



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

CARLOS MOURA PORTO

**IDENTIFICAÇÃO DOS REGIMES DE SEDIMENTAÇÃO - SUSPENSÃO DE
CARBONATO DE CÁLCIO: MISTURA DE PARTICULAS**

**Campina Grande
2015**

CARLOS MOURA PORTO

**IDENTIFICAÇÃO DOS REGIMES DE SEDIMENTAÇÃO - SUSPENSÃO DE
CARBONATO DE CÁLCIO: MISTURA DE PARTICULAS**

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: Dr. Marcello Maia de Almeida

**Campina Grande
2015**

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.

P853i Porto, Carlos Moura.
Identificação dos regimes de sedimentação - suspensão de carbonato de cálcio [manuscrito] : mistura de partículas / Carlos Moura Porto. - 2015.
48 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.
"Orientação: Prof. Dr. Marcello Maia de Almeida, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental".

1. Qualidade da água. 2. Granulometrias. 3. Sedimentação.
I. Título.

21. ed. CDD 628.162 2

CARLOS MOURA PORTO

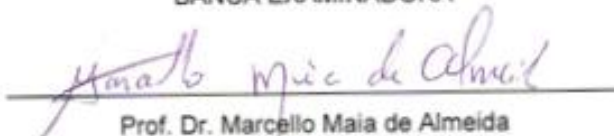
**IDENTIFICAÇÃO DOS REGIMES DE SEDIMENTAÇÃO - SUSPENSÃO DE
CARBONATO DE CÁLCIO: MISTURA DE PARTICULAS**

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.

Aprovado em: 10/12/2015

Nota: 8,7 (oit, sete)

BANCA EXAMINADORA


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


Profa. Dra. Vera Lucia Meira de Moraes Silva
(Examinadora – DESA/UEPB)


Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz
(Examinadora – DESA/UEPB)

Campina Grande-PB

2015

AGRADECIMENTOS

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

A toda minha família, pelos ensinamentos, ajudas e conselhos durante todo o trajeto deste curso, em especial, minha mãe, Luzia Porto e meu pai, Antônio Porto que sempre me ensinaram que através do trabalho duro é que conseguimos ir cada vez mais longe e alcançar nossos objetivos.

Aos meus avós que vivenciaram toda minha luta e dedicação.

As minhas tias Carmelita Porto e Maria Lurdes, bem como aos meus padrinhos Francisco Silva e Carmecita Porto, pelo apoio incondicional demonstrados por conselhos e auxílio financeiro.

Aos meus irmãos, Mauricio e Niara que sempre estiveram presente do meu lado para qualquer tipo de ajuda e reconhecimento.

A minha prima Luhana que me acolheu e me deu todo apoio possível na Paraíba.

Aos meus amigos que proporcionaram momentos de alegria, como também aconselhamentos nos momentos difíceis, em especial: Thiago, Aislan, Plínio, Luís Fernando, Rafael e Leonardo. Sou grato pela ajuda durante esse tempo de estudo na 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.

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

RESUMO

A água destinada ao consumo humano ou para fins higiênicos deve está isenta de partículas coloidais, substâncias húmicas (orgânica e inorgânicas) e microrganismos em geral. Tais impurezas podem ser removidas através da sedimentação, um processo de separação da fase sólida e líquida por meio de um sedimentador. O objetivo desse trabalho foi analisar o comportamento das misturas de diferentes granulometrias utilizando uma proveta volumétrica de 2000mL, bem como verificar o efeito que a concentração e da granulometria sobre a velocidade de sedimentação. Neste estudo utilizou-se suspensões de carbonato de cálcio com concentrações de 100, 150, 200 e 300 g.L⁻¹ com granulometrias (*Mesh*) de 40, 100, 325, em uma proveta de 2000 mL durante em médio de tempo de 60 minutos. Os resultados permitiram a construção de um gráfico no qual foram observadas as regiões de sedimentação livre, transição e constante. A partir do monitoramento das curvas de sedimentação, os resultados obtidos foram que estas regiões são influenciadas pela concentração da suspensão e o efeito da combinação de diferentes granulometrias. Portanto, quando se aumenta a concentração da mistura, a velocidade de sedimentação tende a diminuir devido a um empacotamento das partículas.

PALAVRAS-CHAVE: mistura, granulometria, carbonato de cálcio, velocidade.

ABSTRACT

Water intended for human consumption or for hygienic purposes should be exempt from colloidal particles, humic (organic and inorganic) substances and microorganisms in general. Such impurities may be removed through the sedimentation, a process of separating the solid and liquid phase by means of a settler. The objective of this study was to analyze the behavior of mixtures of different grain sizes using a volumetric cylinder 2000 ml as well as the effect that the concentration and particle size on the sedimentation rate. In this study we used the calcium carbonate slurry with concentrations of 100, 150, 200 and g.L^{-1} 300 with particle size (*Mesh*) 40, 100, 325 in a beaker of 2000 mL over a medium time of 60 minutes. The results allowed the construction of a graph in which were subject to the free settling regions, transition and steady. From the monitoring of the sedimentation curve, the results were that these regions are influenced by the concentration of the suspension and the effect of the combination of different particle sizes. Therefore, when increasing the concentration of the mixture, the sedimentation rate tends to decrease due to a particle packaging.

KEYWORDS: mixing, grading, calcium carbonate, speed.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	3
2.1.1	Objetivo geral.....	3
2.1.2	Objetivo específico.....	3
3	REVISÃO	4
	BIBLIOGRÁFICA	
3.1	QUALIDADE DA AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	4
3.2	SEDIMENTAÇÃO.....	5
3.2.1	Tipos de sedimentação.....	8
3.2.2	Características dos tanques de sedimentação	10
3.2.3	Fatores que afetam a velocidade de sedimentação	11
3.3	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE UM SEDIMENTADOR.....	12
3.4	ESTADO DA ARTE.....	14
4	MATERIAIS E MÈTODOS	18
4.1	Matéria – prima.....	18
4.2	Equipamento e Vidrarias.....	19
4.3	Ensaio de Sedimentação em Proveta.....	19
4.4	Preparação da amostra.....	19
4.5	Monitoramento da curva de sedimentação.....	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1	OBTENÇÃO DA CURVA DE SEDIMENTAÇÃO	22
5.1.1	Regiões de sedimentação.....	23
5.1.1.1	Região de sedimentação livre.....	25
5.1.1.2	Região de transição.....	28
5.1.1.3	Região de formação de sedimento.....	31
6	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Caracterização físico-química do carbonato de cálcio	18
Tabela 2	Concentração da amostra	19
Tabela 3	Velocidade na região de sedimentação livre para cada concentração e Mesh diferentes	28
Tabela 4	Velocidade de região de formação do sedimento para concentrações e Mesh diferentes	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Forças atuantes em uma partícula sólida durante a sedimentação	5
Figura 2	Curva de sedimentação. A: Etapas no teste de sedimentação em bancada; B: Curva de sedimentação típica	7
Figura 3	Classificação da água sobrenadante do teste de sedimentação. A: Ótima (100 NTU); B: Boa (600 NTU); C: Ruim (1500 NTU); D: Péssima (400.000 NTU)	8
Figura 4	Relações entre os tipos de sedimentações e concentrações de sólidos	9
Figura 5	Sedimentador periférico com braço raspador	11
Figura 6	Curva da altura versus o tempo	13
Figura.7	Determinação das variáveis de projeto pelo método de Kynch simplificado. (Simplificação do método de Biscaia Jr.)	13
Figura 8	Processo de sedimentação em proveta: Teste preliminar A até E (suspensões de carbonato de cálcio concentração 100 g.L ⁻¹).....	21
Figura 9	Curvas de sedimentação da suspensão do carbonato de cálcio em diferentes concentrações	22
Figura 10	Curva de sedimentação na C=100 g.L ⁻¹ ; Mesh=40% 324 + 40% 100 + 20% 40	23
Figura 11	Curva de sedimentação na C=150 g.L ⁻¹ ; Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40.....	24
Figura 12	Curva de sedimentação na C=200 g.L ⁻¹ ; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40	24
Figura 13	Curva de sedimentação na C=300 g.L ⁻¹ ; Mesh=120% 324 + 120% 100 + 60% 40	25
Figura 14	Região de sedimentação livre na C=100 g.L ⁻¹ ; Mesh=40% 324 + 40% 100 + 20% 40	26
Figura 15	Região de sedimentação livre na C=150 g.L ⁻¹ ;	26

	Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40	
Figura 16	Região de sedimentação livre na $C=200 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40	27
Figura 17	Região de sedimentação livre na $C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120% 324 + 120% 100 + 60% 40	27
Figura 18	Região de transição na $C=100 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=40% 324 + 40% 100 + 20% 40	29
Figura 19	Região de transição na $C=150 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40	29
Figura 20	Região de transição na $C=200 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40.....	30
Figura 21	Região de transição na $C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120%324+120%100+60%40.....	30
Figura 22	Ajuste para região de formação de sedimento. ($C=100 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=40%324+40%100+20%40)	31
Figura 23	Ajuste para região de formação de sedimento. ($C=150$ g.L^{-1} ; Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40)	31
Figura 24	Ajuste para região de formação de sedimento. ($C=200$ g.L^{-1} ; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40)	32
Figura 25	Ajuste para região de formação de sedimento.($C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120%324+120%100+60%40)	32

1.INTRODUÇÃO

Segundo a Declaração Universal dos Direitos da Água, o direito à água é um dos direitos fundamentais do ser humano: o direito à vida, tal qual é estipulado no artigo 30 da Declaração Universal dos Direitos do Homem. Desta forma, a água destinada ao consumo humano deve preencher condições mínimas para que possa ser ingerida ou utilizada para fins higiênicos, tais como estar isenta de microrganismos patogênicos e, com relação às substâncias orgânicas ou inorgânicas, os teores das mesmas não deverão ser prejudiciais ao ser humano (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2000).

Uma variedade de impurezas pode estar contida na água, destacando-se as partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos em geral. Tais impurezas apresentam carga superficial negativa, impedindo que as mesmas aproximem-se uma das outras, permanecendo no meio se suas características não forem alteradas. Para que as impurezas possam ser removidas, é preciso alterar-se algumas características da água e, conseqüentemente, das impurezas, através da coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração (DI BERNARDO, 1993).

O abastecimento público de água em termos de quantidade e qualidade é uma preocupação crescente da humanidade, em função da escassez do recurso água e da deterioração da qualidade dos mananciais. Antes de ser encaminhada para a rede de distribuição, a água é submetida a várias etapas de tratamento, como a coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração, que viabilizem o seu consumo (DI BERNARDO; PECCI FILHO, 1998).

A sedimentação é um processo bastante utilizado no pré-tratamento de águas de abastecimento. É um dos processos mais amplamente utilizados na separação das fases sólida e líquida, na qual ocorre em um equipamento denominado sedimentador. Tais equipamentos são muito utilizados em indústrias químicas, de tratamento de água e efluentes, em indústrias de beneficiamento de minério, seja para o descarte ou para o aproveitamento do sólido (SILVA, 2004), motivo que desperta o crescente interesse no desenvolvimento de estudos cada vez mais elaborados sobre o assunto.

A maneira mais simples e eficiente para o estudo das condições operacionais de sedimentadores em escala laboratorial consiste basicamente em testes de

sedimentação em batelada em suspensões com concentrações iniciais previamente estabelecidas (AROUCA, 2007).

Assim, o modelo matemático para o fenômeno da sedimentação contínua, baseado no modelo matemático para a sedimentação em batelada proposto por (AROUCA 2007). Tal modelo resulta da combinação dos conceitos fenomenológicos de (D'ÁVILA 1978) com os conceitos matemáticos utilizados por (BURGER; CONCHA 1998) para a resolução do problema da sedimentação.

2OBJETIVO

2.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho da sedimentação do carbonato de cálcio em diferentes concentrações e granulometrias realizadas em batelada a partir do teste em proveta.

2.1.2Objetivos Específicos

- Monitoramentodas curvas de sedimentaçãode suspensão do carbonato de cálcio.
- Verificar o efeito que a concentração e a granulometria possui sobre a velocidade de sedimentação do carbonato de cálcio.
- Identificação dos regimes de sedimentação.

3REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

A água pode veicular um elevado número de enfermidades e essa transmissão pode se dar por diferentes mecanismos. O mecanismo de transmissão de doenças mais comumente lembrado e diretamente relacionado à qualidade da água é o da ingestão, por meio do qual um indivíduo sadio ingere água que contenha componente nocivo à saúde e a presença desse componente no organismo humano provoca o aparecimento de doenças (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006).

A água sofre alterações em sua qualidade e quantidade nas condições naturais, em razão das inter-relações dos componentes do sistema de meio ambiente, quando os recursos hídricos são influenciados devido ao uso para suprimento das demandas dos núcleos urbanos, das indústrias, da agricultura e das alterações do solo. Os recursos hídricos têm capacidade de diluir e assimilar esgotos e resíduos, mediante processos físicos, químicos e biológicos, que proporcionam a sua autodepuração, influenciando seu aspecto qualitativo. Entretanto, essa capacidade é limitada em face da quantidade e qualidade de recursos hídricos existentes (SETTI et al., 2001).

Com o crescimento populacional, aumentou a necessidade de água para abastecimento, agricultura de maior escala para alimentar a crescente população, criação de mais indústrias que consomem mais água, sendo que haverá sempre situações em que serão necessárias tecnologias simples e de baixo custo para o tratamento de esgotos, incluindo a utilização do efluente (BASTOS, 2003).

A reutilização ou o reuso de água ou o uso de águas residuárias não é um conceito novo e tem sido praticado em todo o mundo há muitos anos. No entanto, a demanda crescente por água tem feito do reuso planejado da água um tema atual e de grande importância. Ao liberar as fontes de água de boa qualidade para abastecimento público e outros usos prioritários, o uso de esgotos contribui para a conservação dos recursos e acrescenta uma dimensão econômica ao planejamento dos recursos hídricos. O reuso reduz a demanda sobre os mananciais de água devido à substituição da água potável por uma água de qualidade inferior. Essa prática, atualmente muito discutida, posta em evidência e já utilizada em alguns

países é baseada no conceito de substituição de mananciais. Tal substituição é possível em função da qualidade requerida para um uso específico (CETESB, 2010).

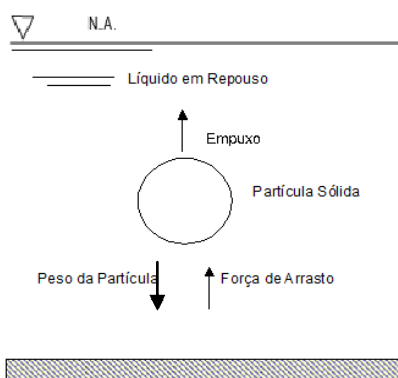
O Brasil oferece condições excepcionalmente favoráveis para a utilização de esgotos, tanto pela disponibilidade de áreas em sua grande extensão territorial como pelas condições climáticas adequadas (BASTOS, 2003). Historicamente, as unidades de sedimentação consagram-se como sendo uma maneira relativamente simples e eficiente de se promover o pré-tratamento de grande parte das águas superficiais destinadas ao abastecimento. Entretanto, a existência de várias situações adversas ao emprego da sedimentação, vem estimulando a busca por outras tecnologias capazes de responder com maior eficácia às tais dificuldades como, por exemplo a flotação (DI BERNARDO e PECCI FILHO, 1998).

3.2 SEDIMENTAÇÃO

A sedimentação é uma operação de separação sólido-líquido que se baseia na diferença entre concentrações das fases da suspensão a ser processada, sujeitas a um campo gravitacional (CREMASCO, 2012). Esta operação é realizada em um equipamento chamado sedimentador. O principal objetivo da sedimentação é produzir um efluente clarificado (von SPERLING, 1996). Durante esta operação, a partícula sólida em suspensão sofre ação das forças: gravidade, empuxo e resistência ao movimento (BENVINDO et al., 2002).

A teoria da sedimentação baseia-se no fato de que qualquer partícula não coloidal, suspensa em um meio líquido em repouso de menor massa específica, será acelerada pela ação da gravidade até que as forças de resistência viscosa e de deformação do líquido sejam iguais à resultante do peso efetivo da partícula, conforme figura 1. A partir desse momento, a velocidade descendente será constante e é denominada de velocidade de sedimentação (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Figura 1. Forças atuantes em uma partícula sólida durante a sedimentação. Fonte: Di Bernardoe Dantas(2005).



Logo, a velocidade de sedimentação depende das dimensões (e forma) das partículas e sua massa específica. Vários fatores podem atuar na velocidade de sedimentação como, por exemplo, o tipo de coagulante empregado, com as condições de floculação e com a natureza do material em suspensão presente na água bruta (OLIVEIRA, 2005).

Para buscar uma esfericidade maior e um diâmetro maior das partículas presentes na suspensão, características que influenciam a sedimentação, promove-se a aglomeração da fase particulada por meio da técnica da coagulação ou floculação (MCCABE, 2005).

No tratamento de água completo, os flocos obtidos apresentam grandes variações de tamanho, forma e massa específica, dependendo principalmente, do tipo de coagulante, auxiliar de floculação, qualidade da água bruta, características da coagulação e da floculação (DI BERNADO, 1993).

O estudo da sedimentação no âmbito científico iniciou-se no início do século XX, com Mishler, que calculava a área da seção transversal de um sedimentador, utilizando a suposição de igualdade entre as velocidades de sedimentação e líquido ascendente (FRANÇA e CASQUEIRA, 2007).

Um dos estudos pioneiros em processo de separação sólido-líquido que aborda o fenômeno da sedimentação em batelada foi apresentado por Coe e Clevenger (1916), que objetivaram explicar melhor o mecanismo do processo (AROUCA, 2007). A partir de testes de sedimentação em batelada, os autores propuseram uma expressão para calcular a capacidade de sedimentadores contínuos, representada pela equação (1):

$$q_s = \frac{v_{so}}{\frac{1}{\varepsilon_{so}} - \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \quad (1)$$

Onde, v_{so} é a velocidade inicial de sedimentação em um ensaio de sedimentação em batelada, ε_{so} é a concentração inicial no ensaio e ε_{su} é a concentração da lama.

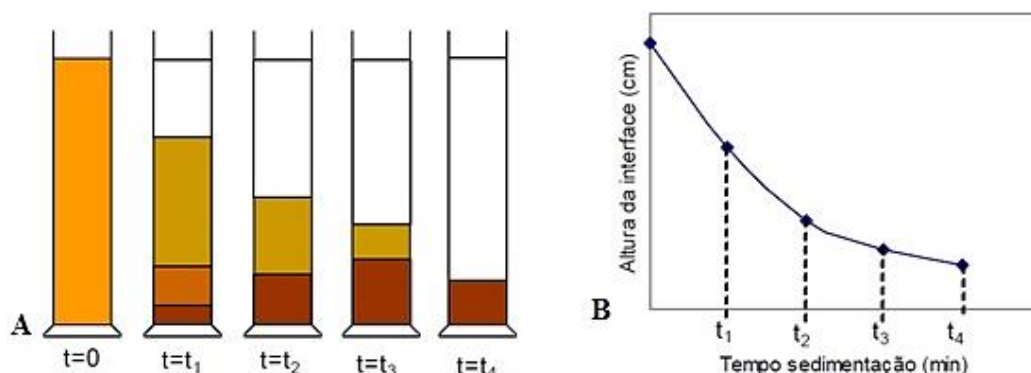
Os resultados foram obtidos em diversos ensaios de sedimentação em proveta para concentrações que compreendiam uma faixa que variava da concentração de alimentação à retirada da lama (Figura 2ª).

Segundo Chaves (2004), se uma amostra previamente homogeneizada da suspensão for colocada em um tubo de vidro graduada de seção constante e

deixada em repouso verifica-se que, após certo tempo, as partículas mais grossas depositam no fundo do tubo e as partículas mais finas continuam em suspensão. As partículas intermediárias ficam distribuídas em diversas alturas de acordo com sua granulometria (Figura 2B).

As partículas sólidas que caracterizam um determinado efluente líquido, dividem-se basicamente em dois tipos: os materiais decantáveis – que sedimentam livremente com velocidade de queda constante e diretamente proporcional ao seu peso específico; e as partículas floculadas; produto da coagulação do material coloidal e sólidos suspensos formados naturalmente ou mediante a adição de produtos químicos (CLAAS; MAIA, 2004).

Figura 2 Curva de sedimentação. A: Etapas no teste de sedimentação em bancada; B: Curva de sedimentação típica. (TORQUATO, 2008).

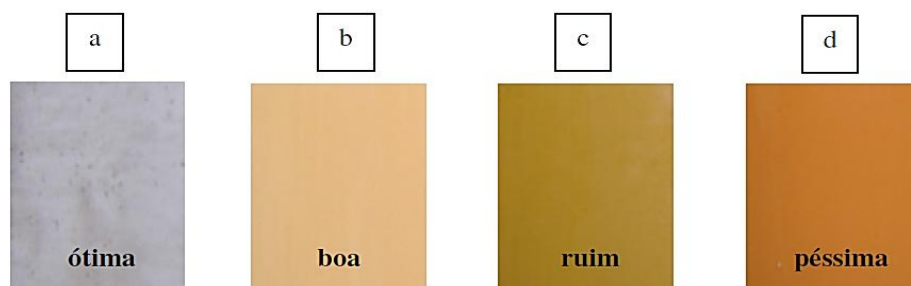


De acordo com Torquato (2008), de um modo geral, o ensaio de sedimentação em bancada é realizado para atender os seguintes objetivos:

- Avaliar a clarificação da água em diferentes condições de ensaio (pH, tipo de polímero, % de sólidos, etc.);
- Avaliar condições diversas de coagulação e floculação de uma polpa;
- Desenvolver e/ou comparar diferentes tipos de polímeros;
- Efetuar o dimensionamento de espessadores.

No teste de sedimentação, após um período de estabilidade da interface em torno de uma cota de altura da proveta, é possível classificar a água sobrenadante com relação à clarificação (BRAGANÇA, 2008), conforme a figura 3.

Figura 3. Classificação da água sobrenadante do teste de sedimentação. A: Ótima (100 NTU); B: Boa (600 NTU); C: Ruim (1500 NTU); D: Péssima (400.000 NTU). (BRAGANÇA, 2008).



NTU-Unidade de medição de turbidez que indica a intensidade da luz espalhada em um ângulo de 90° da luz incidente.

3.2.1 Tipos de sedimentação

A classificação quanto ao tipo de sedimentação se baseia na natureza dos sólidos suspensos e na concentração com que os sólidos se encontram na suspensão (JORDÃO; PESSÔA, 1995). De acordo com Metcalf e Eddy (1991), quatro tipos de sedimentação podem ocorrer:

- Sedimentação de partículas discretas: as partículas que vão se depositando no fundo do tanque mantêm sua individualidade, ou seja, não se submetem a um processo de aglutinação com outras partículas. A deposição de partículas de areia nos desarenadores é um exemplo típico de sedimentação discreta (von SPERLING, 1996).
- Sedimentação de partículas floculentas: Segundo Valencia (1992), as partículas floculentas são aquelas que se aglomeram durante a sedimentação, com consequente aumento de seu tamanho, forma e, portanto, maior velocidade de sedimentação.

Segundo Ramalho (1996), a velocidade de sedimentação das partículas aumenta, devido ao efeito de coalescência com outras partículas. Como a floculação ocorre à medida que as partículas se dirigem para o fundo, quanto mais chances de contato elas tiverem, maior a formação de flocos, assim sendo, a sedimentação floculenta tem a sua eficiência aumentada com o aumento da profundidade (H) e do tempo (t).

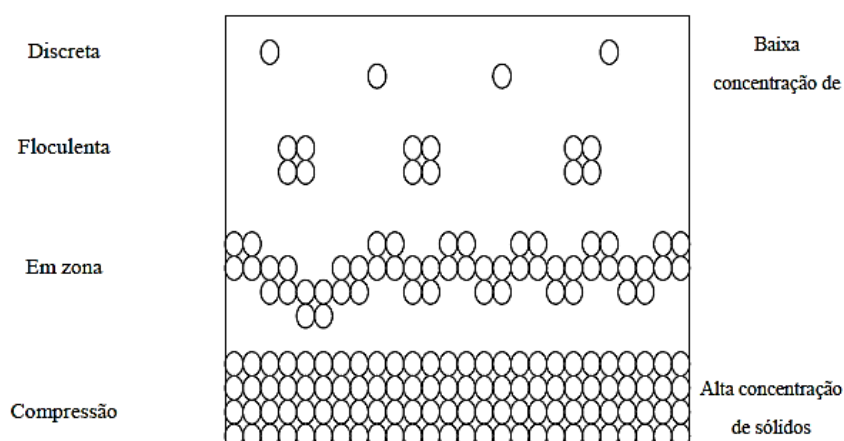
Para favorecer a floculação dos sólidos em suspensão, baixa-se à velocidade da água no tanque, de forma a facilitar o crescimento dos flocos, tornando-os, com isso, mais pesados. Na saída do floculador, têm-se flocos pesados o suficiente para que a maioria deles possa ser separada da água em tratamento, por sedimentação, no interior dos decantadores (VIANNA, 2002).

- **Sedimentação em zona:** este tipo ocorre quando a concentração de sólidos no sistema é elevada e as interações entre as partículas tendem a diminuir a velocidade de sedimentação de cada partícula (MONTGOMERY, 1985). Dessa forma, as partículas sedimentam como se fosse um bloco rígido, formando uma interface sólido-líquido. Exemplos deste processo incluem a sedimentação de lodos ativos nos clarificadores secundários e dos flocos de alumínio no processo de tratamento da água (VIANNA, 2002).
- **Sedimentação por compressão:** as partículas podem estabelecer ponto de contato entre si, viabilizando a transmissão de forças mecânicas. Assim, as camadas inferiores passam a ser compactadas pelo peso das camadas superiores. A gravidade no fundo de decantadores secundários e adensadores é um exemplo deste tipo de sedimentação (METCALF; EDDY, 1991).

A relação entre os tipos de sedimentações e concentrações de sólidos, pode ser visualizada na figura 4.

Figura 4. Relações entre os tipos de sedimentações e concentrações de sólidos.

Fonte: Pereira (2001).



Ocorre divergência quanto ao número de tipos de sedimentação entre os autores. Alguns autores como por exemplo Metcalfe e Eddy (1991), concordam que há quatro tipos de sedimentação: a sedimentação de partículas discreta, a sedimentação de partículas floculentas, a sedimentação em zona e sedimentação por compressão. Contudo, Jordão e Pessoa (1995) não consideram a sedimentação por compressão, pois o adensamento do lodo é visto como parte integrante do processo de sedimentação zonal.

3.2.2 Características dos tanques de sedimentação

Como foi dito anteriormente, os sedimentadores são equipamentos utilizados em estações de tratamento de efluentes, com a finalidade de separar sólidos/líquidos, removendo lodo tanto do tratamento primário como secundário. Estes equipamentos são comuns em indústria química, estações de tratamento de água e efluentes líquidos e unidade de beneficiamento de minérios.

Podem ser do tipo *Dortmund* ou periféricos (com braço raspador ou pontegiratória). Os sedimentadores *Dortmund* são equipamentos cilíndricos ou retangulares, de construção metálica ou de concreto, cujo ângulo deve ser no mínimo 60°, que através de um efeito de dispersão radial que acelera a precipitação das partículas sólidas em suspensão, separa sólidos e líquidos. Os sedimentadores periféricos (Figura 5A-B) são equipamentos cujo arranjo permite que o efluente, através da tubulação de entrada, passe pelo sedimentador e seja elevado pela coluna central descarregando o mesmo dentro de um anel defletor (CLAAS e MAIA, 1994).

Figura 5. A-B: Sedimentador periférico com braço raspador (Fonte: <http://www.vironquip.com.br/>).



3.2.3 Fatores que afetam a velocidade de sedimentação

Alguns fatores podem afetar a forma como a sedimentação se processa, sendo esta a razão de existirem diferentes classificações para este mecanismo de separação. De acordo com França e Casqueira (2007), os principais fatores que atuam em um processo de sedimentação, são:

- Natureza das Partículas

Partículas esféricas sedimentam com maior facilidade do que partículas de formato irregular. Assim como o formato, o tamanho da partícula também interfere na sedimentação, as partículas com diâmetros maiores sedimentam mais rapidamente do que partículas muito finas, que tendem a permanecer em suspensão. Alguns processos como floculação, coagulação ou aglomeração formam unidades maiores e de formato mais regular, que, conseqüentemente, sedimentam mais facilmente.

- Efeito da concentração de Sólidos

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 percentagem de sólidos em uma suspensão, menor será a velocidade (FRANÇA et al., 2007).

- Pré-tratamento

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. Por exemplo, a adição de agentes floculantes aumenta a dimensão das partículas favorecendo a sedimentação, enquanto que a presença de antiaglutinantes evita a formação dos flocos dificultando a sedimentação. Desta forma, a adição de compostos químicos pode favorecer ou não a separação dos sólidos (REIS, 2010).

3.3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE UM SEDIMENTADOR

As principais informações necessárias ao dimensionamento de espessadores são: capacidade requerida para alimentação, *overflow* e/ou *underflow*; características dos

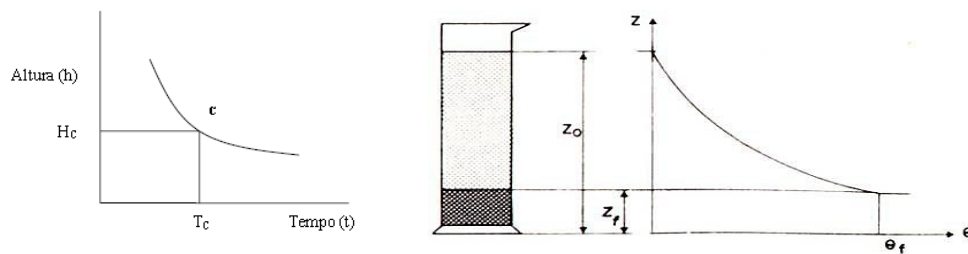
sólidos (tamanho, forma e massa específica das partículas); características do líquido (viscosidade e massa específica); estado de agregação/dispersão das partículas suspensas no líquido e razão mássica sólido-líquido na suspensão que será submetida à operação unitária de espessamento (METCALF et al., 1979).

Coe e Clevenger (1916), foram os primeiros a estudar o dimensionamento através da sedimentação em provetas. Eles propuseram colocar a polpa que se deseja espessar em provetas graduadas, monitorando-se em função do tempo (T_c), a altura (Hc) da linha divisória (LD) entre o líquido já clarificado e o restante da polpa que estava sendo espessada.

Outros pesquisadores, Roberts (1949), Talmadge-Fitch (1955) e Metcalf (1979), utilizaram a curva de sedimentação para analisar o mecanismo de sedimentação e projetar através de modelamento matemático ou gráfico, a área necessária de um espessador contínuo.

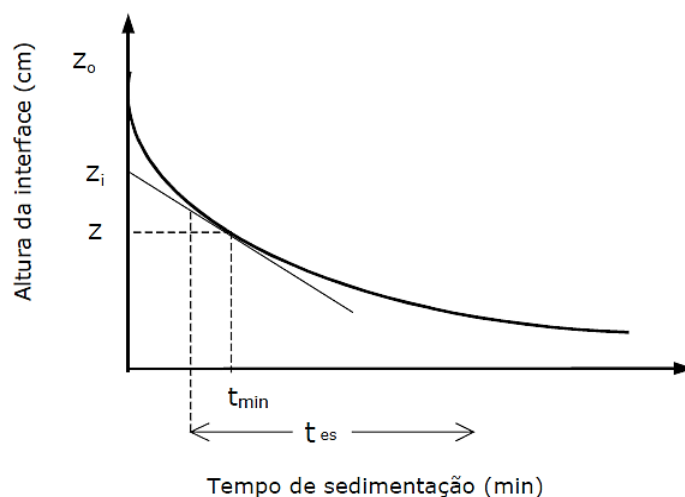
A representação gráfica do comportamento de H_c versus T_c foi denominada curva de sedimentação, como observado na figura 6. Foram eles que observaram a descontinuidade da curva de sedimentação e do ponto crítico (passagem de um regime de transição para o de compressão).

Figura 6. Curva da altura versus o tempo. (COE e CLEVENGER, 1917).



O método de Biscaia Jr. (1982) propõe que a sedimentação modifica-se ao longo do tempo. No início da sedimentação, as partículas sedimentam com velocidade constante e igual a velocidade terminal. Com o passar do tempo e a diminuição da altura da interface, a concentração torna-se maior, diminuindo a velocidade de sedimentação das partículas como visualizado na figura 7.

Figura 7. Determinação das variáveis de projeto pelo método de Kynch simplificado. (Simplificação do método de Biscaia Jr. (1982)). Fonte: FRANÇA et al. (2007).



3.4 ESTADO DA ARTE

Um dos trabalhos pioneiros na área de sedimentação foi realizado por 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.

Estes autores 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).

Kynch (1952) descreveu a velocidade de sedimentação das partículas na dispersão como função exclusiva da concentração volumétrica de sólidos e que a mesma tende a zero quando a concentração tende ao seu valor máximo. A teoria apresentava 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.

Assim, 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. 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 suposições:

- A sedimentação é unidimensional.
- A concentração aumenta com o tempo no sentido do fundo do recipiente.
- A velocidade de sedimentação tende a zero quando a concentração tende a seu valor máximo.
- A velocidade de sedimentação depende da concentração local dos sólidos.
- Os efeitos de parede não são considerados.

Diversos testes de sedimentação em batelada de materiais compressíveis foram realizados por Harris et al. (1975).

As análises gráficas das curvas típicas dos resultados mostraram que as curvas de sedimentação apresentavam formato de S-invertido sem presença da região de velocidade constante. Para isso, utilizaram a suspensão de fosfato diluída com pequenas quantidades de partículas mais grossas. Os resultados mostraram que mesmo com a adição de agente floculante houve formação de pequenos agregados de partículas, bem como várias regiões foram identificadas na curva de sedimentação. Cada região indicava um mecanismo de sedimentação específico predominante numa faixa de concentração. O trabalho apresentou formulações de modelos matemáticos simples para o fenômeno.

Quando a concentração local for muito alta, as partículas tenderão a manter contato umas com as outras, estabelecendo uma malha estruturada (tipo gel). A partir da concentração onde ocorre contato físico entre flocos ou partículas, tem início a consolidação do sedimento formado, em que o fluido contido no espaço intersticial vai sendo, progressivamente, expulso, até que um valor-limite de compactação do sedimento seja atingido. Antes que esse limite seja alcançado, a resistência à compactação cresce com o tempo em decorrência do aumento da repulsão eletrostática e da fricção mecânica ocasionados pela aproximação das partículas (BOUDREAU; BENNETT, 1999).

A importância do uso de testes de sedimentação em batelada para o projeto e dimensionamento de sedimentadores contínuos foi avaliada por Font; Laveda (1996) que propuseram um método para o projeto de sedimentadores contínuos. A partir dos testes, a área por unidade de vazão volumétrica e altura da lama puderam ser calculadas para diferentes concentrações de sólidos da lama em um sedimentador contínuo em um intervalo específico.

O desenvolvimento de modelos para a descrição do fenômeno de sedimentação/consolidação de partículas sólidas é uma matéria relevante em diversas áreas do conhecimento. Sabe-se que a velocidade de sedimentação de uma partícula é função de sua forma, densidade, tamanho, superfície sólida na vizinhança, concentração local e da viscosidade do fluido no qual está imersa. Sabe-se, ainda, que o aumento da concentração local faz com que a velocidade de

sedimentação da partícula diminua (sedimentação impedida), na medida em que decresce a área livre de ascensão do fluido (DANKERS; WINTERWERP, 2007).

Zheng; Bagley (1999) estudaram o processo de sedimentação em batelada e puderam verificar a variação da altura da interface sobrenadante da suspensão com o tempo, assim como a distribuição de concentração de sólidos com o tempo. Verificaram que os resultados obtidos na simulação e os resultados experimentais, presentes na literatura para diferentes materiais e diferentes concentrações iniciais, apresentaram boa concordância entre si. Concluíram que o modelo desenvolvido tem várias vantagens para a simulação do processo de sedimentação em batelada comparado com outros métodos presente na literatura, pois ele requer menos parâmetros.

França (1999) apresentou uma metodologia para estimar os parâmetros de equações para a pressão nos sólidos e a permeabilidade do sistema. Foram feitas simulações computacionais baseadas em um modelo da sedimentação em batelada que considerava a existência de duas regiões distintas durante os testes: as regiões de sedimentação livre e de compactação, acopladas através de equações de balanço de massa global e restrição das alturas. Os parâmetros destas equações eram estimados através do ajuste entre os resultados do modelo e dados experimentais da curva de sedimentação em batelada. Os valores calculados de alturas da região de compactação no sedimentador contínuo se aproximaram bastante dos valores teóricos-experimentais por eles obtidos.

Arouca; Damasceno (2005) utilizaram uma linha de pesquisa em processos de separação baseado no comportamento experimental de materiais particulados em meios aquosos como função de propriedade físicas dos sólidos, tais como a forma, a distribuição de tamanhos e a densidade de partículas. Os resultados obtidos pelos autores mostram a importância dos efeitos das variáveis na dinâmica de sedimentação e na acomodação de partículas em sedimentação formados a partir de testes sedimentação em batelada.

Segundo Valadão (2007), a identificação dos limites entre as seções da curva de sedimentação é relevante nos métodos usuais de dimensionamento de espessadores que utilizam ensaios em provetas.

Pinto *et al.* (2009), estudaram o dimensionamento de espessadores para verificar a validação experimental de três técnicas convencionais os autores observaram que os resultados obtidos através das três técnicas usualmente citadas

em literatura, convergiram para valores muito próximos, indicando coerência entre os procedimentos adotados através das referidas técnicas. Tais resultados validam as técnicas experimentais adotadas para o dimensionamento do espessador industrial dentro das condições estudadas.

Recentemente, Medeiros (2014), estudando o dimensionamento da área de um sedimentador contínuo verificou a coexistência de três regiões de regimes de sedimentação. A primeira 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. Na segunda região de transição, a velocidade de sedimentação não se mantém constante. Na terceira região de formação de sedimento é onde a altura de sedimento atinge seu valor máximo, ou seja, mesmo com tempos longos está se manterá constante.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima

Para realização da análise de sedimentação em batelada utilizou uma suspensão de carbonato de cálcio (CaCO_3) com três diferentes granulometrias 40, 100 e 325 Mesh, adquirido da empresa Dolomil Indústria LTDA, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. As características físico-químicas do carbonato de cálcio estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização físico-química do carbonato de cálcio.

Propriedade	Característica
Estado físico	Sólido cristalino
Forma	Pó finamente dividido de tato arenoso
Cor	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	≈ 0 mmHg
Densidade (água=1)	2,6 a 2,9 g/cm ³
pH (dispersão aquosa a 5%)	9,0-10,50
Densidade aparente	1,4 a 1,9 g/cm ³
Solubilidade em água	Insolúvel
Outra solubilidade	Insolúvel em solventes orgânicos

Fonte: MEDEIROS (2014)

4.2 Equipamento e Vidrarias

Os equipamentos e vidrarias utilizados para realização dos ensaios de sedimentação em proveta estão relacionados abaixo:

- Proveta de 2000mL
- Balança analítica ($\pm 0,0001$)
- Becker de 250mL
- Cronômetro
- Basta de vidro
- Papel milimetrado
- Balão volumétrico

4.3 Ensaio de Sedimentação em Proveta

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

4.4 Preparação da amostra

Inicialmente foram preparadas analiticamente quatro suspensões de carbonato de cálcio com concentrações de 100, 150, 200 e 300 g.L⁻¹. O carbonato de cálcio utilizado na preparação das suspensões tinham Mesh de 40, 100, 325. Após formulações preliminares para testes estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Concentração da amostra

Concentração (g. L ⁻¹)	Mesh		
	325	100	40
100	40	40	20
150	60	60	30
200	80	80	40
300	120	120	60

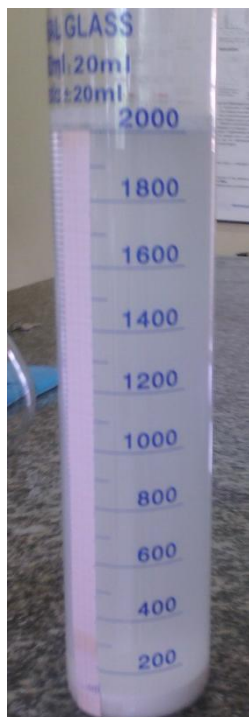
Para formar as suspensões testes foram pesados, em uma balança analítica, as massas de carbonato de cálcio para obtenção das concentrações do mesmo desejados em um Becker de 250 mL, transferidas para uma proveta de 2000 mL com auxílio de um bastão de vidro e em seguida agitadas até obter homogeneização da suspensão. Posteriormente, foi adicionada água destilada até o volume desejado.

4.5 Monitoramento da curva de sedimentação.

O monitoramento da curva de sedimentação das suspensões de carbonato de cálcio realizou-se numa proveta de 2000 mL com auxílio de uma fita de papel milimetrado aderido à parede externa da proveta como visualizado na Figura 8. Esta fita foi utilizada para registrar as leituras do deslocamento da altura (Z), da interface entre o líquido clarificado e a região logo abaixo da suspensão de concentração uniforme igual à concentração inicial da suspensão em função do tempo (t), ao longo do ensaio de sedimentação.

O início do deslocamento foi anotado baseando-se na altura em intervalo de tempos pré-estabelecidos a cada 20 segundos. Durante a sedimentação das partículas no fundo da proveta, observou-se que a variação de altura da interface ia diminuindo, logo o intervalo de tempo passou de 20 segundos para 5 minutos, devido a diminuição da altura da interface. Com a sedimentação total, verificou-se que o tempo do experimento foi de 60 minutos. Assim, todas as concentrações foram analisadas seguindo este tempo estabelecido. Na Figura 8 mostra este comportamento.

Figura 8. Processo de sedimentação em proveta: Teste preliminar A até E (suspensões de carbonato de cálcio concentração 100 g.L^{-1}).



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

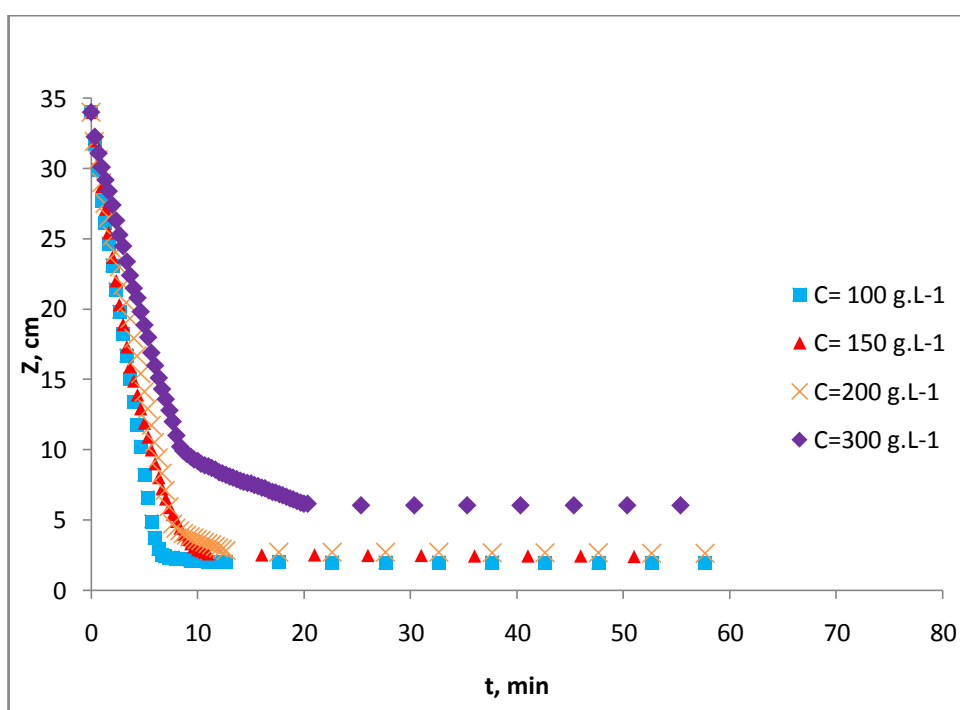
5.1 OBTENÇÃO DA CURVA DE SEDIMENTAÇÃO.

Inicialmente, a partir dos ensaios em proveta foi possível monitorar as curvas de sedimentação para as diferentes concentrações e misturas de partículas de carbonato de cálcio.

Verificou-se que as regiões são diferenciadas pelo comportamento das curvas de sedimentação (Figura 9) e que está diretamente relacionada com a concentração da suspensão e do efeito da combinação de diferentes granulometrias utilizadas na preparação das mesmas.

Observou-se, visualmente, na identificação da interface do líquido clarificado com a região de concentração uniforme igual à concentração inicial da suspensão, que a suspensão de carbonato de cálcio com concentração de 100 g.L^{-1} obteve o melhor resultado. Por outro lado, a suspensão de carbonato de cálcio com concentração de 300 g.L^{-1} , apresenta um decaimento da taxa de sedimentação muito baixa quando comparado com as demais concentrações, dificultando o monitoramento da mesma em relação à observação da altura da interface.

Figura 9. Curvas de sedimentação da suspensão do carbonato de cálcio em diferentes concentrações.



5.1.1 Regiões de Sedimentação

As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam as regiões de sedimentação dos ensaios realizados. A partir destas curvas foi possível identificar os três regimes de sedimentação. Verifica-se que o tempo na região de transição aumenta com a elevação da concentração da suspensão e, também, com o percentual de partículas de granulometria menores, ou seja, de Mesh igual 325. Este fenômeno deve-se, provavelmente, ao fato da maior interferência do movimento destas partículas nesta região.

De maneira geral, observa-se que as curvas apresentam um comportamento convencional de acordo com a literatura estudada.

Figura 10. Curva de sedimentação na $C=100 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=40% 325 + 40% 100 + 20% 40.

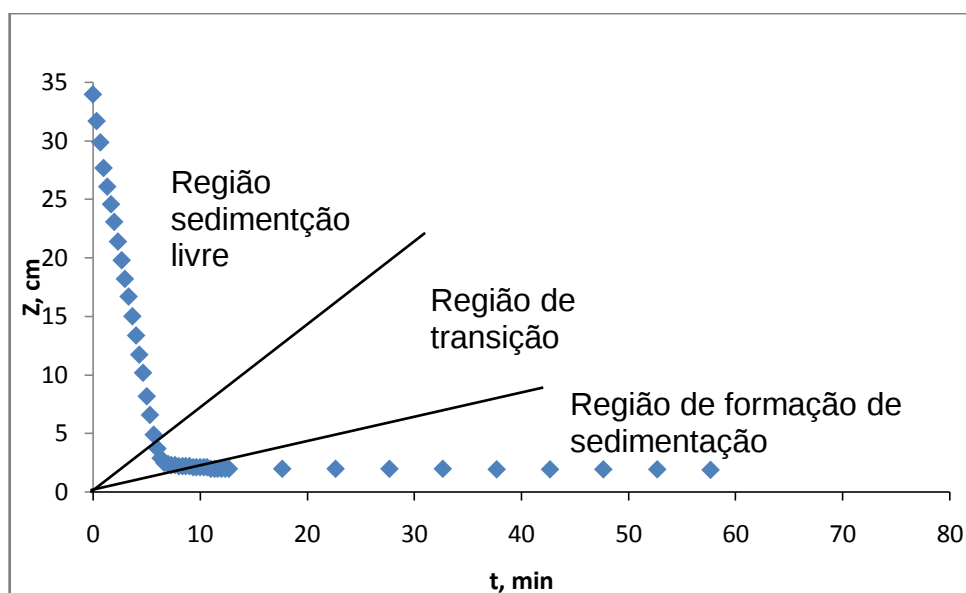


Figura 11. Curva de sedimentação na $C=150 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40.

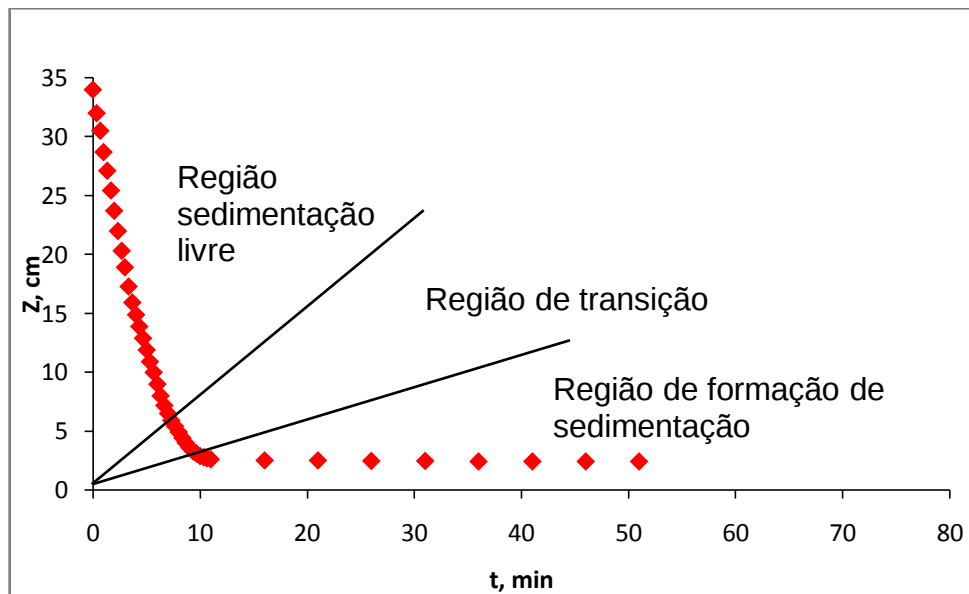


Figura 12. Curva de sedimentação na $C=200 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40.

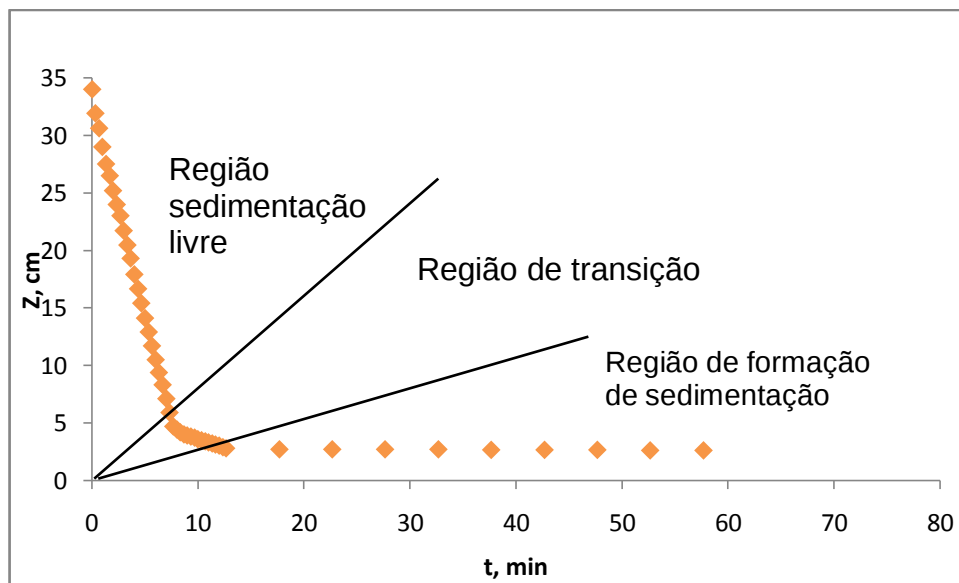
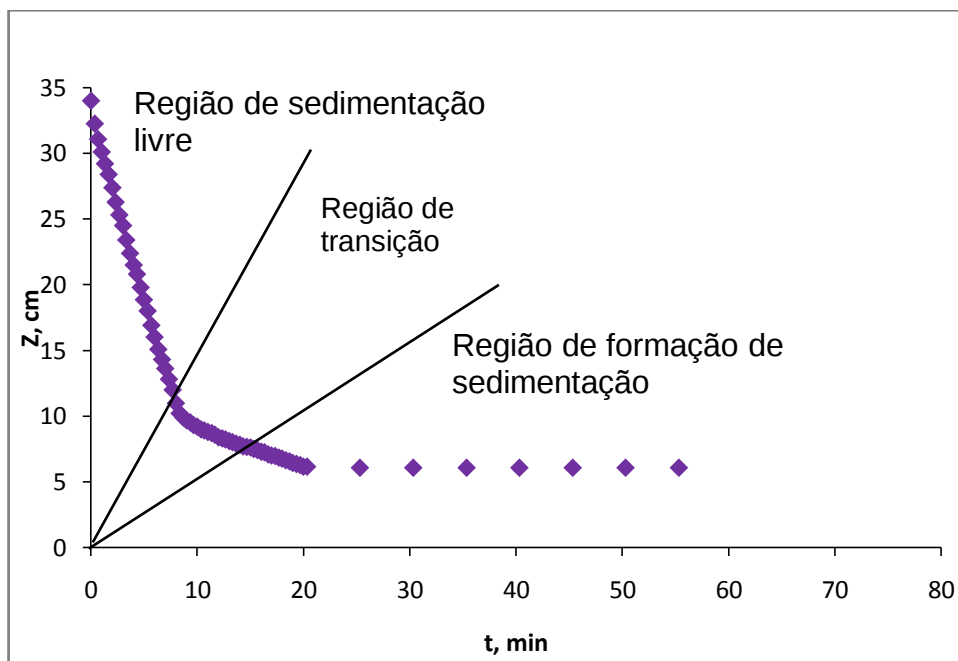


Figura 13. Curva de sedimentação na $C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120% 324 + 120% 100 + 60% 40.



5.1.1.1 Região de sedimentação livre.

A partir das curvas de sedimentação obteve-se a parte inicial do monitoramento da curva de sedimentação uma região com velocidade constante. Segundo Foust(1982) este comportamento ocorre, pois no início as partículas maiores sedimentam a uma taxa muito elevada, porém constante. Nesta região utilizou-se um ajuste linear aos dados experimentais para determinação da velocidade de sedimentação livre. Os modelos de acordo com o coeficiente de determinação mostrou-se satisfatório com valores em média acima de 0,99. As Figuras 14, 15, 16 e 17 representam a região de sedimentação livre nas diferentes concentrações.

Figura 14. Região de sedimentação livre na $C=100 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=40% 324 + 40% 100 + 20% 40.

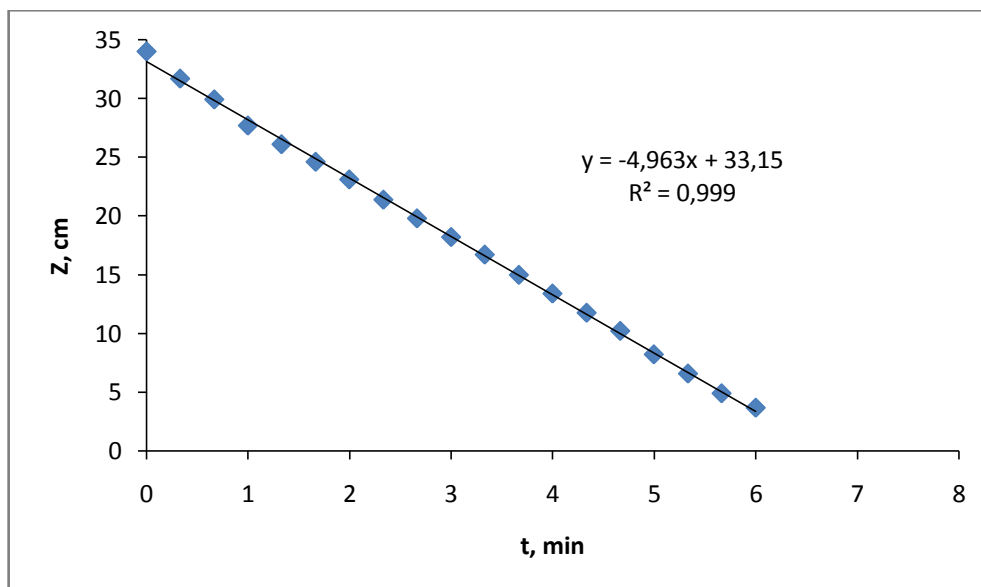


Figura 15. Região de sedimentação livre na $C=150 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40.

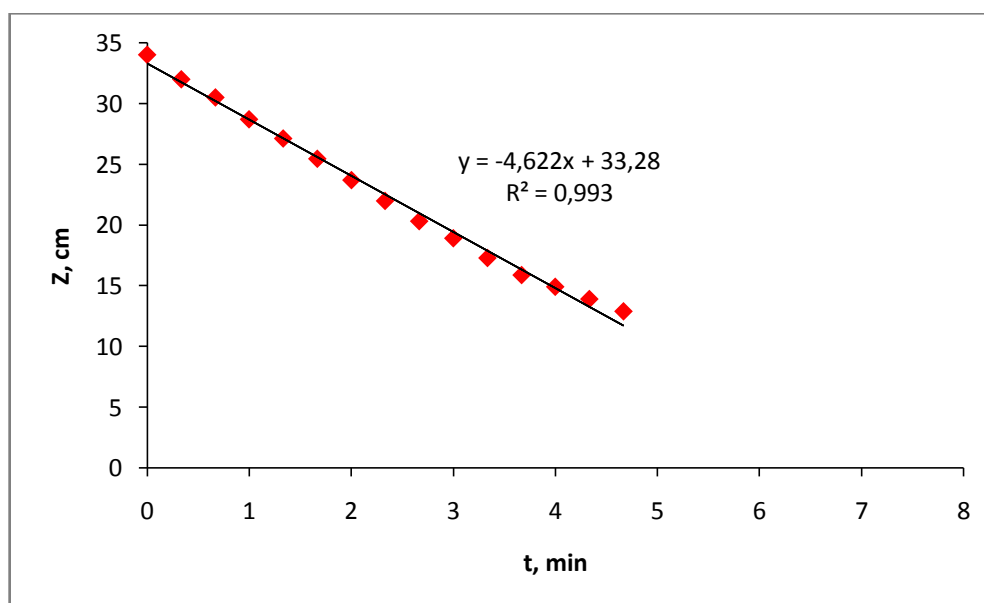


Figura 16. Região de sedimentação livre na $C=200 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40.

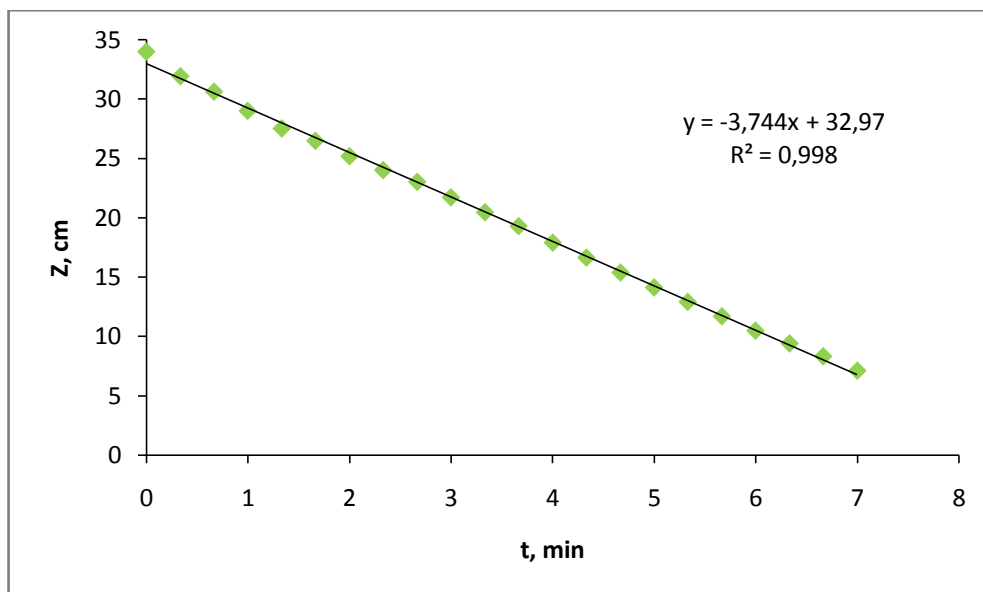
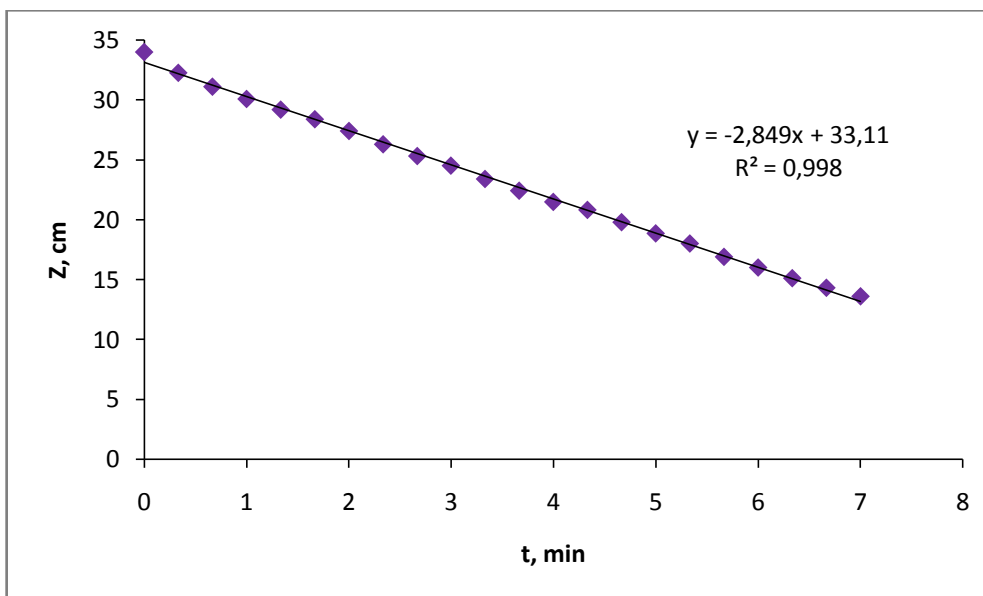


Figura 17. Região de sedimentação livre na $C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120% 324 + 120% 100 + 60% 40.



A Tabela 3 apresenta a velocidade de sedimentação obtida a partir do ajuste linear dos dados experimentais, observa-se que a mesma diminui com o aumento da concentração da suspensão de carbonato de cálcio e maior quantidade de partículas de granulometria menores, este fenômeno pode ser explicado pela maior interação e interferência destas partículas que sedimentam lentamente. Este comportamento também foi observado por Medeiros (2014) durante os ensaios de sedimentação com suspensão de carbonato de cálcio.

Neste trabalho, observou-se que a velocidade de sedimentação livre dos sólidos é maior. Tal fato pode estar relacionado com o diâmetro da proveta, visto que quanto maior, oferece uma maior área disponível para a sedimentação reduzindo o efeito de parede corroborando com França (2006).

Tabela 3. Velocidade na região de sedimentação livre nas concentrações e Mesh diferentes.

Concentração (g. L ⁻¹)	Mesh			R ²	Velocidade (cm.min ⁻¹)
	325	100	40		
100	40	40	20	0,999	4,9637
150	60	60	30	0,9939	4,6221
200	80	80	40	0,9987	3,7447
300	120	120	60	0,9983	2,8496

5.1.1.2 Região de transição

Na curva de sedimentação, foi possível identificar a região de transição como observado nas Figuras 18, 19, 20 e 21. Os dados experimentais foram ajustados a um modelo de potência, os resultados foram satisfatórios, apresentando um coeficiente de determinação, em geral, superior a 0,99.

Figura 18. Região de transição na $C=100 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=40% 324 + 40% 100 + 20% 40.

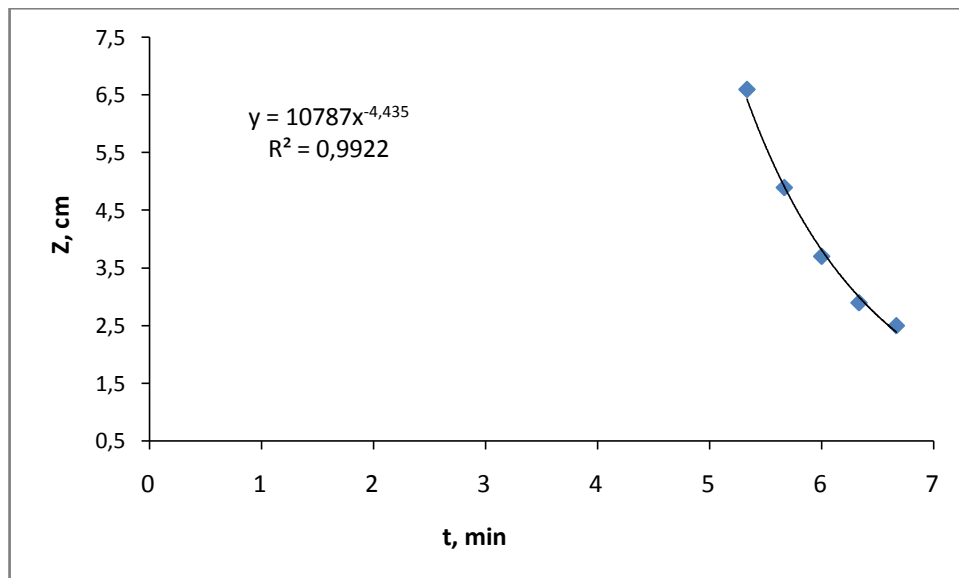


Figura 19. Região de transição na $C=150 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=60% 324 + 60% 100 + 30% 40.

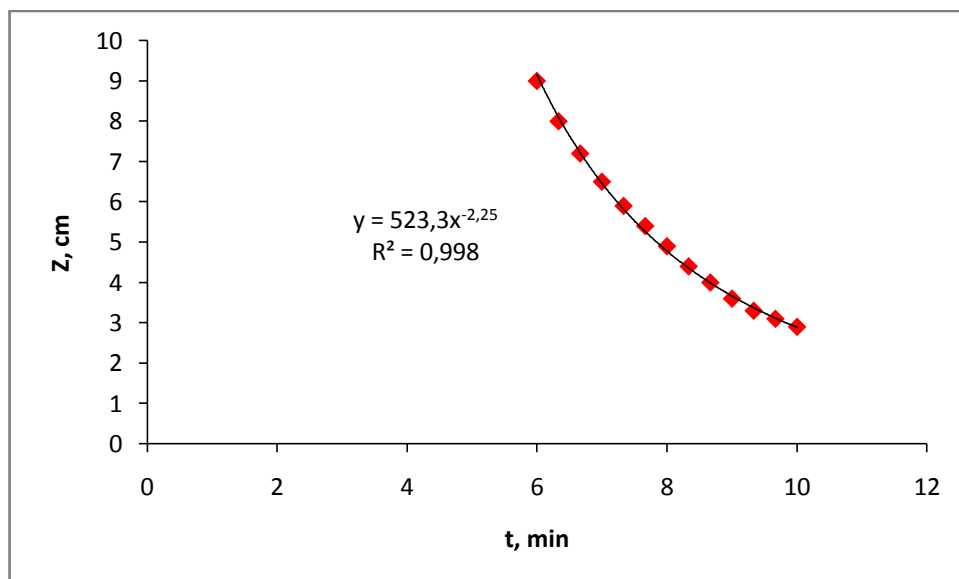


Figura 20. Região de transição na $C=200 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40.

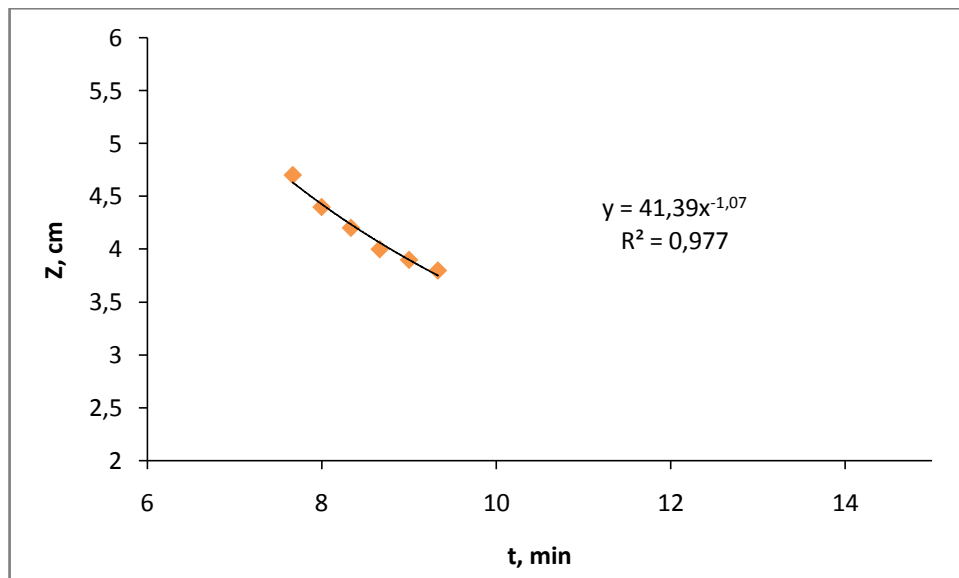
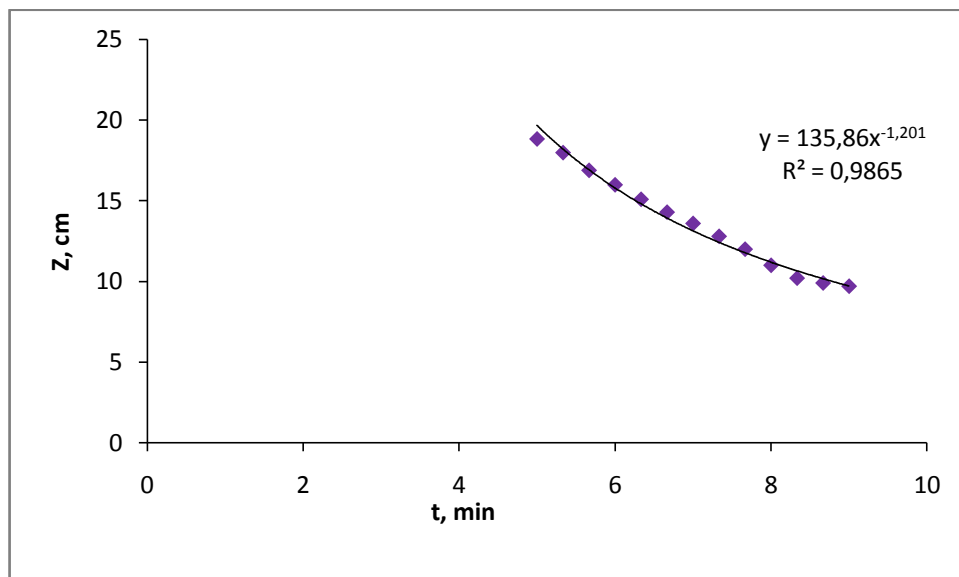


Figura 21. Região de transição na $C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120% 324+120% 100+60% 40.



5.1.1.3 Região de formação de sedimento

As Figuras 22, 23, 24 e 25 apresentam o monitoramento da curva de sedimentação na região de formação do sedimento. Segundo Vaz (2010), a velocidade nesta fase é muito baixa, pois as partículas atingem uma altura máxima mantendo tempos longos por um período constante.

Figura 22. Ajuste para região de formação de sedimento. $C=100\text{g.L}^{-1}$; Mesh=40%
324+40% 100+20% 40.

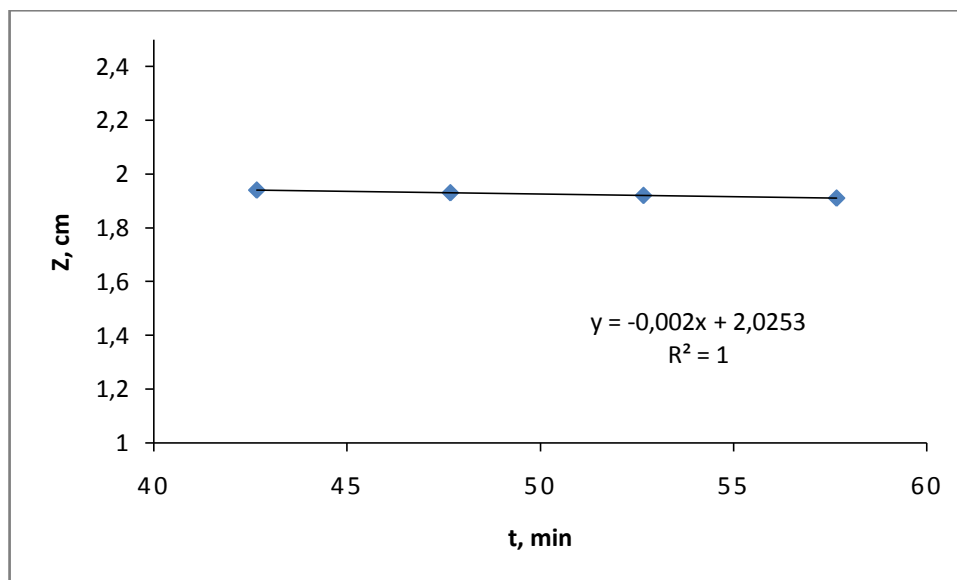


Figura 23. Ajuste para região de formação de sedimento. $C=150\text{ g.L}^{-1}$; Mesh=60%
324 + 60% 100 + 30% 40.

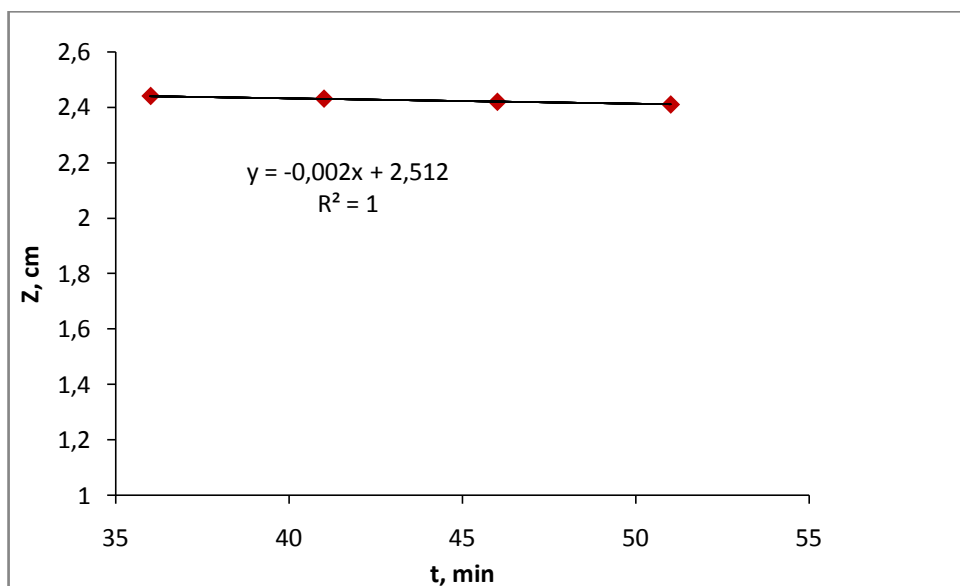


Figura 24. Ajuste para região de formação de sedimento. $C=200 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=80% 324 + 80% 100 + 40% 40.

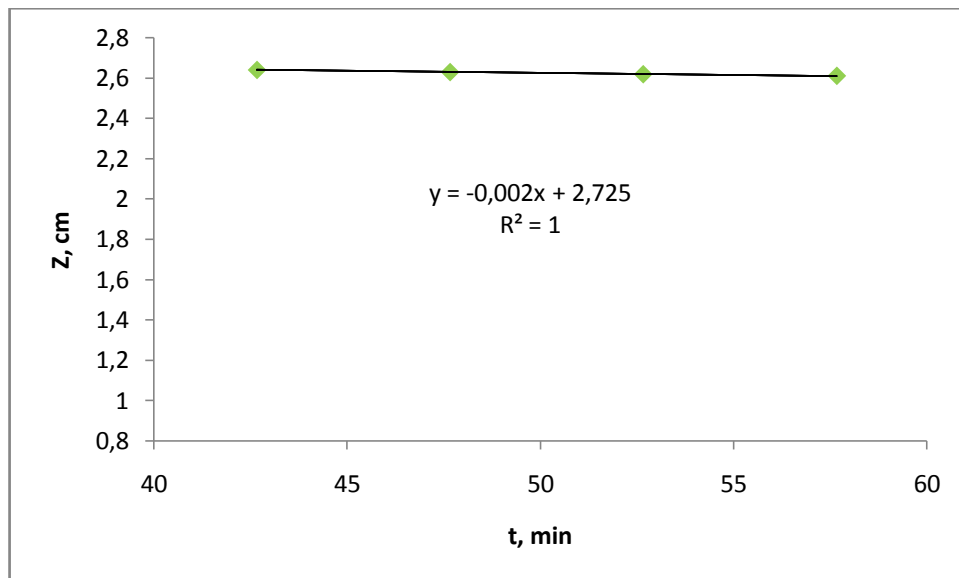
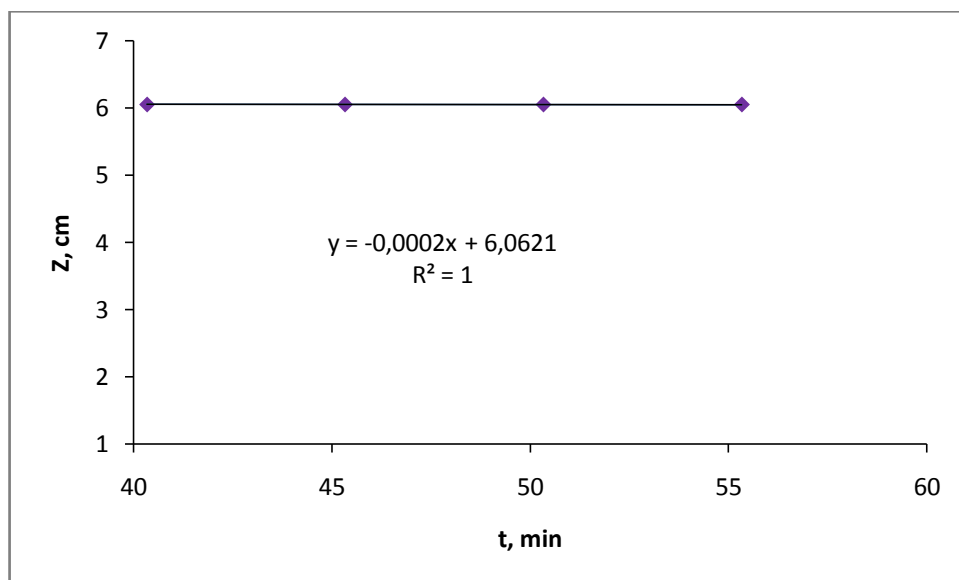


Figura 25. Ajuste para região de formação de sedimento. $C=300 \text{ g.L}^{-1}$; Mesh=120% 324+120% 100+60% 40.



Na Tabela 4 apresenta os valores da velocidade nesta região. Verificou-se que a velocidade tende a valores próximos a zero o que é esperado, haja vista que no final da sedimentação ocorre um empacotamento das partículas fazendo com que a velocidade seja muito pequena tendendo a zero.

Tabela 4. Velocidade de região de formação do sedimento para concentrações e Mesh diferentes.

Concentração (g. L ⁻¹)	Mesh			R ²	Velocidade (cm.mim ⁻¹)
	325	100	40		
100	40	40	20	1	0,002
150	60	60	30	1	0,002
200	80	80	40	1	0,002
300	120	120	60	1	0,0002

Medeiros (2014) realizou o mesmo experimento com três concentrações de suspensão de carbonato de cálcio e a combinação de diferentes granulometrias em uma proveta de 1000mL. Contudo, neste trabalho foi realizado em uma proveta de 2000mL e obteve o comportamento semelhante. Verificou que a velocidade de sedimentação tende ser maior para suspensão de carbonato de cálcio com concentração 100 g.L⁻¹, isso acontece devido as interações entre as partículas serem menor do que nas suspensões de maior concentração.

França (2006) enfatizou que o ideal seria realizar os ensaios de sedimentação em provetas de 2000 mL para que o efeito de parede seja desprezado, caso utilize-se uma proveta de volume inferior, esse efeito terá que ser levado em consideração.

6 CONCLUSÃO

A partir dos ensaios de sedimentação em batelada realizados em laboratório, observou-se:

- O método de separação sólido-líquidos tornou possível a descrição física da sedimentação e a visualização das três regiões de sedimentação.
- A partir dos resultados encontrados, à medida que aumenta a concentração da mistura a, velocidade de sedimentação dos sólidos diminui, devido a influência das partículas em suspensão e a permeabilidade também diminui devido a diminuição dos caminhos livres para queda das partículas.
- Observou-se que a concentração de 100 g.L^{-1} , obteve visualmente, na identificação da interface do líquido clarificado com a região de concentração uniforme igual a concentração inicial da suspensão, apresentou melhor resultado.

REFERÊNCIAS

AROUCA, F. O. Uma contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada. 2007. 286f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2007.

AROUCA, F. O.; DAMASCENO, J. J. R. Analysis of the behavior of solid –liquid systems based on the shape, size distribution and density of the solid particles. *Proceedings of Fifth International Latin-American Conference on powderTechnology – PTECH*, 2005.

BASTOS, R. K. X. *Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e psicultura*. Projeto PROSAB.2003, 264p

BENVINDO, A. L et al. 2002. Tratamento de Minérios. 3ª Edição. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral; Rio de Janeiro-Brasil.

BOUDREAU, B. P., BENNETT, R. H. New Rheological and Porosity Equations for Steady-State Compaction, ***American Journal of Science***, v. 299, p. 517-528, 1999.

BRAGANÇA, A. C. 2008. Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro. UFMG. Belo Horizonte: UFMG.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano/ Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Declaração Universal dos Direitos da Água. Porto Seguro: MMA/SRH, 2000 (Histoire de L'eau, George Ifrah, Paris, 1992).

BURGER, R.; CONCHA, F. Mathematical model and numerical simulation of settling of flocculated suspensions. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 24, p. 1005 - 1023, 1998.

CHAVES, A.P.; Teoria e Prática no Tratamento de Minérios, v.2 p.50-116. 2004. ed. Signus / Mineral.

CLAAS, I. C; MAIA, R. A. M. Manual básico de resíduos industrial de curtume. 1. ed. Porto Alegre: SENAI/RS, 1994.

COE, H. S.; CLEVENGER, G. H. Methods of determining the capacities of slime – settling tanks. *Trans. Am. Inst. Min. Engrs.* ,p. 356-384, 1916.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental- (CETESB). *Reúso da água*. São Paulo. SP. Disponível em:

http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/gesta_reuso.asp. Acesso em 04/02/2010.

CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos. Blucher, São Paulo, 2012.

D`ÁVILA, J. S. *Um Modelo matemático para sedimentação*. Tese (Doutorado) – COPPE/UFRJ, 1979.

DANKERS, P.J.T., WINTERWERP, J.C. Hindered settling of mud flocs: theory and validation. ***Continental Shelf Research***, v. 27, p. 1893-1907, 2007.

DI BERNARDO, L. DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. São Carlos, RiMa, 2ed., 2.v, 1565p, 2005.

DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água - V. I e II. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, Brasil, 1993.

DI BERNARDO, L. Métodos e Técnicas de tratamento de Água. Volume 1. ABES, Rio de Jneiro, Brasil. 481p.

DI BERNARDO, L.; PECCI FILHO, R. Ozonização, adsorção em carvão ativado e flotação para pré-tratamento de água. Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y ambiental, 27, Peru. Anais do XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental. Peru: AIDIS, 1998. p. 12.

FRANÇA, S. C. A. Sobre a simulação da sedimentação em batelada: Lec. XXXVII *Congresso Brasileiro de sistemas particulados*, 1999.

FRANÇA, S.C.; CASQUEIRA, R.G. Ensaios de Sedimentação. In: Práticas Laboratoriais, capítulo 23. CETEM, 2007.

HARRIS, C. C.; SOMAUNDARAN, P.; JENSEN, R. R. Sedimentation of compressible materials: Analysis of batch sedimentation curve. *Powder Technology*, v. 11, p. 75-84, 1975.

JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A. *Tratamento de esgotos domésticos*. 3 ed. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES, 720pp. 1995.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 7 ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 3rd ed. New Delhi: McGraw-Hill Inc., 1991.

METCALF, L.; EDDY, H.P. *Wastewater engineering: treatment disposal and reuse*. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 1334 p.

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

MONTGOMERY, J. M. *Water treatment principles and design*. New York. Jhon Wiley & Sons, 1985.

OLIVEIRA, J.M.B.de. *Remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* por meio de sedimentação e flotação: avaliação em escala de bancada*. 122p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2005.

PEREIRA, J. R, R. *et al.* Apostila de tratamento de esgoto. Belém, 2001.

PINTO; DE LIMA; JÚNIOR; FILHO. Dimensionamento de espessadores: validação experimental de três técnicas convencionais, R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(2): 243-249, abr. jun. 2009.

RAMALHO, R. S. *Tratamiento de águas residuales*. Barcelona: Editorial Reverte, 1996. 705 p.

ROBERTS, E. J. Thickening, art or science. In: *Mining Engineering*, v.1, p. 61-64, 1949.

SETTI, A. A; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. 2ª edição. ANEEL. ANA. Brasília - Distrito Federal, 2001.

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

TALMADGE, W.P., FITCH, E.B. Determining thickener unit areas. In: *Industrial and Engineering Chemistry*, v.47, p. 38-41, 1955.

TALMAGE, W.P.; FITCH, E.B.; Determining Thickener unit areas, Ind. Eng.Chem, v.47. 1955.

TORQUATO, N. (2008). Dimensionamento de Espessadores Convencionais Aplicados a Polpas de Minério de Ferro. UFOP, DEMIN. Ouro Preto/MG: UFOP.

VALADÃO, G.E.S., ARAÚJO, A.C. Espessamento. In: Introdução ao tratamento de minérios, Editora UFMG, cap.7, p. 142-152, 2007.

VALENCIA, J. A. Teoria y practica de lapurificaciondel água, AWWA, Florida, 1992.

VIANNA, M. R. Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água. 4.ed. Belo Horizonte, 2002. 576 p.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2ª ed. 1996. 243 p

VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico das Águas Residuárias – Princípios Básicos do Tratamento de Esgotos. DESA, Belo Horizonte, Brasil, 1996. 211p.

ZHENG, Y.; BAGLEY, D. M. Numerical simulation of batch settling process. *Journal of Environmental Engineering*, v. 125(11). P. 1007-1013, 1999.