

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**LETÍCIA DE SOUSA SALLES**

**COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS COE E CLEVINGER E TALMAGE  
E FICHT PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM ESPESSADOR CONTÍNUO A  
PARTIR DE ENSAIOS LABORATORIAIS COM POLPA DE CALCÁRIO**

**FORMIGA – MG**

**2017**

LETÍCIA DE SOUSA SALLES

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS COE E CLEVINGER E TALMAGE E  
FICHT PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM ESPESSADOR CONTÍNUO A  
PARTIR DE ENSAIOS LABORATORIAIS COM POLPA DE CALCÁRIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Química do  
UNIFOR-MG, como requisito parcial para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Química.

Orientador: Neylor Makalister Ribeiro Vieira.

S168 Salles, Letícia de Sousa.

Comparação entre os métodos Coe e Clevenger e Talmage e Ficht para o dimensionamento de um espessador contínuo a partir de ensaios laboratoriais com polpa de calcário / Letícia de Sousa Salles.– 2017.  
44 f.

Orientador: Neylor Makalister Ribeiro Vieira.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química)-Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2017.

1. Espessadores. 2. Sedimentação. 3. Dimensionamento. I. Título.

CDD 690

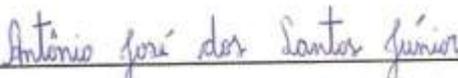
Letícia de Sousa Salles

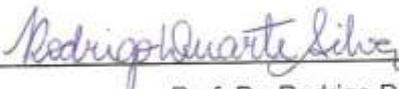
COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS COE E CLEVINGER E TALMAGE E  
FICHT PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM ESPESSADOR CONTÍNUO A  
PARTIR DE ENSAIOS LABORATORIAIS COM POLPA DE CALCÁRIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao curso de Engenharia Química do UNIFOR-  
MG, como requisito parcial para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ms. Antônio José dos Santos Júnior  
UNIFOR-MG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva  
UNIFOR-MG

Formiga, 01 de novembro de 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder sabedoria e força para concluir os meus estudos.

Ao meu orientador prof. Neylor Makalister, por se dispor diante as minhas dúvidas e pelos conhecimentos prestados que foram imprescritíveis para realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo na profissão em que decide dedicar a minha vida.

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

## RESUMO

Este trabalho visa o estudo comparativo entre os métodos de Coe e Clevenger e Talmage e Ficht, utilizados industrialmente para o dimensionamento de espessadores. A preocupação com o racionamento hídrico nas indústrias vem se tornando crescente devido vários processos utilizarem a água em abundância, isto incentiva projetos e estudos para a reutilização da água. Espessadores são tanques que realizam a operação denominada de espessamento, que se baseia no mecanismo da sedimentação. A sedimentação é responsável pela separação sólido-líquido que ocorre através das diferentes densidades das partículas com a ação do campo gravitacional ocorrendo a separação dos constituintes. Neste trabalho foi utilizada uma polpa de calcário de um espessador já em operação de uma indústria de calcinação localizada em Arcos - MG para o dimensionamento de um espessador contínuo a partir de testes laboratoriais realizados em provetas de 2.000 ml. Os resultados obtidos para os métodos de Coe e Clevenger e Talmage e Ficht apresentaram um diâmetro de 14,98 m e 16,78 m respectivamente, onde o método de Talmage e Ficht apresentou um resultado mais seguro para este espessador. A comparação entre diferentes métodos confere uma maior credibilidade e confiança nos resultados obtidos. Neste caso houve uma semelhança, o que implica que os resultados foram considerados satisfatórios.

Palavras-chave: Espessadores. Sedimentação. Dimensionamento.

## ABSTRAT

This work aims at the comparative study between the methods of Coe and Clevenger and Talmage and Ficht, industrial uses for the sizing of thickeners. A concern with water rationing in industries has been increasing due to several processes using abundant water, and is encouraging projects and studies for water reuse. Thickeners are tanks that perform a so-called thickening operation, which is based on the sedimentation mechanism. The sedimentation is responsible for continuous-liquid separation through the different densities of the particles with an action of the gravitational field occurring the separation of the constituents. In this work, a limestone controversy was used for a thickener already in operation in a calcination industry located in Arcos - MG for the dimensioning of a continuous thickener from test laboratories carried out in 2,000 ml beakers. The results obtained for the methods of Coe and Clevenger and Talmage and Ficht presented a diameter of 14.98 m and 16.78 m respectively, where the method of Talmage and Ficht presented a more reliable result for this thickener. The comparison between different methods gives a greater credibility and confidence in the results obtained. In this case, a breach, which implies that the results were considered satisfactory.

Key words: Thickeners. Sedimentation. Scaling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do dispositivo fedwell .....	06
Figura 2 – Vista esquemática de um espessador contínuo .....	07
Figura 3 – Representação do teste de provetas e sua curva de sedimentação ....	09
Figura 4 – Mecanismo da formação de flocos por meio da flocculação por pontes.	11
Figura 5 – Mecanismo da formação de flocos por meio da flocculação por reversão de carga localizada .....	12
Figura 6 – Regimes de espessamento .....	16
Figura 7 – Traçado de Talmage e Ficht .....	19
Figura 8 – Polpa de calcário em processo de sedimentação .....	25

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de sedimentação referente a concentração 01 .....	25
Gráfico 2 – Curva de sedimentação referente a concentração 02 .....	26
Gráfico 3 – Curva de sedimentação referente a concentração 03 .....	26
Gráfico 4 – Curva de sedimentação referente a concentração 04 .....	26
Gráfico 5 – Curva de sedimentação referente a concentração 05 .....	27
Gráfico 6 – Curva de sedimentação referente a concentração 06 .....	27
Gráfico 7 – Traçado de Talmage e Ficht .....	29

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Concentrações da amostra .....	24
Quadro 2 – Velocidade de sedimentação das concentrações .....	27
Quadro 3 – Área do espessador para as seis concentrações .....	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Floculantes e coagulantes mais utilizados .....	14
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$H_A$	Altura inicial da interface
$H_B$	Altura do ponto crítico
$T_B$	Altura do ponto crítico
$V$	Velocidade média na zona de sedimentação livre
$Z_E$	Altura da interface referente a concentração desejada
$C_E$	Concentração de sólidos no underflow
$Z_0$	Altura inicial da interface
$C_0$	Concentração de sólidos na alimentação
$Q_0$	Vazão de alimentação
$\theta_E$	Tempo mínimo necessário para atingir a concentração de sólidos desejada
$M_S$	Massa do sólido
$C$	Concentração de sólidos
$C_1$	Concentração inicial de sólidos
$C_2$	Concentração final de sólidos
$V_1$	Volume inicial
$V_2$	Volume final
$\pi$	Pi
$D$	Diâmetro
$A$	Área mínima do espessador
$S$	Área do espessador
$Q_A$	Vazão volumétrica da suspensão alimentada no espessador
$C_A$	Concentração de sólidos na suspensão alimentada
$C$	Concentração da suspensão na zona limite/crítica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivo específico .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Espessador contínuo convencional .....</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Sedimentação .....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Etapas do ensaio de sedimentação .....</b>	<b>8</b>
<b>3.3</b>	<b>Coagulação .....</b>	<b>10</b>
<b>3.4</b>	<b>Mecanismos de floculação .....</b>	<b>10</b>
<b>3.5</b>	<b>Fatores que influenciam a sedimentação.....</b>	<b>12</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Concentração de sólidos .....</b>	<b>12</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Tamanho e forma das partículas .....</b>	<b>13</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Floculação .....</b>	<b>13</b>
<b>3.6</b>	<b>Dimensionamento de espessador .....</b>	<b>14</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Método de Coe e Clevenger .....</b>	<b>15</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Método de Talmage e Ficht .....</b>	<b>17</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Sobre os métodos .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1</b>	<b>Resultados segundo o método de Coe e Clevenger .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultados segundo o método de Talmage e Ficht .....</b>	<b>28</b>
<b>5.3</b>	<b>Comparações dos resultados .....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>31</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a escassez de água, a sua reutilização tem se tornado um ponto primordial nas indústrias, principalmente na área da mineração, sendo o seu insumo principal. Com isso, os espessadores vem apresentando uma ampla utilização nas indústrias, devido a necessidade da reutilização da água nos mais diversos processos industriais, não sendo somente uma questão ambiental, mas também econômica.

A sedimentação é uma das operações unitárias mais importantes na separação sólido/líquido. Esta operação é realizada em equipamentos chamados espessadores, que através da diferença da densidade das partículas ocorre a separação das fases através da ação da gravidade obtendo dois produtos: o *underflow* que exibem uma maior concentração de sólidos do que a alimentação e o *overflow* que apresenta uma menor concentração de sólidos (água clarificada).

Os espessadores tem como objetivo a polpa com alta concentração de sólidos, onde a separação é chamada de espessamento. Existem, também, os equipamentos chamados de clarificadores que exibe uma baixa concentração de sólidos, porém seu objetivo é a água clarificada.

Os espessadores são tanques com formato cilindro-cônico que são constituídos de aço ou concreto armado (às vezes se utiliza argila compactada para fazer o fundo do espessador). Os espessadores recebem através de um tubo uma alimentação no seu centro, onde as partículas sólidas se sedimentam e são removidas no ápice do espessador (*underflow*) e a água clarificada transborda e é retirada por calhas que cercam o tanque (*overflow*) (CHAVES, 2004).

Na mineração os espessadores são utilizados para: obtenção de polpas com concentrações adequadas aos seus processos subsequentes; espessamento de rejeitos com alta concentração de partículas; transporte e descarte mais efetivo; reaproveitamento da água para o reciclo industrial e recuperação de partículas utilizadas em processos hidrometalúrgicos (FRANÇA; MASSARANI, 2010).

Algumas mineradoras reciclam até 90% da água utilizada nos processos industriais através principalmente dos espessadores. Em média a quantidade de água utilizada em uma mineradora pode chegar até 7.000 m<sup>3</sup> de água por hora (GUIMARÃES, 2010).

Isso impulsiona o estudo do dimensionamento destes equipamentos para que não ocorra o seu superdimensionamento, havendo custos desnecessários e a não utilização correta em relação à sua eficiência.

Alguns dos métodos mais utilizados industrialmente para o dimensionamento dos espessadores são de Coe e Clevenger (1916) que postula que a razão de espessamento é em função da velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre e Talmage e Ficht (1955), que propõe o dimensionamento a partir de método gráfico.

O dimensionamento de um espessador consiste basicamente na determinação da área necessária e diâmetro para suprir a sua concentração de sólidos final desejada.

Para início dos cálculos necessários, o dimensionamento começa no ensaio de sedimentação realizado em bancadas com a utilização de provetas com a polpa que seu equipamento irá atuar, sendo observada a altura da interface em relação ao tempo de sedimentação. Este processo é a base para o dimensionamento de qualquer tamanho e tipo de espessador.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Propor o dimensionamento de um espessador contínuo convencional através dos métodos mais utilizados industrialmente que são: Coe e Clevenger (1916) e Talmage e Ficht (1955) para o espessamento de uma polpa de calcário obtida de uma indústria de calcinação localizada em Arcos – MG.

### **2.2 Objetivo específico**

Comparação dos resultados obtidos nos testes laboratoriais, demonstrando os procedimentos, e as suas dificuldades de execução.

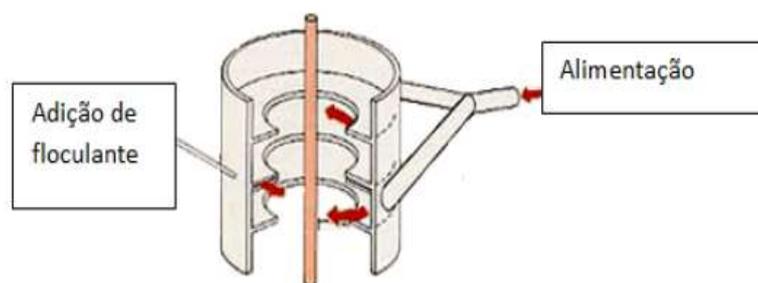
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Espessador contínuo convencional

Espessadores são tanques de grande porte com formato cilindro-cônico, que são utilizados para separação sólido/líquido denominada de espessamento que se baseia na operação de sedimentação. A sedimentação ocorre pela ação da gravidade fazendo com que as partículas se sedimentam obtendo a clarificação da água e o sólido adensado, classificados de *overflow* e *underflow* respectivamente.

Os espessadores são alimentados com uma polpa diluída que chega por meio de uma tubulação ao seu centro, onde existe um dispositivo denominado de *fedweel* que divide o fluxo da polpa da alimentação em vários fluxos diferentes e em direções distintas para amenizar a velocidade e a turbulência do mesmo (a energia cinética é dissipada). Com isso, a alimentação entra no espessador devagar, permitindo uma sedimentação tranquila das partículas (FIG. 1) (CHAVES, 2014).

Figura 1 – Representação do dispositivo fedweel



Fonte: CHAVES, 2004, p. 54.

As partículas sedimentam e formam uma região de compactação, onde há uma maior concentração de sólidos e são retiradas no fundo do espessador. A água clarificada transborda através das canaletas que tem em toda extensão do espessador, e a direcionam para o reaproveitamento no processo, por isso, uma boa sedimentação e clarificação é fundamental, pois um excesso de partículas sólidas podem causar perturbações nos equipamentos de bombeamento e provocar problemas no sistema, visto que contaminantes estará recirculando e podem ser negativos aos processos de concentração (GUIMARÃES, 2010).

No fundo do tanque há rastelos que giram arrastando o material compactado para o ponto de coleta localizado no ápice do espessador, ele ainda tem a função de: promover a compactação do material; fazer com que as partículas sólidas ocupam o menor volume possível; auxiliar no desprendimento de bolhas de ar e água que estiverem nas camadas sedimentadas e manter os sólidos em suspensão para precautelar o aterramento do espessador (GUIMARÃES, 2010).

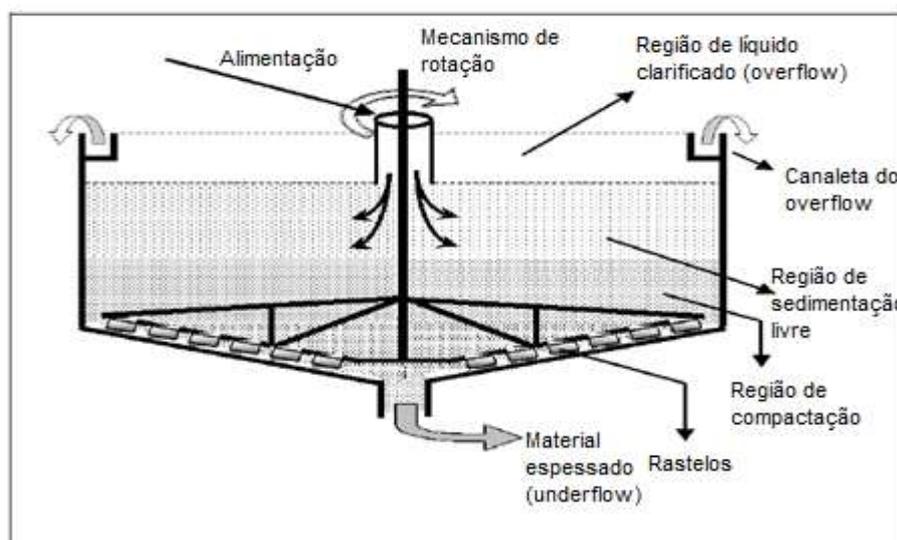
A velocidade do movimento destes rastelos deve ser ideal para as condições do sistema, pois uma velocidade baixa dificultará o movimento dos braços dos rastelos para a remoção do underflow, correspondente a uma compactação intensa, e uma velocidade superior do que o necessário poderá causar uma turbulência e a descompactação da polpa no underflow (PINTO, 2007).

Podem receber polpas bastante diluídas (5 a 10% de sólidos) ou mais adensadas e desaguam-nas até 65 ou 75% de sólidos. Este valor não depende da capacidade do espessador de adensar, mas é definido a partir da capacidade que as bombas de underflow tenham de manusear o material adensado (CHAVES, 2004, p. 50).

Na área da tecnologia mineral, o espessador é utilizado para aumentar a concentração de sólidos da polpa até um valor apropriado para utilização nos processos subsequentes, como bombeamento, condicionamento com reagentes de flotação ou filtração. (FILHO et al., 2009).

A FIG.2 mostra um desenho de um espessador contínuo convencional.

Figura 2 – Vista esquemática de um espessador contínuo



Fonte: FRANÇA, CASQUEIRA, 2007, p. 406.

## 3.2 Sedimentação

A sedimentação é dividida em duas categorias: a clarificação e o espessamento. No caso do espessador, ele se baseia na operação de espessamento, devido a sua finalidade ser um aumento da concentração de sólidos da polpa.

O mecanismo do espessamento é a sedimentação que consiste na separação sólido/líquido de uma polpa diluída através da diferença de densidade das partículas no meio fluido, onde as partículas com maior densidade sedimentam mais rapidamente, ocasionadas pela ação da gravidade obtendo uma região de compactação dos sólidos e a clarificação da água.

Segundo Neto (2016), quando se deseja acelerar o processo de sedimentação, usa-se mecanismos como o processo de coagulação e floculação, para aglomerar as partículas de pequeno diâmetro, aumentando a sua área e consequentemente aumentando a sua velocidade de sedimentação.

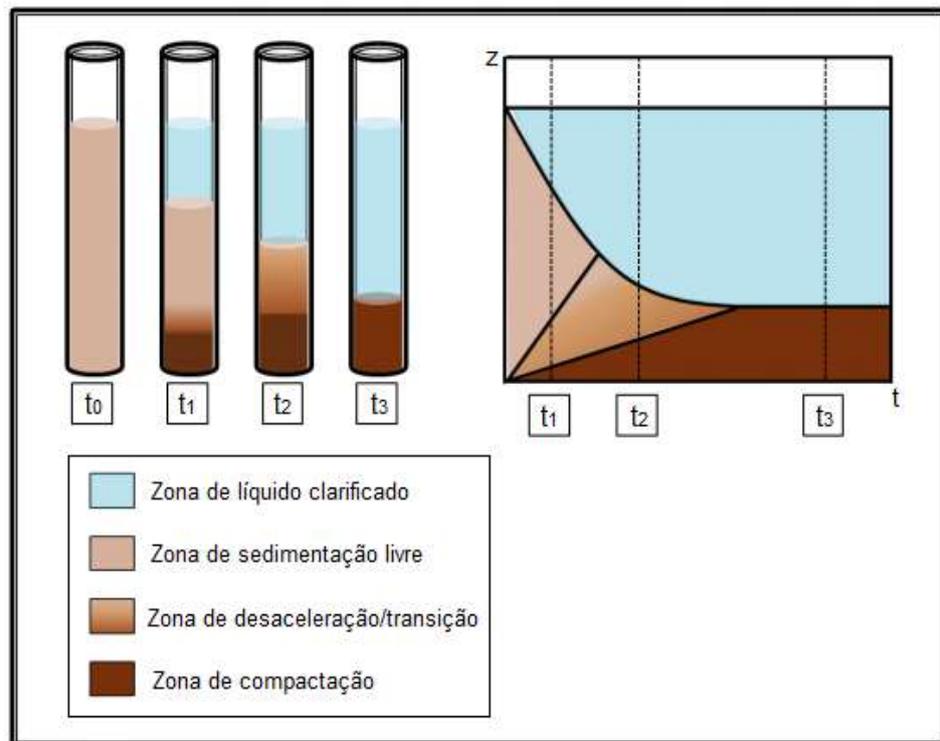
### 3.2.1 Etapas do ensaio de sedimentação

Para início de estudo do dimensionamento dos espessadores, a primeira etapa começa com os ensaios realizados em bancadas com a polpa diluída em que o seu espessador irá operar.

Os ensaios de sedimentação são realizados em provetas de 2.000 ml, que com o decorrer do tempo as partículas vão formando diferentes zonas ocasionadas pela diferença da densidade das partículas e a ação do campo gravitacional (REIS, 2010).

A FIG. 3 mostra as zonas de sedimentação obtidas depois de um determinado tempo de residência, desde a concentração da polpa uniforme na proveta, até chegar ao limite de espessamento em que resta somente a zona de compactação dos sólidos e a água clarificada, que graficamente formam uma curva de sedimentação.

Figura 3 – Representação do teste de proveta e sua curva de sedimentação



Fonte: MOREIRA, 2014, p. 23.

No instante  $t_0$  é promovida a agitação da polpa por meio de um agitador magnético para que as partículas fiquem uniformes por toda extensão da proveta. A partir da retirada do agitador começa-se a contagem do tempo de sedimentação (REIS, 2010).

No instante  $t_1$  as partículas mais densas e maiores começam a sedimentar-se primeiro formando uma fina camada da zona de compactação, onde as partículas estão sobrepostas umas nas outras na base da proveta. Também forma uma camada da zona de desaceleração/transição, zona onde a concentração de sólidos aumenta e a velocidade de sedimentação passa de crescente para ser decrescente. A zona de sedimentação livre tem um decréscimo onde a concentração de sólidos é a mesma da concentração inicial, e apresenta uma parte da zona de líquido clarificado, onde a concentração de sólidos é quase igual a zero (REIS, 2010).

Com o passar do processo, observa-se que não existe mais a zona de sedimentação livre ( $t_2$ ), indo de encontro à compactação máxima de sólidos, na qual as partículas finas ocuparam os interstícios entre as partículas maiores, formando a concentração máxima de sólidos ( $t_3$ ).

### 3.3 Coagulação

Há quadros em que conforme as características das partículas dos minerais a sua sedimentação no espessador ocorrem de forma natural. Porém, existem casos em que haverá a necessidade da adição de reagentes como os coagulantes e floculantes, para que ocorra a aglomeração das partículas com granulometria muito fina para formarem um floco e sofrerem a sedimentação forçada, aumentando a velocidade do processo.

A coagulação consiste na neutralização de cargas negativas das partículas possibilitando a aproximação entre elas, que ocorre em um tanque de agitação intensa para propiciar a mistura entre coagulante e partícula. A coagulação está relacionada à redução do potencial zeta (magnitude da repulsão) a valores que possibilitam a posterior aglomeração das partículas, que se atribui a etapa de floculação (CREMASCO, 2014).

Os aglomerados de partículas formados na coagulação são chamados de coágulos, que apresentam uma maior estabilidade quando comparados com os aglomerados formados na etapa de floculação, o que indica uma menor probabilidade destes aglomerados se desintegrarem, além dos coágulos apresentarem um menor tamanho e menor retenção de líquido nos interstícios das partículas (NETO, 2016).

### 3.4 Mecanismos de floculação

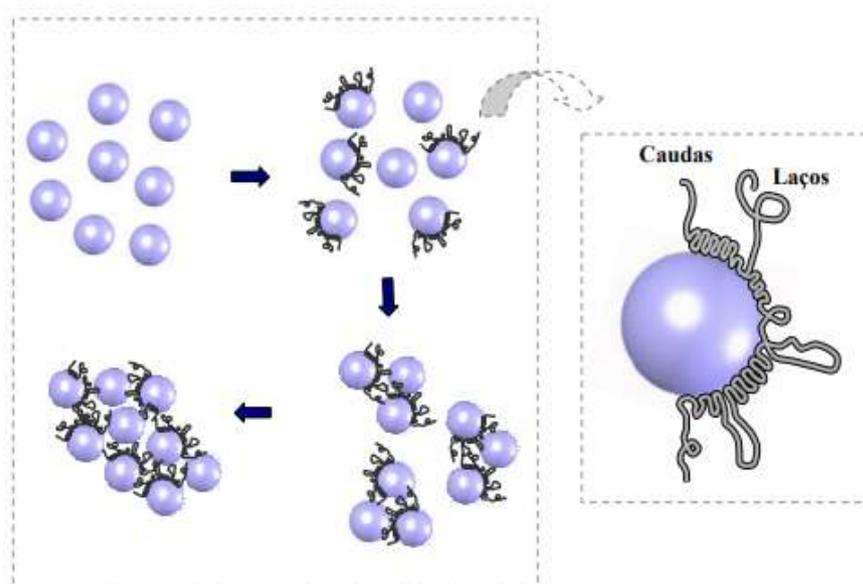
A floculação resulta na adição de polímeros que irão promover uma desestabilização no meio, resultando uma reação em cadeia de atração entre os coloides, tornando-os mais densos com a retirada da água no seu interior (REIS, 2010).

Na floculação ocorre uma mistura lenta onde acontecem os choques entre as partículas e ocorre a aglutinação, formando uma espécie de floco que ocorre por meio de dois métodos principais: a floculação por ponte e a floculação por reversão de carga.

A floculação por pontes é predominante em sistemas com polímeros de alto peso molecular. Neste mecanismo, apenas uma parte da molécula interage com o

sólido e o restante da cadeia formam alças e caudas de modo a possibilitar a interação e absorção com outras partículas, formando flocos maiores e mais resistentes em comparação com a floculação por reversão de carga (FIG. 4) (VREUGDE; POLING, 1975, apud BALTAR, 2010)<sup>1</sup>.

Figura 4 – Mecanismo da formação de flocos por meio da floculação por pontes



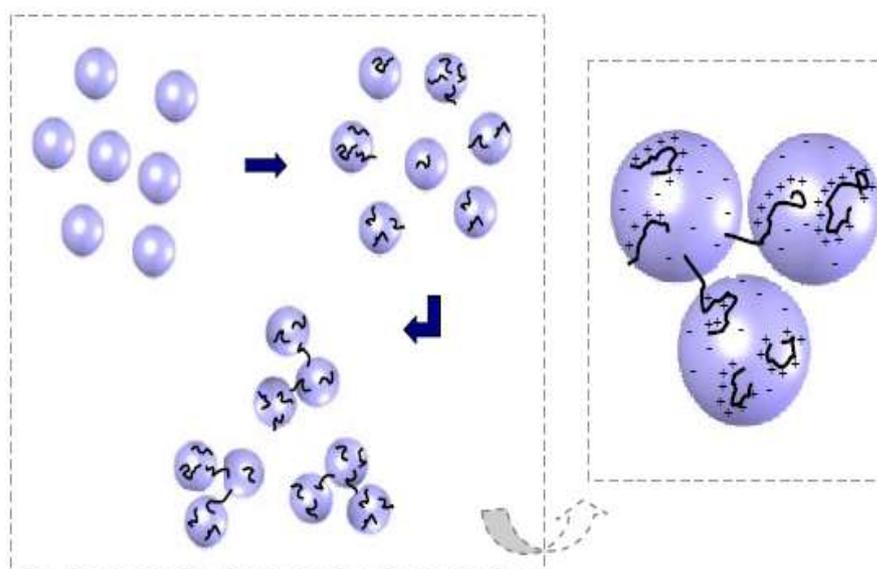
Fonte: RODRIGUES, 2010, p. 32.

Devido o formato vertical, quanto mais extenso estiver o floco, maior será o tamanho das alças e caudas, com isso, maior a probabilidade de contato e adsorção em outras partículas aumentando o tamanho do floco (BALTAR, 2010).

Na floculação por reversão de carga localizada o polímero se apresenta com peso molecular baixo ou médio, com carga elétrica oposta da superfície da partícula. O polímero catiônico se espalha na partícula alterando a carga elétrica nas áreas de adsorção. Com isso, a partícula passa a ter uma distribuição heterogênea, ocorrendo a formação dos flocos pelos choques com outras partículas em áreas opostas (FIG. 5) (BALTAR, 2010)

<sup>1</sup>VREUGDE, M. J. A.; POLING, G. W. **The effect of flocculation on reclaim water quality for flotation.** [S.l.], 1975.

Figura 5 – Mecanismo da formação de flocos por meio da floculação por reversão de carga localizada



Fonte: RODRIGUES, 2010, p. 33.

A floculação resulta em diversas vantagens para o processo, como:

- a) Clarificação do underflow;
- b) Aumento da velocidade de sedimentação;
- c) Reduz o tempo de residência da partícula;
- d) Aumento da capacidade de espessamento;
- e) Minimiza a área do espessador.

### 3.5 Fatores que influenciam a sedimentação

#### 3.5.1 Concentração de sólidos

Existem diversos fatores que podem influenciar a sedimentação de uma partícula no meio fluido, uma delas é a concentração de sólidos.

Alternâncias de concentração dos sólidos podem modificar primeiramente a maneira de sedimentação das partículas. Com uma concentração mais baixa, tem-se uma sedimentação livre, isto é, com poucas objeções ao movimento das partículas deixando o regime mais estável (GUIMARÃES, 2010).

A concentração influencia também na velocidade de sedimentação, onde na zona de desaceleração/transição do espessador há um aumento da concentração

de sólidos, onde a velocidade passa de crescente para ser decrescente, devido aos obstáculos das partículas.

### **3.5.2 Tamanho e forma das partículas**

No processo de sedimentação das partículas, as que apresentam uma granulometria muito fina são chamadas de colóides, que requerem a adição de reagentes químicos para ocorrer à aglomeração destas partículas aumentando o seu tamanho e conseqüentemente promovendo a sedimentação forçada.

A granulometria das partículas interfere na velocidade de sedimentação, ou seja, as partículas com maior diâmetro sedimentam mais rapidamente devido a sua densidade. E as partículas finas ficam em suspensão no meio aquoso.

Para aperfeiçoar o processo de sedimentação das partículas finas, “os processos de floculação e coagulação reúnem as melhores alternativas de atenuar a irregularidade na forma da partícula, ou ainda no seu diâmetro” (FRANÇA; CASQUEIRA, 2007, p. 396).

### **3.5.3 Floculação**

A floculação é um processo complexo, cuja efetividade depende de diversos fatores a serem avaliados.

Deve-se levar em conta primeiramente a escolha do floculante, que no caso do espessamento o importante é o tamanho do floco. Em todos os casos o peso molecular, a natureza da carga elétrica e as propriedades químicas das moléculas são características essenciais que devem ser levadas em consideração na escolha do floculante (BALTAR, 2010).

Para que haja a formação dos flocos é necessária à colisão entre as partículas para que ocorra a agregação. A regularidade e a intensidade das colisões podem ser ampliadas por um sistema de agitação que proporciona uma agitação ortocinética das partículas. A agitação tem o objetivo de ocasionar e aumentar as colisões entre as partículas, com o aumento da turbulência aumenta as colisões, o aumento da movimentação faz que a velocidade na formação dos flocos aumente. (BALTAR, 2010).

A dosagem de floculantes é outro fator a ser analisada, pois a capacidade do polímero de fixar sobre a superfície da partícula pode ser prejudicial ao processo de floculação se o polímero ocupar toda a superfície da partícula, pois o excesso faz com que forme uma barreira protetora e que a partícula se comporte como um colóide e anula o efeito do floculante. Isso ocorre quando a adição do polímero é excessiva, sendo que há um limite de adição (CHAVES, 2004).

A TAB. 1 mostra as concentrações dos principais floculantes e coagulantes usados na indústria mineral.

Tabela 1 – Floculantes e coagulantes mais utilizados

Nome	Concentração (mg/l)	Faixa de pH	Faixa ótima de pH
<u>Floculantes</u>			
Poliacrilamida não iônica	1 – 30	0 – 12	
Poliacrilamida iônica	1 – 30	5 – 11	
Poliacrilamida catiônica	1 – 30	4 – 12	5 – 9
Óxido de Polietileno	1 – 100	3 – 11	
Amido	5 – 200	2 – 10	
<u>Coagulantes</u>			
Cal	500 – 2000	5 – 13	10 – 12
Sulfato de alumínio	15	5 – 8	6
Sulfato férrico	5 – 150	4 – 8	5.6
Sulfato ferroso	200	> 9.5	

Fonte: ASSIS, 2007, p. 19.

Segundo Reis (2010), o pH tem uma grande interferência no processo de ionização da molécula do polímero e a carga da superfície da partícula, ele é o causador das ligações de hidrogênio, principal meio da adsorção dos polímeros.

### 3.6 Dimensionamento de espessador

A teoria sobre o dimensionamento dos espessadores consiste em postular medidas basicamente da área e do diâmetro que melhor se adaptará para determinada quantidade de concentração de polpa que seu processo irá atuar.

O dimensionamento começa com ensaios de sedimentação realizados em provetas com testes em batelada para geração de dados para o cálculo do projeto do espessador.

Os dados obtidos nos testes de proveta são empregados na construção da curva de sedimentação com a finalidade de: expor o comportamento da altura da interface da polpa em relação ao tempo; o tempo de residência necessário para promover o nível máximo da compactação dos sólidos; a velocidade de sedimentação; a razão de espessamento, dentre outros necessários para o dimensionamento do equipamento (REIS, 2010).

Segundo Lara (2007), o aumento da utilização industrial dos espessadores promove o crescente conhecimento em relação ao dimensionamento destes equipamentos, com objetivo de aprimorar a sua utilização e eficiência nos objetivos do processo em si.

### **3.6.1 Método de Coe e Clevenger**

Em 1916, os primeiros conceitos sobre o estudo do dimensionamento de espessadores foram propostos por Coe e Clevenger, fundamentado a partir de testes em bateladas com diluições diferentes.

Eles sugeriram colocar a polpa que se deseja espessar em provetas graduadas, monitorando-se a altura da interface em função do tempo. A função gráfica deste comportamento foi designada de curva de sedimentação (FILHO et al., 2009).

Coe e Clevenger conceituaram como ponto crítico ou ponto de compressão a passagem da polpa para a zona de transição, onde a zona sedimentação livre se encerra. Com o ponto crítico e a curva de sedimentação do ensaio se obtém a velocidade de sedimentação (PINTO, 2007).

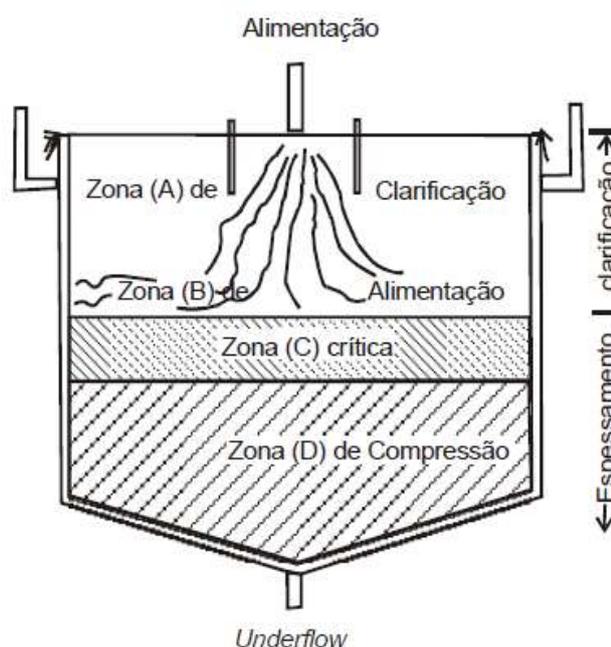
Este método postula que a razão de espessamento é função exclusiva da velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre. Portanto, a velocidade de sedimentação terá o mesmo valor no ensaio descontínuo e na operação contínua (CHAVES, 2004, p.75).

A velocidade de sedimentação é determinada a partir dos ensaios feitos em bancadas, na qual para cada concentração da polpa haverá uma velocidade de sedimentação diferente. Ela é determinada inicialmente para a concentração inicial da polpa e em seguida dilui-se a polpa em 1.000 ml de água até obter diferentes velocidades necessárias para a realização dos cálculos. Com essa relação,

determina-se a área do espessador para todos os testes realizados, o valor máximo encontrado da área será a área mínima para proporcionar a sedimentação em regime permanente de toda a polpa alimentada ao espessador (SOUSA, 2012).

Isso implica que um bom projeto para um espessador considera-se que a área deve ser capaz de proporcionar a sedimentação de todas as partículas alimentadas ao longo das zonas do espessador em operação normal. Se a área for insuficiente, começará haver um acúmulo de sólidos em uma determinada seção do espessador que causará o arrastamento de partículas sólidas no líquido clarificado. Essa seção constitui o “gargalo” da operação, chamada de zona crítica ou limite (FIG. 6) (SOUSA, 2012).

Figura 6 – Regimes de espessamento



Fonte: PINTO, 2007, p. 20.

Segundo Chaves (2004), para a determinação da velocidade de sedimentação realizam-se os testes em bancada. Para cada concentração traça-se a curva de sedimentação identificando a altura inicial da interface inicial (HA), a altura do ponto crítico (HB) e o tempo (TB) da região de transição (referente ao ponto crítico), com isso calcula-se a velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre. Este método é uma simplificação e toma a velocidade média na zona de sedimentação livre. A equação (1) apresenta o cálculo:

$$V = \frac{H_A - H_B}{T_B} \times 60 \quad (1)$$

Onde:

$V$  = Velocidade de sedimentação média na zona sedimentação livre – (m/h)

De acordo com Sousa (2012), após a obtenção da concentração e da velocidade de sedimentação, é possível determinar a área do espessador, expressa pela equação (2):

$$S = \frac{Q_A C_A \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right)}{V} \quad (2)$$

Onde:

$S$  = Área do espessador – (m<sup>2</sup>)

$Q_A$  = Vazão volumétrica da suspensão alimentada no espessador – (m<sup>3</sup>/h)

$C_A$  = Concentração de sólidos na suspensão alimentada – (t/m<sup>3</sup>)

$C$  = Concentração da suspensão na zona limite/crítica – (t/m<sup>3</sup>)

$C_E$  = Concentração da polpa espessada – (t/m<sup>3</sup>)

$V$  = Velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre – (m/h)

Segundo Reis (2010), considerando o sistema contínuo e em equilíbrio, a concentração de sólidos alimentada no espessador será igual a concentração da zona limite.

### 3.6.2 Método de Talmage e Ficht

Em 1955, Talmage e Fitch propuseram uma evolução onde se baseiam em apenas um único ensaio de sedimentação realizado em proveta, com métodos gráficos para compressão do ponto crítico. Através dele é possível obter dados para o cálculo da área unitária mínima do espessador.

De acordo com Filho et al. (2009), para início da plotagem do gráfico deve-se encontrar primeiramente a altura da interface ( $Z_E$ ) referente à concentração desejada ( $C_E$ ) do underflow, que pode ser encontrada pela equação (3):

$$Z_E = \frac{C_0 \times Z_0}{C_E} \quad (3)$$

Onde:

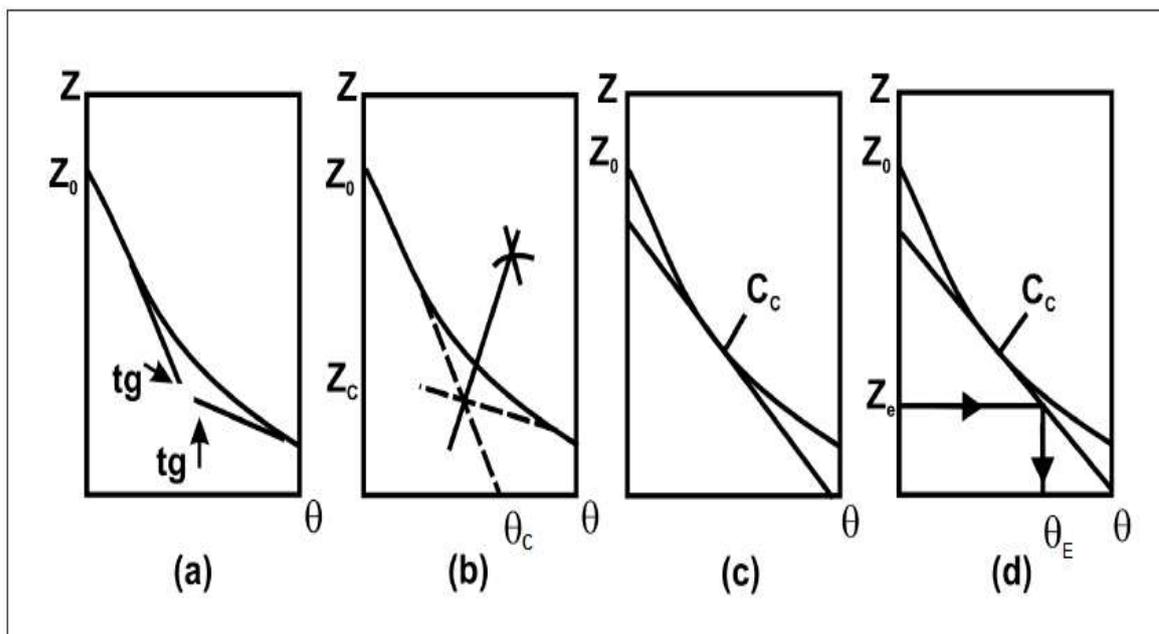
$C_0$  = Concentração de sólidos na alimentação – (t/m<sup>3</sup>)

$Z_0$  = Altura inicial da interface – (m)

$C_E$  = Concentração de sólidos no underflow – (t/m<sup>3</sup>)

Para a obtenção do ponto crítico ou concentração crítica deve ser construída a curva de sedimentação de acordo com o ensaio realizado na proveta, após isso, devem ser traçadas duas tangentes, uma partindo de  $Z_0$  (altura inicial da proveta), seguindo no sentido da curva de sedimentação e outra deve ser traçada do fim da curva de sedimentação. Essas tangentes devem ser distendidas até a interseção entre elas. Com a interseção, forma-se um ângulo, a partir deste ângulo traça-se então a bissetriz até a intercessão com a curva de sedimentação que resulta em uma aproximação do ponto crítico ( $C_c$ ). Com isso, outra tangente é traçada partindo do ponto crítico e prolongada até a linha de underflow (altura referente a  $Z_E$ ) obtendo o tempo mínimo necessário para se alcançar a concentração de sólidos do underflow ( $\theta_E$ ) (FIG. 7) (REIS, 2010).

Figura 7 – Traçado de Talmage e Ficht



Fonte: FILHO et al., 2009, p. 48.

Segundo Filho et al. (2009), com a leitura gráfica de  $\theta_E$ , é possível obter a área do espessador, expressa pela equação (4):

$$A = \frac{Q_0 \times \theta_E}{Z_0} \quad (4)$$

Onde:

$A$  = área mínima do tanque espessador – ( $m^2$ )

$Q_0$  = Vazão de alimentação – ( $m^3/h$ )

$\theta_E$  = Tempo mínimo necessário para atingir a concentração de sólidos desejada – (h)

De acordo com Torquato e Luz (2011), o método de Talmage e Ficht é o mais utilizado industrialmente, porém a prática de dimensionamento da empresa Vale tem contestado a descrição original, visto que o tempo adotado é o referente à interseção da tangente à curva de sedimentação no ponto de compressão.

### 3.6.3 Sobre os métodos

Segundo Guimarães, Valadão e Costa (2011), os dois métodos apresentam faixas de diâmetros bastante próximas nos experimentos já realizados, o que indica que os métodos utilizados no dimensionamento de espessadores pelos produtores são de caráter confiável.

Um dos problemas relatados dos métodos é a necessidade de se traçar gráficos e determinar valores e pontos arbitrariamente, o que às vezes não gera resultados totalmente precisos (CHAVES, 2004).

Os métodos apresentam restrições e às vezes não funcionam bem. Algumas empresas fornecedoras desses equipamentos desenvolveram métodos absolutamente empíricos. Na prática, a experiência e o bom senso são fatores determinantes do sucesso do dimensionamento de um espessador (CHAVES, 2004).

## 4 METODOLOGIA

O presente trabalho propôs uma pesquisa exploratória sobre o dimensionamento de um espessador contínuo convencional a partir de ensaios laboratoriais realizados com provetas, baseando-se em dois métodos mais utilizados industrialmente: Coe e Clevenger e Talmage e Ficht, realizando um estudo comparativo entre métodos, como o procedimento, a coerência dos resultados obtidos e as dificuldades de execução do mesmo.

### 4.1 Materiais

Foi utilizada uma polpa de calcário oriunda de um espessador contínuo de uma indústria de calcinação localizada em Arcos – MG como sendo a polpa em que o espessador irá atuar, onde foi submetida a ensaios de sedimentação utilizando uma proveta de 2.000 ml junto com um cronômetro para o monitoramento da altura da interface sólido/líquido em função do tempo, até atingir a região de compactação máxima.

Um agitador magnético foi utilizado para homogeneização da polpa, promovendo uma distribuição uniforme na proveta, além de uma estufa de secagem utilizada para obtenção da massa seca de sólidos na polpa.

Os gráficos apresentados para ambos os métodos foram construídos pelo software Excel.

### 4.2 Métodos

O ensaio de sedimentação para início dos cálculos do espessador é realizada para os dois métodos, onde se utiliza uma proveta com a polpa que se deseja espessar, neste caso utilizada a polpa de calcário.

A polpa foi colocada em uma proveta de 2.000 ml e agitada com um agitador magnético até obter uma homogeneidade dos sólidos em suspensão, quando retirado o agitador deu-se início a contagem do tempo de sedimentação.

A leitura da altura da interface (Z) foi feita em função do tempo ( $\theta$ ) até a formação da região máxima de compactação na proveta, para ambos os métodos.

O teste de proveta para o método de Talmage e Ficht foi realizado uma única vez para a concentração de sólidos inicial para o desenvolvimento do método gráfico.

Para o método de Coe e Clevenger utilizaram-se seis ensaios com concentrações diferentes. A primeira foi à concentração inicial referente à alimentação do espessador, e posteriormente diluiu-se esta polpa em 1.000 ml de água e realizou-se o teste de proveta novamente, e assim sucessivamente até obter as seis concentrações diferentes.

A determinação da concentração de sólidos na alimentação foi obtida através da secagem de 100 ml da polpa em uma estufa de secagem a 100°C por 24 horas até a obtenção da massa seca dos sólidos. A obtenção da massa dos sólidos ( $M_s$ ) foi calculada através da equação (5) (Pinto, 2007):

$$M_s = m(\text{béquer} + \text{sólido seco}) - m(\text{béquer}) \quad (5)$$

Onde:

$M_s$  = Massa do sólido – (t)

Com a obtenção da massa seca, é possível calcular a concentração de sólidos da polpa na alimentação, descrita pela equação (6):

$$C = \frac{M_s}{V} \quad (6)$$

Onde:

$C$  = Concentração de sólidos da polpa – (t/m<sup>3</sup>)

Com o valor inicial da concentração de sólidos na alimentação, é possível encontrar as outras concentrações através da equação (7):

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (7)$$

Onde:

$C_1$  = Concentração inicial – (t/m<sup>3</sup>)

$V_1$  = Volume inicial – (m<sup>3</sup>)

$C_2$  = Concentração final – (t/m<sup>3</sup>)

$V_2$  = Volume final – (m<sup>3</sup>)

De acordo com França e Casqueira (2007), para o cálculo do diâmetro, aplica-se a equação (10):

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

Onde:

A = Área do espessador – (m<sup>2</sup>)

D = Diâmetro – (m)

O valor estipulado da concentração do underflow desejado para o método de Coe e Clevenger e Talmage e Ficht foi de 0,3 ton/m<sup>3</sup> e 300 kg/m<sup>3</sup> respectivamente, valor estipulado através de estudos referentes para este tipo de polpa. Para o método de Coe e Clevenger o valor de 0,3 ton/m<sup>3</sup> aplicou-se para as seis concentrações obtidas.

A taxa de alimentação estipulada para ambos os métodos foi de 300 m<sup>3</sup>/h, a partir de uma média na qual os espessadores operam.

Os cálculos referente a área do espessador para o método de Coe e Clevenger foram utilizadas as equações (1) e (2), e para o método de Talmage e Ficht as equações (3) e (4), e para o diâmetro a equação (8) para ambos, após a obtenção de todos os dados descritos anteriormente.

Para correção da área e conseqüentemente do diâmetro do espessador foi utilizado um fator de correção de escala que pode variar na faixa de:  $1,29 < f < 1,33$ . A utilização deste fator se deve ao fato que os ensaios de sedimentação foram realizados em provetas (bateladas), enquanto os equipamentos industriais vão operar em regime contínuo (FILHO et al., 2009).

O valor do fator de segurança adotado para este trabalho foi o de maior valor sendo 1,33 para ambos os métodos, e nenhum tipo de floculante foi utilizado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo do trabalho serão apresentados os resultados obtidos dos testes laboratoriais conforme descrito na metodologia.

### 5.1 Resultados segundo o método de Coe e Clevenger

Após a secagem da polpa de calcário na estufa para obtenção da massa seca de sólidos foi possível calcular as seis concentrações para cada teste de proveta realizado (QUADRO 1).

Quadro 1 – Concentrações das amostras

<b>Concentrações</b>	<b>Concentração de sólido - (ton/m<sup>3</sup>)</b>
Concentração 01	0,062319
Concentração 02	0,041546
Concentração 03	0,027697
Concentração 04	0,018465
Concentração 05	0,01231
Concentração 06	0,008207

Fonte: A autora, 2017.

Com a homogeneização da polpa na proveta foi monitorada a altura da interface em função do tempo para a construção da curva de sedimentação referente a cada uma das concentrações.

A FIG. 8 mostra zonas de sedimentação na realização do teste de proveta, na qual foi monitorado este comportamento.

Figura 8 – Polpa de calcário em processo de sedimentação

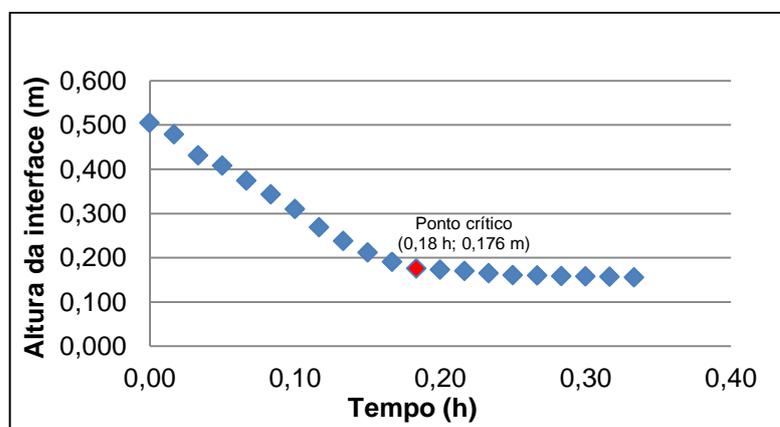


Fonte: A autora, 2017.

Após os testes de proveta realizou-se a construção da curva de sedimentação, onde a leitura do ponto crítico é feita arbitrariamente no gráfico obtendo a altura ( $H_B$ ) e tempo ( $T_B$ ) referente ao mesmo para o cálculo da velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre.

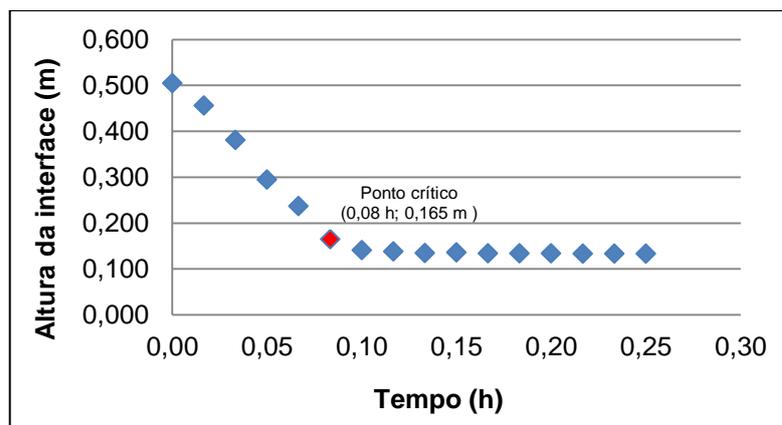
Os GRAF. 1 ao 6 a seguir demonstram a identificação arbitrariamente dos pontos críticos com seus respectivos valores referente a sua altura e tempo correspondente.

Gráfico 1 – Curva de sedimentação referente à concentração 01



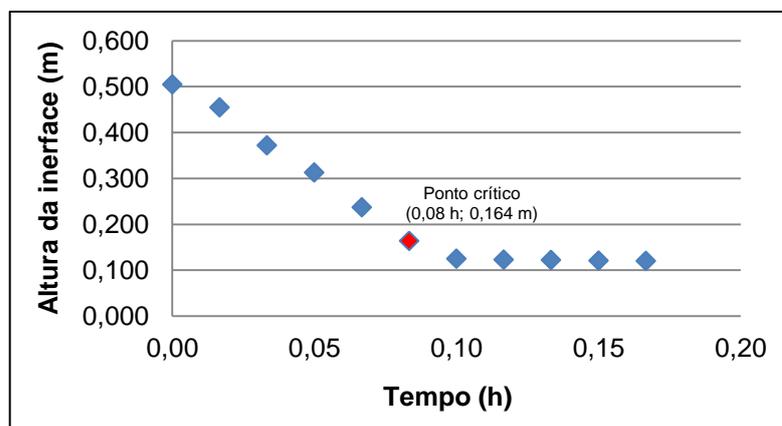
Fonte: A autora, 2017.

Gráfico 2 – Curva de sedimentação referente à concentração 02



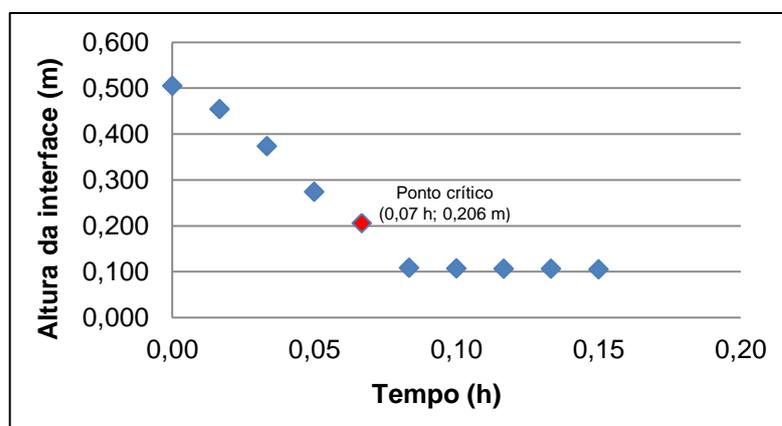
Fonte: A autora, 2017.

Gráfico 3 – Curva de sedimentação referente à concentração 03



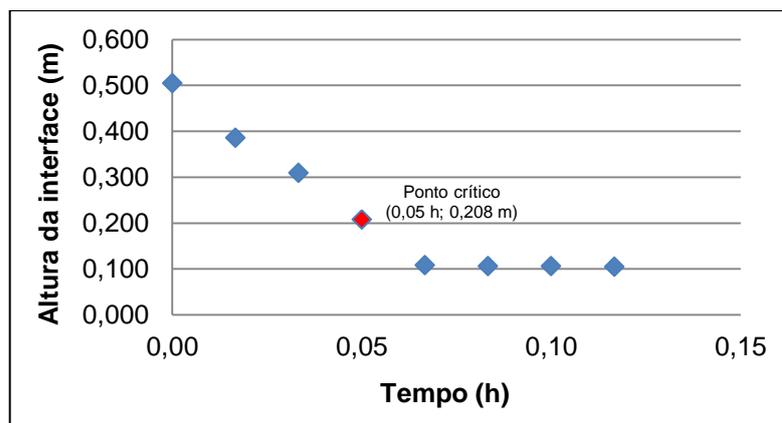
Fonte: A autora, 2017.

Gráfico 4 – Curva de sedimentação referente à concentração 04



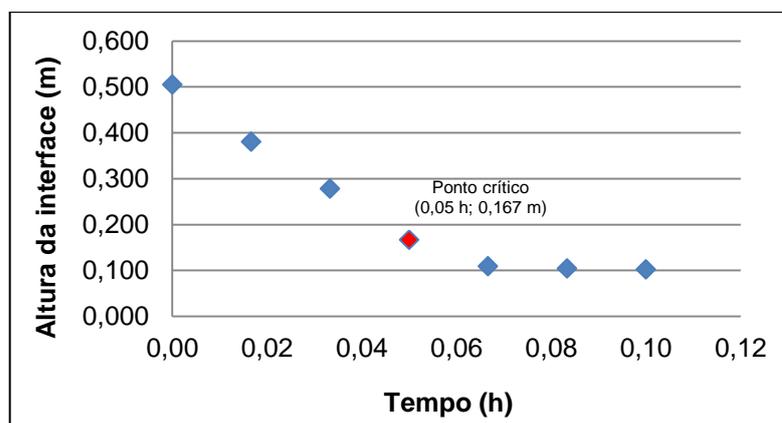
Fonte: A autora, 2017.

Gráfico 5 – Curva de sedimentação referente à concentração 05



Fonte: A autora, 2017.

Gráfico 6 – Curva de sedimentação referente à concentração 06



Fonte: A autora, 2017.

Após a identificação do ponto crítico foi calculada a velocidade de sedimentação na zona de sedimentação livre (m/h) conforme a equação (1) (QUADRO 2).

Quadro 2 – Velocidade de sedimentação das concentrações

Concentrações	Velocidade – (m/h)
Concentração 01	1,794
Concentração 02	4,080
Concentração 03	4,092
Concentração 04	4,271
Concentração 05	5,940
Concentração 06	6,760

Fonte: A autora, 2017.

Pode-se observar que com a diminuição da concentração de sólidos na polpa, a polpa alcança rapidamente a zona máxima de compactação, o que implica que quanto menor a concentração de sólidos maior será a velocidade de sedimentação.

Após a realização de todos os testes e cálculos, se obteve a área mínima do espessador para cada concentração (QUADRO 3).

Quadro 3 – Área do espessador para as seis concentrações

Concentrações	Área – (m <sup>2</sup> )	Diâmetro – (m)
Concentração 01	176,21	14,98
Concentração 02	84,52	10,37
Concentração 03	88,45	10,61
Concentração 04	87,67	10,57
Concentração 05	64,41	9,06
Concentração 06	57,40	8,55

Fonte: A autora, 2017.

O valor adotado como a área mínima para promover o espessamento da polpa de calcário de forma eficiente e estável foi de 176,21 m<sup>2</sup>, com um diâmetro de 14,98 m, sendo a maior área adotada de todos os testes de proveta.

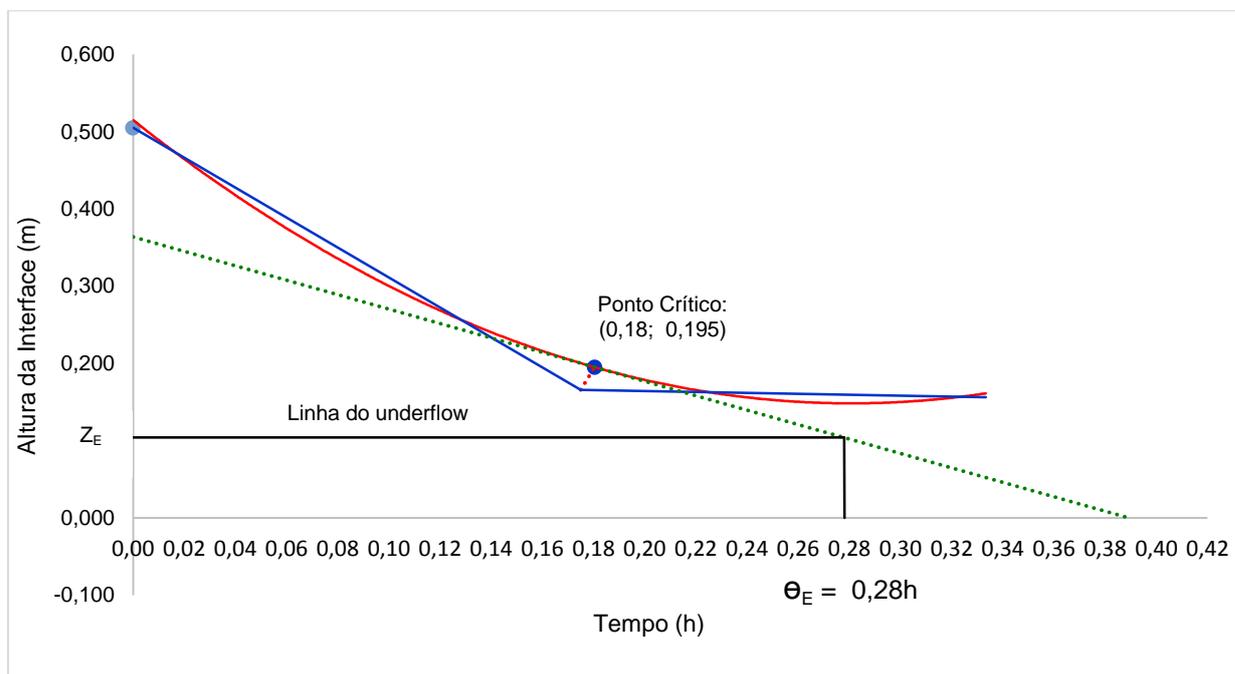
## 5.2 Resultados segundo o método de Talmage e Ficht

Para o método de Talmage e Ficht foi utilizada a concentração inicial da polpa que se refere a 0,062319 t/m<sup>3</sup>.

Com a concentração de sólidos inicial foi calculada a altura da linha do underflow ( $Z_E$ ) para a obtenção do tempo mínimo necessário de sedimentação para atingir a concentração de sólidos desejada. Conforme a equação (3), foi encontrado um valor de 0,104 m para a linha do underflow.

Com a obtenção da linha do underflow encontrou-se o tempo mínimo necessário de sedimentação ( $\theta_E$ ) de 0,28 h para a concentração de sólidos desejada de 0,3 ton/m<sup>3</sup> (GRAF. 7).

Gráfico 7 – Traçado de Talmage e Ficht



Fonte: A autora, 2017.

Com a obtenção do tempo ( $\theta_E$ ) foi calculada a área mínima e o diâmetro de acordo com equação (4) e (8). A área mínima do espessador foi de 221,23 m<sup>2</sup> com um diâmetro de 16,78 m.

### 5.3 Comparações dos resultados

Os testes de proveta realizados surgiram dificuldades para ambos os métodos em relação ao monitoramento da altura da interface, devido a polpa possuir uma granulometria muito fina e cor intensa, o que poderia ser revertido com a utilização de floculantes para os finos que ainda ficaram em suspensão.

Utilizando o método de Coe e Clevenger obteve-se um diâmetro de 14,98 m depois de seis testes de proveta realizados para obtenção da velocidade de sedimentação. O método apresentou indecisões em relação a qual modelo de equação adotar para os cálculos necessários para o dimensionamento, devido o mesmo não apresentar uma regularidade nos procedimentos propostos pelos autores consultados.

Utilizando o método de Talmage e Ficht obteve-se um diâmetro de 16,78 m, sendo considerado o mais seguro para este espessador operar com as variáveis

propostas, devido o mesmo apresentar uma linearidade dos procedimentos propostos pelos autores. Apresentou simplicidade quanto a compreensão dos cálculos necessários, porém obteve dificuldades para a construção do método gráfico, pois não fica claro a correta ordenada das tangentes para a obtenção do tempo mínimo necessário de sedimentação.

Para este espessador, o método mais confiável é o de Talmage e Ficht, devido a maior área que gera uma segurança a mais para o processo.

Os dois métodos apresentaram valores muito próximos, o que indica coerência entre os procedimentos adotados, sendo os resultados considerados satisfatórios para as variáveis propostas para o dimensionamento deste espessador operando com polpa de calcário, devido o mesmo apresentar uma semelhança com outros espessadores já existentes.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo do dimensionamento dos espessadores é de extrema importância devido a sua crescente utilização industrial, para evitar que ocorra o superdimensionamento ou subdimensionamento destes equipamentos, além da comparação entre os métodos existentes, o que leva a confirmação da sua confiabilidade.

Com a utilização do método de Coe e Clevenger obteve-se uma menor área, o que gera menos custos, manutenção e requer menos espaço, porém o método de Talmage e Ficht apresentou-se mais seguro referente aos cálculos propostos, tendo em vista que a alimentação no espessador, a homogeneidade da polpa, a velocidade da sedimentação, dentre outros, podem sofrer perturbações no sistema e não serem constantes, o que acarretará incertezas quanta aplicação do método de Coe e Clevenger para este espessador, podendo comprometer o processo devido o seu subdimensionamento.

Os métodos descritos ainda são desenvolvidos atualmente nas indústrias, porém a escassez de teoria sobre este espessador ainda é grande, que pode ser revertida com base em estudos aprofundados, principalmente sobre o seu dimensionamento que deve ser aperfeiçoado.

A utilização de dois métodos confere uma maior credibilidade ao dimensionamento, o que pode ser observado pelo fato dos resultados obtidos serem semelhantes, além de demonstrarem similaridade com outros espessadores já existentes.

Realizar vários ensaios comparativos com diferentes tipos de polpas, avaliar os efeitos dos floculantes para diversas concentrações, estudar os fatores que influenciam a sedimentação e a utilização de fatores de segurança para o dimensionamento, podem contribuir diretamente para a otimização deste processo.

## REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. A.R. **Estudo de *mycobacterium phlei* (atcc 11758) como agente agregante para hematita e quartzo**. 2007. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- BALTAR, C. A. M. Processos de agregação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MG, 2010. p.559-587.
- CHAVES, A. P. Espessamento. In:\_\_\_\_\_. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 2. ed. São Paulo: Signus, 2004. cap. 2, p. 49-116.
- CREMASO, M.A. Sedimentação. In:\_\_\_\_\_. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014. cap. 13. 325-352.
- FILHO, L. S. et al. **Dimensionamento de espessadores**: validação experimental de três técnicas convencionais. Ouro Preto, 2009.
- FRANÇA, S. C.A.; CASQUEIRA, R. G. Desaguamento. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MG, 2007. p.393-411.
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, A.; FRANÇA. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MG, 2010. p. 637-678.
- GUIMARÃES, F. A. V. **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos métodos industriais**. 2010. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- GUIMARÃES, F. A. V.; VALADÃO, G. E. S.; COSTA, R. A.V. Comparação nos métodos de dimensionamento de espessadores. **ENTMME**, Salvador, v.7, p.726-732, 2011.
- LARA, A. F. M. **Espessamento e transporte de pasta mineral**. 2011. 76 p. Especialização (Especialização Recursos Minerais)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- MOREIRA, B. M. **Estudo da sedimentação em suspensões de fluidos com características reológicas pseudoplásticas**. 2014. 194 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

NETO, M. C. R. **Estudo de pastas minerais a partir do espessamento de lamas de processamento fosfático**. 2016. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Metalúrgica, Materiais e de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PINTO, T. C. S. **Aplicação de técnicas clássicas para polpas não floculadas de dimensionamento de espessadores aplicadas a suspensões de salmoura e lodo biológico**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

REIS, K. L. **Dimensionamento de espessadores**. 2010. 29 p. Pós Graduação (Especialista em Beneficiamento Mineral)-Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

RODRIGUES, C. O. **Mecanismos de floculação com polímeros hidrossolúveis, geração de flocos aerados, floculação em núcleos de bolhas floculantes e aplicações na separação de partículas modelos por flotação**. 2010. 242 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SOUSA, P. A. **Espessamento de polpas**. 2012. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TORQUATO, N.C.; LUZ, J. A.M. Espessadores no beneficiamento de minério de ferro. **Mineração**, Ouro Preto, p. 3, mar. 2011.

VREUGDE, M. J.; POLING, G. W. The effect of flocculation on reclaim water quality for flotation. Canada: [s.n], 1975 apud BALTAR, C. A. M. **Processos de agregação**. Rio de Janeiro: CETEM/MG, 2010.