



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

LORENA RIBEIRO DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADOR: VALIDAÇÃO DAS TÉCNICAS DE
*COE E CLEVINGER, TALMAGE E FITCH E OLMANN.***

ARAXÁ/MG
2018

LORENA RIBEIRO DOS SANTOS

**DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADOR: VALIDAÇÃO DAS TÉCNICAS DE
COE E CLEVINGER, TALMAGE E FITCH E OLTMANN.**

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

Orientador: Prof.^a Dra. Michelly dos Santos Oliveira.

Coorientador: Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva.

ARAXÁ/MG
2018

LORENA RIBEIRO DOS SANTOS**DIMENSIONAMENTO DE ESPESSADOR: VALIDAÇÃO DAS TÉCNICAS DE COE E CLEVINGER, TALMAGE E FITCH E OLTMANN.**

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

Orientador: Prof.^a Dra. Michelly dos Santos Oliveira.

Coorientador: Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva.

Araxá, 25 de junho de 2018



Presidente e Orientador: Prof.^a Dra. Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Araxá



Coorientador: Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva
Engenheiro de Minas Mosaic Fertilizantes – Tapira-MG



Membro Titular: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Natal Junior Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Araxá

*Dedico este trabalho aos meus pais:
Alexssandra e Marco Antônio que
acreditaram em mim quando eu mesma não
acreditei.*

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo agradeço a Deus por me permitir concluir mais uma etapa tão importante na minha vida e por estar sempre ao meu lado.

Agradeço a minha família. Aos meus pais por me mostrarem a importância do estudo e nunca pararem de acreditar em mim. As minhas irmãs: Thais, Amanda e Nicolle que me lembram, todos os dias, de que jamais estarei sozinha. Obrigada por me apoiarem e me motivarem a ser uma pessoa melhor.

Aos meus amigos por evidenciarem que nenhum momento é tão ruim quando se tem pessoas especiais ao seu lado e que momentos felizes são melhores ao serem divididos com quem se ama. Agradeço a vocês por estarem ao meu lado durante toda essa caminhada.

Um agradecimento especial a minha orientadora Professora Doutora Michelly e meu coorientador Mestre Fernando Brandão, pela disponibilidade, ensinamentos e por se fazerem sempre dispostos a me ajudar e tornarem possível a execução do presente trabalho.

Agradeço, por fim, ao CEFET que me acolheu e por muito tempo foi como uma segunda casa.

A todos que de alguma forma contribuíram para minha formação pessoal e profissional durante essa jornada, meu muito obrigada!

*Eu acredito em trabalho duro e em sorte. E
que o primeiro leva ao segundo.*

J. K. Rowling

RESUMO

O espessamento é uma importante operação unitária compreendida na etapa de separação sólido-líquido. Por meio dessa operação pretende-se atingir diversos objetivos dentre os quais se destacam: a obtenção de água para recirculação, adequação da porcentagem de sólidos da polpa para a operação subsequente e formação da pasta mineral para descarte. Os espessadores são os equipamentos responsáveis pelo espessamento e por serem de fácil manutenção e operação, são amplamente utilizados, não apenas no âmbito da mineração. Tais equipamentos carecem de dimensionamento de forma que seu diâmetro seja projetado para atender às características do material a ser espessado assim como a vazão requerida. No presente trabalho são aplicadas três técnicas convencionais de dimensionamento para cálculo da área circular necessária para espessar lama natural proveniente de minério fosfático da região do Alto Paranaíba em Minas Gerais. O material contém ainda pequena quantidade de rejeito de flotação. Foram utilizadas as técnicas de Coe e Clevenger, Talmage e Fitch e por fim, de Oltmann. Os valores de áreas obtidas foram comparados com a de um espessador industrial que já se encontra em operação, permitindo assim que se fizesse uma comparação dos valores teóricos com os utilizados na prática. O método de dimensionamento que mais se aproximou do valor praticado industrialmente foi o método de Coe e Clevenger. Por esse método percebeu-se a ocorrência de subdimensionamento do diâmetro em cerca de 18%. Devido a esse subdimensionamento o espessador pode não oferecer as condições que otimizem a sedimentação do material alimentado. Para corrigir esse fato sugere-se a utilização de agentes aglomerantes para aumento da velocidade de sedimentação. Outra sugestão seria a diminuição da vazão de alimentação, porém isso poderia acarretar prejuízos decorrentes da queda na produção.

Palavras-chave: espessamento; espessador convencional; dimensionamento; Coe e Clevenger; Talmage e Fitch; Oltmann.

ABSTRACT

Thickening is an important unitary operation in the solid-liquid separation step. By means of the thickening it is intended to reach several objectives, among which the following stand out: obtaining water for recirculation, adjusting the percentage of solids in the pulp for the subsequent operation and formation of the mineral paste for disposal. The thickeners are the equipment responsible for the thickening and for this reason they are easy to maintain and operate, they are widely used not only in mining. Such equipment requires dimensioning so that its diameter is designed to meet the characteristics of the material to be thickened as well as the required flow rate. In the present work three conventional sizing techniques are applied to calculate the circular area required to thicken natural sludge from a phosphate ore. The material still contains a small amount of flotation tailing. The techniques of Coe and Clevenger, Talmage and Fitch and, finally, Oltmann were used. The values of the obtained areas were compared to that of an industrial thickener that is already in operation, thus allowing a comparison to the theoretical values and those used in practice. The scaling method closest to the value practiced industrially was the Coe and Clevenger method. By this method was observed an underestimation in about 18% in the diameter. Due to this undersizing the thickener may not offer the conditions that optimize the sedimentation of the feeding material. To correct this fact we suggest the use of agglomerating agents to increase sedimentation speed. Another suggestion would be the reduction of the feeding flow, however this could entail losses due to the drop in production.

Keywords: thickening; conventional thickener; sizing; Coe and Clevenger; Talmage and Fitch; Oltmann.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Espessador de Lamas.	15
Figura 2 - Fluxograma típico no beneficiamento.	18
Figura 3 - Técnicas de separação sólido líquido em função do tamanho das partículas.	20
Figura 4 - Sistema de recirculação de água para mineração de ferro.	24
Figura 5 - Forças atuantes na sedimentação de uma partícula discreta.	26
Figura 6 - Sistema de rakes.....	28
Figura 7 - Espessador convencional.	29
Figura 8 - <i>Feedweel</i>	30
Figura 9 - Fases da sedimentação.	31
Figura 10 - Zonas de sedimentação em um espessador.....	32
Figura 11 - Altura da interface nos testes de sedimentação.	33
Figura 12 - Curva de sedimentação típica.	36
Figura 13 - Determinação do ponto crítico de acordo com metodologia de Roberts.....	37
Figura 14 - Método gráfico de Oltmann.	39
Figura 15 - Amostra para ensaios.	40
Figura 16 - Homogeneização da amostra utilizando lona.	41
Figura 17 - Formação da pilha 17a e quarteamento 17b.	41
Figura 18 - Teste de picnometria. 18a picnômetro vazio, 18b picnômetro com amostra, 18c picnômetro mais amostra e água, 18d picnômetro com água.	42
Figura 19 - Peneirador suspenso e peneiras utilizadas.	43
Figura 20 - Teste de proveta realizado para aplicação da metodologia de Talmage e Fitch.....	45
Figura 21 - Teste de proveta realizado para aplicação da metodologia de Oltmann.....	46
Figura 22 - Curva granulométrica.	48
Figura 23 - Diferentes polpas preparadas com porcentagens de sólido de 3, 5, 7, 9, 11, 13 e 15%, da esquerda para a direita.	49
Figura 24 - Curvas de sedimentação obtidas nos testes para aplicação da metodologia de Coe e Clevenger.....	50
Figura 25 - Curva de sedimentação para aplicação da metodologia de Talmage e Fitch.	52
Figura 26 - Curva de sedimentação para aplicação da metodologia de Oltmann.....	54

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Agentes aglomerantes mais utilizados.	21
Tabela 2 - Dados do espessador de rejeito utilizado pela mineradora X.....	41
Tabela 3 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica.	44
Tabela 4 - Testes realizados para dimensionamento de espessador via Coe e Clevenger.	45
Tabela 5 - Resultados obtidos no teste de picnometria.	47
Tabela 6 - Resultados da análise granulométrica.	48
Tabela 7 - Velocidades de sedimentação obtidas pelos testes de proveta.	51
Tabela 8 - Áreas para espessamento calculadas de acordo com a metodologia de Coe e Clevenger.....	52
Tabela 9 - Variáveis obtidas pela aplicação da metodologia de Talmage e Fitch.....	53
Tabela 10 - Variáveis obtidas pela aplicação da metodologia de Oltmann.....	54
Tabela 11 - Comparação entre as RE e áreas para espessamento obtidas.	55
Quadro 1 - Seleção de equipamentos de separação sólido-líquido.....	25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas

CETEM Centro de Tecnologia Mineral

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Mesh
%	Porcentagem ou porcentagem
"	Polegada
<	Menor que
>	Maior que
μ	Micrômetro
a	Aceleração da gravidade
Co	Concentração de sólidos no <i>overflow</i>
Cu	Concentração de sólidos no <i>underflow</i>
d	Diâmetro da partícula
da	Densidade da água
dp	Densidade da polpa
ds	Densidade do sólidos
Ff	Força de fricção entre a partícula e o fluido
Fg	Força gravitacional
Fl	Empuxo
g	Grama
Kg	Quilograma
l	Litro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico

mg	Miligrama
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
N	Newton
Pa	Pascal
Pc	Ponto de compressão ou ponto crítico
pH	Potencial hidrogeniônico
qs	Fluxo de sólidos no sedimentador
Re	Número de Reynolds
RE	Razão de espessamento
s	Segundo
s ²	Segundo quadrado
v	Velocidade de sedimentação da partícula
Vs ₀	Velocidade de sedimentação em teste de batelada
Ze	Altura da interface para uma determinada concentração de sólidos no <i>underflow</i>
Zo	Altura inicial da interface
θc	Tempo decorrido para alcançar o ponto de compressão
θe	Tempo decorrido para alcançar a concentração de sólidos do <i>underflow</i>
ρf	Massa específica do fluido
ρs	Massa específica do sólido
η	Viscosidade dinâmica do fluido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Separação sólido-líquido.....	18
2.2 Espessamento.....	22
2.2.1 Sedimentação em meio fluido	25
2.2.2 Espessador convencional.....	28
2.2.3 Zonas e mecanismos de sedimentação	31
2.3 Dimensionamento de espessadores.....	34
2.3.1 Método de Coe e Clevenger	34
2.3.2 Método de Kynch ou Talmage e Fitch	36
2.3.3 Método de Oltmann	38
3. METODOLOGIA	40
3.1 Amostra.....	40
3.2 Caracterização da amostra	42
3.2.1 Massa específica dos sólidos	42
3.2.2 Distribuição granulométrica	43
3.3 Metodologia adotada para aplicação do método de Coe e Clevenger	44
3.4 Metodologia adotada para aplicação do método de Talmage e Fitch.....	45
3.5 Metodologia adotada para aplicação do método de Oltmann.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Caracterização da amostra	47
4.1.1 Massa específica dos sólidos	47
4.1.2 Distribuição granulométrica	47
4.2 Resultados obtidos pela metodologia de Coe e Clevenger	49
4.3 Resultados pela metodologia de Talmage e Fitch.....	52
4.4 Resultados pela metodologia de Oltmann	53
5. CONCLUSÕES.....	56
6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	57
7. REFERÊNCIAS	58
8. ANEXO 1: PONTOS CRÍTICOS E VELOCIDADES DE SEDIMENTAÇÃO....	61

1. INTRODUÇÃO

Espessadores são equipamentos amplamente utilizados na mineração para realização da separação sólido-líquido. Sua operação, simples e de baixo custo, baseia-se na diferença de velocidade de sedimentação das partículas constituintes da polpa mineral. Segundo Oliveira, Luz e Lacerda (2004), os equipamentos supracitados podem ser utilizados para espessar suspensões com 1% a 50% de sólidos, gerando polpas 10% a 80% de sólidos em massa. A Figura 1 exhibe um espessador convencional para lamas.



Figura 1- Espessador de Lamas.
Fonte: Catálogo on line daVLC (2012).

Os dois produtos obtidos por meio do espessamento possuem características distintas. O produto que possui concentração de sólidos maior do que a alimentação é denominado *underflow*, ao passo que o produto que exibe uma concentração de sólidos menor que a alimentação é o *overflow* (SOUSA, 2012).

O espessamento não é uma etapa exclusiva da mineração, sendo empregado nas indústrias química, farmacêutica, no processamento de alimentos, no tratamento de água e resíduos. Na indústria mineral as finalidades a serem atingidas por meio dessa operação de adensamento são, consoante Sousa (2012):

- espessamento de lamas (muito diluídas) na recuperação de água para recirculação;
- adensamento de polpas de rejeitos para disposição em barragem - na falta dos espessadores de rejeito, ou na ineficácia destes equipamentos, grande volume de material seria destinado às barragens, implicando assim na diminuição da vida útil

desses reservatórios. A necessidade de se retornar a água contida nas barragens acarretaria custos adicionais, principalmente devidos a instalação de bombas.

- adequação da concentração de sólidos para a etapa subsequente, filtragem;
- espessamento de materiais ainda não concentrados para a adequação do percentual de sólidos para a etapa de concentração, geralmente flotação ou concentração magnética;
- geração da pasta mineral (espessadores *Deep Cone*) para descarte.

O dimensionamento desses equipamentos pode ser realizado por diversas técnicas que levam em consideração o comportamento das partículas no meio aquoso. Conforme Pinto et al. (2009), essas técnicas apresentam deficiências em função das muitas variáveis do processo de espessamento e da complexidade dos mecanismos de sedimentação das partículas.

O presente trabalho consiste em um estudo de caso e visa a aplicação de três técnicas comuns de dimensionamento, sendo elas as técnicas de Coe e Clevenger, Talmage e Fitch e Oltmann. Por meio desses métodos obtêm-se valores de área unitária e razão de espessamento. O cálculo da área é normalmente feito com base em ensaios de bancada, em batelada, utilizando-se provetas de 1.000 ml ou 2.000 ml (TORQUATO e LUZ, 2011). As técnicas citadas serão utilizadas para verificar qual a área ideal para um espessador de rejeito de minério fosfático da região do Alto Paranaíba em Minas Gerais. Tal espessador já se encontra em operação, desse modo, poder-se-á constatar qual técnica fornece o valor mais próximo do diâmetro industrial utilizado e averiguar a ocorrência, caso exista, de super ou subdimensionamento.

Trabalhos semelhantes já foram publicados, buscando uma comparação entre os diversos meios de dimensionamento e/ou cálculo de fatores de correlação (escala). Todos esses, objetivando otimizar as dimensões de espessadores, o que implica diretamente na eficiência da operação e no consumo de recursos para sua instalação.

Pinto et al. em 2009 fizeram uma revisão de três métodos utilizados para cálculo da área unitária, sendo esses: Metcalf, Talmage e Fitch e Fluxo de Sólidos. Os autores buscaram validar o diâmetro de um espessador industrial e verificaram a ocorrência de um superdimensionamento de cerca de 10% com relação aos modelos teóricos. Torquato e Luz no ano de 2011, após ensaios em escala de bancada e industrial, sugeriram um fator de correção para o modelo clássico de Kynch (com traçado de

Talmage e Fitch). Em 2010, Guimarães comparou os resultados obtidos pela aplicação de quatro técnicas convencionais e concluiu que os métodos clássicos fornecem valores de área unitária bem próximos entre si.

Apesar do custo de operação e princípios de funcionamento de um espessador serem satisfatórios, o que explica sua ampla utilização, a instalação deste requer altos investimentos. Esse custo é devido à mão de obra e insumos necessários, por se tratarem, muitas vezes, de tanques de sedimentação de grandes dimensões, a exemplo do espessador de lamelas da mina de Conceição, da VALE, o qual possui um diâmetro de 100 m. Como toda atividade econômica, a mineração visa o lucro e, otimizar o dimensionamento de equipamentos, permite que menos recursos sejam desperdiçados, ainda mais considerando o cenário econômico-social mundial, o qual busca cada vez mais o desenvolvimento sustentável. Por esse motivo, o dimensionamento eficiente se mostra como uma etapa de suma importância dentro do âmbito da atividade mineral.

Para o desenvolvimento desse estudo de caso foi realizada primeiramente uma revisão bibliográfica compreendendo os aspectos gerais da separação sólido-líquido, comportamento das partículas em meio fluido, espessamento e métodos convencionais para o dimensionamento de espessadores. Em seguida é apresentada a metodologia adotada para a aplicação das técnicas de dimensionamento utilizadas. A metodologia compreende ainda os testes utilizados para uma caracterização inicial da amostra. Os próximos capítulos abordam os resultados obtidos para caracterização da amostra (picnometria e distribuição granulométrica) e as curvas de sedimentação, resultantes dos testes de proveta, confeccionadas para cálculo das velocidades de sedimentação e aplicação dos métodos gráficos de dimensionamento. Por fim são apresentadas as conclusões acerca do caso em estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Separação sólido-líquido

A etapa de separação sólido-líquido é considerada uma etapa crucial no fluxograma de beneficiamento de minérios, de acordo com Luz, Sampaio e França (2010). A figura 2 ilustra um fluxograma típico, destacando-se as principais operações unitárias dessa etapa: espessamento, filtragem e secagem. Segundo Valadão e Araujo (2012), várias outras etapas podem ser utilizadas tais como centrifugação, peneiramento, secagem, flotação e separação magnética.

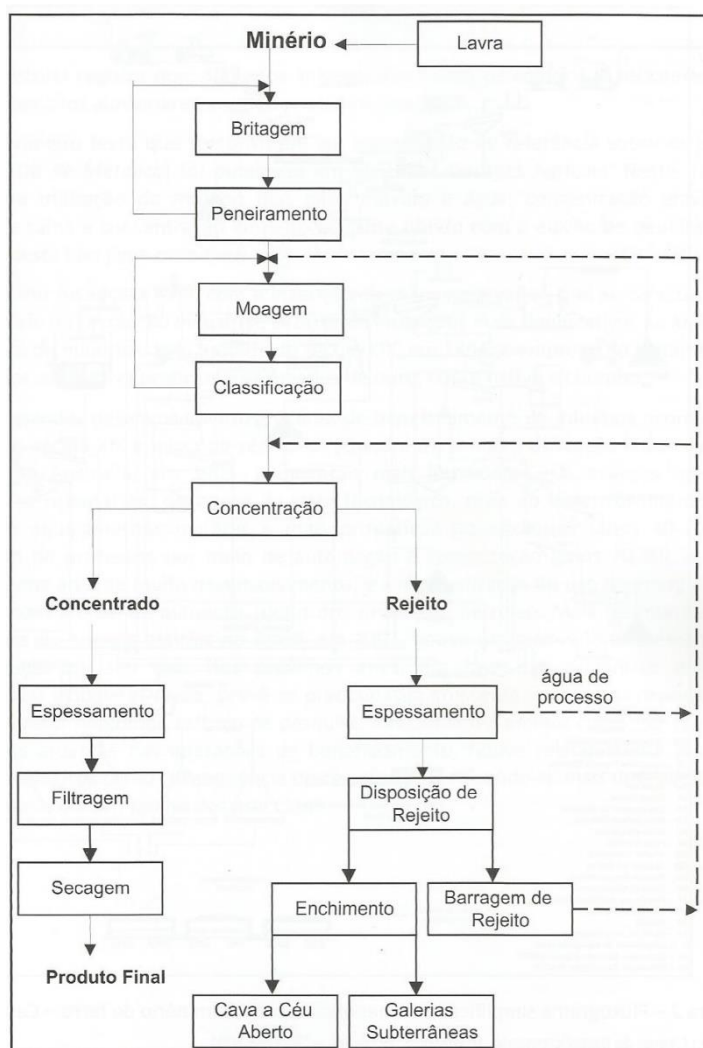


Figura 2 - Fluxograma típico no beneficiamento.

Fonte: LUZ, SAMAPAIIO e FRANÇA (2010).

Nos processos metalúrgicos a separação sólido-líquido é usualmente realizada através da combinação de espessamento e filtragem. Uma quantidade significativa de

água é removida por sedimentação ou espessamento produzindo uma polpa espessada com concentração de sólidos por peso da ordem de 55 a 65%, podendo, em alguns casos, chegar a 80%. Para obtenção de uma torta úmida com 80 a 90% de sólidos, o produto final é filtrado. A torta poderá então ser submetida a um processamento térmico para atingir uma concentração de sólidos em peso em torno de 95% (OLIVEIRA, LUZ, LACERDA, 2004).

O objetivo básico a ser atingido na separação sólido-líquido consiste na obtenção de dois produtos, os quais são um sólido desaguado e um líquido clarificado. O sólido desaguado pode ser de mineral concentrado ou rejeito, cada qual será destinado para uma etapa subsequente diferente. O líquido clarificado é geralmente reutilizado na usina como água de processo, a depender de suas características físicas e químicas.

Diversos são os equipamentos capazes de realizar a operação em questão e, portanto, alguns fatores devem ser considerados na escolha do equipamento que mais se adeque às necessidades do processo industrial. Em conformidade com Silverblatt e Easton (2002), deve-se atentar para os parâmetros descritos a seguir.

- Capacidade requerida;
Quando o processo a ser desenvolvido possui baixa taxa de alimentação e de produção, dá-se preferência por executar a filtração, seja esta contínua ou em batelada. Em contrapartida, quando o volume de material é considerável, os espessadores geralmente são mais recomendados. Tal fato pode ser justificado considerando que os espessadores possuem custos de operação e de manutenção inferiores aos dos filtros, mesmo necessitando de áreas para instalação maiores.
- Distribuição de tamanhos e forma das partículas;
Esse parâmetro é um dos mais influenciadores. Deve-se ressaltar que quanto menor for a granulometria das partículas mais restrita será a escolha do equipamento, tendo em vista que a capacidade e a eficácia reduzem de forma significativa. A Figura 3 exibe quais os métodos mais adequados a depender da faixa granulométrica dos sólidos. Já com relação à forma, o formato ideal seria o esférico, desse modo, quanto mais diferente dessa geometria, mais trabalhoso se torna a operação. Um exemplo seriam as partículas com formato mais alongado (acicular), as quais podem entupir os poros dos tecidos filtrantes utilizados na filtração.

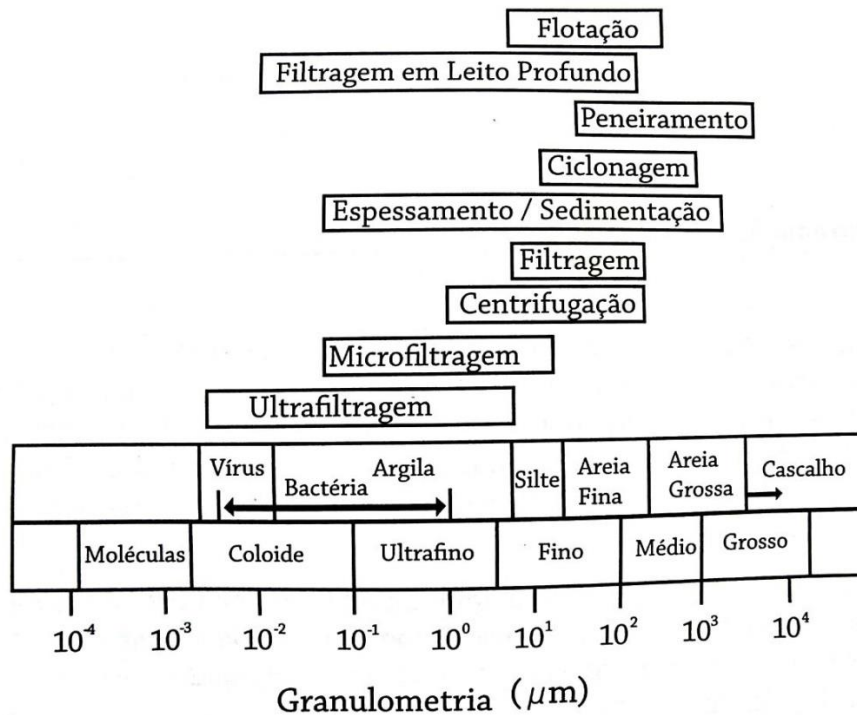


Figura 3 - Técnicas de separação sólido líquido em função do tamanho das partículas.

Fonte: LUZ, SAMAPAILO e FRANÇA (2010)

- Aglomeração de partículas;

Os processos de aglomeração de partículas têm um papel importante na eficiência da separação sólido-líquido, agindo em prol do aumento da velocidade de sedimentação dos sólidos. Esses processos podem ocorrer por meio de coagulação ou floculação. Partículas de tamanhos muito pequenos respondem melhor ao processo de coagulação, já para particulados maiores utiliza-se a floculação como auxiliar de sedimentação. Conforme Sousa (2012), os floculantes, compostos orgânicos sintéticos ou naturais, agem em nível molecular nas superfícies das partículas para reduzir as forças repulsivas e salientar as forças atrativas. São formados então agregados a partir de partículas finamente divididas em forma de flocos que ao aumentar de tamanho também aumentam a velocidade de sedimentação. Já na coagulação adicionam-se compostos químicos (eletrólitos) a uma suspensão coloidal objetivando a diminuição da repulsão eletrostática devido às cargas superficiais das partículas, permitindo que elas se aproximem e se juntem por meio das forças de *Van der Waals*. A Tabela 1 apresenta as principais características dos aglomerantes mais utilizados na mineração.

Tabela 1 - Agentes aglomerantes mais utilizados.

Floculante	Concentração típica (mg/L)	Operação de pH	Faixa ótima de pH
Poliacrilamida Não Iônica	1 – 30	0 -12	-
Poliacrilamida Aniônica	1 – 30	5,5 – 11	-
Poliacrilamida Catiônica	1 – 30	4 – 12	5 – 9
Óxido de polietileno	1 – 100	3 - 11	-
Amido	5 – 200	2 -10	-
Coagulantes			
Cal	500 – 2000	5 - 13	10 -12
Sulfato de Alumínio	15	5,5 – 7,5	5,9 – 6,1
Sulfato Férrico	5 -150	4,5 – 8,0	5,6 – 5,7
Sulfato Ferroso	200	> 9,5	-

Fonte: Adaptado de VALADÃO & ARAUJO (1991), apud SOUSA (2012).

Mesmo conferindo maior eficiência ao processo de desaguamento, a utilização de agentes aglomerantes deve ser fortemente considerada na concepção dos equipamentos a fim se minimizarem erros de escalonamento considerando escala laboratorial e escala industrial.

- Concentração de sólidos na polpa;

A porcentagem de sólidos está intimamente relacionada com a eficiência dos equipamentos. Esse parâmetro se torna mais crítico quando há a necessidade de se flocular as partículas, já que polpas com concentração de sólidos elevada não se comportam bem frente o processo de aglomeração por meio da floculação. Desse modo, equipamentos como os espessadores não apresentarão um bom rendimento, quanto às

taxas de sedimentação, se forem alimentados com polpas concentradas e que necessitem de serem floculadas.

A separação sólido-líquido é uma etapa importante e, às vezes, crítica nas usinas de processamento mineral. Apresenta, normalmente, alto consumo energético. No caso da concentração de cobre, por exemplo, esse consumo só é suplantado pela fragmentação e flotação. Para os minérios de ferro processados no Quadrilátero Ferrífero (MG), esse consumo energético representa de 15 a 40% do total (VALADÃO & ARAUJO, 2012).

2.2 Espessamento

Existem duas operações unitárias muito parecidas, porém distintas: clarificação e espessamento. O objetivo da clarificação é produzir um produto clarificado ao máximo, ao passo que o espessamento, através dos espessadores, objetiva produzir um produto adensado até o valor compatível com a operação subsequente (bombeamento, filtragem, condicionamento etc.) (CHAVES, 2013).

Luz, Sampaio e França (2010) definem espessamento como um dos processos de separação sólido-líquido que se baseia na diferença de velocidade de sedimentação dos materiais presentes em uma suspensão (polpa). É devido ao campo gravitacional que se dá a remoção das partículas sólidas em uma corrente líquida. Ainda de acordo com esses autores, podem-se destacar quatro principais aplicações dos espessadores na indústria da mineração:

- adensamento de polpas, ou seja, aumento da concentração de sólidos, a fim de adequá-las para processos subsequentes. Um exemplo disto é a elevação da porcentagem de sólidos em minérios de ferro de 45 para 70%, para o bombeamento por meio de minerodutos;
- espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando o transporte e descarte mais eficazes;
- recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos.
- recuperação de água para recirculação nos processos industriais, objetivando a recuperação máxima desse recurso o que implica em diminuição de custos e processos ambientais para a captação de água nova.

De acordo com a Constituição de 1988, as águas são bens públicos, não existindo assim águas particulares, desse modo, a administração e gestão desse recurso é de responsabilidade ora dos estados, ora da União. A Constituição da República art. 21, inciso XIX, também atribuiu à União a competência para instituir “sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso” (BOSON; CASTRO; FEITOSA, 2006). De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), outorga é o ato administrativo mediante o qual o poder público outorgante (União, Estado ou Distrito Federal) faculta ao requerente o direito de uso de recursos hídricos, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato. Esse controle é necessário para evitar conflitos entre usuários de recursos hídricos e para assegurar-lhe o efetivo direito de acesso à água. Para terem direito ao uso de recursos hídricos em suas atividades operacionais, as empresas de mineração devem solicitar essa outorga, exceto poucos casos em que o volume requerido é enquadrado como uso insignificante. Trata-se então de um processo legal o qual está sujeito à restrições de cunho ambiental. A fim de atender às necessidades de volume hídrico das operações mineiras faz-se necessário muitas vezes a reciclagem da água utilizada no processo, já que a captação de água nova pode ser algo dispendioso devido às restrições legais (ambientais) e pela própria localização da usina de beneficiamento. Nesse contexto, BOSON, CASTRO e FEITOSA (2006) definem como água de reciclagem ou recirculada, a que retorna ao processo, após tratamento ou não, e cujas características físicas e químicas são adequadas. As fontes principais desse recurso são as barragens de rejeitos e os processos de desaguamento como filtração, peneiramento e espessamento. A quantidade de água que volta para o processo é variável sendo a situação ideal aquela em que o descarte é igual à zero. A figura 4 exemplifica um sistema típico de recirculação de água para a mineração de ferro. Caso esse sistema para reaproveitamento seja ineficiente, corre-se o sério risco de faltar água nas operações, o que implicaria em prejuízos consideráveis, o que, via de regra, não é algo desejado.

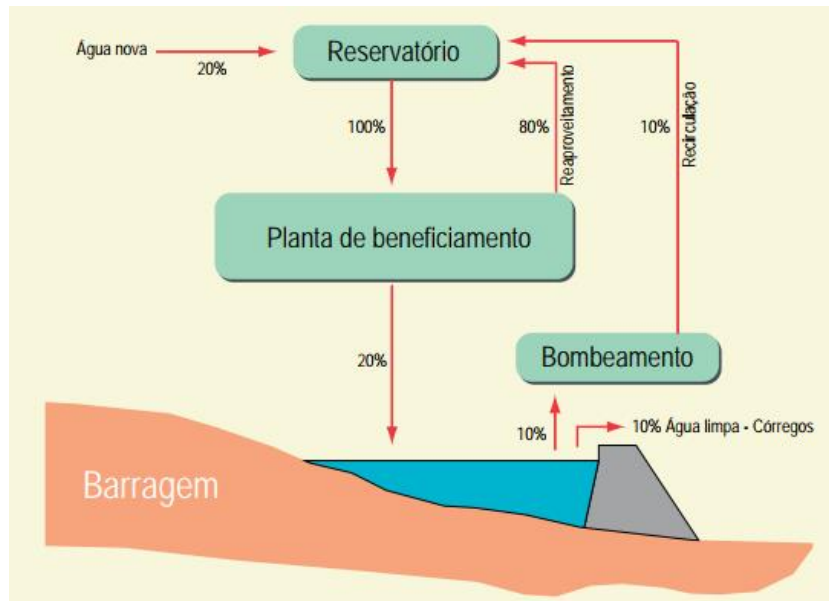


Figura 4 - Sistema de recirculação de água para mineração de ferro.

Fonte: BOSON, CASTRO e FEITOSA (2006).

Convém ressaltar, como o faz Sousa (2012), que novas aplicações para os espessadores podem ser deslumbradas, como:

- maior adensamento de lamas (espessadores *High Density*) ou geração de pasta mineral (espessadores *Deep Cone*) para descarte;
- espessamento de rejeitos de flotação, tendo em vista a eliminação das espumas (para melhorar a condição de bombeamento) ou a adequação da concentração de sólidos no *overflow* e no *underflow*.

Dentre as vantagens do espessamento perante as outras operações de desaguamento pode-se citar seu baixo custo de operação, simplicidade de funcionamento e sua adaptação em um intervalo amplo de concentração de sólidos e tamanhos das partículas, quando comparado aos outros métodos. Tal fato é evidenciado no Quadro 1.

Quadro 1 - Seleção de equipamentos de separação sólido-líquido.

Tamanho	$x < 5\mu\text{m}$		$5\mu\text{m} < x < 50\mu\text{m}$		$x > 50\mu\text{m}$	
	baixa	alta	alta	baixa	baixa	alta
Equipamento	Filtro de camada profunda, Filtros de cartucho, Filtragem por pré-cobertura, Centrífuga.	Filtragem de torta, Filtros RV, Filtros a pressão, Filtros de placa e quadro.		Tanques de sedimentação, Centrífuga, Hidrociclones, Peneira.		Filtragem, Centrífuga.
	ESPESSAMENTO					

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, LUZ e LACERDA (2004).

2.2.1 Sedimentação em meio fluido

Em conformidade com Guimarães (2010), as partículas em suspensão se sedimentam de formas diferentes, a depender de parâmetros como a concentração destas e propriedades físico-químicas.

Na interação hidrodinâmica de um sistema água-partícula, o movimento de uma partícula na água é o resultado de um conjunto de forças que agem em diferentes sentidos tais como: força externa aplicada, força peso, empuxo e a força de resistência oferecida pelo fluido à partícula em movimento (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

As forças atuantes na sedimentação de partículas discretas, ou seja, aquelas que não alteram sua forma, densidade e tamanho, são mostradas no esquema da Figura 5.

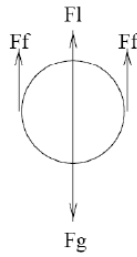


Figura 5 - Forças atuantes na sedimentação de uma partícula discreta.

Onde:

F_f = Força de fricção entre a partícula e o fluido (N);

F_l = empuxo (N);

F_g = Força gravitacional (N).

Após um estágio inicial de aceleração decrescente as partículas desenvolvem uma velocidade terminal de equilíbrio. Para Oliveira, Luz e Lacerda (2004) tal aceleração é dependente do número de Reynolds, parâmetro empregado para caracterizar a turbulência a que uma partícula em movimento está submetida em um fluido. Esse parâmetro é calculado pela Equação [1] que se segue:

$$Re = \frac{\rho_s \cdot d \cdot v}{\eta} \quad [1]$$

Na qual:

d = diâmetro da partícula em m;

v = velocidade de sedimentação da partícula em m/s;

ρ_s = massa específica do sólido em Kg/m^3 ;

η = viscosidade dinâmica do fluido dada em Pa.s.

O número de Reynolds é adimensional e, a depender do seu valor, é possível classificar os regimes desenvolvidos pelos fluidos. Arbitrariamente têm-se os seguintes limites:

$Re < 0,2$ – escoamento laminar

$0,2 > Re > 3000$ – escoamento intermediário

$Re > 3000$ – escoamento turbulento

Consoante Luz, Sampaio e França (2010), em um regime turbulento a viscosidade não apresenta um papel importante na magnitude da força de resistência, predominando a componente de resistência de forma. Em contrapartida, no regime laminar, a força de resistência passa a ser influenciada pela viscosidade do fluido, predominando a componente de resistência de fricção.

Para regimes laminares a velocidade da partícula esférica é dada pela lei de Stokes, Equação [2], a qual faz as considerações:

- resistência do movimento é proporcional à velocidade;
- meio contínuo e infinito;
- partícula isolada, rígida e maior que as moléculas;
- inexistência de interações eletrostáticas.

$$v = \frac{d \cdot d \cdot a \cdot (\rho_s - \rho_f)}{18 \cdot \eta} \quad [2]$$

Sendo:

v = velocidade de sedimentação em m/s;

d = diâmetro da partícula, m;

a = aceleração da gravidade em m/s^2 ;

ρ_s = massa específica do sólido em Kg/m^3 ;

ρ_f = massa específica do fluido em Kg/m^3 ;

η = viscosidade dinâmica, dada em Pa.s.

Quando o regime do fluido é caracterizado como turbulento utiliza-se a Lei de Newton, expressa na Equação [3], para realizar o cálculo da velocidade de sedimentação de partículas esféricas isoladas. Tal lei se baseia na premissa de a resistência ser proporcional ao quadrado da velocidade.

$$V = \left(3,03 \cdot d \cdot g \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{1/2} \quad [3]$$

2.2.2 Espessador convencional

Os espessadores são, em geral, constituídos de um tanque de sedimentação cuja área e volume possuem dimensões suficientes para permitir a sedimentação de todas as partículas alimentadas. Podem ser classificados como convencional, de alta capacidade, lamelas e cone de sedimentação. Os tipos variam de acordo com a granulometria e forma como o equipamento é alinhado (SOUSA, 2012).

Para Chaves (2013) os espessadores convencionais são equipamentos de grande porte, caros e, geralmente instalados fora da usina. Tais equipamentos são constituídos de um tanque cilíndrico-cônico, e seus diâmetros variam de alguns metros até dezenas de metros. Sua construção pode ser feita utilizando-se aço ou concreto armado. Argila compactada pode ser utilizada para a construção do fundo. Para diâmetros menores, a utilização de aço se torna mais econômica frente ao concreto.

Taggart (1945) define esses equipamentos como tanques cilíndricos superficiais, comparados com seu diâmetro, com transbordamento periférico e uma saída central de descarga inferior; um poço de alimentação centralmente localizado, e um arado rotativo, (Figura 6), acionado por força, posicionado perto do fundo, para mover sólidos sedimentados para a abertura de descarga inferior. Esses arados são comumente conhecidos como *rakes*.

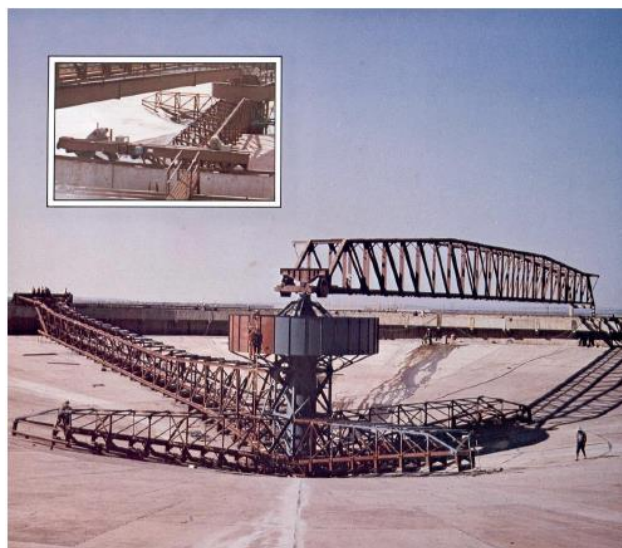


Figura 6 - Sistema de rakes.

Fonte: OLIVEIRA, LUZ e LACERDA (2004).

A descarga do fundo por gravidade não é satisfatória. Instalações modernas geralmente utilizam bombas para deslocamento volumétrico constante.

Chaves (2013) destaca que com espessadores de diâmetros maiores, as forças resistentes ao movimento do *rake* podem atingir valores significativos. O mesmo pode acontecer quando se trabalha com concentrados de elevada densidade, quando há depósitos localizados dentro do espessador, quando a alimentação traz instantaneamente partículas mais grosseiras ou quando cai dentro do espessador alguma ferramenta ou objeto mais volumoso. Se essas forças forem grandes o suficiente, elas podem entortar o *rake* ou torcer o eixo de acionamento. Para evitar que tais problemas ocorram, o mecanismo de acionamento de um espessador contém um torquímetro ligado a um sistema automático de proteção: verificado algum valor mais alto do que o especificado, soa um alarme na cabine de controle e automaticamente é acionado um dispositivo que levanta os braços do *rake* até encontrar uma posição de menor resistência. A partir dessa nova situação, e sem parar o movimento, o *rake* começa a ser baixado lentamente.

A Figura 7 mostra os principais componentes dos espessadores.

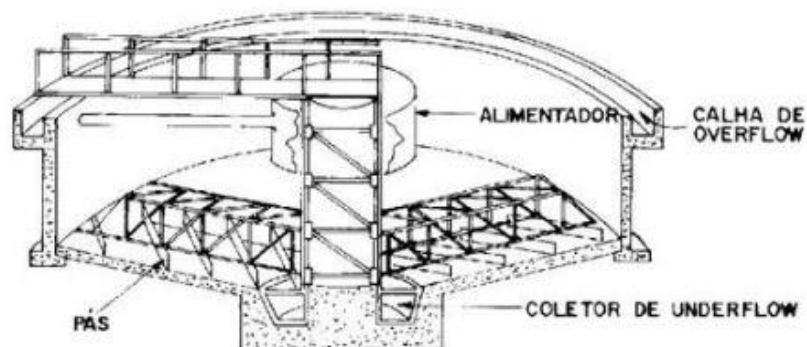


Figura 7 - Espessador convencional.

Fonte: VALADÃO E ARAUJO (2012).

A alimentação chega por meio de uma tubulação ao centro do espessador. Tal alimentação é realizada na parte central, em que um dispositivo diminui a energia cinética da polpa, permitindo assim o espalhamento homogêneo do material e a sedimentação do sólido (VALADÃO E ARAUJO, 2012). Como ressalta Sousa (2012), o mecanismo denominado *feedwheel*, mostrado na Figura 8, responsável por dividir o fluxo da alimentação e, assim, diminuir a turbulência. A alimentação é feita através de

calhas por gravidade, a uma velocidade de 2,5 a 3,0 m/s. Para atingir tal velocidade é necessária uma inclinação de 1,5%.

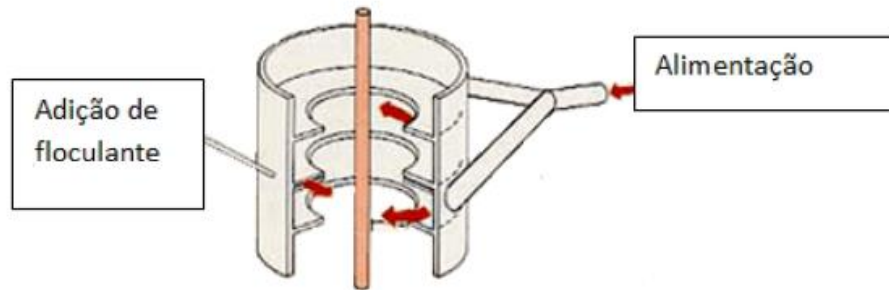


Figura 8 - Feedweel.
Fonte: CHAVES (2013).

As principais características dos espessadores citadas por Valadão e Araujo (2012) são:

- parte superior cilíndrica, com diâmetro maior que a altura;
- parte inferior representada por cone raso, com *apex* voltado para baixo;
- calha interna ou externa ao tanque, para coleta do *overflow*;
- calha para alimentação central;
- passarela para mecanismo de giro;
- mecanismo de giro de braços e pás - responsável por conduzir os sólidos para a região de descarga;
- cones de remoção do *underflow*.

Conforme Oliveira, Luz e Lacerda (2004), a eficiência dos espessadores vai depender dos seguintes parâmetros:

- a densidade, a viscosidade e a temperatura da polpa;
- o tamanho e a forma das partículas sólidas;
- a presença de agregantes;
- a diferença de densidade entre as partículas sólidas e a fase líquida;
- os métodos de aplicação dos agregantes;
- a distribuição granulométrica dos sólidos;
- as características de molhabilidade das partículas;
- os sistemas de alimentação da polpa e retirada do *underflow*;

- a presença de correntes de convecção;
- a perturbação de ventos e a evaporação.

Esses fatores devem ser analisados em conjunto para otimizar a operação de um espessador.

2.2.3 Zonas e mecanismos de sedimentação

De acordo com Taggart (1945), uma polpa floculada não necessariamente vai sedimentar rapidamente. A taxa de sedimentação vai depender de um número de fatores que precisam ser determinados experimentalmente em cada caso. Coe e Clevenger demonstraram as várias etapas a que uma polpa em espessamento está sujeita, mostradas na figura 9.

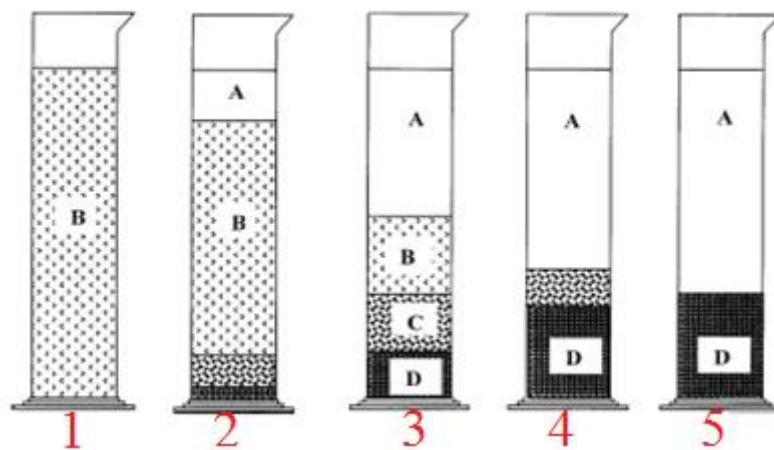


Figura 9 - Fases da sedimentação.
Fonte: adaptado de TAGGART (1945).

A proveta 1 representa a amostra de polpa logo após ser agitada. Em 2 ocorre um ligeiro assentamento; uma zona A, de solução clarificada, é formada. Logo abaixo dessa zona, identifica-se outra: B. Nessa região, a polpa apresenta características da alimentação, exceto por algumas partículas grosseiras que podem ter segregado para a denominada zona D. Entre as zonas B e D tem-se uma zona de transição, C. Essa última pode ser de formação lenta em algumas polpas e preencher todo o espaço entre as zonas A e D, com conseqüente eliminação da zona B, desse modo a concentração de sólidos aumenta de baixo para cima.

B e C são comumente designadas de zonas de sedimentação coletiva, diferenciadas da zona D, a qual é conhecida como zona de compressão. Nesta, as partículas se encontram intimamente conectadas, como uma “pilha de esponjas”.

As provetas 3 e 4 são similares à proveta 2, exceto pelo fato do aumento da zona de compressão. O ponto crítico é identificado na proveta 5, na qual as zonas B e/ou C desaparecem e as zonas A e D entram em contato. A forma com as zonas citadas acima se localizam em um espessador convencional pode ser vista no esquema apresentado na Figura 10.

Para polpas que sedimentam produzindo depósitos altamente compressíveis, a proveta não é suficientemente representativa, e prefere-se usar tubos longos (3 m) para simular alturas de coluna de compressão (CHAVES, 2013).

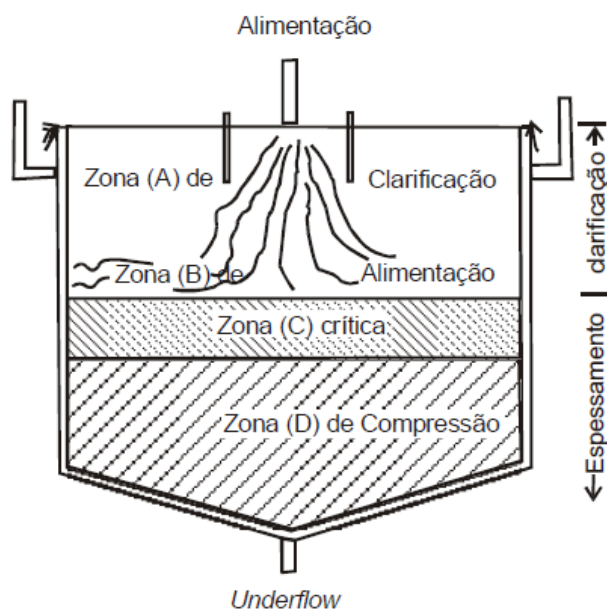


Figura 10 - Zonas de sedimentação em um espessador.

Fonte: OLIVEIRA, LUZ e LACERDA (2004).

Ao plotar-se um gráfico da altura da interface em função do tempo obtém-se as chamadas curvas de sedimentação, como exemplifica a Figura 11. Essas curvas são amplamente utilizadas para a realização do dimensionamento de espessadores por meio dos métodos convencionais.

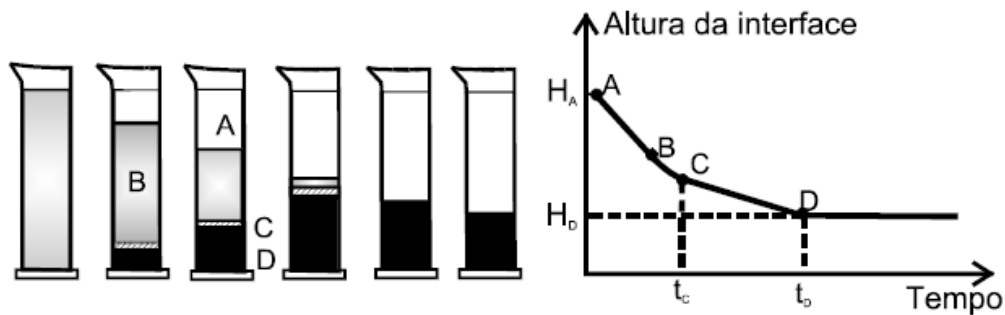


Figura 11 - Altura da interface nos testes de sedimentação.
OLIVEIRA, LUZ e LACERDA (2004).

Pode-se concluir com base no trabalho de Chaves (2013), que, na prática, a sedimentação das partículas durante o espessamento acontece segundo três regimes distintos: clarificação, sedimentação por fase e compressão.

- Regime de clarificação – predomina em situações de altíssima diluição de polpa, visto que as partículas estão distantes umas das outras e podem sedimentar praticamente sem influências mútuas. Se uma partícula maior afunda mais rapidamente e colide com outra partícula, e se há tendência para a formação de flocos, as duas se agregam e passam a sedimentar com velocidade ainda maior. Se não há essa tendência, após a colisão as duas partículas continuam seu movimento individual sem interferências mútuas, cada uma com sua velocidade própria.

- Sedimentação por fase – ocorre com partículas floculadas e também quando a concentração de partículas na polpa aumenta e atinge-se uma condição em que cada partícula está em contato com as vizinhas e elas descem em conjunto, aprisionando as demais nessa estrutura e fazendo-as afundar com a mesma velocidade. Forma-se uma interface nítida entre a polpa em sedimentação e o líquido sobrenadante.

- Regime de compressão – acontece quando as partículas se encontram tão adensadas que uma está em contato com as outras e o adensamento só pode ocorrer por causa da compactação do conjunto em decorrência do peso das partículas sobrejacentes. É nesse estágio que ocorre melhor acomodação do material, permitindo a eliminação de bolsões de água e ar, mantendo a suspensão estável.

2.3 Dimensionamento de espessadores

O dimensionamento de um espessador consiste basicamente na definição de sua área unitária, a fim de atender as condições operacionais pré-determinadas. De acordo com Torquato e Luz (2011), para a realização desse dimensionamento são feitos os chamados testes de proveta, em escala de bancada, as quais podem ser de 1.000 ou 2.000 ml. A maior dificuldade nos testes de proveta consiste na identificação do ponto crítico de transição do regime de sedimentação por zona e por compressão: o chamado ponto de compressão. Esse ponto é necessário para o dimensionamento segundo a metodologia de Kynch e seus derivados (OLIVEIRA, LUZ e LACERDA, 2004).

Torquato e Luz (2011) afirmam ainda que os testes podem ser realizados em escala-piloto, porém não é o mais recomendado. Esse fato é devido à dificuldade operacional existente em se garantir a constância da vazão, da concentração mássica de sólidos e de sua granulação na alimentação durante todo o ensaio.

Segundo Guimarães (2010), a tecnologia da sedimentação começou a ser utilizada em 1905, com a invenção do espessador *Dorr*. As técnicas de dimensionamento foram aprimoradas com o tempo e modelos matemáticos cada vez mais precisos permitiram maior assertividade na construção de novas metodologias e processos de modelamento de espessadores.

Diversos são os trabalhos voltados para o dimensionamento desses equipamentos. Dentre as técnicas mais utilizadas pode-se citar: Mishler (1912), Coe e Clevenger (1917), Roberts (1949), Kynch (1952), Talmage e Fitch (1955), Metcalf e Eddy (1979), Oltmann e Wilhelm e Naide, citados por Sousa (2012).

2.3.1 Método de Coe e Clevenger

Baseado no conceito das zonas de sedimentação, o método de Coe e Clevenger é o método mais antigo e ainda muito empregado. Esse método se baseia fundamentalmente na velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre.

Verifica-se experimentalmente que a razão de espessamento varia conforme a diluição da polpa, passando por um ponto de máximo valor, que é o que determina a capacidade necessária para o espessador. Dentro de um espessador contínuo, a densidade da polpa aumentará continuamente com a profundidade, até atingir um valor

crítico, que limita a vazão dos sólidos por unidade de área através dessa zona de concentração crítica (CHAVES, 2013).

Taggart (1945) descreve a forma para realização do cálculo da área para espessamento a partir do referido método, chamando atenção para alguns aspectos:

- equipamento – cilindro de vidro, com no mínimo 2” de diâmetro, profundidade de 12 a 18”. Tais cilindros (provetas) devem estar perfeitamente graduados, e quanto a seus volumes, 2 litros são excelentes;
- testes – duas séries de testes devem ser feitas: uma para determinar a área requerida para obtenção do overflow clarificado e a segunda, para definir o volume do tanque para que se tenha uma descarga com a densidade requerida. Cabe ressaltar, como o faz Taggart (1945) que as condições dos testes devem ser as mesmas que serão encontradas na prática como: tempo do minério em contato com a água ou solução, tipo e quantidade de eletrólitos ou outro reagente presente, temperatura, entre outras;
- teste de área – requer de 6 a 12 amostras de polpa variando a concentração de sólidos entre os valores da alimentação e concentração de lamas no *underflow*. Cada amostra é deixada para decantar até que se identifique a separação clara dos sólidos e do líquido clarificado. O tempo requerido é de 2 ou 3 minutos e, para polpa como materiais finos, de 6 a 10 minutos.

Para a realização do cálculo construir-se-á várias curvas de sedimentação a partir dos ensaios de batelada em diversas concentrações (GUIMARÃES, 2010). Cada ensaio fornecerá polpas com diferentes velocidades de sedimentação. A partir dessas velocidades calcula-se a área unitária de espessamento através da Equação [4],

$$q_s = \frac{v_{so}}{\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_u}} \quad [4]$$

Na qual:

q_s = fluxo de sólidos no sedimentador em $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s}$;

v_{so} = velocidade inicial de sedimentação em um teste de batelada em m/s ;

C_0 = concentração volumétrica de sólidos inicial em Kg/m^3 ;

C_u = concentração volumétrica de sólidos desejada no *underflow* em Kg/m^3 .

O menor valor encontrado para cada concentração corresponde à capacidade do sistema. Ao realizar o inverso de q_s tem-se a área unitária, ou seja, o passo inicial para se calcular a área de um espessador de acordo com a vazão de material a ser espessado.

A razão de espessamento (RE) pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$RE = 1,33 \times \frac{\% \text{sólidos na Alim.} - \% \text{sólidos UF}}{\text{vel. de sedimentação} \times \text{dens. da polpa}} \quad [5]$$

Será obtido um valor de RE em $\text{Kg/m}^2/\text{s}$. Tabulando-se os valores de razão de espessamento em função das diferentes diluições da polpa, identifica-se o menor valor, ou seja, a razão crítica. Essa razão crítica consiste na pior situação que o equipamento poderá ser submetido.

2.3.2 Método de Kynch ou Talmage e Fitch

Em conformidade com Chaves (2013), o método de dimensionamento proposto por Talmage e Fitch é baseado nos conceitos introduzidos por Coe e Clevenger e na técnica de avaliação da velocidade de sedimentação em função da concentração, baseada nos conceitos introduzidos por Kynch. Tal método admite também que a razão de espessamento é dependente da diluição da polpa alimentada no espessador.

Diferentemente do método de Coe e Clevenger que requer de 6 a uma dúzia de testes, o método de Talmage e Fitch necessita de um único teste, a partir do qual se confecciona a curva de sedimentação, como mostrado na Figura 12.

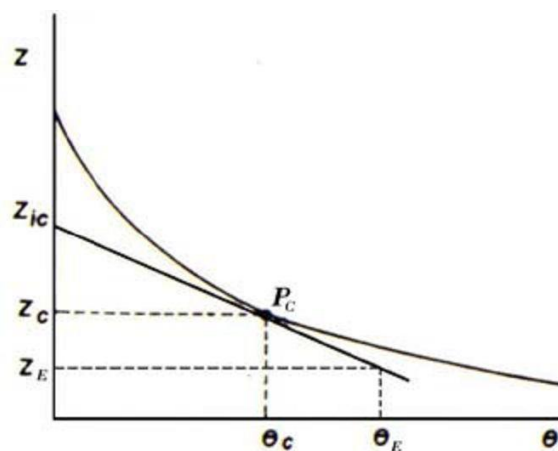


Figura 12 - Curva de sedimentação típica.

Fonte: Guimarães (2010).

Na curva apresentada, P_c é o ponto crítico, o qual pode ser definido com mais precisão pela metodologia proposta por *Roberts*. Por essa metodologia traça-se um gráfico de $Z-Z_f$ versus θ em papel mono-Log, a partir do ensaio de sedimentação. Por esse gráfico, como mostrado na Figura 13, fica clara a descontinuidade no ponto crítico, permitindo a fácil identificação de θ_c (tempo decorrido para alcançar o ponto de compressão).

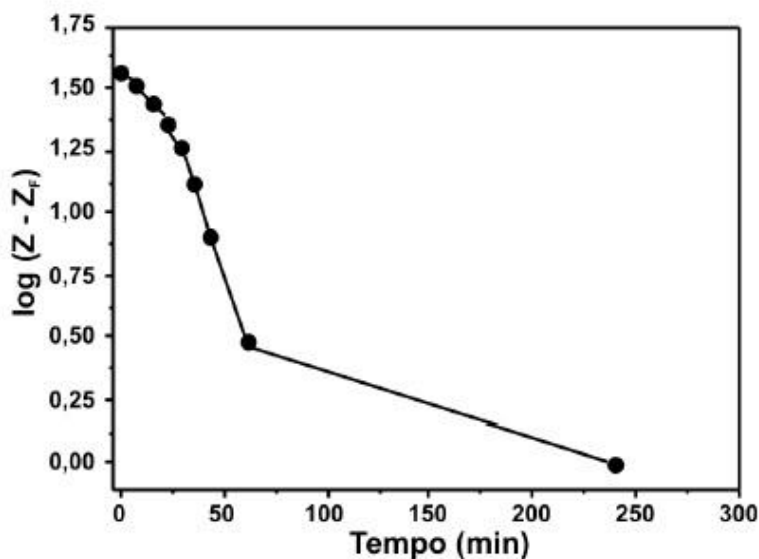


Figura 13 - Determinação do ponto crítico de acordo com metodologia de Roberts.

Fonte: PINTO, et al. (2009).

Os passos para o cálculo da razão de espessamento segundo Talmage e Fitch são os que se seguem:

- identificar o ponto crítico na curva e traçar uma reta tangente ao mesmo;
- ler no eixo de tempo qual o tempo θ_c para atingir o ponto crítico;
- obter a altura da interface para uma determinada concentração de sólidos desejada no *underflow*. Essa altura é representada por Z_e e é calculada a partir da equação:

$$Z_e = \frac{CoZo}{Cu} \quad [6]$$

Onde:

C_o = Concentração inicial de sólidos na alimentação em Kg/m^3 ;

Z_o = Altura inicial da interface em m;

C_u = Concentração de sólidos desejada no *underflow* em Kg/m^3 .

- Em posse do valor de Z_e , ler qual o respectivo tempo, θ_e . Quando a concentração requerida no *underflow* for menor do que a concentração da camada crítica, θ_e é o valor da ordenada da interseção da linha horizontal traçada por Z_e . Caso contrário, o valor será dado pela ordenada de interseção com a tangente à curva que passa pelo ponto crítico;
- Calcular a razão de espessamento, RE, em $\text{m}^2.\text{s/Kg}$, pela equação:

$$RE = \frac{\theta_e}{C_o Z_o} \quad [7]$$

Na qual,

θ_e = Tempo, dado em segundos, necessário para que a polpa atinja a altura Z_e correspondente a uma determinada porcentagem de sólidos no *underflow*;

C_o = Concentração inicial de sólidos na alimentação em Kg/m^3 ;

Z_o = Altura inicial da interface em m;

Para encontrar o valor de área demandada para o espessador a partir da razão de espessamento, basta que se multiplique a mesma pela taxa de alimentação do equipamento que, para compatibilidade das unidades, deve ser dada em Kg/s .

2.3.3 Método de Oltmann

Esse método de dimensionamento de espessadores é semelhante à metodologia proposta por Talmage e Fitch: ambos utilizam apenas uma curva de sedimentação para a determinação dos parâmetros necessários.

Os passos a serem executados para o dimensionamento segundo Oltmann são descritos abaixo, como o fazem Guimarães (2010):

- confecção da curva de sedimentação;

- determinar o ponto de compressão;
- traçar uma reta da altura inicial, passando pelo ponto de compressão;
- determinar Z_e pela Equação 6;
- traçar uma horizontal partindo de Z_e ;
- fazer a leitura de θ_e a partir da interseção da horizontal Z_e com a reta traçada;
- calcular a razão de espessamento pela Equação [7], utilizando porém um fator de escala.

Os parâmetros citados podem ser identificados na Figura 14, a qual apresenta uma curva de sedimentação para aplicação do método gráfico de Oltmann.

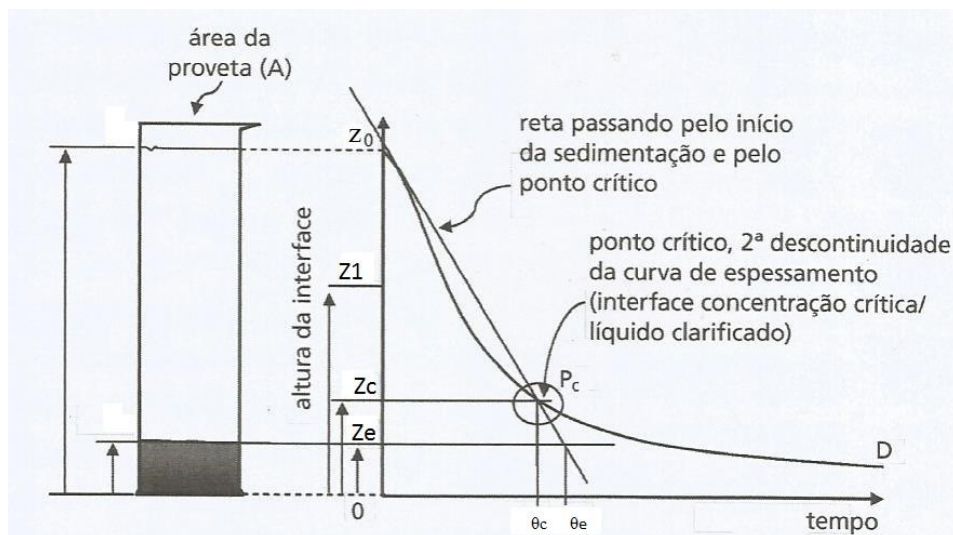


Figura 14 - Método gráfico de Oltmann.

Fonte: Adaptado de CHAVES (2013).

Oltmann propõe uma variante empírica que depende da identificação do ponto crítico. Não há justificativa teórica, e o fator de escala a ser usado é 1,20 (CHAVES, 2013).

3. METODOLOGIA

Os procedimentos adotados incluem: caracterização da amostra de rejeito fosfático, testes de proveta em batelada e construção de curvas de sedimentação para aplicação dos métodos gráficos de dimensionamento de espessadores. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Unidade Araxá.

3.1 Amostra

A amostra utilizada foi doada por uma mineradora X em atividade na região. A amostra foi recebida previamente seca, embalada e identificada (Figura 15).

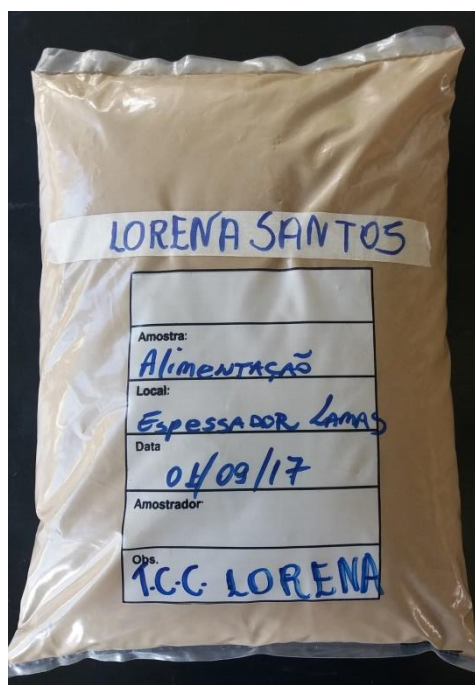


Figura 15 - Amostra para ensaios.

Trata-se de 2.078 Kg de material sólido, composto em sua maioria por lama natural fosfática (descartada na etapa de deslamagem) e uma pequena parcela de rejeito de flotação. Tal material alimentaria a operação de espessamento. Juntamente com a amostra foram enviadas as informações operacionais do espessador da mineradora X, as quais são dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do espessador de rejeito utilizado pela mineradora X.

Espessador de Rejeito	
Diâmetro	100 m
Alimentação	400 t/h
% sólidos na alimentação	3
% sólidos no underflow	15

Antes dos ensaios de caracterização da amostra, esta foi preparada, consistindo essencialmente na homogeneização e quarteamento do material constituinte. Primeiramente foram feitos 4 tombamentos completos em lona para homogeneizar os sólidos (Figura 16) e, em seguida, fez-se pilhas cônicas para quarteamentos subsequentes (Figura 17). Por quarteamento foi separada uma alíquota de 49g para o ensaio de picnometria.

**Figura 16 - Homogeneização da amostra utilizando lona.****Figura 17 - Formação da pilha 17a e quarteamento 17b.**

3.2 Caracterização da amostra

A caracterização da amostra consistiu na determinação da massa específica dos sólidos, por picnometria, e na identificação da distribuição granulométrica da mesma, via peneiramento a úmido.

3.2.1 Massa específica dos sólidos

Por meio da picnometria calculou-se a densidade relativa dos sólidos. Para aplicação desse método torna-se necessário conhecer as massas do picnômetro vazio, picnômetro com amostra, picnômetro preenchido por água mais amostra e, por fim, picnômetro acrescido de água (Figura 18). Todos esses valores de massa foram aferidos com auxílio de uma balança de precisão.

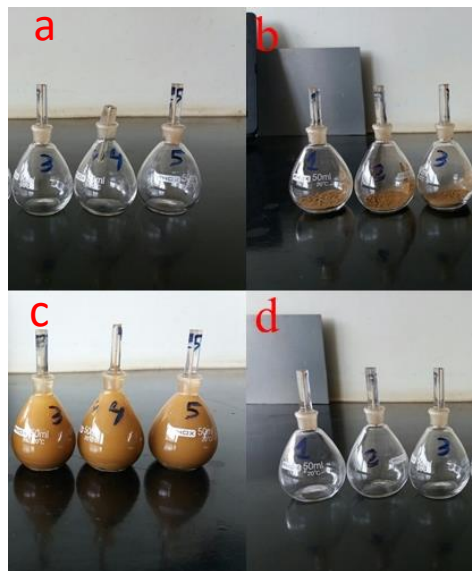


Figura 18 - Teste de picnometria. 18a picnômetro vazio, 18b picnômetro com amostra, 18c picnômetro mais amostra e água, 18d picnômetro com água.

O cálculo da densidade aparente é feito substituindo-se os valores de massa na equação 8.

$$d_s = \frac{(A_2) - (A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad [8]$$

Onde:

d_s = densidade dos sólidos (g/cm^3);

A_1 = massa do picnômetro (g);

A_2 = massa do picnômetro + amostra (g);

A_3 = massa do picnômetro + amostra + água (g);

A_4 = massa do picnômetro + água (g).

Realizaram-se 3 testes de picnometria, e a densidade dos sólidos foi determinada por meio da média aritmética entre os valores obtidos em cada um dos testes.

3.2.2 Distribuição granulométrica

A fim de se analisar a forma como as partículas se distribuem por faixas granulométricas, realizou-se um peneiramento a úmido utilizando peneirador suspenso (Figura 19). Uma massa de 30g da amostra foi peneirada.



Figura 19 - Peneirador suspenso e peneiras utilizadas.

As peneiras utilizadas no teste pertencem a Série Tyler cujas aberturas podem ser conferidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Peneiras utilizadas na análise granulométrica.

Mesh (#)	Abertura (mm)
48	0,297
65	0,210
100	0,149
150	0,105
200	0,074
270	0,053
400	0,037

3.3 Metodologia adotada para aplicação do método de Coe e Clevenger

Como característica desse método, realizaram-se testes de sedimentação em proveta com diferentes concentrações de sólidos e, para cada teste, foi construída uma curva de sedimentação. As concentrações de sólidos dos testes são valores compreendidos entre a concentração da alimentação e a concentração do *underflow*. Um total de 7 testes foi realizado para esse método de dimensionamento de espessadores, e as características dos mesmos estão expressas na Tabela 4. As densidades das polpas foram calculadas a partir da equação 9.

$$\%s = \frac{ds(dp-da)}{dp(ds-da)} \times 100 \quad [9]$$

Onde:

% s = porcentagem de sólidos na polpa

ds = densidade dos sólidos (g/cm³)

dp = densidade da polpa (g/cm³)

da = densidade da água (g/cm³)

Conhecidas as densidades das polpas é possível o cálculo da concentração de sólidos inicial (C₀) em cada teste, utilizando-se a equação 10.

$$Co = dp \times \%s \quad [10]$$

Tabela 4 - Testes realizados para dimensionamento de espessador via Coe e Clevenger.

Teste	Porcentagem de sólidos na alimentação	Densidade da polpa (Kg/m ³)	Concentração de sólidos na alimentação (Kg/m ³)
1	3	1.019	30,57
2	5	1.032	51,60
3	7	1.045	73,15
4	9	1.059	95,31
5	11	1.073	118,03
6	13	1.087	141,31
7	15	1.102	165,30

Para cada um dos 7 testes fez-se uma curva de sedimentação e, assim, a velocidade de sedimentação das partículas constituintes da polpa foi calculada. Esse cálculo foi feito considerando a região de velocidade de sedimentação constante, identificada graficamente por uma reta. Tomou-se por essa velocidade a razão entre a variação da altura da interface pelo tempo decorrido.

Em posse desses dados, foi possível aplicar a Equação [4] para o cálculo do fluxo de sólidos, cujo inverso forneceu os valores de área unitária.

3.4 Metodologia adotada para aplicação do método de Talmage e Fitch

Dadas as concentrações de sólidos na alimentação e no *underflow* do espessador, um teste de proveta foi feito (Figura 20).



Figura 20 - Teste de proveta realizado para aplicação da metodologia de Talmage e Fitch.

Após o ensaio confeccionou-se a respectiva curva de sedimentação para a aplicação do método gráfico de Talmage e Fitch.

Por meio da equação [7] calculou-se a razão de espessamento e a por fim a área requerida para o espessador com base na taxa de alimentação da operação industrial.

3.5 Metodologia adotada para aplicação do método de Oltmann

De forma similar ao método aplicado para o dimensionamento via Talmage e Fitch, realizou-se um teste de proveta para construção da curva de sedimentação. O estado final do teste pode ser visto na Figura 21.



Figura 21 - Teste de proveta realizado para aplicação da metodologia de Oltmann.

Utilizando um fator multiplicador igual a 1,2 na Equação [7], obteve-se a razão de espessamento e a respectiva área demandada para atingir a concentração de sólidos desejada no *underflow*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da amostra e nos testes de proveta.

4.1 Caracterização da amostra

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da amostra são apresentados a seguir.

4.1.1 Massa específica dos sólidos

Realizou-se um total de 3 testes de picnometria (P1, P2 e P3) para determinação da massa específica dos sólidos. O valor utilizado nos cálculos foi o valor médio dos 4 testes. Na Tabela 5 a seguir é possível ver os valores das massas obtidas durante a realização dos ensaios.

Tabela 5 - Resultados obtidos no teste de picnometria.

	Picnômetro (g)	Picnômetro e amostra (g)	Picnômetro, amostra e água (g)	Picnômetro e água (g)	Massa específica (g/cm³)
P1	30,68	32,500	81,370	80,240	2,638
P2	31,94	33,660	83,440	82,330	2,820
P3	31,54	33,560	83,380	82,200	2,405
	Massa específica média (g/cm³)				2,621
	Desvio padrão (g/cm³)				0,208

4.1.2 Distribuição granulométrica

Os resultados obtidos no peneiramento a úmido via peneirador suspenso são exibidos na Tabela 6. Baseando-se nessa Tabela confeccionou-se a curva granulométrica mostrada na Figura 22.

Tabela 6 - Resultados da análise granulométrica.

Malha #	Abertura (mm)	Massa retida (g)	Retida simples %	Retida acumulada %	Passante acumulada %
48	0,297	0,020	0,068	0,068	99,932
65	0,210	0,100	0,340	0,408	99,592
100	0,149	0,170	0,578	0,985	99,015
150	0,105	0,500	1,699	2,684	97,316
200	0,074	0,690	2,345	5,029	94,971
270	0,053	0,420	1,427	6,456	93,544
400	0,037	2,590	8,801	15,257	84,743
-400	Total	24,940	84,743	100,000	0,000

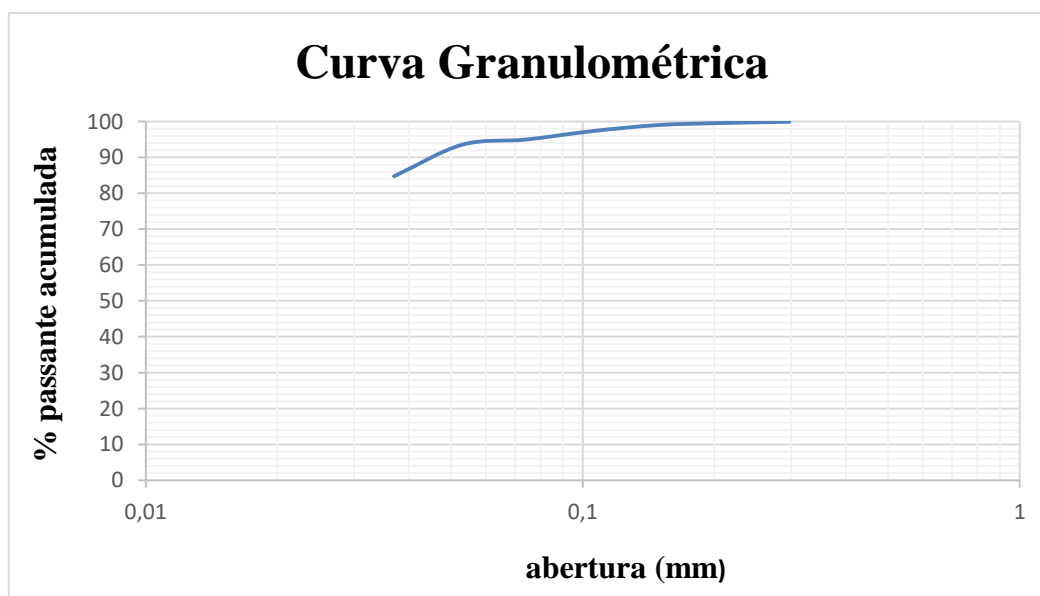


Figura 22 - Curva granulométrica.

Com base nos dados da Tabela 6 e da Figura 22, conclui-se que a amostra é composta em sua maioria por material fino com 84,743% da massa possuindo granulometria inferior a 400#, ou seja, passante na abertura de 0,037 mm. O material consiste essencialmente de finos naturais de fosfato.

4.2 Resultados obtidos pela metodologia de Coe e Clevenger

Na Figura 23 é possível perceber a diferença visual entre as 7 polpas preparadas para execução dos ensaios. Fica evidente que em polpas com menores porcentagens de sólidos ocorre um aumento visual da turbidez, dificultando assim uma clara separação entre o líquido clarificado e o sólido espessado.

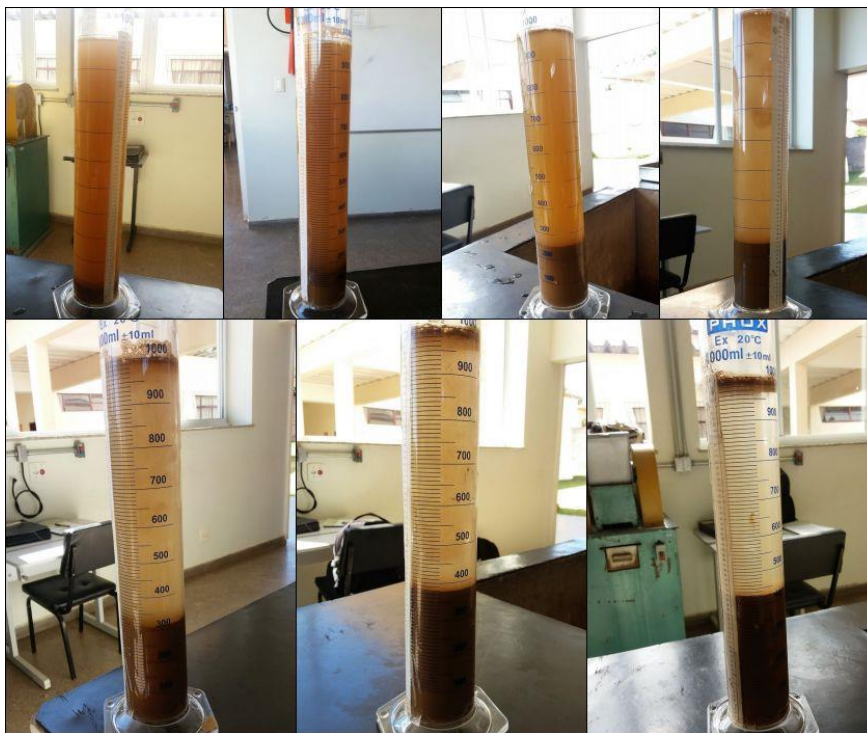


Figura 23 - Diferentes polpas preparadas com porcentagens de sólido de 3, 5, 7, 9, 11, 13 e 15%, da esquerda para a direita.

Após a realização dos testes de proveta, com variadas porcentagens de sólidos, foram plotadas as respectivas curvas de sedimentação mostradas na Figura 24. As tabelas que deram origem às curvas são exibidas no Anexo 1.

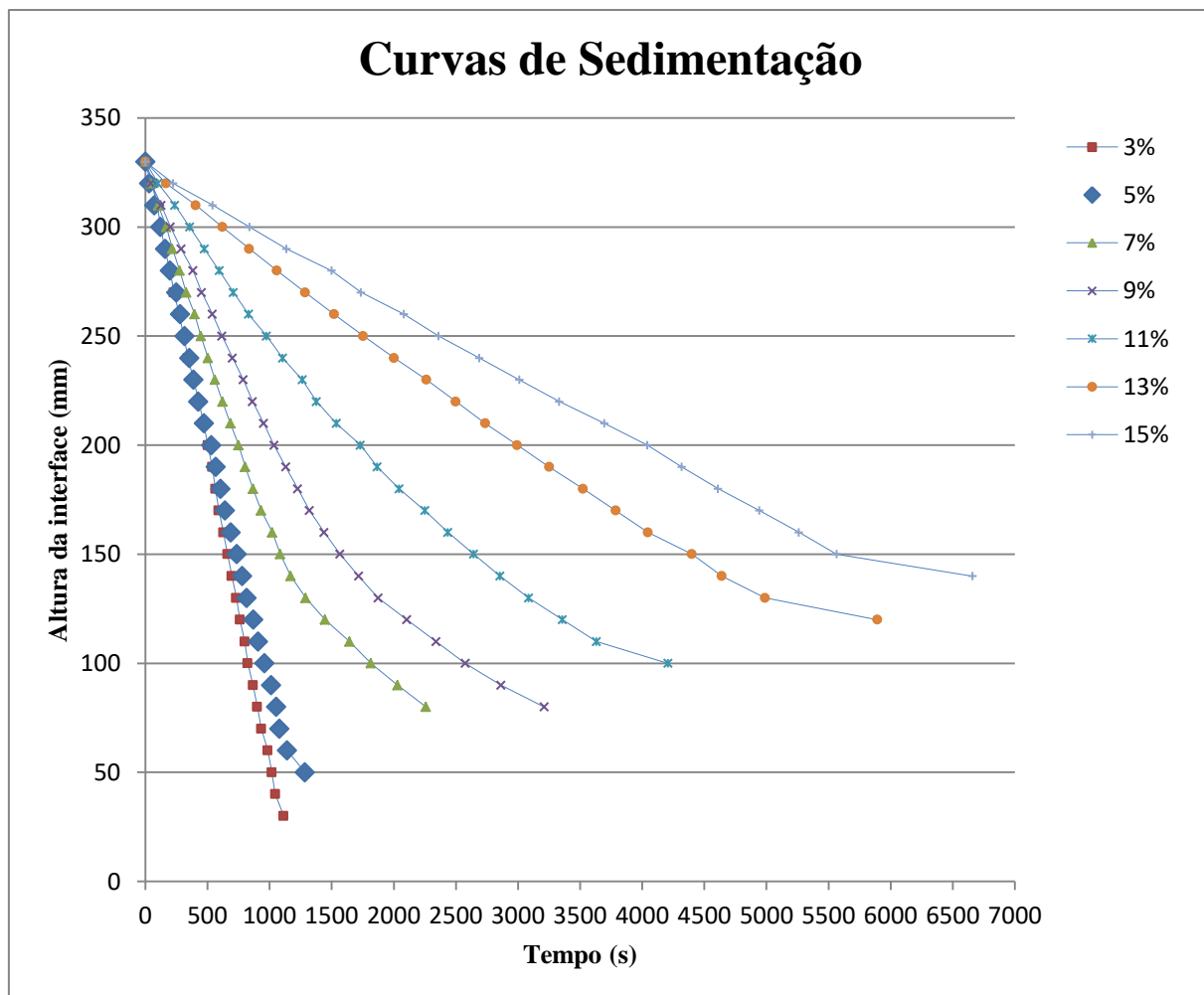


Figura 24 - Curvas de sedimentação obtidas nos testes para aplicação da metodologia de Coe e Clevenger.

Pela Figura 24 constata-se que os dois testes com as menores porcentagens de sólido, ou seja, mais diluídas, apresentaram um comportamento mais linear, impondo certa dificuldade para identificação do ponto de compressão no gráfico. Já os testes com porcentagens de sólidos variando entre 7 e 15% já mostraram uma curva típica, de acordo com a base teórica.

A Tabela 7 abaixo mostra as velocidades de sedimentação obtidas por meio dos gráficos plotados a partir dos resultados dos testes de proveta. Os dados que embasaram esses cálculos estão discriminados no Anexo 1.

Tabela 7 - Velocidades de sedimentação obtidas pelos testes de proveta.

% Sólidos do teste	Velocidade de sedimentação (10^{-3} m/s)
3	0,271
5	0,242
7	0,170
9	0,108
11	0,070
13	0,042
15	0,032

Verifica-se que quanto maior a porcentagem de sólidos na polpa, menor se torna a velocidade de sedimentação. Esse fato é corroborado por França e Casqueira (2007). Esses autores justificam que o fato observado na prática é devido à interação das partículas com outras partículas e com o fluido. Ao sedimentar livremente a partícula sofre apenas a resistência imposta pelo empuxo. Quando isolada, ou com poucas partículas, esta descreve uma trajetória descendente livre e sedimenta. Quando há maior quantidade de partículas sedimentando no fluido existe a probabilidade de mais de uma partícula ter a mesma trajetória. Há também a presença de partículas cujas densidades e velocidades terminais são diferentes. Assim, quanto maior a porcentagem de sólidos em suspensão, menor será a velocidade de sedimentação desses sólidos (efeito de população), pois a taxa de sedimentação deixa de ser constante para tornar-se decrescente.

Em posse das velocidades de sedimentação, aplicou-se a Equação [4] cujo resultado é exibido na Tabela 8. O teste com porcentagem de sólidos igual a 3% foi o que apresentou menor fluxo de sólidos e conseqüentemente, maior área unitária. Para esse teste em questão tem-se o pior cenário ao qual o espessador poderia ser submetido, ou seja, exige maior capacidade do sistema. A razão de espessamento obtida foi de $98,385.m^2.s/Kg$.

Tabela 8 - Áreas para espessamento calculadas de acordo com a metodologia de Coe e Clevenger.

% Sólidos do teste	Fluxo de sólidos (Kg/m ² .s)	Área unitária (m ² .s/Kg)
3	0,0102	98,385
5	0,0182	55,084
7	0,0223	44,829
9	0,0243	41,134
11	0,0289	34,612
13	0,0409	24,453
15	-	-

4.3 Resultados pela metodologia de Talmage e Fitch

A Figura 25 apresenta a curva de sedimentação obtida para o teste de proveta a 3% de sólidos (igual à da alimentação do espessador industrial). Como o método de Talmage e Fitch é um método que consiste de análise gráfica, são plotados nesse gráfico as variáveis de interesse.

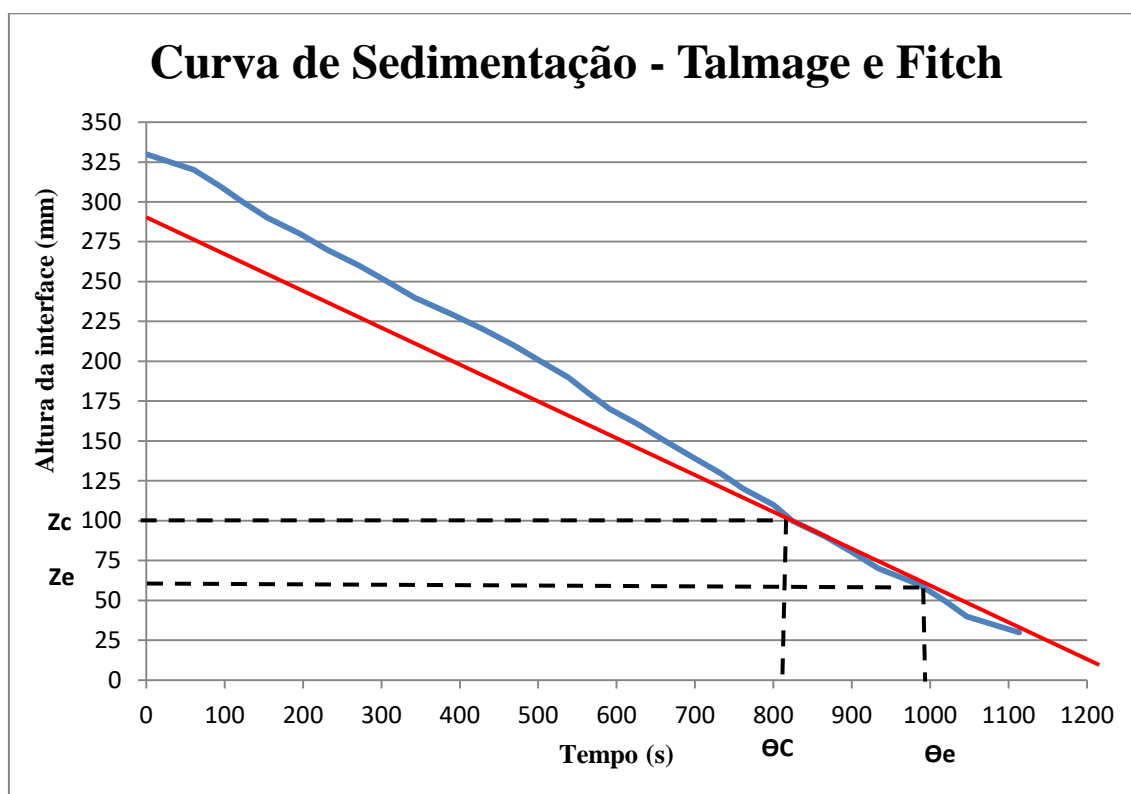


Figura 25 - Curva de sedimentação para aplicação da metodologia de Talmage e Fitch.

A Tabela 9 exibe o valor das variáveis obtidas. O valor de Z_e , altura para que a polpa atinja a porcentagem de sólidos desejadas no *underflow*, foi determinada frente aplicação da Equação [6]. As demais variáveis mostradas na tabela em questão foram obtidas graficamente.

Tabela 9 - Variáveis obtidas pela aplicação da metodologia de Talmage e Fitch.

Método de Talmage e Fitch	
Variável	Valor
Z_e	0,061 m
θ_e	998 s
Z_c	0,100 m
θ_c	805 s
Z_o	0,330 m

Aplicando-se a Equação [7] para o cálculo da razão de espessamento, obteve-se o valor de $98,927 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{Kg}$.

4.4 Resultados pela metodologia de Oltmann

Para a aplicação da metodologia gráfica de dimensionamento de espessadores segundo Oltmann, foi gerada a curva de sedimentação como exibe a Figura 26. A Tabela 10 expõe as variáveis e seus respectivos valores, obtidas segundo a metodologia de Oltmann. A altura da interface Z_e foi calculada por meio da Equação [6].

A razão de espessamento obtida para o método de dimensionamento em questão foi de $115,023 \text{ m}^2 \cdot \text{s}/\text{Kg}$.

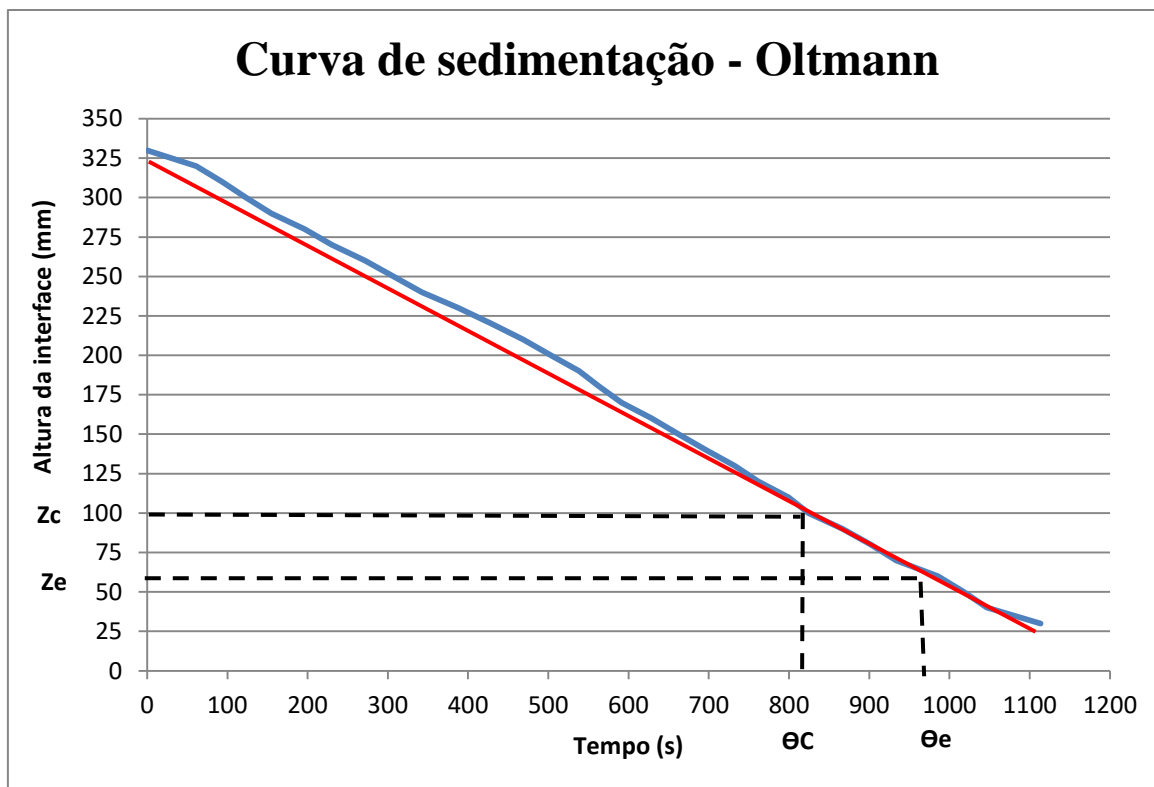


Figura 26 - Curva de sedimentação para aplicação da metodologia de Oltmann.

Tabela 10 - Variáveis obtidas pela aplicação da metodologia de Oltmann.

Método de Oltmann	
Variável	Valor
Z_e	0,061 m
θ_e	967 s
Z_c	0,100 m
θ_c	805 s
Z_o	0,330 m

Comparando-se os resultados de razões de espessamento obtidas pelos três métodos diferentes, chegou-se aos seguintes resultados expressos na Tabela 11. Nessa Tabela são ainda mostradas as respectivas áreas dimensionadas para o espessamento,

calculadas de acordo com a taxa de alimentação, em Kg/s, do espessador de lammas industrial.

Tabela 11 - Comparação entre as RE e áreas para espessamento obtidas.

Método	RE (m².s/Kg)	Área para espessamento (m²)	Diâmetro (m)
Coe e Clevenger	98,385	10.931,667	117,977
Talmage e Fitch	98,927	10.991,889	118,302
Oltmann	115,023	12.780,333	127,563
Valores utilizados industrialmente		7.853,982	100,000

Pela Tabela 11 verifica-se que o método de dimensionamento que retornou um valor mais próximo do adotado industrialmente foi o método de Coe e Clevenger. Todos os valores de área obtidos são maiores do que o real, isso permite concluir que, na prática, houve um subdimensionamento do espessador analisado. Pelo método de Coe e Clevenger esse subdimensionamento foi de aproximadamente 18% no diâmetro.

Comparando-se os métodos de dimensionamento utilizados constata-se que todos retornaram valores de razão de espessamento bem próximos, corroborando com Guimarães (2010), sendo que por meio do método de Oltmann obteve-se a maior RE e, conseqüentemente, maior área requerida para espessar o material de alimentação do equipamento.

5. CONCLUSÕES

O trabalho em questão teve como objetivo realizar o dimensionamento de um espessador convencional por meio de três métodos diferentes. Em busca da validação do diâmetro de um espessador industrial, comparou-se os resultados obtidos pelas técnicas de Coe e Clevenger, Talmage e Fitch e Oltmann com o diâmetro utilizado na prática industrial.

Durante a execução dos testes de proveta necessários para as três metodologias aplicadas percebeu-se que a interface entre o líquido clarificado e o sólido espessado não é tão fácil de ser identificada quando trabalha-se com polpas diluídas e compostas essencialmente de material sólido tipo lama.

Todos os métodos utilizados neste trabalho retornaram razões de espessamento bem próximas entre si e valores de diâmetro maiores do que o do espessador em questão, implicando assim na ocorrência de subdimensionamento.

A metodologia de Coe e Clevenger foi a que mais se aproximou do valor industrial e o subdimensionamento do diâmetro calculado foi de aproximadamente 18%. Algumas ações que poderiam minimizar o impacto desse fato seria a aplicação de agente aglomerante no espessador a fim de se aumentar a velocidade de sedimentação. Desse modo, a área requerida para que as partículas sedimentassem seria menor e a alimentação poderia inclusive ter algum acréscimo. Convém ressaltar que essa é uma sugestão e que estudos de sedimentação na presença de floculantes e/ou coagulantes devem ser feitos para melhor análise do cenário analisado.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Determinar novas velocidades de sedimentação do material na presença de agentes aglomerantes: floculantes e/ou coagulantes. Analisar se a presença dessas substâncias tem impacto significativo na redução da área requerida para o espessamento, via métodos convencionais de dimensionamento de espessadores.

Calcular razões de espessamento utilizando outras técnicas de dimensionamento tais como Mishler, Roberts, Metcalf e Naide, a fim de se comparar os valores obtidos por diferentes metodologias.

7. REFERÊNCIAS

BOSON, P. H. G., CASTRO, L. M. A., FEITOSA, V. M. N. *Os instrumentos de gestão de recursos e sua implantação na mineração: a experiência brasileira*. In: DOMINGUES, A. F., BOSON, P. H. G., ALÍPAZ, S. (Org.). *A gestão dos recursos hídricos e a mineração*. Brasília: IBRAM, 2006. p. 71-85.

CHAVES, A. P. *Desaguamento, Espessamento e Filtragem*. 4. ed. ver. e aprimorada São Paulo: Oficina de Textos, 2013, v.2. 240p.

COE, H.S; CLEVINGER, G.H: *Methods for determining the capacities of slime settling tanks*. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, v.60, p.356-358; (1917); Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FRANÇA, S. C. A., CASUQUEIRA, R. G. *Ensaio de Sedimentação*. In: SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., BRAGA, P. F. A. *Laboratório de Minérios – Práticas Laboratoriais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT,2007. p. 391-408.

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

KYNCH, G. J. *A Theory of Sedimentation*. 1952 Trans. Faraday Society, 48, 1666-177, London; Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. *Tratamento de Minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010, 932p.

METCALF; EDDY, Inc. *Waste water engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, 2 ed. New York, McGraw-Hill, 1979, 920p; Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MISHLER, R. T. *Settling Slimes at the Tiger Mill*. 1912 Engng. Min. J., 94, 643-646; Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, M. L. M., LUZ, J. A. M., LACERDA, C. M. M. *Escola de Minas da universidade Federal de Ouro Preto*. Espessamento e Filtragem, Ouro Preto. 2004, 121p.

PINTO, T. C. S., LIMA, J. R. B., JÚNIOR, D. M., FILHO, L. S. L. *Dimensionamento de espessadores: validação experimental de três técnicas convencionais*. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 2, p. 243-249, abr/jun. 2009.

ROBERTS, E. J. *Thickening, art or science*. In: Mining Engineering, v.1, p. 61-64, 1949. Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TAGGART, A. F. *Handbook of Mineral Dressing. Ores and Industrial Minerals*, New York: J. Wiley & Sons, 1945,.

TALMAGE, W.P.; FITCH, E.B.; *Determining Thickener unit areas*, Ind. Eng.Chem, v.47 (1955); Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TORQUATO, N. C., LUZ, J. A. M. *Espessadores no beneficiamento de minério de ferro*. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p. 091-096, jan/mar. 2011.

VALADÃO, E. S. G.; ARAÚJO, A.C.; ANDRADE, V. L. L. *Curso de Sedimentação*. Belo Horizonte: Fundação Christiano, 1991. Apud. SOUSA, P. A. *Espessamento de Polpas*. 2012. 49 f. Monografia. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

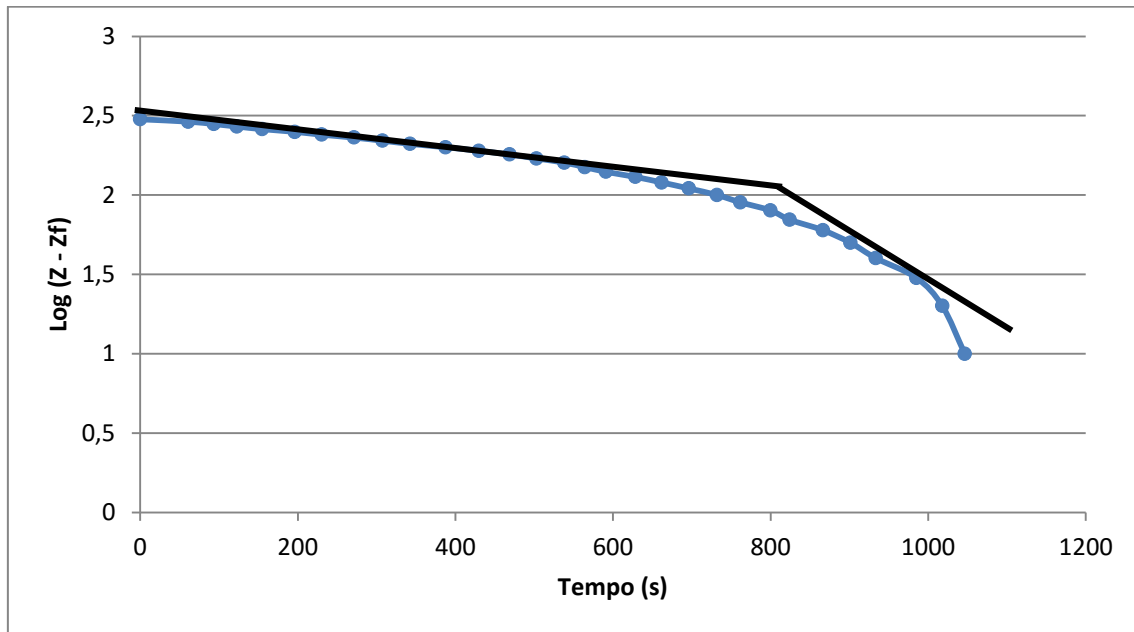
VALADÃO, E. S. G., ARAUJO, A. C. *Introdução ao Tratamento de Minérios*. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 234p.

VLC: FILTRAÇÃO, SEDIMENTAÇÃO. Espessador de lama. Disponível em: <
<http://www.vlc.com.br/espessador-de-lama/>>. Acesso em 15 de Outubro de 2017.

8. ANEXO 1: PONTOS CRÍTICOS E VELOCIDADES DE SEDIMENTAÇÃO

Teste com 3% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



Cálculo da velocidade de sedimentação.

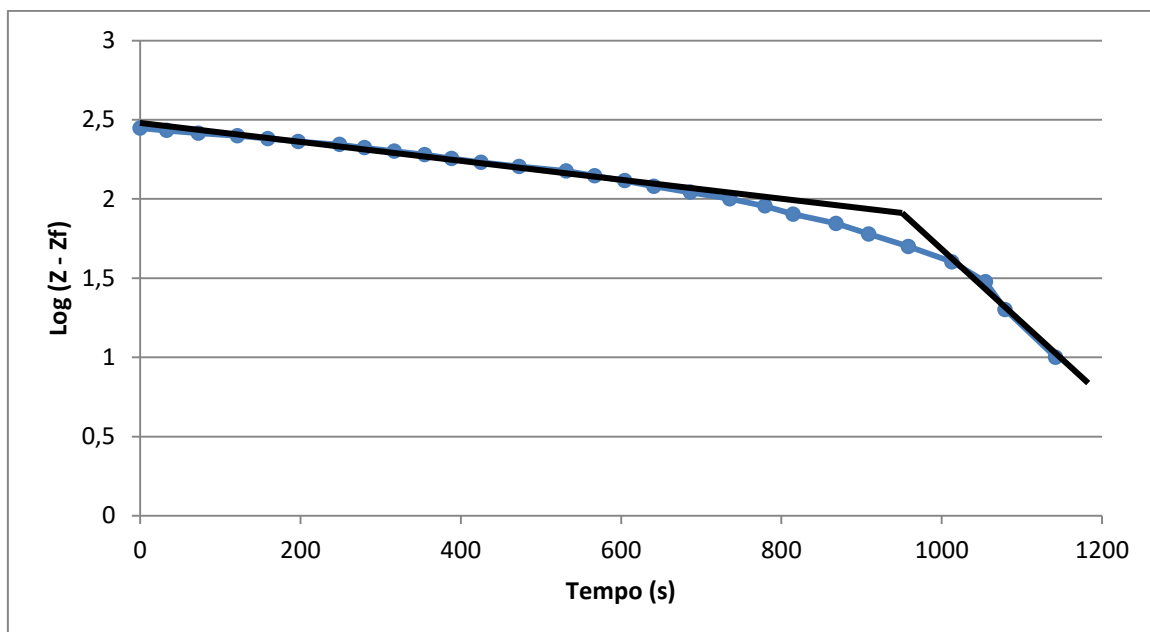
Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	60,88	320
2	93,46	310
3	122,87	300
4	154,93	290
5	196,35	280
6	230,31	270
7	271,45	260
8	307,43	250
9	342,39	240
10	387,77	230
11	429,91	220
12	468,69	210
13	502,98	200
14	538,32	190
15	564,15	180
16	591,14	170
17	628,7	160
18	661,97	150

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 200)}{(502,98 - 60,88)} = 0,271 \text{ mm/s}$$

19	696,49	140
20	732,07	130
21	761,65	120
22	799,77	110
23	824,14	100
24	866,49	90
25	901,55	80
26	933,75	70
27	985,36	60
28	1017,96	50
29	1046,45	40
30	1113,76	30

Teste com 5% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



Cálculo da velocidade de sedimentação.

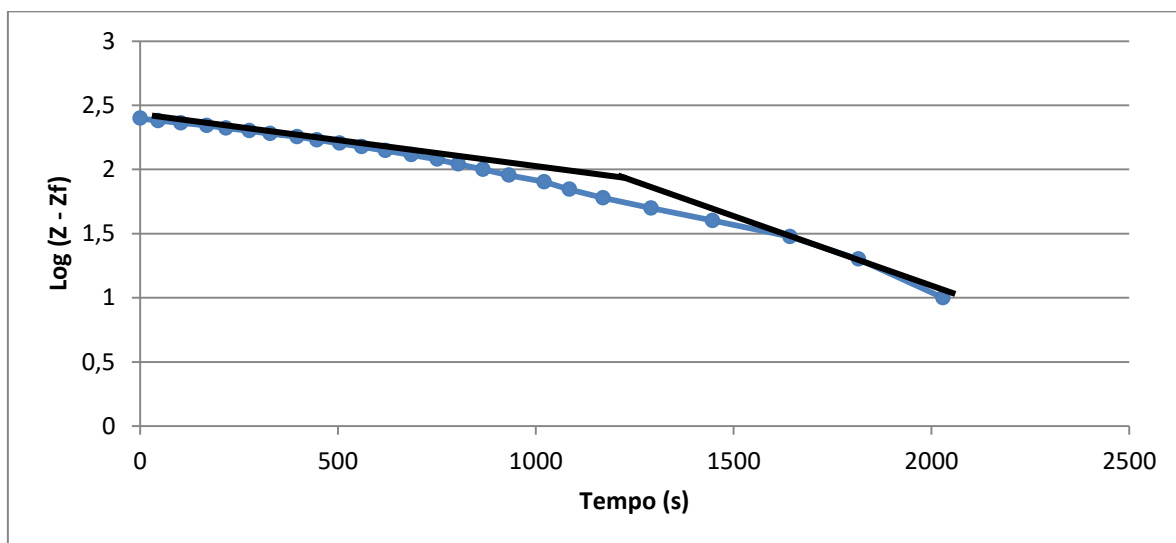
Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	33,05	320
2	72,79	310
3	121,29	300
4	159,52	290
5	197,3	280
6	249,04	270

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 150)}{(735,93 - 33,05)} = 0,242 \text{ mm/s}$$

7	280,06	260
8	317,08	250
9	354,95	240
10	388,62	230
11	425,37	220
12	472,97	210
13	531,58	200
14	567,1	190
15	604,8	180
16	641,05	170
17	686,67	160
18	735,93	150
19	779,7	140
20	815,03	130
21	868,56	120
22	909,17	110
23	958,84	100
24	1013,05	90
25	1054,96	80
26	1079,35	70
27	1142,36	60
28	1284,48	50

Teste com 7% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



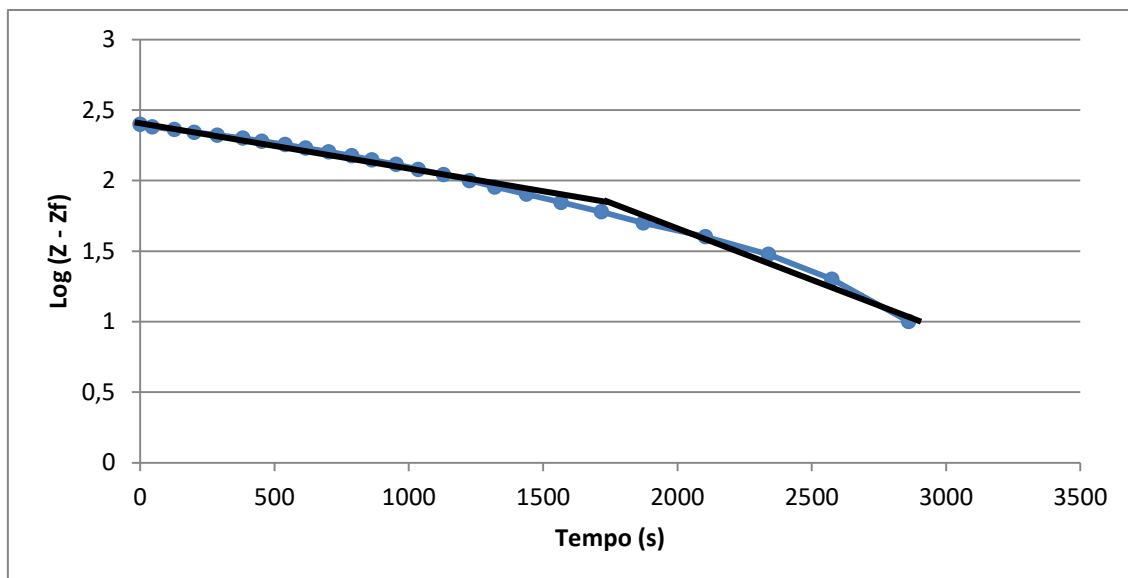
Cálculo da velocidade de sedimentação.

Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	44,99	320
2	102,94	310
3	168,49	300
4	216,83	290
5	275,65	280
6	328,95	270
7	396,38	260
8	446,77	250
9	504,08	240
10	560,1	230
11	620,04	220
12	685,24	210
13	750,57	200
14	804,13	190
15	866,56	180
16	932,34	170
17	1021,55	160
18	1085,09	150
19	1169,72	140
20	1291,25	130
21	1447,2	120
22	1642,35	110
23	1816,18	100
24	2029,4	90
25	2259,05	80

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 180)}{(866,56 - 44,99)} = 0,170 \text{ mm/s}$$

Teste com 9% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



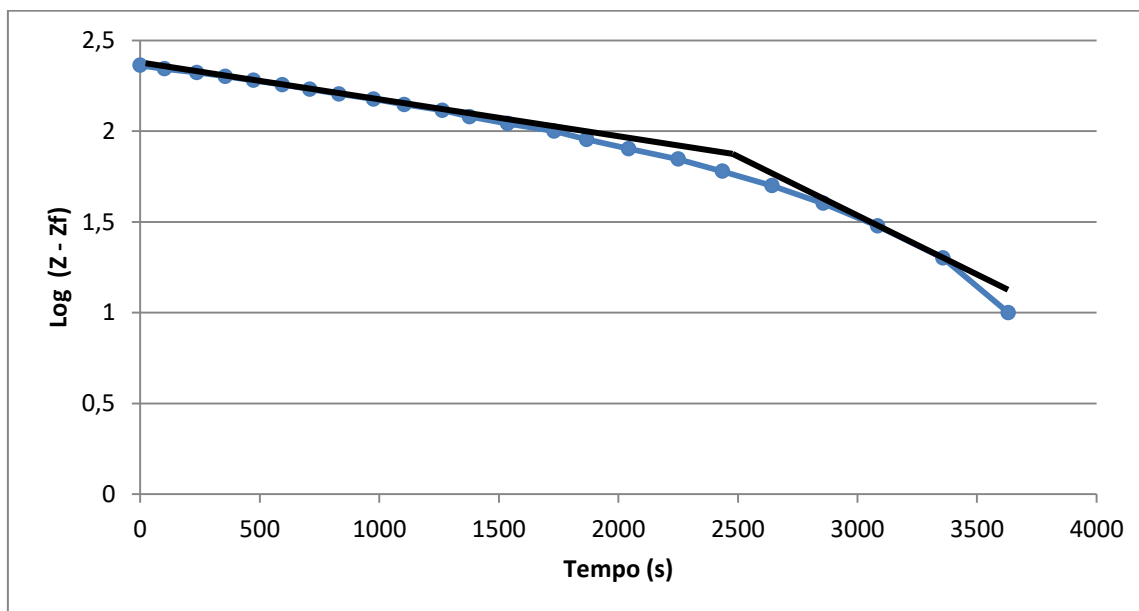
Cálculo da velocidade de sedimentação.

Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	45,53	320
2	127,04	310
3	201,68	300
4	287,51	290
5	383,11	280
6	453,36	270
7	539,96	260
8	616,55	250
9	701,54	240
10	788,17	230
11	862,68	220
12	953,01	210
13	1036,26	200
14	1129,99	190
15	1226,56	180
16	1320,95	170
17	1438,78	160
18	1566,92	150
19	1717,37	140
20	1873,91	130
21	2105,03	120
22	2339,51	110
23	2575,41	100
24	2862,26	90
25	3211,45	80

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 140)}{(1717,37 - 45,53)} = 0,108 \text{ mm/s}$$

Teste com 11% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



Cálculo da velocidade de sedimentação.

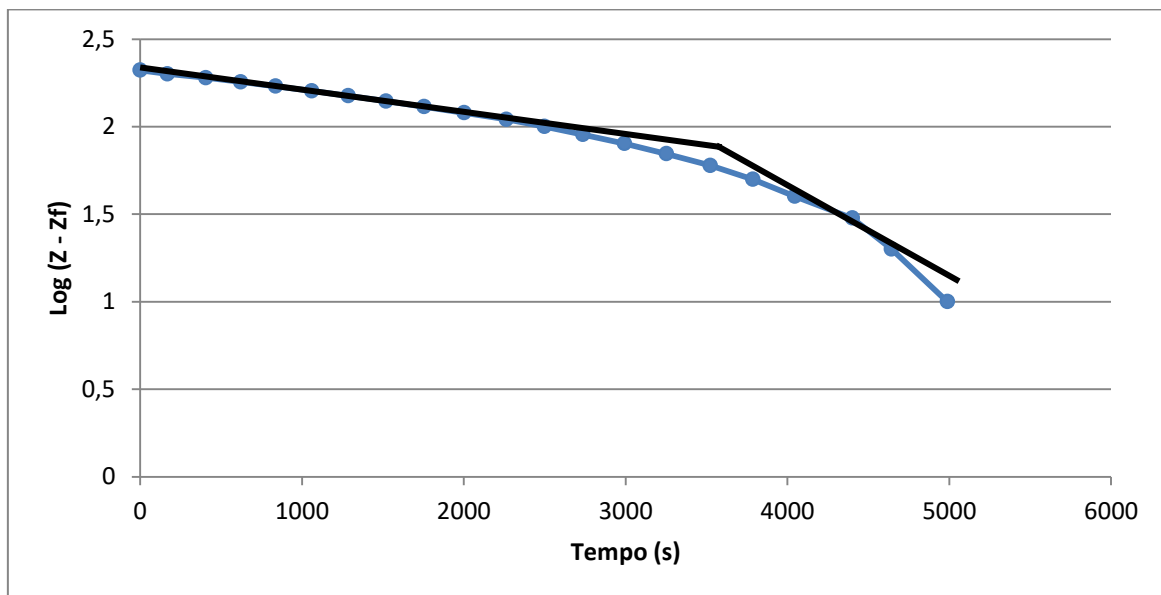
Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	101,38	320
2	237,43	310
3	356,61	300
4	473,98	290
5	594,61	280
6	709,17	270
7	831,28	260
8	975,57	250
9	1104,94	240
10	1263,68	230
11	1377,99	220
12	1537,52	210
13	1731,03	200
14	1867,51	190
15	2043,03	180
16	2250,6	170
17	2435,33	160
18	2643,66	150

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 170)}{(2250,60 - 101,38)} = 0,070 \text{ mm/s}$$

19	2856,8	140
20	3085,04	130
21	3358,21	120
22	3630,72	110
23	4208,4	100

Teste com 13% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



Cálculo da velocidade de sedimentação.

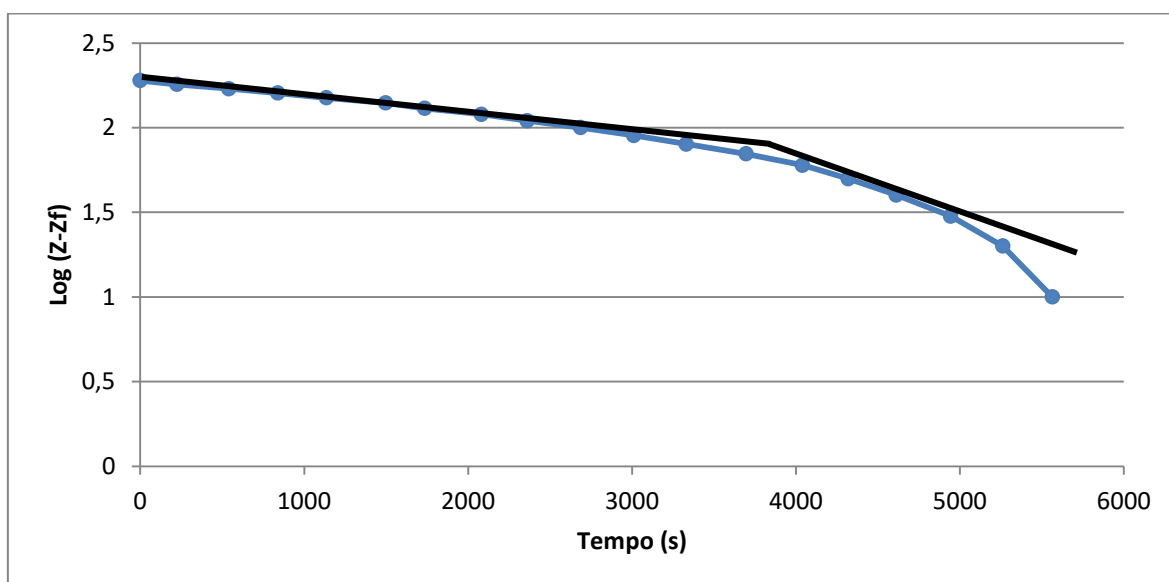
Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	167,37	320
2	406,46	310
3	620,34	300
4	836,61	290
5	1059,71	280
6	1286,88	270
7	1519,54	260
8	1754,02	250
9	2002,95	240
10	2264,26	230
11	2499,59	220
12	2736,75	210
13	2994,02	200

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 190)}{(3252,19 - 167,37)} = 0,042 \text{ mm/s}$$

14	3252,19	190
15	3523,08	180
16	3787,53	170
17	4046,54	160
18	4401,58	150
19	4642,7	140
20	4988,66	130
21	5893,38	120

Teste com 15% de sólidos

Determinação do ponto crítico pela metodologia de Roberts.



Cálculo da velocidade de sedimentação.

Leitura	Tempo (s)	Altura (mm)
-	0	330
1	225,29	320
2	541,88	310
3	839,04	300
4	1136,22	290
5	1498,81	280
6	1736,44	270
7	2082,6	260
8	2360,38	250
9	2687,88	240
10	3011,13	230
11	3332,48	220
12	3696,14	210
13	4040,71	200
14	4319,49	190
15	4611,83	180
16	4944,58	170
17	5262,19	160
18	5565,36	150
19	6660,09	140

$$v = \frac{\Delta altura}{\Delta tempo} = \frac{(320 - 210)}{(3696,14 - 225,29)} = 0,031 \text{ mm/s}$$