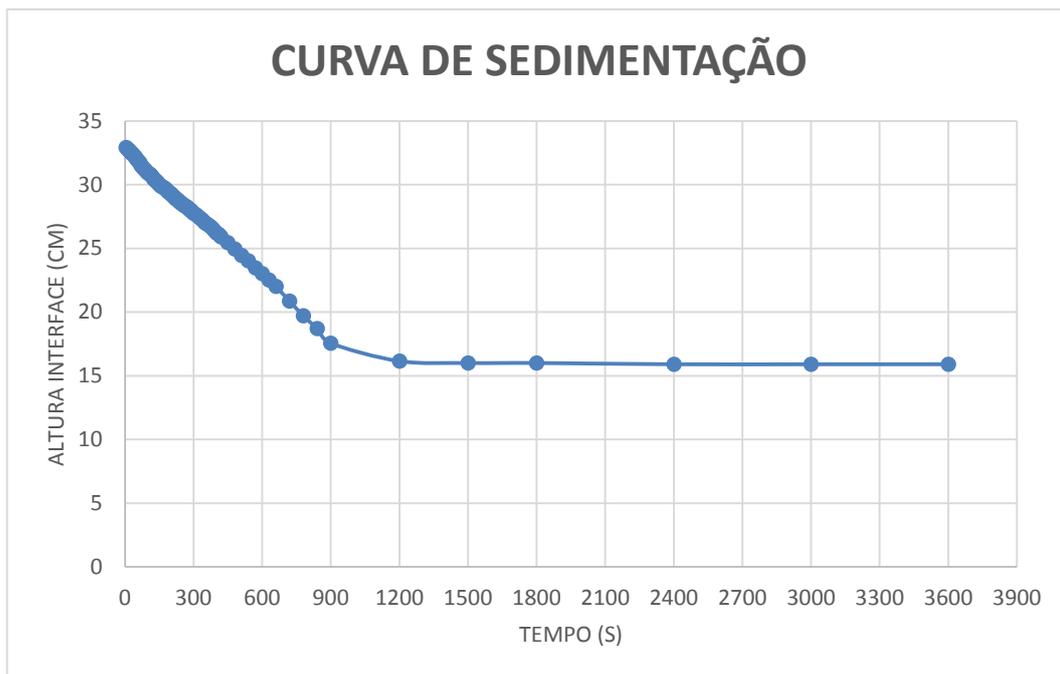


Gráfico A17: Curva de sedimentação teste réplica 6.

## Teste 7

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem= 15 g/t    pH 6,07</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,04 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 16,08 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 787,92 \text{ g}$

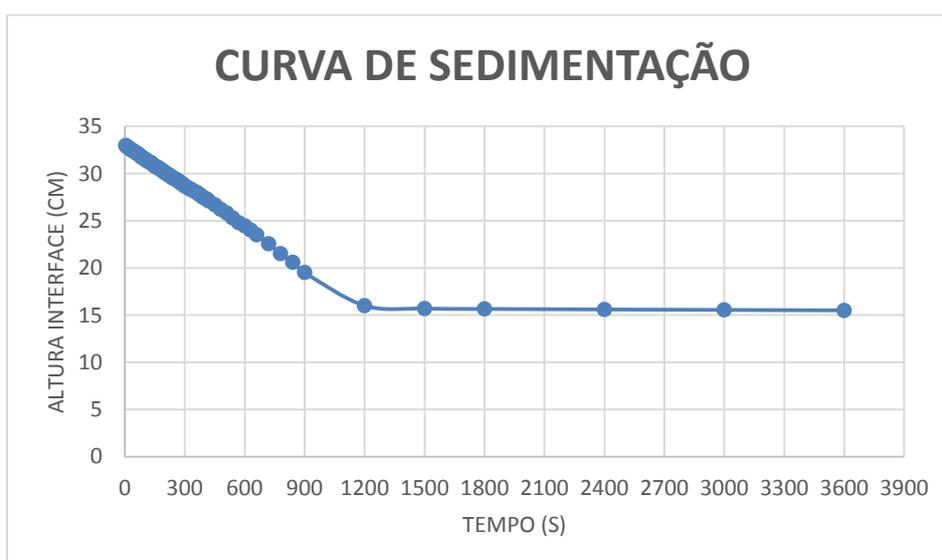


Gráfico A18: Curva de sedimentação teste 7.

## Réplica 7

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem= 15 g/t    pH 6,11</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 8,04 \times 10^{-3} \text{ g}$
$V_{sol} = 16,08 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 787,92 \text{ g}$

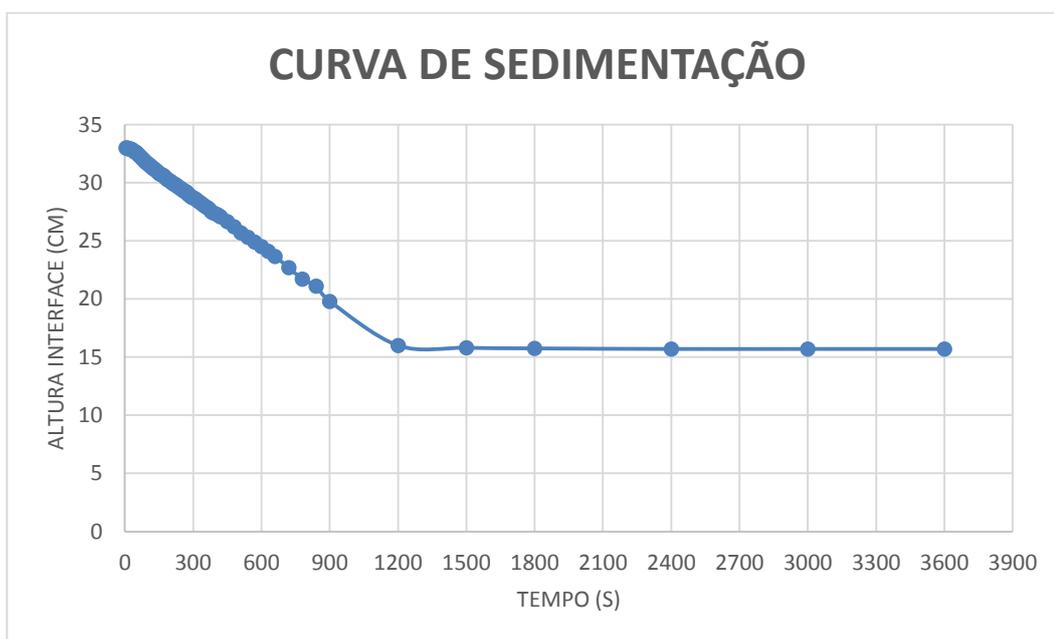


Gráfico A19: Curva de sedimentação teste réplica 7.

## Teste 8

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem= 30 g/t    pH 6,15</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 0,01608 \text{ g}$
$V_{sol} = 32,16 \text{ ml}$	$M_{\acute{a}gua} = 771,84 \text{ g}$

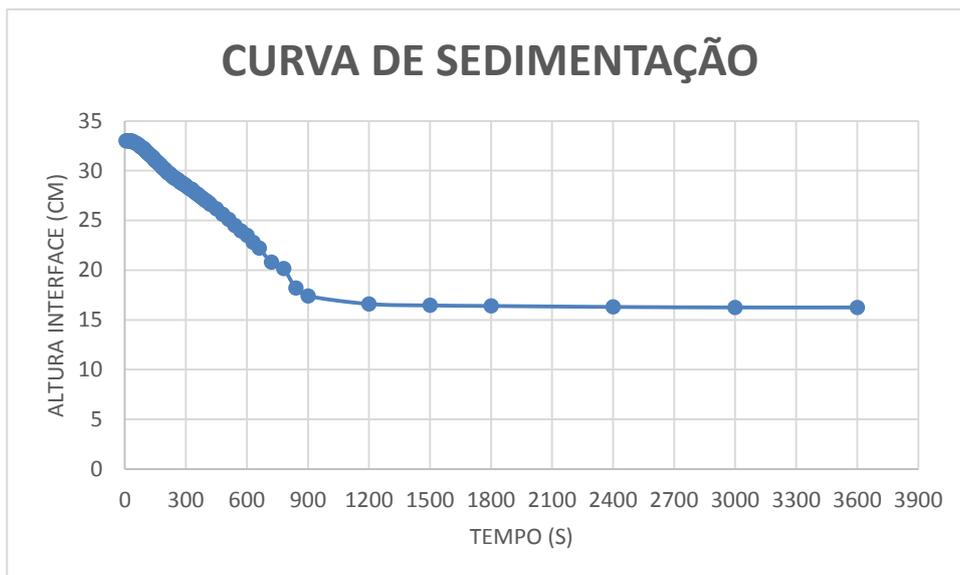


Gráfico A20: Curva de sedimentação teste 8.

## Réplica 8

<b>%Sólidos = 40%    Dosagem= 30 g/t    pH 6,29</b>	
$M_s = 536 \text{ g}$	$M_{floc} = 0,01608 \text{ g}$
$V_{sol} = 32,16 \text{ ml}$	$M_{\text{água}} = 771,84 \text{ g}$

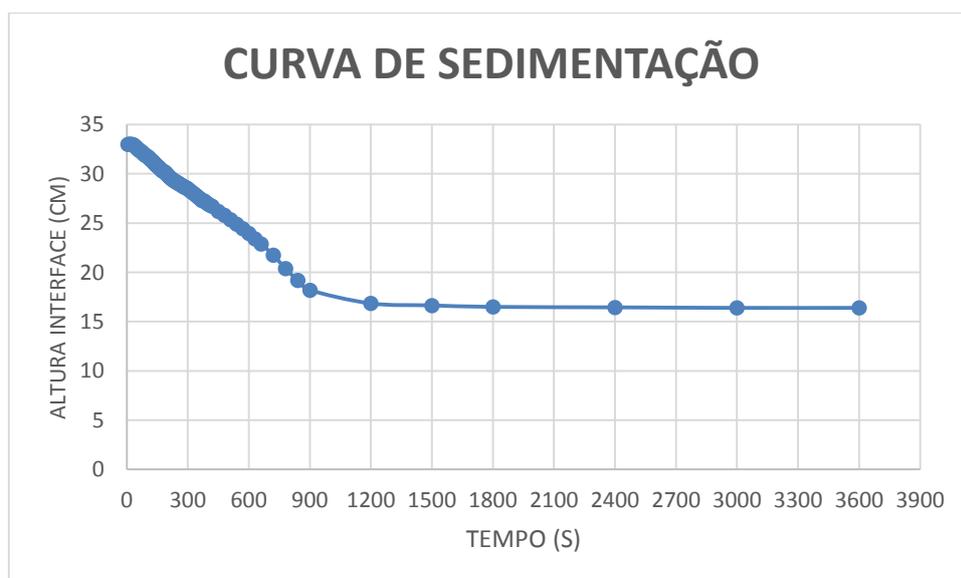


Gráfico A21: Curva de sedimentação teste réplica 8.