



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL**

Fernando Augusto Fernandes de Medeiros

DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE UM SEDIMENTADOR CONTÍNUO

**Campina Grande – PB
2014**

Fernando Augusto Fernandes de Medeiros

DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE UM SEDIMENTADOR CONTÍNUO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora da graduação do curso de Química Industrial como requisito para obtenção do título de **Bacharel em Química Industrial**, pela Universidade Estadual da Paraíba.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida

**Campina Grande – PB
2014**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

M488d Medeiros, Fernando Augusto Fernandes de.
Dimensionamento da área de um sedimentador contínuo
[manuscrito] / Fernando Augusto Fernandes de Medeiros. - 2014.
66 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.
"Orientação: Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

1. Sedimentação. 2. Suspensão de carbonato de cálcio. 3. Granulometria. 4. Método de Kynch. I. Título.

21. ed. CDD 660.284 2

Fernando Augusto Fernandes de Medeiros

DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE UM SEDIMENTADOR CONTÍNUO

Aprovado em: 11 / 12 / 2014
Nota: 10,0 (dez, zero)

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Marcelo Maia de Almeida
(Orientador – DESA/ UEPB)


Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
(Examinador – DESA/ UEPB)


Profa. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira
(Examinadora – DESA/ UEPB)

Campina Grande – PB
2014

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me deu força, saúde, paciência, persistência e muita fé para que fosse possível concluir mais esta etapa da minha vida.

A toda minha família, pelos ensinamentos, ajudas, conselhos e críticas que me deram, em especial, minha mãe, Santana Fernandes dos Santos e minha tia, Maria Aparecida de Medeiros que sempre me ensinaram que através do trabalho duro é que conseguimos ir cada vez mais longe e alcançar nossos objetivos.

Ao meu irmão Felipe Fernandes de Medeiros sempre esteve presente do meu lado para qualquer tipo de ajuda e reconhecimento.

Aos meus amigos que me proporcionaram momentos de alegria, me aconselharam em momentos difíceis em especial, Hélcio, Michel, Matias, Thiago, Igor, Ramon, Thiago Rodrigo, sou grato pelas infinitas ajudas durante esse tempo de universidade.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida, pelo qual tenho bastante admiração, pela total dedicação em me orientar para que fosse possível concluir esse trabalho.

Ao meu amigo Carlos Porto, que além de um grande amigo, me ajudou nos experimentos desse trabalho.

Ao projeto social BOLA DE NEVE JIU JITSU, que me ensinou sempre o melhor caminho para vida, através de conselhos, orações e por me apresentar o jiu jitsu, esporte esse que sou apaixonado, só tenho a agradecer por fazer parte dessa família, OSS.

Aos professores da UEPB que contribuíram na minha formação profissional e todo aprendizado conquistado.

RESUMO

Alguns fatores podem influenciar a sedimentação de uma suspensão de partículas tais como a forma da partícula, densidade e a distribuição do tamanho. Partículas com diâmetros maiores sedimentam mais rapidamente, enquanto as partículas muito finas tendem a permanecer muito tempo em suspensão. Uma das formas de contornar o pequeno diâmetro das partículas é a utilização de agentes coagulantes. Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito da concentração da suspensão de Carbonato de Cálcio e da granulometria sobre a velocidade de sedimentação para dimensionamento de um sedimentador contínuo. No estudo experimental foi utilizado uma proveta de 1000 mL para os ensaios em bancada de laboratório, com suspensões de concentração de 100, 150 e 200 g.L⁻¹ e partículas de abertura de peneira de 40, 100 e 325 mesh. Os ensaios foram realizados em média em tempos de 60 minutos. Após testes variando a concentração de CaCO₃ e o tamanho da partícula da suspensão pode ser observado que as velocidades de sedimentação são maiores para a concentração de 100 g.L⁻¹, isso acontece devido as interações entre as partículas serem menor do que nas suspensões de maior concentração. Através da utilização dos métodos de Kynch simplificado (Biscaia Jr) e Talmadge e Fitch foi possível calcular a área de um sedimentador contínuo com uma vazão de alimentação pré-determinada.

PALAVRAS-CHAVE: Sedimentação; Método de *Kynch* simplificado; Método de *Talmadge e Fitch*.

ABSTRACT

Several factors can influence a settling particles a suspension such as a particle shape, density and distribution make size. Particles with diameters more settle more quickly, while as particles very fine tend there stay long sleep. One of the ways to get around Little diameter of the particles and the use of flocculating agents. This paper aims to study the effect of concentration of calcium carbonate suspension and gradation About sedimentation speed Para um Sizing continuous settler. No experimental study was Used A beaker of 1000 ml for os testing Laboratory bench with concentration suspensions of 100, 150 and 200 g.L- 1 particles and sieve opening of 40, 100 and 325 mesh . Were the tests done on average time of 60 minutes. After tests by varying the concentration of CaCO₃ and size may suspension of the particle que be watched as sedimentation speeds are greater for one concentration of 100 g.L- 1, that happens due to interactions among particles as being less do que NAS suspensions increased focus. Through the use of simplified Kynch methods (Biscay Jr) and Talmadge and Fitch was possible calculate the hum area settler continuous power with a predetermined flow.

Keywords: Simplified *Kynch* methods; *Talmadge e Fitch* methods; setting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Forças atuantes durante a sedimentação de uma partícula discreta	18
Figura 2.2. Representação dos estágios da coluna de suspensão ao longo do tempo.	23
Figura 2.3. Determinação das variáveis de projeto pelo método de Kynch simplificado. (simplificação de Biscaia Jr.)	29
Figura 2.4. Método gráfico de Talmadge-Fitch.....	31
Figura 3.1 Memontos da sedimentação no ensaio de proveta.....	39
Figura 4.1. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (Mesh = 325).....	41
Figura 4.2. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (Mesh = 100).....	42
Figura 4.3. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (mistura das partículas de granulometria diferentes)	42
Figura 4.4. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (Mesh = 40).....	43
Figura 4.5. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 100g. L ⁻¹ ; mesh = 325).....	44
Figura 4.6. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 100g. L ⁻¹ ; mesh = 100).....	44
Figura 4.7. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 100g. L ⁻¹ ; mistura).....	45
Figura 4.8. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 150g. L ⁻¹ ; mesh = 325).....	45
Figura 4.9. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 150g. L ⁻¹ ; mesh = 100).....	46
Figura 4.10. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 200g. L ⁻¹ ; mesh = 325).....	46
Figura 4.11. Ajuste da região de sedimentação livre (C = 200g. L ⁻¹ ; mesh = 100).....	47
Figura 4.12. Ajuste para região de transição (C = 100g. L ⁻¹ ; mesh = 325).....	49
Figura 4.13. Ajuste da região de transição (C = 100g. L ⁻¹ ; mesh = 100).....	49
Figura 4.14. Ajuste para região de transição (C = 100g. L ⁻¹ ; mistura).....	50
Figura 4.15. Ajuste para região de transição (C = 150g. L ⁻¹ ; mesh = 325).....	50
Figura 4.16. Ajuste para região de transição (C = 150g. L ⁻¹ ; mesh = 100).....	51
Figura 4.17. Ajuste da região de transição (C = 200g. L ⁻¹ ; mesh = 325).....	51
Figura 4.18. Ajuste da região de transição (C = 200g. L ⁻¹ ; mesh = 100).....	52
Figura 4.19. Ajuste para região de formação de sedimento (C = 100g. L ⁻¹ ; mesh = 325).	53
Figura 4.20. Ajuste para região de formação de sedimento (C = 100g. L ⁻¹ ; mesh = 100).	53
Figura 4.21. Ajuste para região de formação de sedimento (C = 100g. L ⁻¹ ; mistura)....	54
Figura 4.22. Ajuste para região de formação de sedimento (C = 150g. L ⁻¹ ; mesh = 325).	54
Figura 4.23. Ajuste para região de formação de sedimento (C = 150g. L ⁻¹ ; mesh = 100).	55
Figura 4.24 Ajuste para região de formação de sedimento (C = 200g. L ⁻¹ ; mesh = 325).	55
Figura 4.25. Ajuste para região de formação de sedimento (C = 200g. L ⁻¹ ; mesh = 100).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Caracterização físico-química do carbonato de cálcio.....	38
Tabela 4.1: Velocidade na região de sedimentação livre para cada concentração e mesh.....	48
Tabela 4.2. Velocidade de decantação na região de formação do sedimento.....	56
Tabela 4.3. Parâmetros do ajuste do modelo exponencial ($Z_o = 7,4$ cm; Mesh = 325).58	
Tabela 4.4. Parâmetros do ajuste do modelo exponencial ($Z_o = 7,4$ cm; Mesh = 100).58	
Tabela 4.5. Parâmetros do ajuste do modelo exponencial ($Z_o = 7,4$ cm; Mesh = 40% 325 + 40% 100 + 20% 40).	59
Tabela 4.6. Área do sedimentador utilizando o método de Biscaia Jr.....	59
Tabela 4.7. Dimensinamento do sedimentador utilizando o método de Talmadge e Fitch.....	60

SUMÁRIO

OBJETIVO GERAL	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 SEDIMENTAÇÃO	14
2.1.1 Tipos de sedimentação	17
2.1.1.1 Sedimentação discreta	17
2.1.1.1.1 Identificação do regime de decantação.....	21
2.1.1.2 Sedimentação em massa.....	22
2.1.1.3 Sedimentação contínua e descontínua	23
2.1.2 Fatores que afetam a sedimentação.....	24
2.1.3 Pré Tratamento	25
2.1.4 Tanque de sedimentação	26
2.1.5 Projeto de Sedimentadores	26
2.1.6 Método de Kynch (1952).....	27
2.1.7 Método de Biscaia Jr.	28
2.1.8 Método de Talmadge-Fitch	31
2.2 ESTADO DA ARTE.....	33
3 MATERIAIS E METODOLOGIA	38
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	38
3.2 MONITORAMENTO DA CURVA DE SEDIMENTAÇÃO	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 REGIÃO DE SEDIMENTAÇÃO LIVRE.....	43
4.2 REGIÃO DE TRANSIÇÃO	48
4.3 REGIÃO DE FORMAÇÃO DE SEDIMENTO.....	52
4.4 CÁLCULOS DO PROJETO DO SEDIMENTADOR.....	57
4.4.1 Método de Kynch simplificado (Biscaia Jr).....	57
4.4.2 Método de Tamalge e Fitch	59
5 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	61
6 CONCLUSÃO	62

OBJETIVO GERAL

Dimensionar a área de um sedimentador utilizando os métodos de Talmadge e Fitch e Biscaia Jr.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter a curva de sedimentação, calcular a área do sedimentador, verificar o efeito que a concentração e a granulometria tem na velocidade de sedimentação.

1 INTRODUÇÃO

A sedimentação é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química, como por exemplo, nas indústrias de beneficiamento de minério, alimentícias, no tratamento de água, assim como, em estações de tratamento de efluente. É um processo de separação sólido-fluido baseado na diferença de densidade entre o sólido e o líquido. Pela ação da gravidade as partículas sólidas presentes em uma corrente líquida são removidas, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional (FRANÇA e CASQUEIRA, 2007).

Os sedimentadores são amplamente utilizados na indústria química e por isso há um crescente interesse no conhecimento do dimensionamento e operação desses equipamentos, com o fim de melhorar a utilização e eficiência no atendimento aos objetivos operacionais.

Uma forma de conhecer melhor estes equipamentos é utilizar modelos matemáticos para o seu projeto. Um dos pioneiros a propor um modelo matemático para a sedimentação foi Kynch, em 1952. Kynch propôs um modelo cinemático da sedimentação com base apenas no desenvolvimento da equação da conservação da massa para fase sólida. A publicação de Kynch motivou a indústria mineral a explorar essa nova teoria para o projeto de sedimentadores (LIRA, 2010).

De acordo com Lira (2010) a sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas ou flocos pode sofrer a influencia de fatores tais como: a natureza das partículas, distribuição de tamanhos, forma, densidade específica, propriedades químicas e mineralógicas, a quantidade de sólidos na suspensão. Partículas esféricas ou com forma aproximada à esférica têm uma maior facilidade de sedimentar do que partículas de mesmo peso com formato irregular (FRANÇA e MASSARANI, 2002).

O fenômeno da sedimentação ocorre através da força gravitacional sobre as fases sólidas e líquidas, onde a fase sólida tem uma densidade maior

que a fase líquida, ocorrendo então à deposição da fase sólida na base do equipamento (AZEVEDO, 2009).

Normalmente esses equipamentos operam de forma contínua ou semi-contínua, e são construídos de forma circular, sendo uma parte cilíndrica e outra cônica, facilitando a retirada da lama. A alimentação da suspensão que se deseja trabalhar pode ser feita no topo ou no interior do equipamento.

Podemos encontrar dois tipos de equipamentos, os sedimentadores convencionais e os não-convencionais. Os convencionais apresentam o diâmetro muito maior que a altura e a alimentação é feita no topo do equipamento, já os não-convencionais são classificados quando são submetidos a qualquer tipo de modificação, como por exemplo, modificações mecânicas, mecanismos de raspagem e de retirada da lama e também no modo de alimentação da suspensão. Os sedimentadores convencionais são constituídos de um tanque com alimentação de suspensão e um de retirada da lama e dispositivos para descarga do *overflow* e do *underflow* (LIRA, 2010).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo iremos abordar de maneira clássica os conceitos relevantes sobre sedimentação e ressaltar um pouco sobre o estado da arte.

2.1 SEDIMENTAÇÃO

Foust *et al.* (1982), definem sedimentação como o processo de separação de uma suspensão, pela ação gravitacional, até se ter um fluido límpido e uma lama com maior teor de sólidos. As operações de sedimentação industrial podem ser efetuadas ou descontinuamente ou continuamente em equipamentos denominados tanques de decantação ou decantadores, classificados por sua vez em espessadores ou clarificadores.

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-fluido baseado na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão, a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela

ação do campo gravitacional. Esta operação é baseada em fenômenos de transporte, onde a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento.

Segundo Nunes (2008) no caso de partículas sólidas muito pequenas, a eficiência de separação diminui drasticamente, inviabilizando a separação com padrões aceitáveis, tornando-se assim necessária a pesquisa de métodos para a otimização da eficiência de separação. Uma maneira de contornar tal situação consiste na adição de agentes coagulantes cuja ação consiste em produzir estruturas complexas (flocos) com os quais as partículas sólidas interagem e podem ser absorvidas. Tais estruturas possuem densidades suficientemente altas para promover a separação de forma adequada.

De acordo com França e Massarani (2002) os sedimentadores são classificados em dois tipos: os espessadores, que têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de espessados com alta concentração de sólidos e os clarificadores, que têm como produto de interesse o líquido e se caracterizam pela produção de espessados com baixas concentrações de sólidos. Industrialmente os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente, em regime contínuo.

Os espessadores são largamente utilizados para as seguintes finalidades: obtenção de polpas com concentrações adequadas a um determinado processo subsequente; espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando transporte e descarte mais eficazes; recuperação de água para reciclo industrial; recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação utilizadas em processos hidro metalúrgicos. Os tipos de espessadores variam em função da geometria ou forma de alimentação do equipamento. Basicamente são tanques de concreto equipados com um mecanismo de raspagem, para carrear o material sedimentado até o ponto de retirada, e corresponde ao maior custo do equipamento (FRANÇA e MASSARANI, 2002).

Os primeiros decantadores foram os tanques de fluxo horizontal. Este decantador é amplamente utilizado devido às diversas vantagens que apresenta, sendo elas a simplicidade, alta eficiência e baixa sensibilidade a condições de sobrecarga (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1998).

A sedimentação de sólidos finos pode ser realizada sem interferência mútua das partículas (sedimentação livre) ou com interferência (sedimentação retardada). De um modo geral, é a concentração de sólidos na suspensão que determina o tipo de decantação. As leis de Stokes e Newton, bem como as correlações empíricas para a decantação retardada, aplicam-se ao cálculo da velocidade de decantação. Todavia o projeto de decantadores é feito com base em ensaios de decantação realizados em laboratório, sendo a razão disto o desconhecimento das verdadeiras características das partículas. Os ensaios de laboratório permitem obter a curva de decantação da suspensão, sendo conduzidos de modo diferente quando se trata de suspensão diluída ou concentrada. As suspensões diluídas são decantadas com o objetivo de clarificar o líquido e o equipamento que se emprega é um clarificador (GOMIDE, 1980).

A condução de experimentos para obtenção de curvas de decantação difere para soluções concentradas ou diluídas. Em testes de sedimentação de soluções concentradas é perceptível a formação de interfaces e regiões de diferentes concentrações de sólidos. Foust et al. (1982) citam que em tais condições podem ser definidas até quatro diferentes zonas de concentração: líquido límpido, concentração uniforme, zona de dimensões e concentrações variáveis e sólidos grossos. Já na decantação de soluções diluídas não é possível tal diferenciação. As únicas fases perceptíveis são o depósito de sólidos ao fundo e a solução em si. Por este motivo, a obtenção da curva de decantação difere para os dois tipos de solução.

Se uma amostra previamente homogeneizada da suspensão for colocada num tubo de vidro graduado de secção constante e deixada em repouso, verifica-se que, decorrido certo tempo, as partículas mais grossas depositam-se no fundo do tubo. As mais finas continuam em suspensão. As partículas intermediárias distribuem-se em diversas alturas, de acordo com a sua granulometria. Em outras palavras, há uma verdadeira classificação espontânea das partículas ao longo do tubo. Cada partícula vai decantando com velocidade proporcional ao seu tamanho e a clarificação vai progredindo, mas não há uma linha nítida de separação entre a suspensão e o líquido clarificado. A única separação nítida que se nota é entre o sedimento sólido depositado no fundo e o resto da suspensão. Este comportamento é típico das

suspensões diluídas (GOMIDE, 1980).

Torquato e Luz (2011) comentam que a prática industrial, no âmbito do tratamento de minérios de ferro no Brasil, tem consolidado uma modificação substancial no método clássico de Kynch (com traçado de Talmage e Fitch), a qual consiste em adotar, para o traçado, a concentração mássica de sólidos na proveta após 24 horas, no lugar da concentração nominal do underflow no espessador industrial. Os ensaios indicam que a área unitária assim obtida ainda deve ser afetada com os fatores de correção. Esse fator, multiplicativo, é de 0,64, para espessadores de lamas, e de 1,3, para espessadores de concentrado fino (pellet feed).

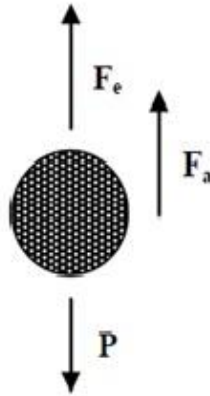
2.1.1 Tipos de sedimentação

De acordo com Simões (2014) quatro tipos de sedimentação podem ocorrer de acordo com a concentração de sólidos e com as características das partículas que induzirão ou não a tendência interagir: sedimentação discreta; sedimentação de flocos de pequena concentração; sedimentação em massa (flocos com alta concentração), zona de compressão. Neste trabalho limitaremos apenas a abordagem da sedimentação discreta e em massa, pois são as principais formas encontradas no cotidiano.

2.1.1.1 Sedimentação discreta

A sedimentação discreta de partículas pode ser analisada por meio das leis clássicas de Newton e Stokes. De acordo com a teoria de Newton, a velocidade de sedimentação é fundamentada no fato de que qualquer partícula não coloidal, suspensa em um meio líquido em repouso e de menor massa específica será acelerada pela ação da gravidade até que as forças de resistência viscosa sejam iguais à resultante do peso efetivo da partícula. A partir daí, a sua velocidade descendente torna-se constante e passa a ser denominada velocidade terminal (DI BERNARDO, 1993), conforme a Figura 2.1.

FIGURA 2.1. Forças atuantes durante a sedimentação de uma partícula discreta.



Fonte: SIMÕES (2014)

De acordo com a Figura 2.1, toma-se a força F como a resultante das forças aplicadas sobre a partícula, sendo elas:

P : a força externa, que nesse caso será a força da gravidade;

F_e : a força devido ao empuxo;

F_a : a força devido ao atrito;

Essas forças são representadas pelas seguintes equações: (FOUST *et al* .1982)

$$P = m_p \cdot g \quad (2.1)$$

m_p : é a massa da partícula

g : é a aceleração da gravidade

$$F_e = m_f \cdot g \quad (2.2)$$

m_f : é a massa do fluido deslocado

$$F_A = C_a \frac{S \cdot \rho_l v^2}{2} = C_a \frac{\pi \cdot d_p^2}{8} \cdot \rho_f v^2 \quad (2.3)$$

C_a : é o coeficiente de atrito

S : é área projetada da partícula (considerando a partícula esférica)

ρ_f : é a massa específica do fluido;

v : é a velocidade da partícula relativa ao fluido;

d_p : é o diâmetro da partícula.

$$F = m_p \cdot a = m_p \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.4)$$

a : é a aceleração do movimento da decantação.

Portanto, temos que a força resultante fica da seguinte forma:

$$m_p \cdot \frac{dv}{dt} = P - F_e - F_A = m_p \cdot g - m_f \cdot g - C_a \frac{\pi d_p^2}{8} \cdot \rho_f \cdot v^2 \quad (2.5)$$

O volume deslocado é considerado igual ao volume de partícula, então, para uma partícula esférica temos:

$$V_s = \frac{\pi d_p^3}{6} \quad (2.6)$$

V_s : volume de partícula

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f} \quad (2.7)$$

$V_f = V_s$, temos:

$$m_f = \rho_f \cdot V_f = \rho_f \cdot V_s \quad (2.8)$$

Assim, substituindo a equação:

$$m_p \cdot \frac{dv}{dt} = m_p \cdot g - \rho_f \frac{\pi d_p^3}{6} g - \frac{\pi d_p^3}{6} - C_a \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f \cdot v^2 \quad (2.9)$$

Considerando velocidade de sedimentação constante, ou seja:

$$a = \frac{dv}{dt} = 0 \quad (2.10)$$

Como também,

$$m_p = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} g \quad (2.11)$$

tem-se:

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} g - \rho_f \frac{\pi d_p^3}{6} g - C_a \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f \cdot v^2 \quad (2.12)$$

$$C_a \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f \cdot v^2 = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_f) g \quad (2.13)$$

Esta é a Equação Newtoniana, pode ser reescrita como:

$$v^2 = \frac{4gd_p}{3C_a} \cdot \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} \quad (2.14)$$

Para partículas esféricas, pequenas, num meio viscoso, Stokes demonstrou que:

$$F_A = 3\pi d_p \mu \cdot v \quad (2.15)$$

Igualando as forças de atrito de Newton e de Stokes:

$$C_a \frac{\pi d_p^2}{8} \rho_f \cdot v^2 = 3\pi d_p \mu \cdot v \quad (2.16)$$

$$C_a \frac{24\mu}{d_p \rho_f v} = \frac{24}{Re} \quad (2.17)$$

Substituindo a Equação 2.17 na Equação 2.14:

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_f) g d_p^2}{18\mu} \quad (2.18)$$

Onde:

ρ_f : massa específica do fluido

ρ_p : massa específica do sólido ou partícula

μ : viscosidade do fluido (no caso do espessador é a água)

2.1.1.1.1 Identificação do regime de decantação

Quando a velocidade de decantação é desconhecida, torna-se difícil reconhecer o regime de decantação, pois o número de Reynolds, Re , não pode ser calculado.

Para identificação do regime de decantação pode ser usado a seguinte equação:

$$K = d_p \sqrt[3]{\frac{\rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2}} \quad (2.19)$$

onde o valor de K calculado identifica o regime de decantação das partículas do sólido na suspensão. O cálculo do parâmetro K depende apenas das propriedades do fluido e do sólido que compõe a suspensão.

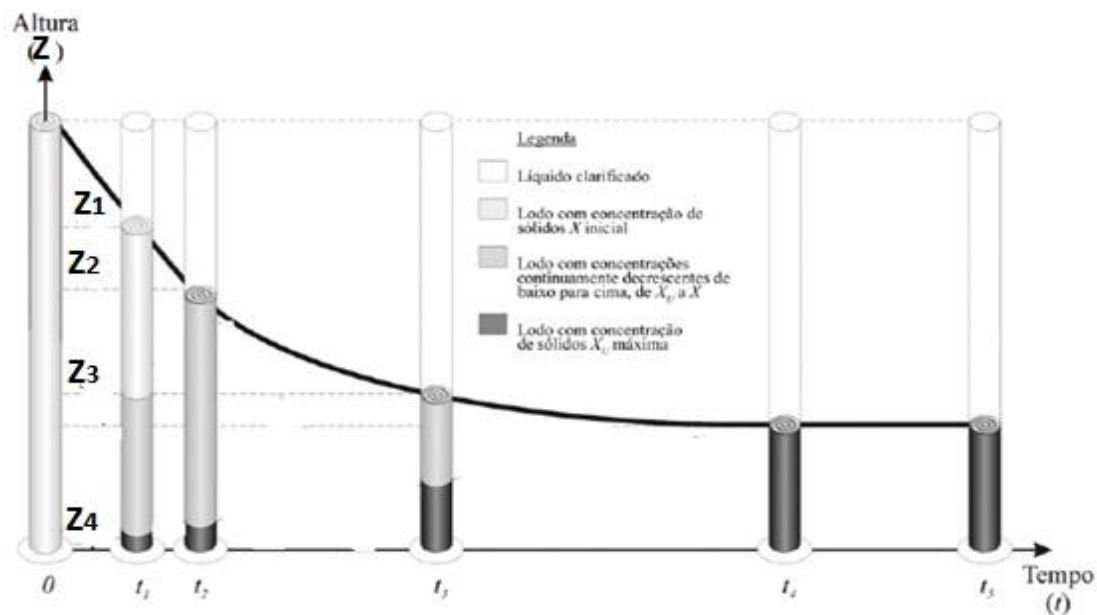
$$K \left\{ \begin{array}{l} <3,3: \text{ regime viscoso} \\ 3,3 \text{ a } 44: \text{ regime intermediário} \\ 44 \text{ a } 2360: \text{ regime hidráulico} \\ 2360 > Re > 20000 \end{array} \right.$$

2.1.1.2 Sedimentação em massa

A sedimentação em massa é amplamente aplicada para suspensões concentradas (PASSOTO, *et al.*, 2011). Tais partículas estão sujeitas às forças da gravidade, empuxo e resistência ao movimento (FRANÇA, *et al.*, 2007).

Considere uma suspensão homogênea de partículas submetidas à força gravitacional, conforme Figura 2.2. No tempo $t = 0$, todas as partículas estão dispersas no meio do líquido. Para o tempo ($t = t_1$), as partículas de maior densidade começam a se movimentar, por ação da gravidade, no sentido do fundo da proveta. As partículas de menor densidade permanecem em equilíbrio com o meio líquido. Entretanto, quando a força peso da partícula é maior do que a força exercida em sentido oposto, pelo líquido, as partículas de menor densidade também começam a se movimentar no sentido do fundo da proveta ($t = t_2$). Nesse momento, observa-se uma interface de partículas descendentes, com velocidades diferentes, que vão formando gradativamente a região de compactação. Ao mesmo tempo em que essa interface desce, formando acima dela uma região de líquido clarificado, a interface inferior sobe, formando abaixo dela uma região de compactação (espessado). Nessa região, as partículas sólidas começam a interagir entre si, aparecendo o efeito de resistência ao movimento ($t = t_3$) das partículas. Quando todas as partículas sólidas sedimentam, formando a região de compactação, o processo passa a ser, formando a região de compactação, o fenômeno que rege o processo passa a ser neste instante ($t = t_4$) o de acomodação do leito de partículas compactadas (FRANÇA *et al.*, 2007). A partir do tempo t_5 , a taxa de sedimentação está definida e atingiu o equilíbrio.

FIGURA 2.2. Representação dos estágios da coluna de suspensão ao longo do tempo.



Fonte: SANTOS *et al.* (2005)

2.1.1.3 Sedimentação contínua e descontínua

Costuma-se classificar os sedimentadores em dois tipos: os espessadores, que têm como produto de interesse o sólido e são caracterizados pela produção de espessados com alta concentração de sólidos e os clarificadores, que têm como produto de interesse o líquido e se caracterizam pela produção de espessados com baixas concentrações de sólidos. Industrialmente os espessadores são os mais utilizados e operam, geralmente, em regime contínuo (FRANÇA *et al.*, 2002).

Segundo Butze, *et al.* (2010) os sedimentadores descontínuos são tanques cilíndricos com a solução em repouso por certo tempo. A velocidade decrescente da altura da superfície de separação do líquido sobrenadante claro, da camada que contém o sólido em suspensão é chamada velocidade de sedimentação. Este ensaio deve ser realizado em pequena escala, a uma temperatura constante e uniforme para impedir o movimento do fluido, ou o surgimento de diferentes correntes de convecção causadas por alterações na temperatura.

2.1.2 Fatores que afetam a sedimentação

De acordo com França e Casqueira (2007) vários fatores influenciam o processo de sedimentação, entre eles estão à natureza das partículas, o pré-tratamento e o efeito de concentração de sólido e área do sedimentador.

Natureza das Partículas

Partículas esféricas, ou com forma aproximada à esférica, sedimentam com maior facilidade do que partículas de formato irregular. O mesmo pode ser notado para partículas com diâmetros maiores, que sedimentam mais rapidamente, enquanto as partículas muito finas tendem a permanecer em suspensão. Os processos de floculação e coagulação reúnem as melhores alternativas de atenuar a irregularidade na forma da partícula, ou ainda no seu diâmetro. Desse modo, o processo de aglomeração das partículas forma unidades maiores e de formato mais regular, que, conseqüentemente, sedimentam mais facilmente. A coagulação das partículas é um tipo de pré-tratamento da polpa, antes desta ser submetida ao processo de sedimentação.

Efeito da concentração de Sólidos

Suspensões muito concentradas apresentam características de sedimentação bem diferentes das observadas na sedimentação de uma partícula isolada, devido ao efeito da concentração. Esse efeito origina o fenômeno da sedimentação impedida (obstada), fazendo com que a taxa de sedimentação deixe de ser constante para se tornar decrescente (LUZ et al.,2010).

Ao sedimentar livremente, uma partícula mineral em um meio fluido sofre apenas a resistência do líquido ao seu movimento (empuxo). Quando isolada, ou com poucas partículas, esta descreve uma trajetória descendente livre e sedimenta, utilizando para isso um tempo t . Quando há várias partículas sedimentando no meio fluido, existe a probabilidade de mais de uma partícula ter a mesma trajetória. Assim, há também partículas de diferentes tamanhos e/ou densidades sedimentando ao mesmo tempo, com velocidades terminais

diferentes. Dessa forma, quanto maior a porcentagem de sólidos em uma suspensão, menor será a velocidade (FRANÇA, *et al.*, 2007).

Suspensões muito concentradas apresentam características de sedimentação bem diferentes das observadas na sedimentação de uma partícula isolada, devido ao efeito da concentração. Esse efeito origina o fenômeno da sedimentação impedida (obstada), fazendo com que a taxa de sedimentação deixe de ser constante para se tornar decrescente (LUZ *et al.*, 2010).

2.1.3 Pré Tratamento

Existem situações em que dependendo das características físico-químicas do minério e da distribuição granulométrica, a sedimentação ocorre de forma natural e satisfatória ao processo, em contrapartida, existem casos em que é necessária a utilização da sedimentação forçada, ou seja, a utilização de produtos químicos (floculantes, coagulantes, tensoativos) para aglomeração das micropartículas tornando-as maiores e com massa suficiente sofrerem a ação do campo gravitacional, atendendo desta forma as necessidades do processo. Para solucionar esse problema, ou seja, tornar as partículas maiores e mais pesadas possibilitando assim que ocorra a sedimentação, podem-se utilizar três alternativas para agregação das partículas, a coagulação, aglomeração e a floculação. A coagulação consiste, na atração natural de uma partícula pela outra devido à existência de cargas contrárias em suas superfícies, ou, quando estas cargas são iguais, se faz necessária à utilização de produtos químicos para desestabilização da superfície tornando-as atrativas entre si. A aglomeração tem como o princípio básico a utilização de um líquido imiscível que misturado à suspensão, ocorrerá à formação de bolhas de ar que irão aglomerar os coloides, uma das principais características necessária para que ocorra a formação do aglomerado é que a partícula seja naturalmente hidrofóbica. A coagulação resulta da utilização de polímeros de alta massa molecular que, dosados na suspensão, irão provocar uma desestabilização da suspensão, surgindo uma reação em cadeia de atração entre os coloides tornando-os mais pesados e com água retida em seu interior (REIS, 2010).

Luz *et al.* (2010) suspensões floculadas apresentam características diferentes das suspensões não floculadas de partículas, uma delas é a taxa de sedimentação consideravelmente maior do que a da suspensão original, devido a grande quantidade de água que o floco contém nos seus interstícios. Assim, características como forma e densidade são muito pouco relacionadas com as características das partículas originais. Para a previsão de novas taxas de sedimentação, o que é extremamente complexo, faz-se necessário o conhecimento de um novo fator de forma e valor de densidade, que ainda são determinados por métodos empíricos. A grande dificuldade na determinação destas variáveis é a sua dependência não apenas com o tipo de floculante utilizado, mas também com as condições físico-químicas sob as quais ocorreu a floculação.

2.1.4 Tanque de sedimentação

A geometria e as dimensões do tanque têm influência no processo de sedimentação; a existência de paredes ou obstáculos no trajeto da partícula promove a redução da taxa de sedimentação. A altura de suspensão no tanque não altera a velocidade desedimentação nem a concentração de sólidos na lama ao final do teste, porém se a concentração de sólidos é muito alta, é importante que o tanque seja alto o suficiente para que o processo de sedimentação aconteça livremente, sem que as partículas sejam indevidamente desaceleradas devido ao fundo do tanque (LUZ *et al.*, 2010).

2.1.5 Projeto de Sedimentadores

O projeto consiste basicamente no cálculo do diâmetro e da altura do sedimentador, com a finalidade de espessar ou clarificar uma determinada polpa (DAMASCENO e MASSARANI, 1993). Para tanto, os dados obtidos nos testes de laboratório devem ser confiáveis, além de consistentes. A seguir será descrita a metodologia de Kynch (1952) para cálculo dessas variáveis.

2.1.6 Método de Kynch (1952)

Em seu trabalho, Kynch estabeleceu um método para determinar o par de variáveis, concentração (C) e velocidade de sedimentação (v_s), necessário ao cálculo do fluxo de sólidos, com apenas um teste de proveta. Conhecendo-se a concentração inicial e o comportamento da interface descendente é conveniente introduzir a velocidade superficial da partícula na suspensão ou fluxo de partículas, ou seja, o número de partículas que atravessam uma seção horizontal do recipiente de dispersão por unidade de área por unidade de tempo.

$$F_S = C_S \cdot v_s \quad (21)$$

Sendo a concentração volumétrica de sólidos sua velocidade intersticial, o fluxo de partículas (AROUCA, 2007).

Uma vez que se assume por hipótese que a velocidade de sedimentação de todas as partículas na dispersão depende apenas da concentração local de sólidos e que a concentração de partículas é também uma função exclusiva da concentração. A velocidade superficial torna-se desta forma dependente de, uma vez que, sob o ponto de vista analítico, à medida que a concentração volumétrica aumenta até seu valor máximo a velocidade de sedimentação decresce continuamente de um valor finito a zero. Definindo Z como sendo a altura de uma camada uniforme qualquer acima da base da coluna de altura L de sedimentação das partículas e sabendo que o fluxo F varia com Z. Assim, Kynch descreveu a suspensão como um meio no qual a concentração varia com o tempo da mesma forma que a velocidade superficial dos sólidos varia com a posição ao longo da coluna (AROUCA, 2007).

O método de Kynch baseia-se na equação da continuidade em sua forma unidimensional. Sua teoria prevê a propagação de ondas de concentração características, do fundo do recipiente até a interface superior. A velocidade de propagação dessas ondas de concentração só depende da concentração local. Kynch mostrou a partir do estudo da estabilidade de descontinuidades da concentração que a velocidade de propagação diminui

com o aumento da concentração do sólido (KYNCH, 1952). Essa metodologia ficou conhecida como o método das tangentes.

2.1.7 Método de Biscaia Jr.

De acordo com Cremasco (2012) o inconveniente do método de Kynch está na necessidade de explorar a curva de sedimentação, na região de transição, para obter o máximo valor para a área do sedimentador. Biscaia Jr. (1992) propôs uma simplificação ao procedimento de Kynch e à minimização de

$$\frac{Q}{S} = \frac{q_i}{C_A} \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_e} \right)^{-1} \quad (2.20)$$

baseado no fato de que a curva de sedimentação resulta na combinação de uma reta com uma exponencial (MASSARANI, 1997) ou

$$\left(\frac{Q}{S} \right)_{proj} = \frac{Z_0}{t_{min}} \quad (2.11)$$

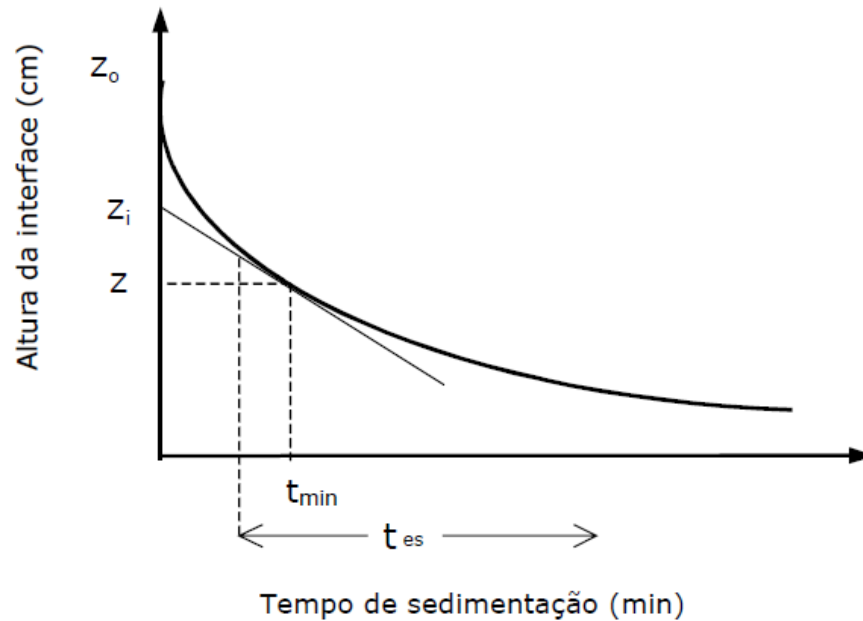
O valor de t_{min} é o tempo correspondente a

$$Z_{min} = Z_0 \frac{C_0}{C_E} \quad (2.22)$$

$$v_s = \frac{Z_i - Z}{t_{min}} \quad (2.23)$$

O método simplificado das tangentes consiste no traçado de uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de sedimentação, como mostrado na Figura 2.3. Uma simplificação matemática da metodologia de Kynch foi introduzida por Biscaia Jr. (1988), tornando mais fácil a determinação gráfica das variáveis de projeto, que são determinadas pelas Equações (2.22) e (2.23). Essas equações permitem calcular a concentração a e velocidade de sedimentação de sólidos em diferentes alturas da proveta, durante o ensaio de sedimentação.

Figura 2.3. Determinação das variáveis de projeto pelo método de Kynch simplificado. (simplificação de Biscaia Jr.).



Fonte: FRANÇA *et al.*(2007)

Com a aplicação do método de Kynch simplificado (BISCAIA, 1988) à curva de sedimentação, é possível determinar:

- (i) os valores de Z_i (ponto no qual a tangente toca o eixo y);
- (ii) o ponto no qual a reta tangente toca a curva fornece os valores de Z e t_{min} , que são a altura da região de compactação e o tempo mínimo necessário à formação da região de compactação;
- (iii) três, o tempo de residência da partícula sólida na região de compactação, necessário à formação do material espessado.

Com estas informações é possível calcular a capacidade de projeto do sedimentador $(Q/S)_{proj}$, ou seja, a vazão máxima de suspensão que poderá ser alimentada com uma determinada área de seção transversal, respeitando as velocidades de sedimentação dos sólidos de uma dada suspensão. A capacidade de projeto e a vazão de alimentação do sedimentador são dadas, respectivamente, pelas Equações (2.21) e (2.22):

Onde:

Q , vazão de alimentação de polpa ($m^3 \cdot h^{-1}$);

S , área da seção transversal do espessador (m^2);

Z_0 , altura inicial da interface no teste de proveta (m);

t_{min} , tempo mínimo necessário à formação do espessado com uma dada percentagem de sólidos (h);

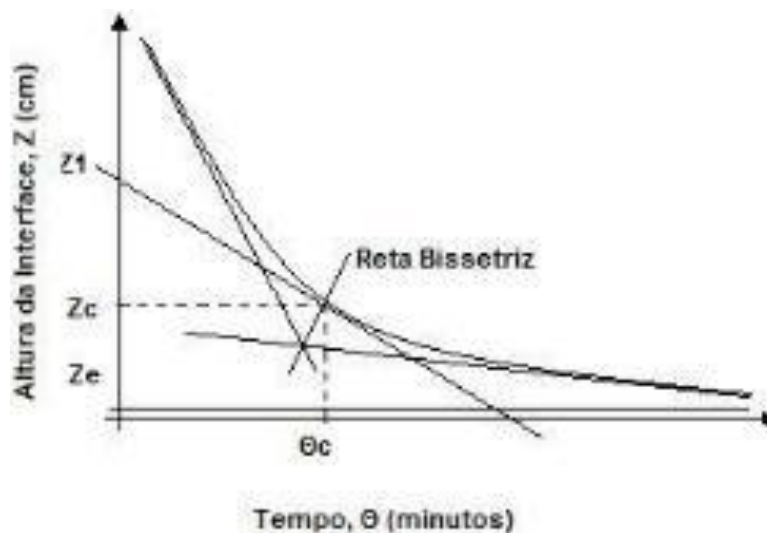
v_s , velocidade superficial dos sólidos ($m \cdot h^{-1}$).

Conhecendo-se a vazão de alimentação da polpa que irá alimentar o espessador e os demais dados provenientes da sedimentação em batelada (curva de proveta), calcula-se o diâmetro do sedimentador (D).

2.1.8 Método de Talmadge-Fitch

O método de Talmadge-Fitch (1955) baseia-se na determinação do ponto crítico (Z_c , t_c) através de análise da curva de sedimentação como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4. Método gráfico de Talmadge-Fitch.



Onde:

Z_c , Altura da interface no ponto crítico;

t_c , Tempo necessário para se atingir o ponto crítico;

t_e , Tempo necessário para o espessamento;

Etapas:

1. Traçar a tangente à curva de sedimentação na zona de clarificação;
2. Traçar a tangente à curva de sedimentação na zona de espessamento;
3. Traçar a bissetriz entre as duas retas;
4. Localizar o ponto crítico;
5. Traçar a tangente à curva de sedimentação passando pelo ponto crítico.
6. Identificar Z_1 , Z_c , e t_c .

Lembrando que no ensaio de proveta a massa de sólidos é constantemente que no processo de espessamento ocorre a remoção de certa

quantidade de líquido para que ocorra a alteração da concentração, tem-se que:

$$C_0SZ_0 = C_cSZ_c = C_E SZ_E \quad (25)$$

$$C_0Z_0 = Z_c C_c = C_E Z_E \quad (2.26)$$

$$V_{\text{líquido}} = S (Z_c - Z_e) \quad (2.27)$$

$$t_{\text{descarga}} = t_c - t_e \quad (2.28)$$

Onde C_0 e Z_0 são a concentração e altura iniciais, C_c e Z_c são a concentração e altura no ponto crítico, C_e e Z_e são a concentração e altura ao final do período de espessamento, $V_{\text{líquido}}$ é o volume de líquido expelido durante o espessamento e t_{descarga} é o tempo necessário para descarga do volume $V_{\text{líquido}}$.

A vazão volumétrica de sedimentação pode ser obtida a partir da velocidade V_c , de sedimentação no instante t_c :

$$Q_0 = \frac{S \cdot Z_0}{t_E} \quad (2.29)$$

Em condições de escoamento contínuo, o escoamento ascendente de líquido límpido deve ser igual ao escoamento descendente de sólidos para que seja possível o espessamento. Logo, tem-se vazão volumétrica de líquido expelido igual vazão volumétrica de sedimentação.

$$V = \frac{Z_1 - Z_c}{t_c} \quad (2.30)$$

A partir dos dados de um ensaio de sedimentação em proveta, a determinação da área mínima de um espessador contínuo se baseia no fato de que se possui de C_0 , Z_0 , C_e (a altura final da zona de espessamento), determina-se Z_e , pela Eq. (2.26) e, traçando uma reta até a tangente do ponto crítico encontra-se t_e . Para a operação estacionária do sedimentador contínuo, a velocidade de sedimentação (massa/tempo) na camada de compressão de sólidos (que é a camada de velocidade de sedimentação mais lenta e que, portanto, requer a maior área do sedimentador) deve ser a mesma vazão mássica de sólidos alimentada, dada por:

$$S = \frac{Q \cdot t_e}{Z_0} \quad (31)$$

Sendo que S é a área da seção reta do decantador e Q é a vazão volumétrica de alimentação do sedimentador contínuo.

2.2 ESTADO DA ARTE

Neste tópico será apresentado diversos trabalhos referentes à evolução da teoria da sedimentação que atualmente muitos pesquisadores tem citado objetivando de aperfeiçoar as técnicas utilizadas para os cálculos da capacidade dos sedimentadores e tornar o processo mais eficiente.

Segundo Azevedo (2009) os primeiros estudos de sedimentação de partículas sólidas em meio aquoso foram iniciados em 1904, quando Hazen mostrou que o tempo de residência não é um fator primordial no dimensionamento de sedimentadores, por outro lado, a quantidade de sólidos removidos depende da área transversal do tanque e das propriedades das partículas.

Em 1905, Dorr inventou o espessador contínuo sendo este o ponto de partida da era moderna do espessamento.

De acordo com Azevedo (2009) no ano de 1912 Mishler iniciou o estudo do projeto de sedimentadores a partir de bases científicas propondo que a área transversal do equipamento fosse calculada em função da velocidade ascensional do líquido, suposta igual à velocidade de sedimentação das partículas.

Um dos trabalhos pioneiros na área de sedimentação foi o de Coe e Clevenger (1916), que propuseram uma metodologia para o projeto de sedimentadores baseada em ensaios em batelada para diversas concentrações iniciais variando entre as concentrações da alimentação e da lama. A cada ensaio eram medidas a concentração e a velocidade inicial de sedimentação na região de concentração constante. Eles postularam uma teoria onde coexistem dois regimes de sedimentação. O primeiro baseia-se no conceito de sedimentação livre, que diz que em um primeiro momento, as partículas sofrem influências apenas de forças hidráulicas. O segundo conceito expressa que as partículas sofrem um esforço mecânico, com isto as próprias partículas exercem forças de compressão umas sobre as outras. Os autores concluíram que a velocidade de sedimentação da interface depende da concentração inicial (PINTO, 2007).

Segundo Azevedo (2009) em meados do ano de 1952, Kynch desenvolveu uma teoria simplificada para descrever o fenômeno de sedimentação em batelada. A teoria estabelece que a partir do conhecimento do movimento da interface descendente e da concentração inicial, pode-se determinar a variação da velocidade das partículas na suspensão. A teoria apresenta ainda a descrição de quatro regiões distintas do fenômeno da sedimentação em batelada: região de líquido clarificado, região de sedimentação livre, região de transição e região de formação do sedimento. Esta teoria está alicerçada na hipótese de formação de sedimentos incompressíveis, e a sua utilização para projeto de sedimentadores que operam com suspensões que produzem sedimentos com pequenos graus de compressibilidade. Ela admite as seguintes hipóteses:

1. A sedimentação é unidimensional.
2. A concentração aumenta com o tempo no sentido do fundo do recipiente.

3. A velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração tende a seu valor máximo.
4. A velocidade de sedimentação depende da concentração local dos sólidos.
5. Os efeitos de parede não são considerados.

Desta forma, observa-se que a teoria proposta por Kynch simplifica o dimensionamento de sedimentadores no que se refere ao número de experimentos necessários, pois o procedimento proposto por Coe e Clewenger (1916) há necessidade de vários ensaios de sedimentação em proveta com concentrações iniciais variando desde a concentração da alimentação do sedimentador até a concentração da lama espessada.

Em 1955 Talmadge e Fitch desenvolveram um procedimento gráfico baseado na teoria de Kynch. Os autores propuseram a existência de uma camada crítica no interior do sedimentador, onde o peso efetivo dos sólidos é equilibrado pela força de arraste do líquido ascendente. Em seus estudos os autores verificaram que as velocidades de sedimentação calculadas dos métodos de Coe e Clewenger (1916) e de Kynch (1952) apresentam concordância entre os dois procedimentos no caso de baixas concentrações (AZEVEDO, 2009)).

Damasceno e Massarani (1990) efetuaram um estudo experimental sobre o projeto de sedimentadores pelo método de Kynch (1952). Tomando por base ensaios de sedimentação em proveta com diversas alturas de coluna de suspensão, calcularam o diâmetro de sedimentadores para produzir diversas concentrações de lama. Seus resultados demonstraram que o valor calculado para o diâmetro depende da altura da coluna de suspensão, principalmente para os casos de alta concentração de lama. Estes autores presumiram que tal fato ocorre devido a não consideração da região de sedimento pela teoria de Kynch e inferiram que o uso do método de Kynch (1952) só deve ser indicado ao projeto de sedimentadores que devem produzir lamas muito diluídas, para as quais o sedimento não está presente, como no caso de clarificadores. Além disso, verificaram que, para o projeto de sedimentadores utilizando este

método, deve-se realizar um ensaio de sedimentação em proveta, cuja altura da coluna de suspensão seja igual à altura do sedimentador.

Ruiz (2000) efetuou o acompanhamento do fenômeno da sedimentação em batelada para suspensões aquosas de carbonato de cálcio e caulim, com concentrações volumétricas baixas na faixa de 2 a 3 %. Este acompanhamento foi realizado usando a técnica de atenuação de raios gamas. Resolvendo as equações do movimento e da continuidade para o sólido, foi possível determinar a velocidade de sedimentação e a pressão nos sólidos. Seus resultados demonstraram que a velocidade de sedimentação é uma função única da concentração de sólidos para sedimentos pouco compressíveis.

Nunes (2008) estudou as variáveis que afetam o desempenho de sedimentadores convencionais operando com suspensões previamente floculadas, tais como o pH e a massa de material floculante e apresentou um procedimento para sedimentação contínua com floculação utilizando o sedimentador convencional. Concluiu que ensaios de proveta foram muito eficientes apesar da simplicidade, pois obteve um bom ajuste dos dados experimentais pelas equações constitutivas de Tiller e Leu (1980) para pressão e permeabilidade; houve uma influência da área da seção transversal na velocidade de sedimentação, as provetas de maior diâmetro proporcionaram uma maior velocidade, indicando que há um efeito de parede no processo; calculando a capacidade do sedimentador pelo método de Kynch (1952) obteve um melhor desempenho utilizando-se o processo de floculação, mostrando assim a importância de se utilizar este processo nos casos de sedimentação de partículas muito finas.

Metcalf e Eddy (1979) apud Pinto *et al.* (2009) propõem que o dimensionamento do diâmetro de espessadores seja efetuado através de um método baseado no fluxo de sólidos, isto é, seja efetuado através da vazão mássica que passa por uma unidade de área durante certo intervalo de tempo, após o sistema atingir o estado estacionário. A curva do fluxo de sólidos em função da concentração, sendo tangenciada por uma reta que parte do ponto onde se encontra a concentração de sólidos desejada no underflow C_e (eixo das abscissas), indica o fluxo de sólidos limitante da operação (F_L), quando tal fluxo toca o eixo das ordenadas.

Roberts (1949) apud Pinto *et al.* (2009), analisando o trabalho de Coe e Clevenger, propôs um método gráfico que parte da curva de sedimentação (Z versus q) traçada em escala monologarítmica. Esse método evidencia e caracteriza o ponto crítico (início da zona de compressão) com a descontinuidade da curva. O método, também, é realizado com ensaios em provetas com uma única concentração de alimentação, tendo, também, sido reportado por Gomide (1980).

Segundo Pinto *et al.* (2009) Um fator de escala (f) é, usualmente, utilizado para corrigir o diâmetro de espessadores, o qual é calculado através de ensaios de laboratório. Para esse fator, a literatura indica valores na faixa de $1,29 < f < 1,33$, para espessadores convencionais (Chaves, 1996) e $f = 1,4$, para espessadores de lamelas (Kelly; Spottiswood, 1982). A utilização de um fator de escala no dimensionamento é justificada pelo fato de que os ensaios de sedimentação foram realizados em bateladas (sedimentação em provetas), enquanto que os equipamentos industriais vão operar em regime contínuo (Chaves, 1996). Gradientes de temperatura e possível formação de bolhas na polpa, oriundas de canais preferenciais de sedimentação, também justificam o uso do fator de escala (Moraes, 1990). Também é usual que engenheiros projetistas utilizem um fator de segurança (fs), para que o equipamento, quando em operação, absorva variações operacionais. Isto se justifica pelo fato de os espessadores serem equipamentos de alto custo e, também, inflexíveis na sua operação (Chaves, 1996).

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste Capítulo são apresentados os equipamentos e materiais utilizados, bem como a metodologia experimental aplicada.

Os ensaios de sedimentação em proveta foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais (LAPECA), do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual da Paraíba (CCT/UEPB).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

O sólido utilizado neste trabalho para formar as suspensões testes de sedimentação em batelada foi carbonato de cálcio adquirido da empresa Dolomil Indústria LTDA., com representação em Campina Grande, PB. Utilizaram-se três tipos de amostras, com diferentes granulometrias, sendo os mesh 325, 100 e 40. A Tabela 3.1 apresenta as características físico-químicas do carbonato de cálcio.

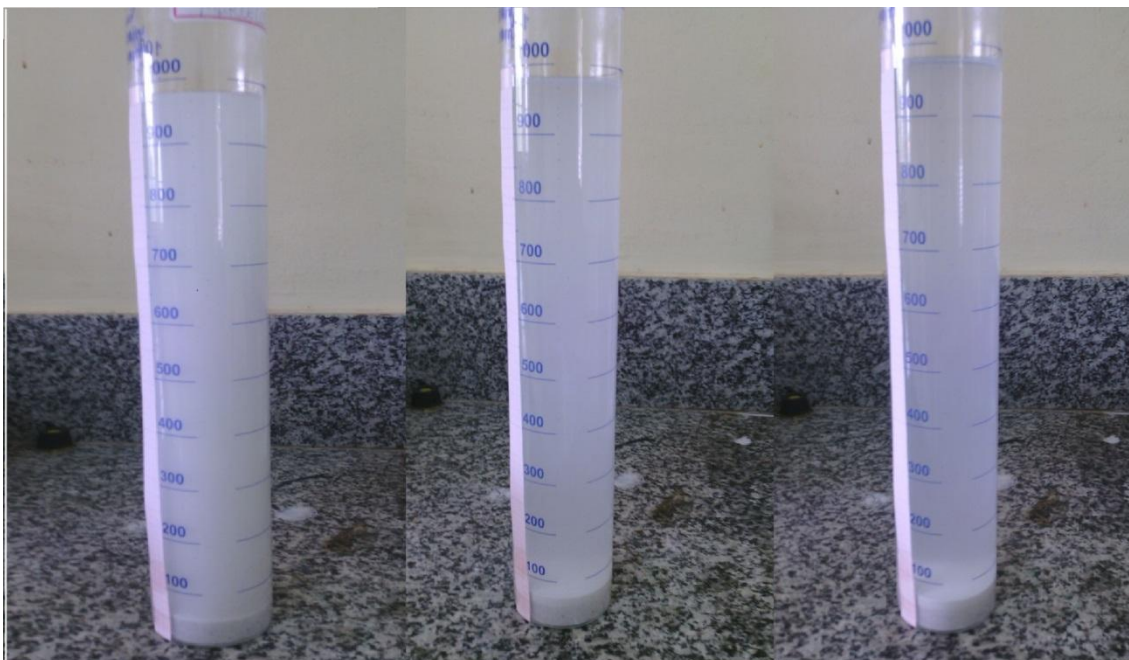
TABELA 3.1 caracterização físico-química do carbonato de cálcio.

Estado Físico: Sólido Cristalino	Forma: Pó finamente dividido de tato arenoso	Cor: Cor do branco ao acinzentado	Odor: Inodoro
Ponto de fusão: 1339° C	Temperatura de decomposição 800° C	Ponto de fulgor incombustível	Temperatura de auto ignição: Não aplicável
Limites de explosividade superior	Pressão de vapor: Aproximadamente 0mmHg	Densidade (água=1): 2,60 a 2,90g/cm ³	PH(dispersão aquosa a 5%) 9,0 – 10,50
Densidade aparente: 1,40 a 1,90g/cm ³	Solubilidade em água: Insolúvel	Outras solubilidade: Insolúvel em solventes orgânicos	

FONTE: Dolomil Indústria LTDA

Para realização do experimento foi utilizado uma proveta de 1000 ml com papel milimetrado aderido a parede externa da proveta como poder ser visto na Figura 3.2.

FIGURA 3.2 Momentos da sedimentação no ensaio de proveta.



Embora França (2006) enfatize que o ideal seria realizar os ensaios de sedimentação descontínua em provetas de 2000 ml para que o efeito de parede seja desprezado, caso utilize-se uma proveta de volume menor do que 2000 ml, esse efeito terá que se levado em consideração. As concentrações utilizadas foram escolhidas aleatoriamente com valores de 100 g.L^{-1} , 150 g.L^{-1} e 200 g.L^{-1} de carbonato de cálcio.

3.2 MONITORAMENTO DA CURVA DE SEDIMENTAÇÃO

Foram preparadas analiticamente três suspensões de concentrações diferentes: 100 g.L^{-1} , 150 g.L^{-1} e 200 g.L^{-1} com tamanho de partículas diferentes referentes aos mesh 325, 100, 40 e a mistura dos três diferentes mesh, sendo uma suspensão de 100 g.L^{-1} com 40% do mesh 325, 40% do mesh 100 e 20% do mesh 40. Os experimentos de sedimentação em proveta com as suspensões de carbonato de cálcio preparadas foram executados na proveta de capacidades volumétricas de 1000 mL. As suspensões com concentrações

definidas foram preparadas no béquer de 2000 mL e transferidas para o balão volumétrico de 1000 mL para realizar a aferição, em seguida, realizou-se a transferência do balão volumétrico de 1000 mL para a proveta de 1000 mL, houve uma agitação com bastão de vidro. Posteriormente, durante a execução de cada ensaio de sedimentação, monitorou-se a altura (Z) da interface sólido-líquido (nas provetas graduadas), em função do tempo (t), obtendo-se o comportamento de Z , em função de t .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os testes em batelada que foram realizados, utilizando uma suspensão aquosa de carbonato de cálcio em diferentes concentrações e diâmetro de partícula, foi possível determinar duas regiões de sedimentação e com os dados obtidos foi possível distinguir claramente nos gráficos apresentados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, a região de sedimentação livre e região de transição.

FIGURA 4.1. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (Mesh = 325).

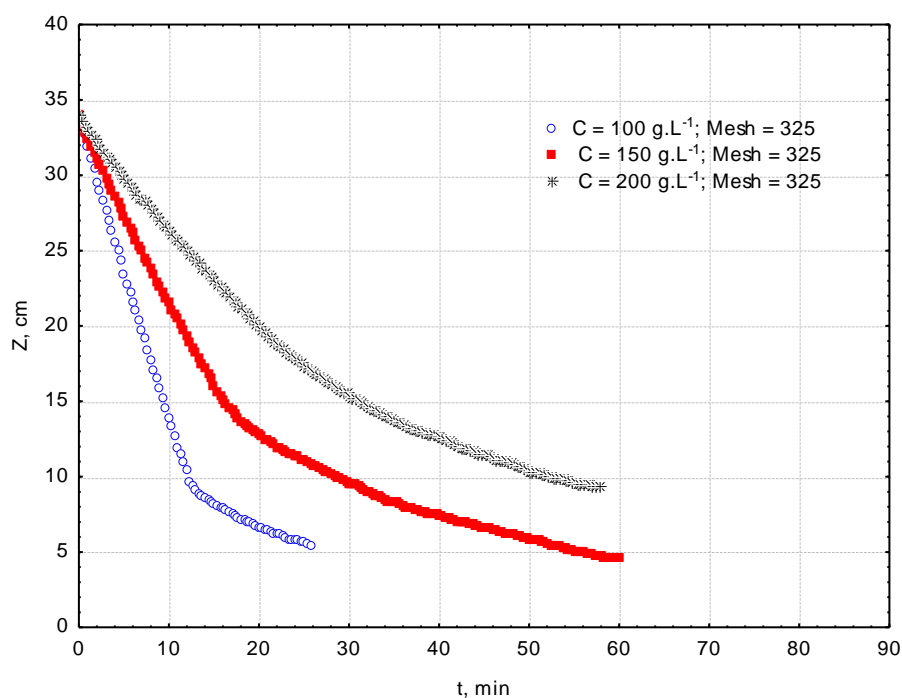


FIGURA 4.2. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (Mesh = 100).

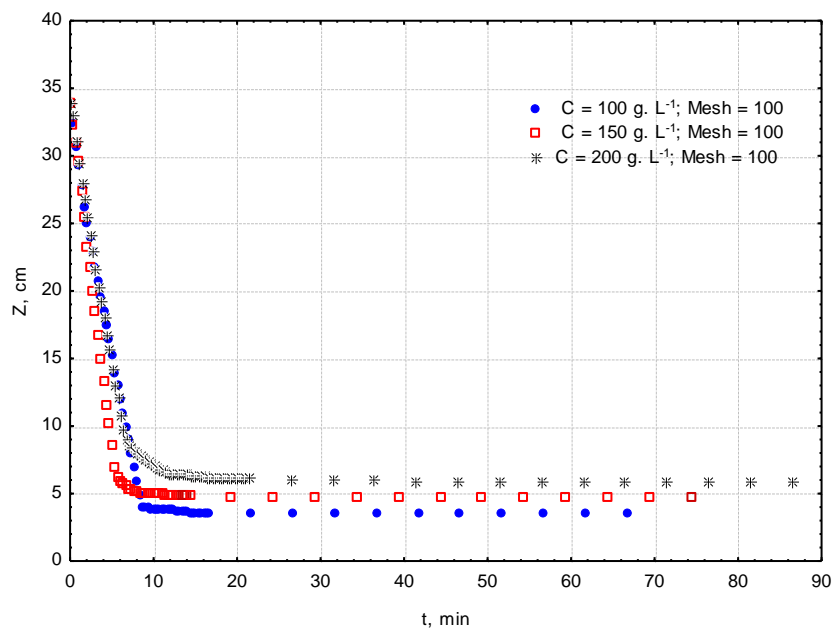
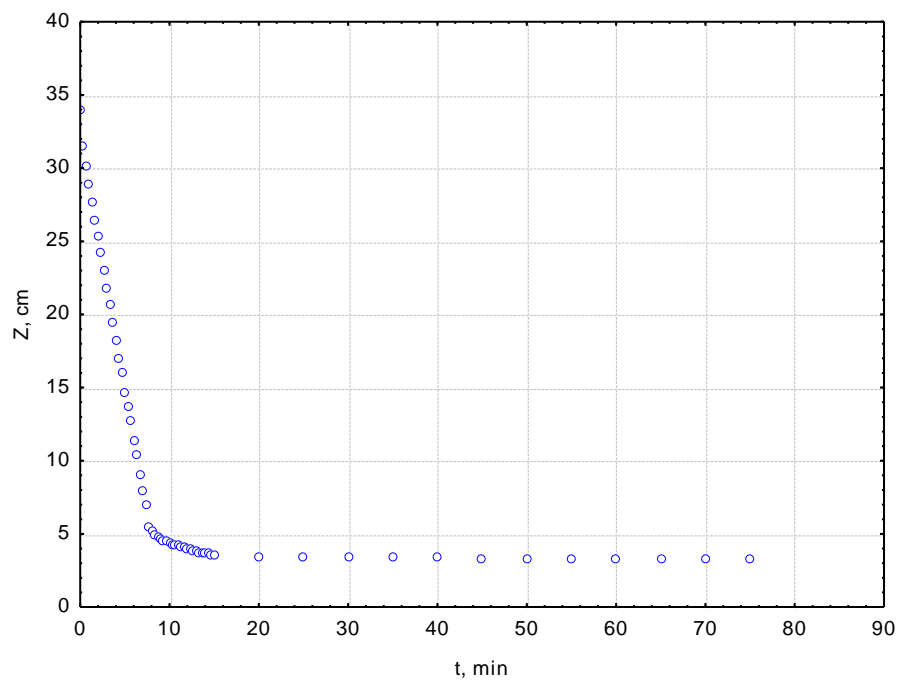
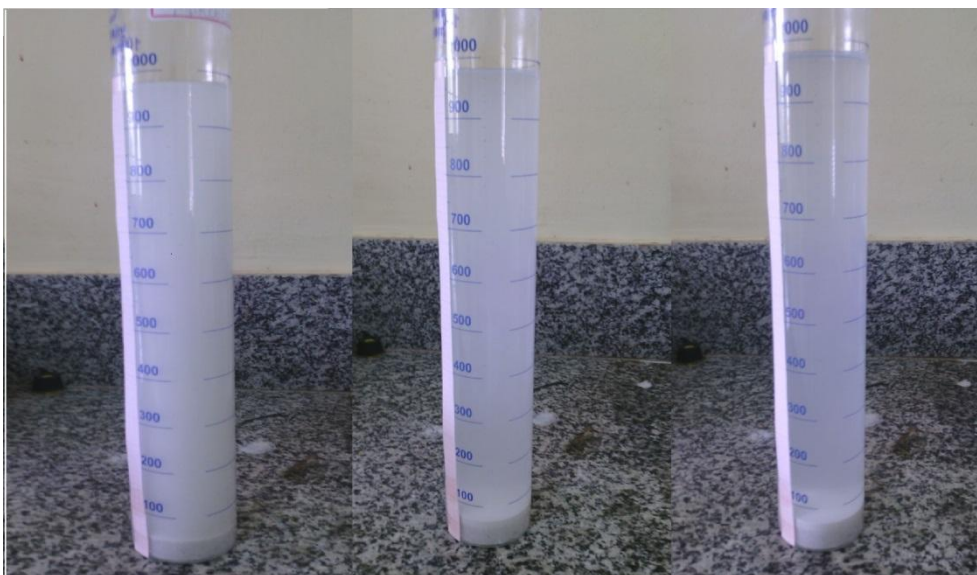


FIGURA 4.3. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (mistura das partículas de granulometria diferentes e com concentração de 100 g.L⁻¹).



A Figura 4.4 apresenta o monitoramento da curva de sedimentação com o diâmetro das partículas de carbonato de cálcio com abertura da peneira de mesh 40. Observou-se que neste ensaio após 10 minutos as partículas sedimentavam completamente, ficando difícil de realizar o monitoramento de da altura Z em função do tempo t. Desta forma, inviabilizando a construção da curva de sedimentação para determinação da área do sedimentador. Provavelmente, este fenômeno pode ser justificado pelo diâmetro da proveta que deve interferir. Segundo literatura os testes de bancada devem ser realizados em provetas de 2000 mL.

FIGURA 4.4. Monitoramento da curva de sedimentação da suspensão de carbonato de cálcio (Mesh = 40).



4.1 REGIÃO DE SEDIMENTAÇÃO LIVRE

Após a identificação da região de velocidade de sedimentação constante, região de sedimentação livre, pode-se fazer uma regressão linear com estes pontos para encontrar a velocidade, que será encontrada através do valor da inclinação da reta, na qual os sólidos se sedimentam nas diferentes concentrações e diâmetro da partícula como pode ser visto nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

FIGURA 4.5. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

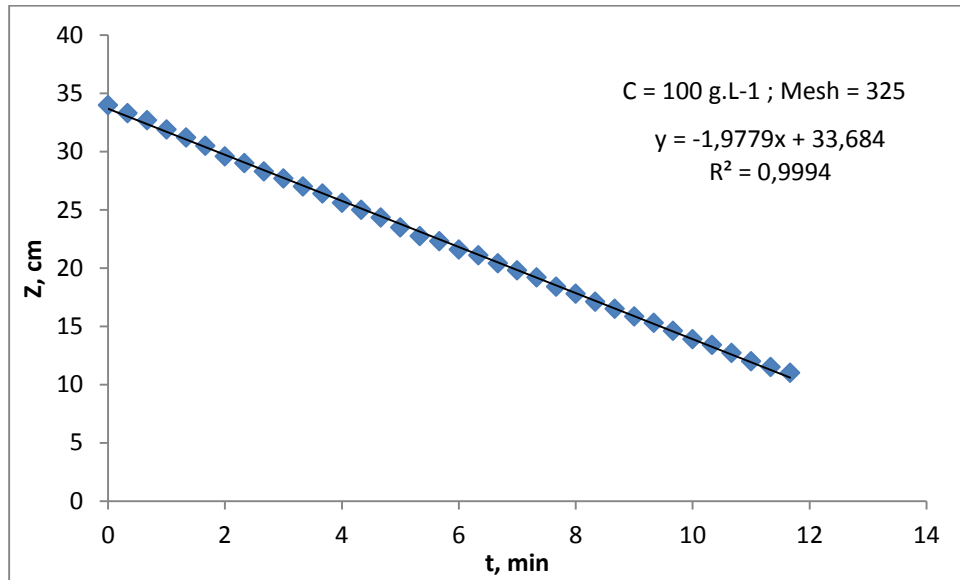


FIGURA 4.6. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).

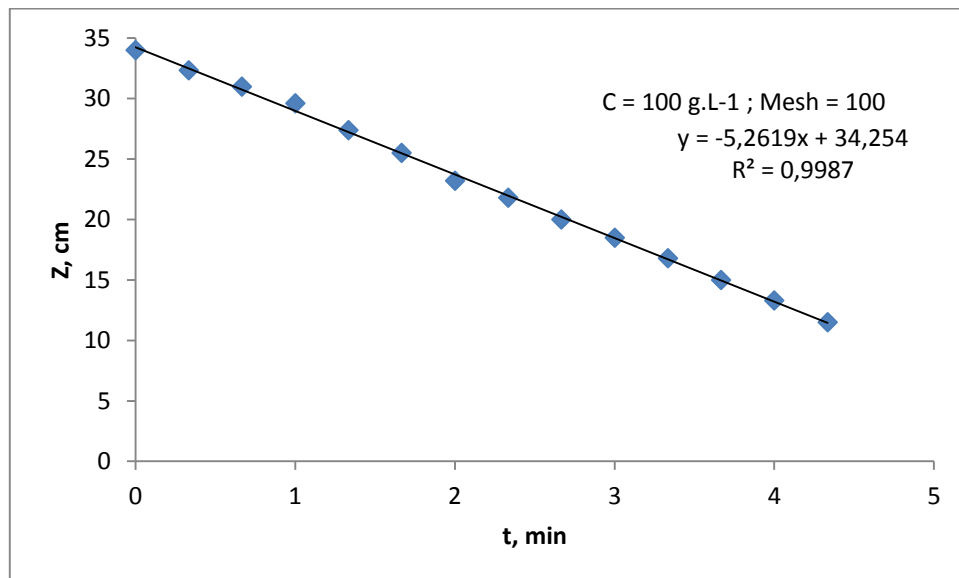


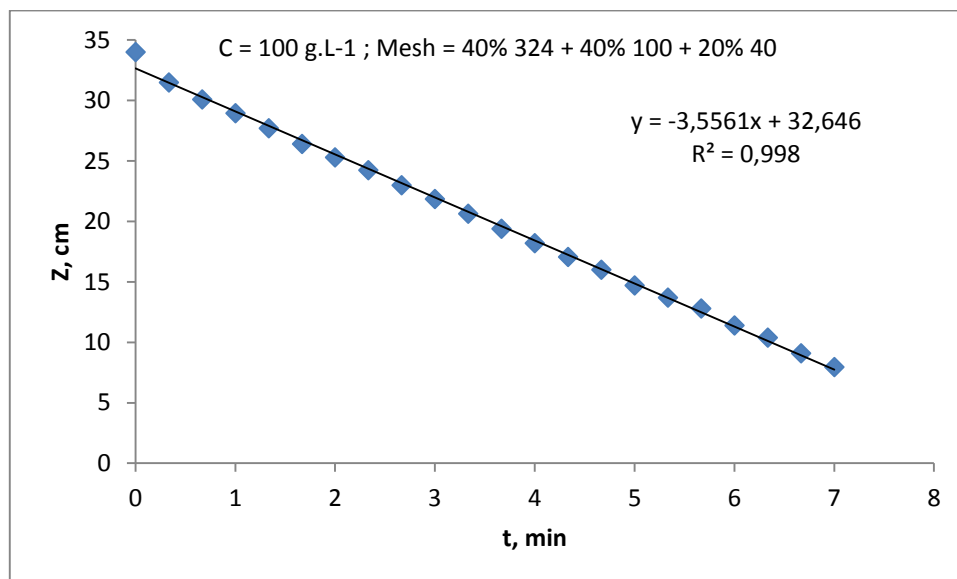
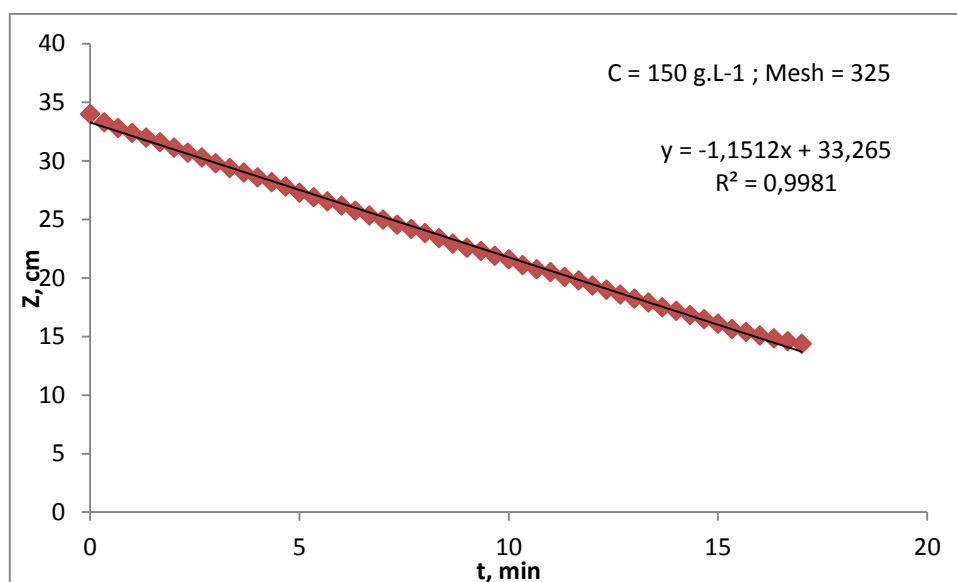
FIGURA 4.7. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mistura).FIGURA 4.8. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 150\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

FIGURA 4.9. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 150\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).

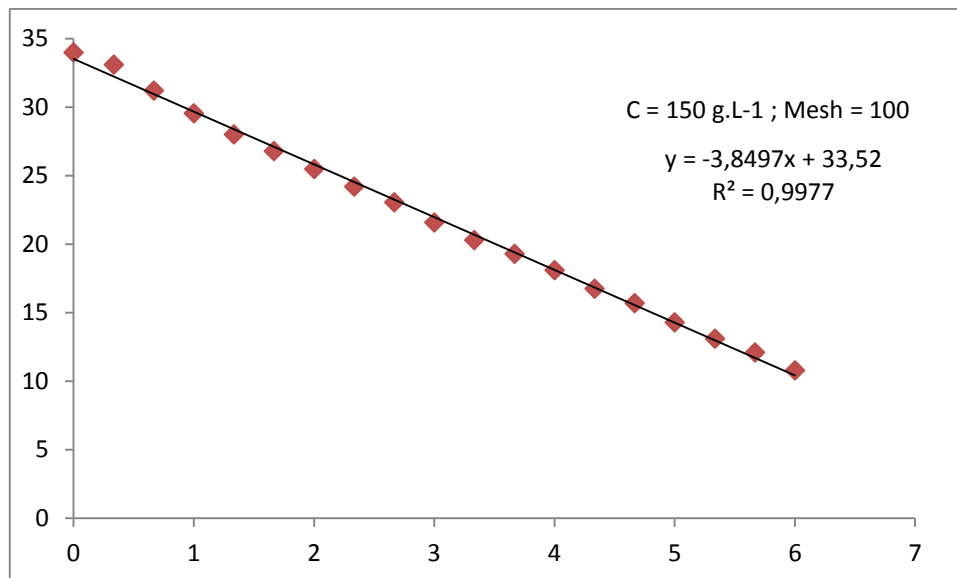


FIGURA 4.10. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 200\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

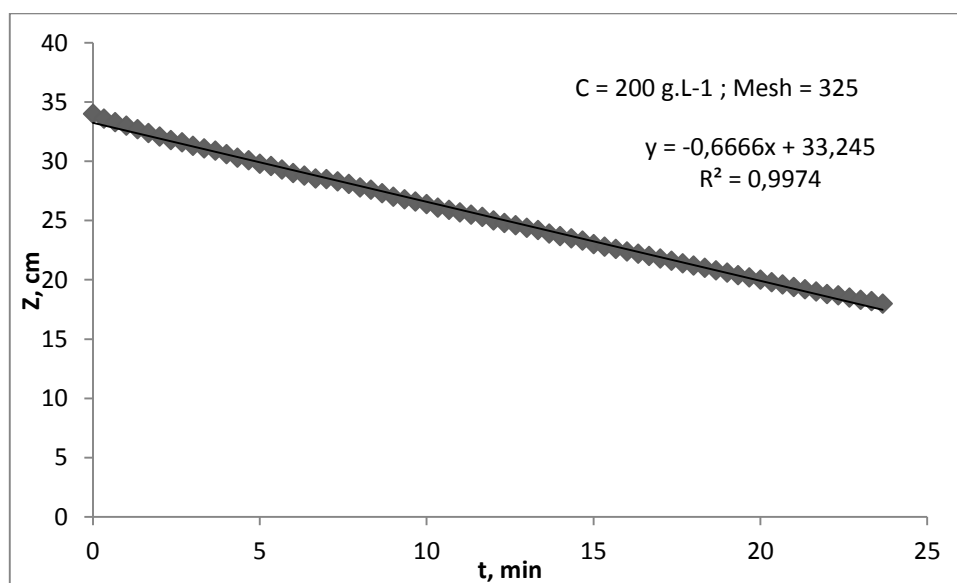
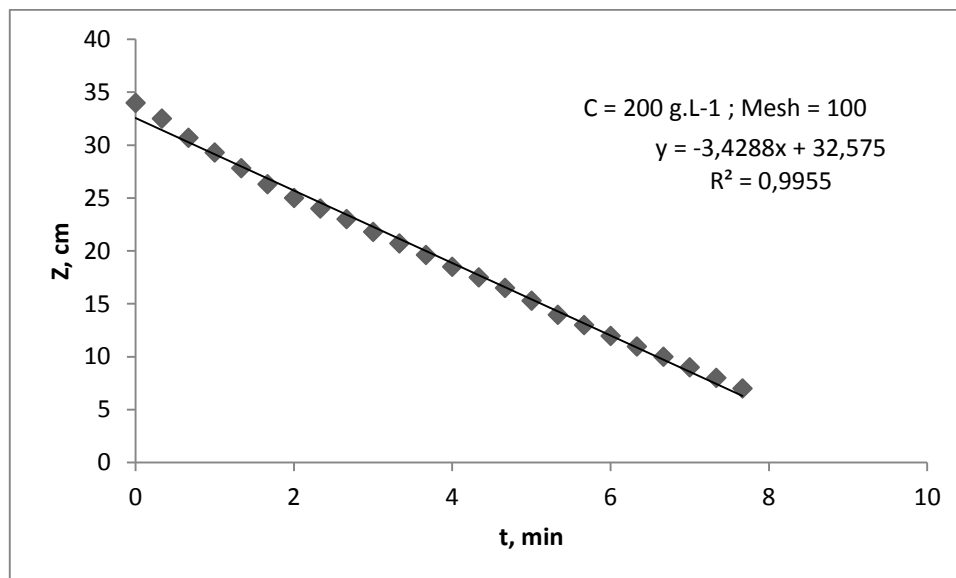


FIGURA 4.11. Ajuste da região de sedimentação livre ($C = 200 \text{ g.L}^{-1}$; mesh = 100).



Na tabela 4.1 encontram-se os resultados da velocidade na região de sedimentação livre, para cada concentração e granulometria, obtido a partir da inclinação da reta correspondente a parte inicial da curva de sedimentação onde as partículas sedimentam sem interferência uma das outras, a velocidade constante. Observa-se como esperado que a velocidade nos ensaios com tamanho de partículas maiores, ou mesh menor, apresentam valores mais elevados, variando entre 2 a 6 vezes o valor obtido pelo mesh maior. Também, verifica-se que para concentrações maiores a velocidade tende a diminuir. Vaz (2010) estudando Análise dos processos de floculação e sedimentação no tratamento de água encontrou resultados semelhantes corroborando com o comportamento previsto neste trabalho.

Tabela 4.1: Velocidade na região de sedimentação livre para cada concentração e mesh.

Mesh/C, g. L ⁻¹	Velocidade (cm.min ⁻¹)		
	325	100	Mistura
100	1,9779	5,2619	3,5561
150	1,1512	3,8497	
200	0,6666	3,4288	

4.2 REGIÃO DE TRANSIÇÃO

Na região de transição, a velocidade de sedimentação não se mantém constante, os pontos experimentais foram ajustados por uma equação de potência e os resultados obtidos se encontram nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18. Resultados semelhantes foram apresentados por Vaz (2010) estudando Análise dos processos de floculação e sedimentação no tratamento de água corroborando com o comportamento previsto neste trabalho. A velocidade pode ser determinada ponto a ponto a partir da derivada desta curva em cada ponto.

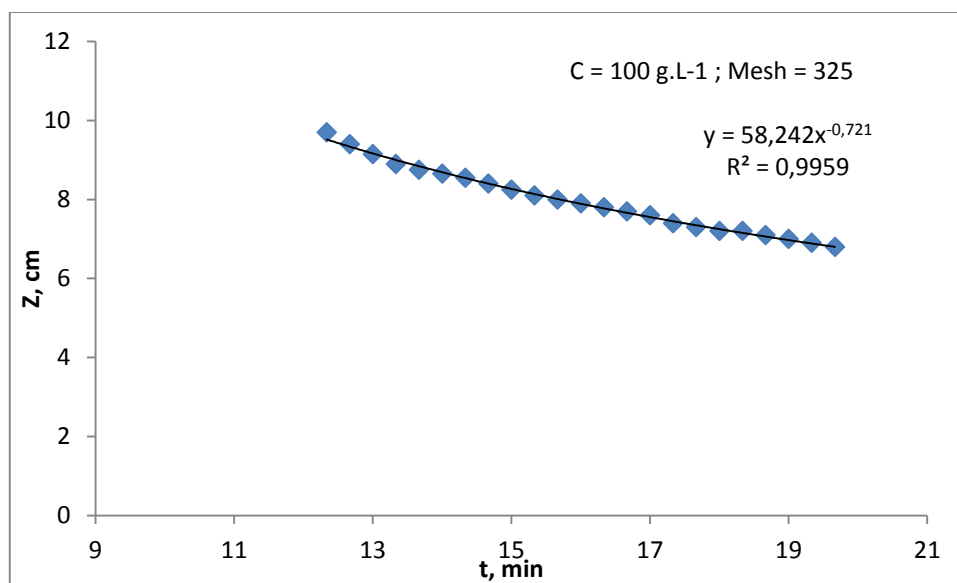
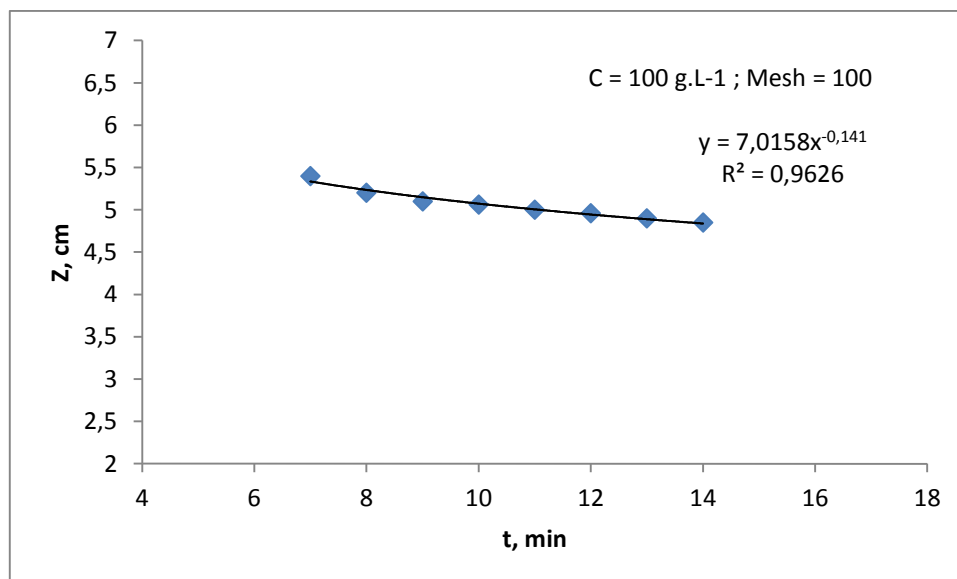
FIGURA 4.12. Ajuste para região de transição (C = 100g. L⁻¹; mesh = 325).FIGURA 4.13. Ajuste da região de transição (C = 100g. L⁻¹; mesh = 100).

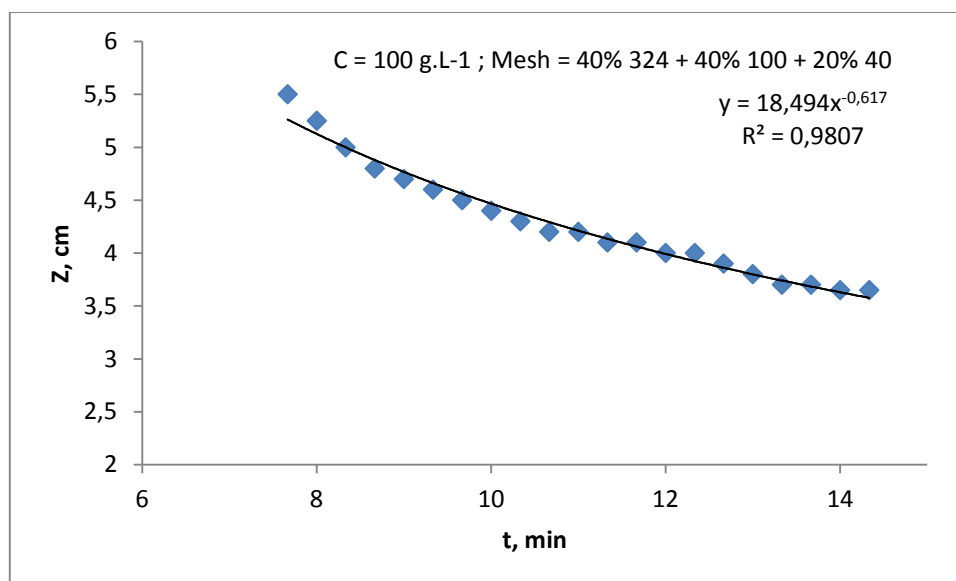
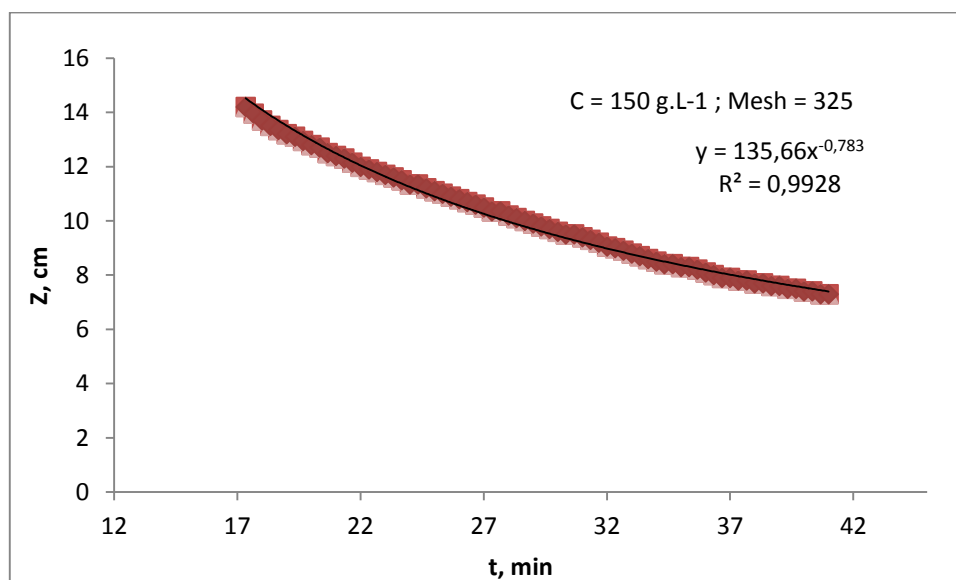
FIGURA 4.14. Ajuste para região de transição ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mistura).FIGURA 4.15. Ajuste para região de transição ($C = 150\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

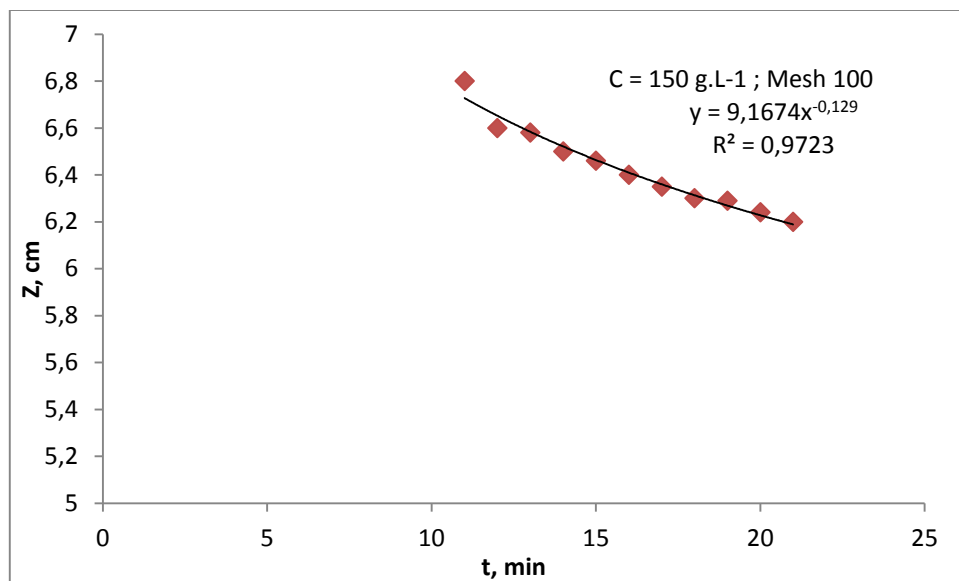
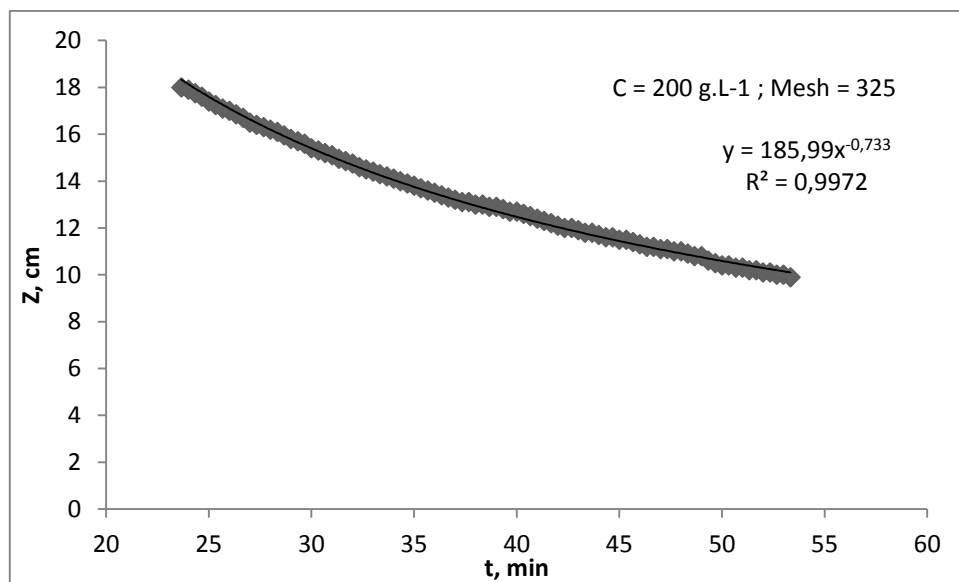
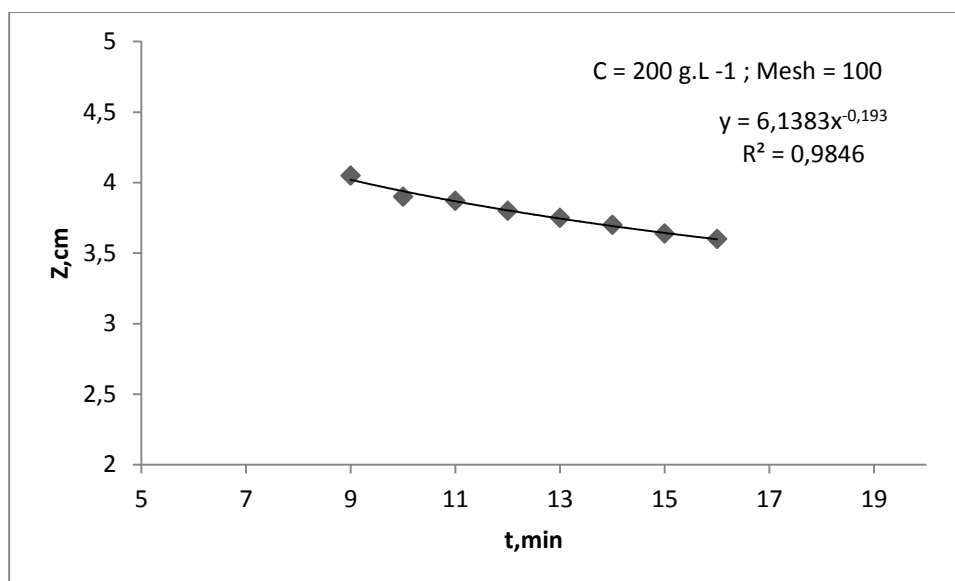
FIGURA 4.16. Ajuste para região de transição ($C = 150\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).FIGURA 4.17. Ajuste da região de transição ($C = 200\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

FIGURA 4.18. Ajuste da região de transição ($C = 200\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).

4.3 REGIÃO DE FORMAÇÃO DE SEDIMENTO

A região de formação de sedimento é onde a altura de sedimento atinge seu valor máximo, ou seja, mesmo com tempos longos esta se manterá constante. Nas Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 nota-se através de ajustes dos pontos, que a velocidade tende a zero, uma vez que os coeficientes angulares das equações é zero ou quase zero e altura máxima de sedimento é aproximadamente o valor do coeficiente linear.

FIGURA 4.19. Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

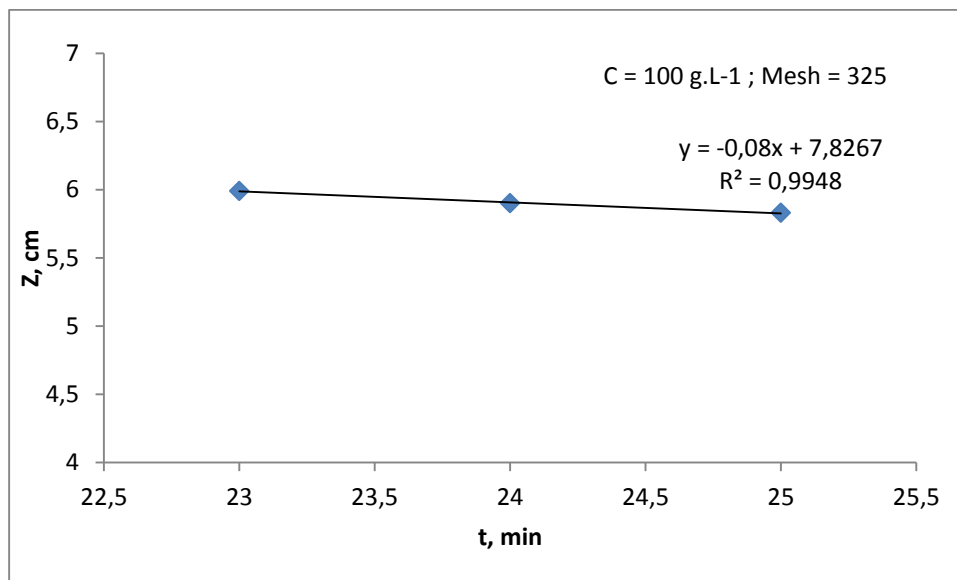


FIGURA 4.20. Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).

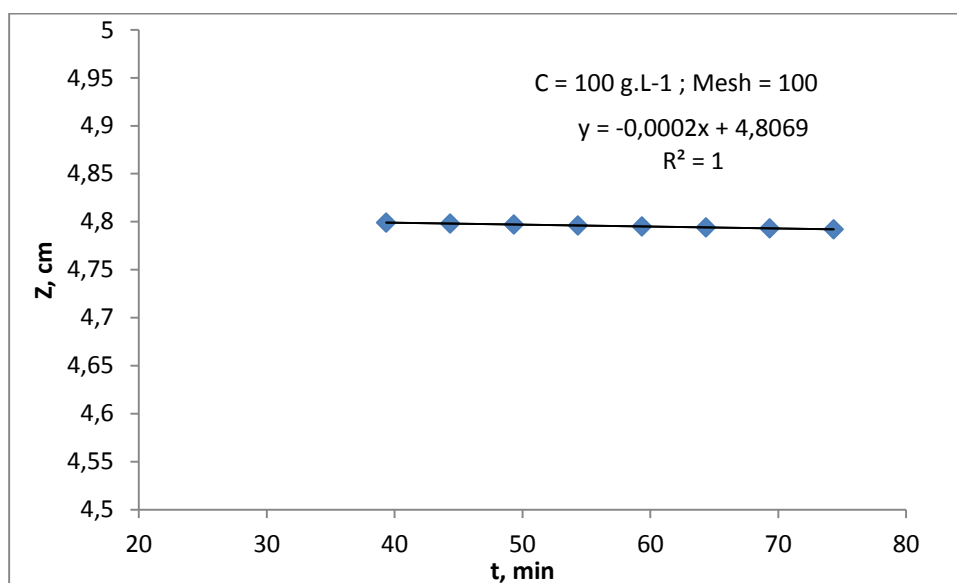


FIGURA 4.21. Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 100\text{g. L}^{-1}$; mistura).

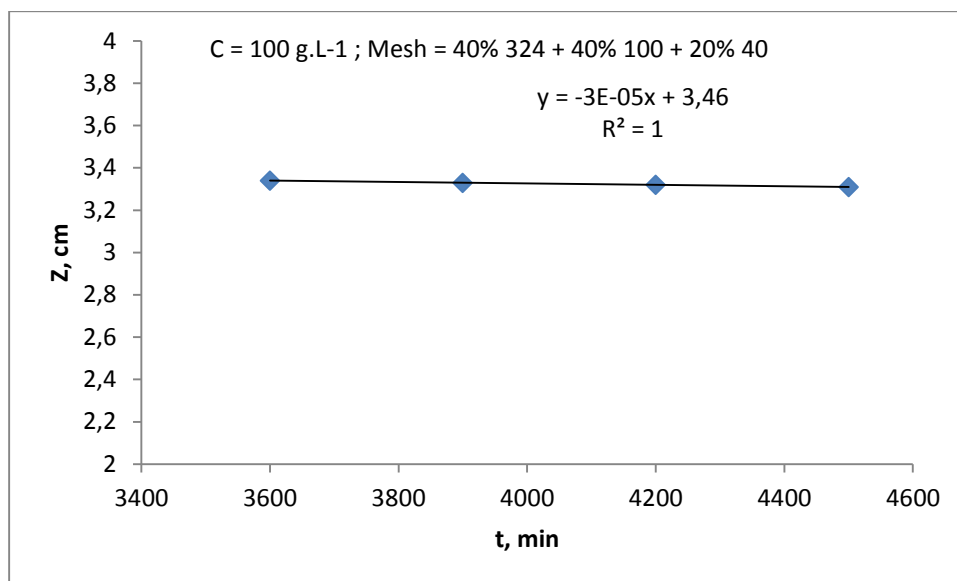


FIGURA 4.22. Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 150\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

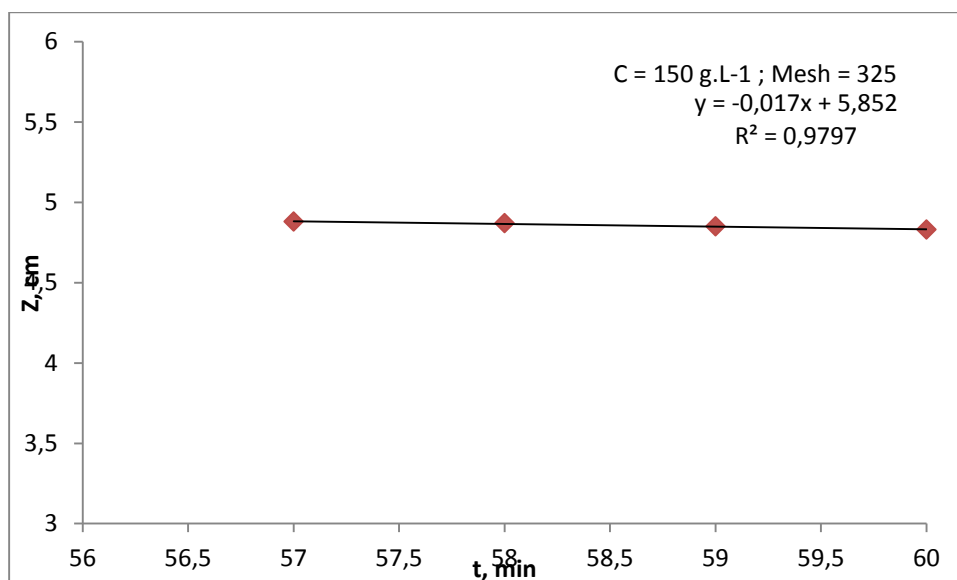


FIGURA 4.23. Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 150\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).

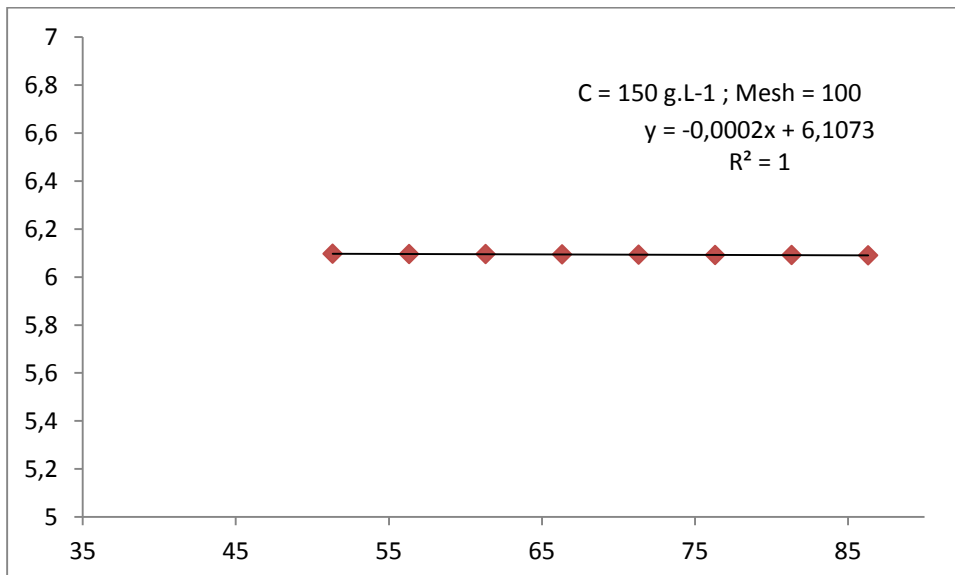


FIGURA 4.24 Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 200\text{g. L}^{-1}$; mesh = 325).

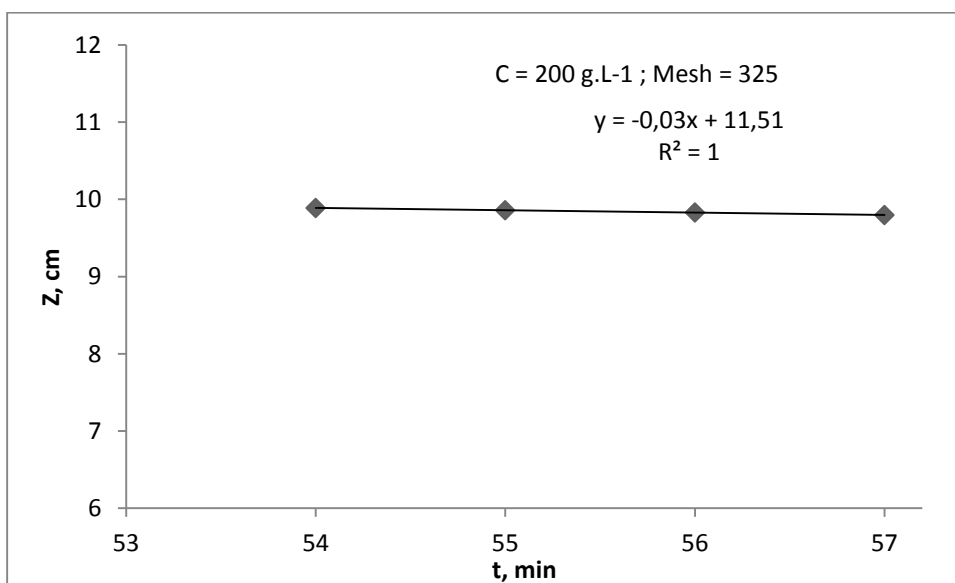
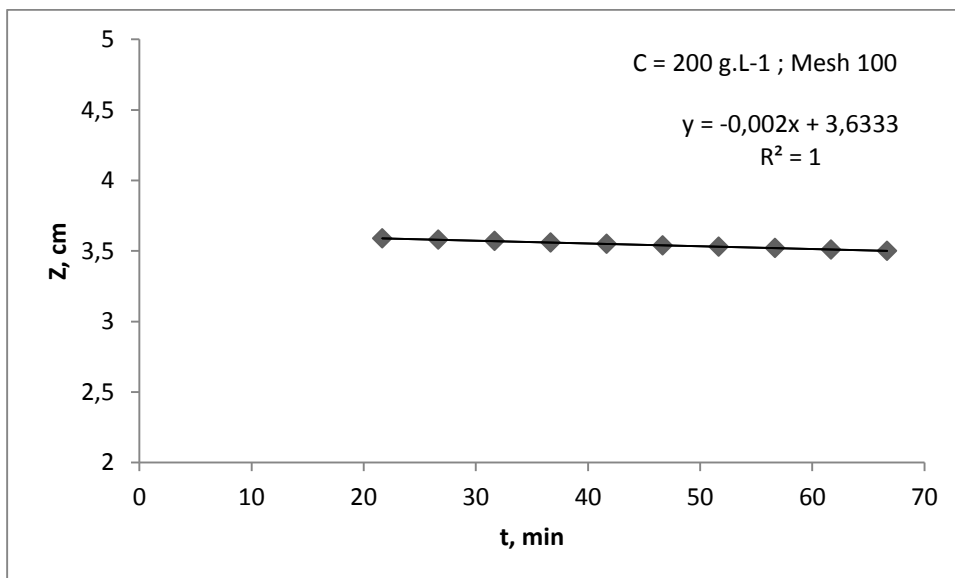


FIGURA 4.25. Ajuste para região de formação de sedimento ($C = 200\text{g. L}^{-1}$; mesh = 100).



A Tabela 4.2 apresenta os resultados da velocidade de sedimentação na região de espessamento observa-se que a mesma tende a zero haja vista a velocidade nesta fase ser muito baixa.

Tabela 4.2. Velocidade de decantação na região de formação do sedimento.

Mesh/C, g. L ⁻¹	Velocidade (cm.min ⁻¹)		
	325	100	Mistura
100	0,08	0,0002	3×10^{-05}
150	0,0017	0,0002	
200	0,03	0,002	

4.4 CÁLCULOS DO PROJETO DO SEDIMENTADOR

Para realização dos cálculos utilizou-se os métodos de Kynch simplificado (Biscaia Jr) e Talmadge e Fitch através dos dados obtidos nos ensaios de proveta com suspensões de concentrações de 100, 150 e 200 g.L⁻¹ em uma proveta de 1000 mL, tendo como objetivo calcular a área necessária para espessar a suspensão de carbonato de cálcio de acordo com as condições de entrada do sedimentador contínuo: vazão volumétrica (Q) igual a 2,63.10⁶ cm³. min⁻¹, esta consideração baseou-se no estudo realizado por Simões (2014). A concentração de espessamento (C_E) utilizada foi igual a 4,4 vezes a concentração inicial a do processo em batelada realizado em bancada de laboratório (C₀) de acordo com (FOUST. *et al*, 1982). A partir dos resultados obtidos foi possível efetuar um estudo comparativo entre os dois métodos com intuito de avaliar a discrepância entre os resultados.

4.4.1 Método de Kynch simplificado (Biscaia Jr)

De acordo com o método de Biscaia Jr. o valor de Z_{min} = 7,4 cm e considerando um comportamento exponencial da curva de sedimentação é possível determinar o valor de t_{min} para cada ensaio ajustando os dados experimentais pelas Equações

$$Z = Z_0 e^{-b*t} \quad (4.1)$$

$$Z_{min} = Z_0 \frac{C_0}{C_E} \quad (4.2)$$

$$t_{min} = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{Z_{min}}{Z_0}\right) \quad (4.3)$$

$$S = \frac{Q}{(Z_0/t_{min})} \quad (4.4)$$

Onde,

Z, é a variação da altura da interface entre o líquido clarificado e a região de concentração uniforme (cm);

b, parâmetro do modelo;

Z_{min}, altura mínima necessária para espessar a suspensão (cm);

Z₀, altura inicial da suspensão (34 cm);

S, área do sedimentador (m²).

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os resultados do parâmetro b e do coeficiente de determinação R^2 obtidos do ajuste exponencial realizado aos dados experimentais. Observa-se de maneira geral que o valor de R^2 é superior em média 90%, o que indica um bom comportamento dos dados do ensaio ao modelo utilizado. Por outro lado, verifica-se que o parâmetro b diminui em função da concentração da suspensão. Contudo, os valores de b para partículas de granulometria maiores são mais elevados. Este fato justifica-se pois partículas maiores sedimentam mais rapidamente.

Tabela 4.3. Parâmetros do ajuste do modelo exponencial ($Z_0 = 7,4$ cm; Mesh = 325).

C, g. L ⁻¹	b	R ²	t _{min} , min
100	0,08461	0,9801	18,0
150	0,0419	0,9604	36,4
200	0,0250	0,9801	60,9

Tabela 4.4. Parâmetros do ajuste do modelo exponencial ($Z_0 = 7,4$ cm; Mesh = 100).

C, g. L ⁻¹	b	R ²	t _{min} , min
100	0,2185	0,9025	4,87
150	0,1765		3,95
200	0,1428	0,7744	3,18

Na tabela 4.5 é apresentado os resultados obtidos para a mistura de partículas. Este experimento foi conduzido visto a impossibilidade de efetuar os ensaio para partículas de mesh 40. Observa-se que o modelo apresenta um indicativo de bom comportamento frente aos dados experimentais. O valor do parâmetro b estimado é aproximadamente a média dos valores obtidos para partículas de mesh 100. Este resultado corrobora com a discussão apresentada anteriormente.

Tabela 4.5. Parâmetros do ajuste do modelo exponencial ($Z_0 = 7,4$ cm; Mesh = 40% 325 + 40% 100 + 20% 40).

C, g. L ⁻¹	b	R ²	t _{min} , min
100	0,1802	0,9409	8,46

A partir dos resultados obtidos do ajuste da curva de sedimentação foi possível determinar a área do sedimentador pelo método de Biscaia Jr. Os valores do dimensionamento do sedimentador apresentados na Tabela 4.6 mostram que quanto maior a concentração e menor diâmetro das partículas, é necessário uma área mínima mais elevada para que seja possível efetuar o espessamento.

Tabela 4.6. Área do sedimentador utilizando o método de Biscaia Jr.

	Mesh	100 g.L ⁻¹	150 g.L ⁻¹	200 g.L ⁻¹
S(m ²)	325	137,65	278,35	467,71
S(m ²)	100	53,37	66,07	81,65
S(m ²)	Mistura	64,67		

4.4.2 Método de Talmadge e Fitch

As Figuras 4.1, 4.2, e 4.3 apresentam a curva de sedimentação em batelada, a partir desta realizou-se a determinação da área do sedimentador através do método de Talmadge e Fitch nas concentrações de 100, 150 e 200 g.L⁻¹ em uma proveta de 1000 mL. Os dados obtidos nos ensaios realizados fornecem os valores necessários para a construção do gráfico e também para construção das tangentes e bissetriz para a determinação do ponto crítico de acordo com o item 2.1.2.8. Após encontrar o ponto crítico foi possível encontrar o valor do tempo (t_e) necessário para espessar a suspensão da concentração final (C_e de projeto considerada). Os resultados encontrados estão resumidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Dimensionamento do sedimentador utilizando o método de Talmadge e Fitch.

Área	Mesh	Concentração		
		100 g.L ⁻¹	150 g.L ⁻¹	200 g.L ⁻¹
S(m ²)	325	135,3676	266,8676	344,2206
S(m ²)	100	40,9970	51,8264	58,0147
S(m ²)	Mistura	30,9412		

Vaz (2010) estudando a análise dos processos de floculação e sedimentação no tratamento de água observou o comportamento semelhante corroborando com os resultados previstos no presente trabalho. De uma maneira geral, podemos verificar que para partículas de mesh menores a determinação pelo método Biscaia Jr apresentam valores diferentes, este efeito pode ser provavelmente justificado que para partículas grandes o método não seja tão eficiente, ou sofra influencia maior quanto ao diâmetro da proveta. Pois a metodologia recomenda a realização de testes em proveta de 2000mL.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados nesse trabalho nos apresentam condições experimentais trabalhadas que:

- A utilização de dois ou mais métodos nos garante uma maior confiabilidade dos resultados obtidos no trabalho;
- A confiabilidade nos métodos se dar pelo fato de que os resultados obtidos através deles são semelhantes;
- Ao decorrer da sedimentação a velocidade tende a diminuir, o que foi comprovado nos ensaios, isso é melhor observado na fase de formação de sedimento;
- A concentração exerce influência sobre a fase de formação de sedimento, uma vez que o tempo mínimo para sua formação em uma mesma área é menor para concentrações maiores.
- Comparando os resultados apresentados nas Tabelas 4.6 e 4.7, observa-se que não houve semelhança entre os valores das capacidades (área) dos sedimentadores, produzidas pelos dois métodos utilizados, principalmente, para partículas menores (mesh de 325) independente da concentração da suspensão. Por outro lado, as partículas maiores (mesh 100) não houve boa reprodutibilidade em relação aos métodos utilizados, esta variação deve, principalmente, as partículas maiores sedimentarem mais rapidamente dificultando a obtenção com mais precisão dos dados experimentais para construção das curvas de sedimentação. Os resultados se mostraram consistentes, e demonstraram assertividade quando comparamos com as dimensões dos sedimentadores industriais.

6 CONCLUSÃO

Os métodos utilizados apresentam dificuldades quanto à determinação exata do ponto de compressão e, principalmente, no traçado da reta tangente a este ponto. Além, dos métodos serem influenciados de forma significativa na obtenção das curvas de sedimentação a partir do monitoramento dos dados de leitura da interface do líquido clarificado com a região de concentração uniforme. Porém, a simplicidade e rapidez na obtenção dos resultados experimentais e execução tornaram-se fatores predominantes no uso do método de Talmadge e Fitch e o método simplificado de Kynch (Biscaia Jr.).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, C. G. "Simulação da operação de sedimentos contínuos". Dissertação de Mestrado. FEQUI/UFU, Uberlândia, Brasil, 2009
- BUTZE, A. C.; LINDEMANN, C; SCHMIDT, V. W. Sedimentação. Relatório. Programa de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- COE, H. S. & CLEVENGER, G. H. "Methods of determining the Capacities of Slime – Settings Tanks". Am. Inst. Min. Engrs., v.55, p.356-384, 1916.
- CHAVES, H. A. F & DELLA FAVERA, J. C, 1996 – Cyclic Sedimentation in Early Permian Section of the Paraná Basin in Areas of Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul, Brazil, 30th International Geological Beijing China, 414 August 1996, **Abstracts** V. 2, p. 22, 1996. (Symposium in Quantitative Stratigraphy).
- CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos. São Paulo. Blucer, 2012.
- DAMASCENO, J. J. R. e MASSARANI, G. "Uma Análise do Método de Kynch para o Projeto de Sedimentadores". Anais do XVII Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, 283-290, 1990.
- DAMASCENO, J. J. R. & MASSARANI, G. Cálculo da Capacidade de Sedimentadores Através da Determinação da Permeabilidade do Sedimento. Anais do XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, p.233-242, Ouro Preto, Brasil, 1993.
- DI BERNARDO, L. Métodos e técnicas de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1993. V.1
- FRANÇA, S. C. A, Casqueira, R. G. "Ensaio de Sedimentação". Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, Parte VI – Desaguamento, cap. 23, pág. 393-408, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- FRANÇA, S. C. A, MASSARANI, G. Separação sólido-líquido. Comunicação Técnica elaborada para a 3ª Edição do Livro de Tratamento de Tratamento de Minérios, cap.14, p.571-609, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- FRANÇA, S. C. A. (2000), Equações Constitutivas para a Sedimentação de Suspensões Floculentas. Tese de Doutorado, PEQ/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 96 p.
- FRANÇA, S. C. A. Ensaio de sedimentação. Comunicação Técnica elaborada para o Livro de Tratamento de Tratamento de Minérios. cap.23 p.393, Rio de Janeiro, 2007.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A; MAUS, L; ANDERSEN, L. B. Princípios das Operações Unitárias.2.ed.[S.I.]: Editorial LTC,1982.

GOMIDE, R., 1980, "Operações Unitárias: separações mecânicas", Vol. 3, Edição do Autor, São Paulo, Brasil, 199 p.

HAZEM, A. On Sedimentation, Trans. Amer. Soc. Civ. Engrs, v.53, p 45-71, 1904.

KYNCH, G. J. A Theory of Sedimentation. Trans Faraday Society, v.48, p.166-177, London, 1952.

LIRA, J. R. Estudo dos Parâmetros que Influenciam a Flocculação na Sedimentação Contínua.

LUZ, A. H. S; MUFARREJ, M. P; SILVA, W. S. Separação sólido-líquido. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Pará, 2010.

MASSARANI, G., 1997. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Editora UFRJ, Rio de Janeiro - RJ, 192 p.

METCALF; EDDY, Inc. *Wastewater engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, 2ed. New York, McGraw-Hill, p 920, 1979.

MORAES JR., D. Separações sólido-líquido: moendas, centrífugas espessadores e filtros. São Carlos: Ed. UFSCAR, 1990. 182 p.

NUNES, J. F. Estudo da sedimentação gravitacional de suspensões floculentas. Programa de pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

PASSOTO, M. B; ARNOSTI. S; PASSOTO L, H. Tópicos em separação mecânica. Tecnologia Sucroalcooleira, São Carlos, 2011.

PINTO, T. C. S. Aplicação para técnicas clássicas para polpas não flocculadas de dimensionamento de espessadores aplicadas a suspensões de salmoura e lodo biológico. Dissertação (mestrado). Programa de Engenharia Mineral. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

PINTO, C. de S. *et al.* Dimensioning of thickeners: experimental validation of three conventional techniques. Rev. Esc. Minas. vol. 62 nº.2, Ouro Preto, Apr.\June, 2009.

RICHTER, C. A.; Netto J. M. A. Tratamento de água: tecnologia atualizada. São Paulo, Edgard Blucher, 1998, 332p.

ROBERTS, E. J. Thickening, art or science; Mining Engineering v.1; p.61 ,1949.

REIS, K. M. Dimensionamento de Espessadores. Dissertação (Especialização em Beneficiamento Mineral) Programa de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

RUIZ, M. I. (2000), "Estudo da Sedimentação em Batelada com o Auxílio da Técnica de Atenuação de Raios Gama". Dissertação de Mestrado, 14 páginas, PPG-EQ/UFU, Uberlândia, Minas Gerias, Brasil.

SILVA, T. A. Estudo Teórico-Experimental da Operação de Sedimentadores Divergentes. Dissertação de Mestrado, FEQ-UFU, Uberlândia, Brasil, 2004.

SIMÕES, V. N. Projeto de Sedimentador Continuo a Partir de Ensaio de Proveta: Estudo da Influência da Concentração da Suspensão de Carbonato de Cálcio e Dimensões da Proveta.

TALMAGE, W.P. & FITCH, E.B. Determing thickener unit areas. Ind. Engng. Chem., v.47 (1) p.38-41, 1955.

TILLER, F. M. , LEU, W. "Basic Data Fitting in Filtration", Chin. Inst. Chem. Engrs, 1, 61-70, 1980.

TORQUATO, N. C. e LUZ J. A. M. Espessadores no beneficiamento de minério de ferro. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 64(1), 091-096, jan/mar. 2011.

VAZ, L. M. O. Análise dos processos de floculação e sedimentação no tratamento de água. CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA. Monografia de graduação. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA, 2010.