



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

ERIKA SUELLEN DOS SANTOS VIEIRA

**METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA ANÁLISE DO
DIMENSIONAMENTO DE UM SEDIMENTADOR CONTINUO A PARTIR DE
EXPERIMENTOS EM PROVETA**

**PALMAS – TO
ABRIL/2019**

ERIKA SUELLEN DOS SANTOS VIEIRA

**METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA ANÁLISE DO
DIMENSIONAMENTO DE UM SEDIMENTADOR CONTINUO A PARTIR DE
EXPERIMENTOS EM PROVETA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Tocantins, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof. Ms. Cilene Mendes Reges

PALMAS – TO

ABRIL/2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- V658m Vieira, Erika Suellen dos Santos.
 Metodologia de Superfície de Resposta para análise do dimensionamento de um sedimentador contínuo a partir de ensaios em proveta. / Erika Suellen dos Santos Vieira. – Palmas, TO, 2019.
 75 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia de Alimentos, 2019.
 Orientadora : Cilene Mendes Regis
1. Sedimentação. 2. Metodologia de Superfície de Resposta. 3. DCCR. 4. Operações Unitárias. I. Título

CDD 664

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso.

**METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA PARA ANÁLISE DO
DIMENSIONAMENTO DE UM SEDIMENTADOR CONTINUO A PARTIR DE
EXPERIMENTOS EM PROVETA**

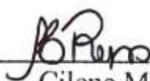
Elaborador por

Erika Suellen dos Santos Vieira

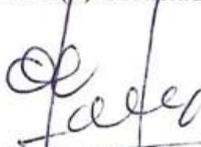
Como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

DATA DA APROVAÇÃO: 16/04/2019.

COMISSÃO EXAMINADORA



Cilene Mendes Reges
Professor(a) Orientador(a)



Aroldo Arcvalo Pinedo
Professor(a) Avaliador(a) 1



Itamar Souza Reges
Professor(a) Avaliador(a) 2

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu força, coragem e determinação para a realização de mais um sonho.

Aos meus pais, Eva Maria e Naticilio Julio, e minha irmã Amanda Julia, que nunca mediram esforços para que eu conseguisse conquistar os meus objetivos, sempre me guiando pelo caminho do respeito e da honestidade. Amo vocês!

A todos os meus familiares, que mesmo distantes, não deixaram de transmitir ensinamentos e conselhos valiosos para minha formação, e em especial a minha prima Dark Luzia, que me apresentou com muito amor a Engenharia de Alimentos.

Ao meu namorado Marcus Souza, pelo amor, incentivo e companheirismo, tornando esta etapa muito mais fácil.

A todos os meus amigos pelo apoio dado em todos os momentos de minha vida, e por estarem sempre ao meu lado.

As amizades construídas na Universidade, que me proporcionaram momentos únicos de alegria, descontração e também aprendizado, em especial, Lara e Antonina, sou grata por toda a ajuda recebida, principalmente na finalização deste trabalho.

A minha querida orientadora Cilene Mendes, que me guiou durante a realização deste trabalho sempre com muita calma e sabedoria. Agradeço por compartilhar a sua “maletinha do conhecimento”. Tenho muito orgulho e gratidão em ter sido sua aluna e orientada.

Ao grupo PET Engenharia de Alimentos, tutor Abraham Zuniga e queridos petianos. Nos tornamos uma grande família, e sem dúvidas, levarei a amizade construída para toda a vida. Sou muito grata por ter feito parte de tantos projetos incríveis que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

A Universidade Federal do Tocantins e todos os professores do curso de Engenharia de Alimentos, pela contribuição na minha formação profissional e todo aprendizado conquistado, em especial ao professor Itamar Reges por todos os conselhos valiosos recebidos durante o curso e ao professor Aroldo Arévalo por aceitar com prontidão ao convite para compor a banca examinadora.

RESUMO

O dimensionamento de sedimentadores contínuos pode ser realizado a partir de dados experimentais obtidos em ensaios de proveta realizados em laboratório a fim de conhecer as características da suspensão, pois existem fatores que influenciam a sedimentação, como a concentração de sólidos e a área disponível para operação. As informações da sedimentação descontínua servem como base para o projeto de sedimentadores contínuos, permitindo a construção de curvas de sedimentação da suspensão e, posteriormente, a aplicação de modelos matemáticos para o cálculo das variáveis de projeto. O objetivo deste trabalho foi dimensionar um sedimentador contínuo a partir de ensaios de proveta utilizando suspensões de carbonato de cálcio, aplicando os modelos matemáticos de Kynch (1952), Talmagde e Fitch (1955) e Biscaia Junior (1982). A fim de observar o efeito da concentração da suspensão e do diâmetro da proveta no cálculo da área, utilizou-se o planejamento estatístico Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), e os resultados obtidos foram avaliados aplicando a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Com base nas condições estabelecidas no presente estudo, concluiu-se que as curvas de sedimentação construídas tiveram excelentes coeficientes de correlação, com valores entre 0,9437 a 0,999, atestando que os dados experimentais fornecem confiabilidade para o dimensionamento de um sedimentador contínuo. Aplicando os modelos matemáticos de Kynch (1952) e Biscaia Junior (1982) encontrou-se variações de áreas muito semelhantes, entre 9 a 60 m² e 11 a 72 m², respectivamente. Já o método de Talmagde e Fitch resultou em valores de áreas que variaram entre 5 a 18 m², e apresentou a modelagem mais adequada, indicando que aproximadamente 90% das variações são explicadas pelo modelo ajustado ($A = 12,450 + 4,105x_1^2 + 4,215 x_2 - 5,001x_2^2$). De modo geral, quando o efeito da interação não é significativo, como no caso dos três métodos analisados, é possível afirmar que os fatores são independentes, onde cada efeito principal pode ser interpretado isoladamente.

Palavras-chave: Sedimentação; Sedimentadores; DCCR; MSR.

ABSTRACT

The sizing of continuous decanter can be done from experimental data obtained in laboratory tests to know the characteristics of the suspension, as there are factors that influence sedimentation, such as the concentration of solids and the area available for operation. Discontinuous sedimentation information serves as a basis for the design of continuous decanters, allowing the construction of sedimentation curves, and later the application of mathematical models for the calculation of design variables. The objective of this work was to size the area of a continuous decanter applying the mathematical models of Kynch (1952), Talmagde and Fitch (1955) and Biscaia Junior (1982). In order to determine the best operating conditions to obtain the calcium carbonate suspensions to be analyzed, was used the Central Rotatable Composite Design (CRCD), and the results obtained were evaluated applying the Response Surface Methodology (RSM), in order to observe the effect of the concentration of the suspension and the diameter in the calculation of the area. Based on the conditions established in the present study, it was concluded that the sedimentation curves constructed had excellent correlation coefficients, with values between 0.9437 and 0.999, attesting that the experimental data provide reliability for the design of a continuous decanter. Applying the mathematical models of Kynch (1952) and Biscaia Junior (1982) found variations of very similar areas, between 9 to 60 m² and 11 to 72 m², respectively. The Talmagde and Fitch method resulted in values ranging from 5 to 18 m² and presented the most adequate modeling, indicating that approximately 90% variations are explained by the adjusted model ($A = 12,450 + 4,105x_1^2 + 4,215 x_2 - 5,001x_2^2$). In general, when the interaction effect is not significant, as in the case of the three methods analyzed, it is possible to affirm that they are independent factors, where each main effect can be interpreted in isolation.

Keywords: Sedimentation; Decanters; CRCD; RSM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de forças na sedimentação de partículas discretas	21
Figura 2 – Ensaio de sedimentação em proveta	21
Figura 3 – Zonas de sedimentação apresentadas em um sedimentador contínuo	22
Figura 4 – Esquema operacional de um sedimentador contínuo convencional.....	25
Figura 5 – Interior de um sedimentador retangular	25
Figura 6 – Determinação gráfica do método de Kynch.....	26
Figura 7 – Determinação gráfica das tangentes pelo método de Kynch	27
Figura 8 – Determinação das variáveis de projeto pelo método de Talmadge e Fitch.....	28
Figura 9 – Determinação das variáveis de projeto pelo método de Biscaia Junior	30
Figura 10 – Componentes técnicos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), sequência geral de execução e descrição resumida de seus objetivos.....	32
Figura 11 – Curva de sedimentação do Ensaio 1: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 41 g.L ⁻¹	36
Figura 12 – Curva de sedimentação do Ensaio 2: Proveta de 1000 mL, utilizando volume de 800 mL e concentração de 41 g.L ⁻¹	37
Figura 13 – Curva de sedimentação do Ensaio 3: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 119 g.L ⁻¹	37
Figura 14 – Curva de sedimentação do Ensaio 4: Proveta de 1000 mL, utilizando volume de 800 mL e concentração de 119 g.L ⁻¹	38
Figura 15 – Curva de sedimentação do Ensaio 5: Proveta de 100 mL, utilizando volume de 77 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	38
Figura 16 – Curva de sedimentação do Ensaio 6: Proveta de 2000 mL, utilizando volume de 923 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	39
Figura 17 – Curva de sedimentação do Ensaio 7: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 25 g.L ⁻¹	39

Figura 18 – Curva de sedimentação do Ensaio 8: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 135 g.L ⁻¹	40
Figura 19 – Curva de sedimentação do Ensaio 9: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	40
Figura 20 – Curva de sedimentação do Ensaio 10: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	41
Figura 21 – Curva de sedimentação do Ensaio 11: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	41
Figura 22 – Curva de sedimentação do Ensaio 12: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	42
Figura 23 – Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) da interação dos fatores concentração e volume para o método de Kynch	56
Figura 24 – Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) da interação dos fatores concentração e volume para o método de Biscaia Junior	58
Figura 25 – Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) da interação dos fatores concentração e volume para o método de Talmadge e Fitch.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos tipos de sedimentadores, de acordo com a geometria	24
Tabela 2 – Valores das variáveis independentes utilizados no DCCR para sedimentação em proveta	33
Tabela 3 – Matriz do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)	34
Tabela 4 – Características das provetas utilizadas para cada volume do experimento	34
Tabela 5 – Especificação Técnica do Carbonato de cálcio.....	35
Tabela 6 – Área do sedimentador contínuo a partir de ensaios de proveta para os modelos matemáticos de: (a) Kynch, (b) Talmadge e Fitch e (c) Biscaia Junior	54
Tabela 7 – Efeitos dos fatores para a área calculada a partir do Método de Kynch.....	55
Tabela 8 – Efeitos dos fatores para a área calculada a partir do Método de Biscaia Junior....	57
Tabela 9 – Efeitos dos fatores para a área calculada a partir do Método de Talmadge e Fitch	59
Tabela 10 – Ensaio 1: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 41 g.L ⁻¹	66
Tabela 11 – Ensaio 2: Proveta de 1000 mL, utilizando volume de 800 mL e concentração de 41 g.L ⁻¹	67
Tabela 12 – Ensaio 3: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 119 g.L ⁻¹	68
Tabela 13 – Ensaio 4: Proveta de 1000 mL, volume de 800 mL e concentração de 119 g.L ⁻¹	69
Tabela 14 – Ensaio 5: Proveta de 100 mL, utilizando volume de 77 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	70
Tabela 15 – Ensaio 6: Proveta de 2000 mL, utilizando volume de 923 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	71
Tabela 16 – Ensaio 7: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 25 g.L ⁻¹	72

Tabela 17 – Ensaio 8: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 135 g.L ⁻¹	73
Tabela 18 – Ensaio 9: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	74
Tabela 19 – Ensaio 10: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	75
Tabela 20 – Ensaio 11: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	76
Tabela 21 – Ensaio 12: Proveta de 500 mL, volume de 500 mL e concentração de 80 g.L ⁻¹	77

LISTA DE SIGLAS

DCCR	Delineamento Composto Central Rotativo
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
UFT	Universidade Federal do Tocantins

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de sedimentação = seção transversal do sedimentador	$[M^0L^2T^0]$
C	Concentração da suspensão na zona limite	$[M^1L^{-3}T^0]$
C ₀	Concentração inicial da suspensão	$[M^1L^{-3}T^0]$
C _A	Concentração de sólidos na suspensão alimentada	$[M^1L^{-3}T^0]$
C _C	Concentração no ponto crítico	$[M^1L^{-3}T^0]$
C _e	Concentração ao final do período de espessamento	$[M^1L^{-3}T^0]$
D	Diâmetro	$[M^0L^1T^0]$
F _f	Força de fricção entre partículas e o fluido	$[M^1L^1T^{-2}]$
F _g	Força gravitacional	$[M^1L^1T^{-2}]$
F _l	Força de empuxo	$[M^1L^1T^{-2}]$
Q	Vazão volumétrica de alimentação	$[M^0L^3T^{-1}]$
Q _A	Vazão volumétrica da suspensão alimentada ao decantador	$[M^0L^3T^{-1}]$
T	Tempo até atingir a altura da interface em análise	$[M^0L^0T^1]$
T _c	Tempo necessário para se atingir o ponto crítico	$[M^0L^0T^1]$
T _e	Tempo necessário para o espessamento	$[M^0L^0T^1]$
T _{min}	Tempo mínimo necessário à formação do espessado	$[M^0L^0T^1]$
v _s	Velocidade de sedimentação	$[M^0L^1T^{-1}]$
x ₁	Variável independente do DCCR que representa o volume	$[M^0L^3T^0]$
x ₂	Variável independente do DCCR que representa a concentração	$[M^1L^{-3}T^0]$
Z	Altura da Interface	$[M^0L^1T^0]$
Z ₀	Altura inicial da suspensão	$[M^0L^1T^0]$
Z _c	Altura da interface no ponto crítico	$[M^0L^1T^0]$
Z _e	Altura ao final do período de espessamento	$[M^0L^1T^0]$
Z _i	Ponto no qual a tangente toca o eixo y	$[M^0L^1T^0]$
Z _{min}	Altura mínima necessário à formação do espessado	$[M^0L^1T^0]$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Separação Sólido-Líquido	19
3.2 Sedimentação.....	19
3.2.1 Zonas de Sedimentação	21
3.2.2 Fatores que influenciam a sedimentação	23
3.3 Tipos de Sedimentadores.....	23
3.4 Dimensionamento de Sedimentadores	26
3.4.1 Método de Kynch (1952).....	26
3.4.2 Método de Talmadge e Fitch (1955)	28
3.4.3 Método de Biscaia Junior (1982)	30
3.5 Metodologia de Superfície de Resposta	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1 Planejamento Experimental.....	33
4.2 Ensaios de sedimentação em proveta	34
4.3 Análise dos Dados	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Curvas de sedimentação e dimensionamento da área.....	36
5.2 Efeitos dos Fatores e Superfície de Resposta	55
6 CONCLUSÃO.....	61
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	61

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
8 APÊNDICE A	66

1 INTRODUÇÃO

A sedimentação é uma operação unitária que consiste no processo de separação sólido-líquido de uma suspensão, por ação da força da gravidade, resultando em um líquido clarificado e uma lama espessada.

Existem fatores que influenciam a sedimentação de uma suspensão, como a concentração de sólidos e a área disponível para que a sedimentação aconteça. Suspensões muito concentradas em relação a uma partícula isolada apresentam características de sedimentação muito diferentes, pois assumem uma sedimentação obstada onde a taxa de sedimentação deixa de ser constante e passa a assumir um perfil decrescente. Já a presença de paredes ou obstáculos no trajeto da partícula promovem a redução da taxa de sedimentação, por isso é importante que o sedimentador tenha uma área grande o suficiente para que o processo aconteça livremente, sem que as partículas sejam indevidamente desaceleradas.

Os sedimentadores são os equipamentos responsáveis por efetuar em escala industrial a sedimentação, e se destacam pela simplicidade operacional e baixo custo. São vastamente utilizados nas indústrias de alimentos, química, farmacêutica e de beneficiamento de minérios. Alguns exemplos da aplicação desse equipamento são no processo de clarificação de um produto, na obtenção de polpas com concentração de sólidos desejada a fim de atender uma operação unitária posterior, e também no tratamento de resíduos e efluentes.

De acordo com a sua operação, os sedimentadores podem ser classificados como contínuos ou descontínuos, sendo os que funcionam continuamente os mais utilizados na indústria. Os modelos contínuos convencionais são construídos geralmente com seção circular, onde a alimentação é feita no topo do equipamento e possuem dispositivos para descarga do *overflow* (saída do líquido límpido ou clarificado) e do *underflow* (saída do espessado ou lama). Já os modelos não convencionais são denominados assim quando passaram por qualquer modificação, se diferindo do convencional, como na mudança dos mecanismos de raspagem e retirada da lama ou no modo de alimentação da suspensão, a fim de se adaptar a uma situação específica.

O dimensionamento de sedimentadores contínuos pode ser realizado a partir de dados experimentais obtidos em ensaios de proveta realizados em laboratório. As informações da sedimentação descontínua servem como base para o projeto de

sedimentadores contínuos, permitindo a construção de curvas de sedimentação da suspensão e, posteriormente, a aplicação de modelos matemáticos para o cálculo das variáveis de projeto. Kynch (1952) foi um dos precursores a propor um modelo matemático para o dimensionamento de sedimentadores, abrindo caminho a partir de sua teoria para pesquisadores como Talmagde e Fitch (1955) e Biscaia Junior (1982), que formularam os três modelos matemáticos em ênfase neste trabalho.

A aplicação de modelos matemáticos fornece resultados que permitem compreender o dimensionamento e conseqüentemente, possibilita a proposição de melhorias na performance do equipamento e aumento da sua eficiência.

Entretanto, o uso de modelos deve ser acompanhado de dados obtidos em condições que minimizem as incertezas inerentes ao ensaio em proveta como o efeito de parede, profundidade e concentração dos sólidos. Com isso, aplicar um planejamento estatístico como o Delineamento Composto Central Rotacional permite realizar a seleção de variáveis, destacando as mais significativas e quantificando suas interações, o que agrega uma grande economia de experimentos e, conseqüentemente, tempo, esforços e custos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi dimensionar um sedimentador contínuo a partir de ensaios de proveta e estabelecer condições operacionais para os ensaios que minimizem as incertezas dos resultados, aplicando modelos matemáticos e a Metodologia de Superfície de Resposta.

2.2 Objetivos específicos

- Obtenção das curvas de sedimentação das suspensões aquosas de carbonato de cálcio nas condições estabelecidas através do planejamento experimental DCCR;
- Determinar a área de um sedimentador contínuo através dos modelos matemáticos de Kynch (1952), Talmagde e Fitch (1955) e Biscaia Junior (1982) a partir dos dados obtidos nos ensaios de proveta;
- Aplicar a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) aos resultados obtidos, a fim de avaliar o efeito da concentração da suspensão de carbonato de cálcio e do diâmetro da proveta no cálculo da área.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Separação Sólido-Líquido

Misturas entre sólidos e fluidos são extremamente comuns no cotidiano e, principalmente na indústria de alimentos. Está presente em processos simples como no preparo de sucos de frutas, filtros de água e coador de café, e também nos mais complexos com produção de alimentos, produtos farmacêuticos, refino de petróleo e tratamento de efluentes, sendo processos que necessitam de etapas de separação sólido-fluido e são operações unitárias fundamentais. (BASTOS & AFONSO, 2015)

Os métodos de separação são classificados de acordo com dois tipos de operações, sendo o primeiro o movimento relativo de fases, quando o sólido se desloca através do líquido em repouso, onde se destaca pelas operações de sedimentação, que podem ser subdivididas de acordo com a concentração da suspensão ou com o fim visado (clarificação ou espessamento), e o segundo quando o líquido se desloca através da fase estacionária sólida, exemplificada pela filtração. (GOMIDE, 1980; SMANIOTTO, 2017)

O estudo dos processos de separação sólido-líquido é de grande valor para o dimensionamento e elaboração de projetos de equipamentos modernos e de baixo custo, assim como, avaliar a sua performance na indústria. (AZEVEDO, 2009)

3.2 Sedimentação

Foust *et al.* (1982) conceituam sedimentação como o processo de separação de uma suspensão diluída, pela ação gravitacional, resultando em um líquido límpido e uma lama composta por um número considerável de sólidos.

Nesse processo, a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida acontece com a influência do campo gravitacional, proporcionando ao processo baixo custo devido a facilidade operacional. O equipamento utilizado para tal finalidade é denominado sedimentador, e a sua vasta utilização industrial estimula a procura por conhecimento em dimensionar e/ou operar estes equipamentos integrando eficiência para atingir os objetivos operacionais. (FRANÇA & MASSARANI, 2002)

As operações de sedimentação industrial podem ocorrer de forma descontínua ou contínua em decantadores denominados de acordo com a sua finalidade, seja espessador ou clarificador. (FOUST *et al.*, 1982)

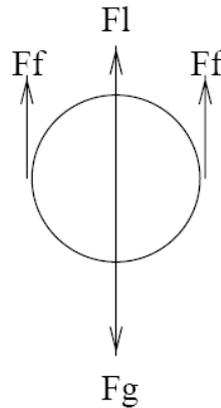
A sedimentação contínua pode ser realizada em um sedimentador do tipo cone invertido, recipiente cilíndrico ou retangular, preparado para conduzir lodos espessados até um orifício central de saída (descarga). Situado na parte superior ou central do sedimentador encontra-se um tanque onde o produto é fornecido por um canal de alimentação. A suspensão precipita diretamente sob o recipiente de alimentação, formando um lodo que se descarrega pelo fundo. Normalmente projetam-se os sedimentadores para funcionamento contínuo, mas os mesmos princípios de projeto são aplicáveis a unidades que funcionem descontinuamente. (COULSON&RICHARDSON, 1983)

Quando se mistura um sólido fino em água enchendo uma proveta graduada e deixando repousar, isso evidencia um processo de sedimentação descontínuo. Em escala industrial, esse processo geralmente ocorre em batelada utilizando tanques cilíndricos onde uma determinada suspensão é deixada por um tempo preestabelecido, acontecendo a separação do líquido límpido e da lama. (BUTZE, et al. 2010)

Existem quatro tipos de sedimentação que variam de acordo com a concentração de sólido e as características das partículas: sedimentação discreta, onde as partículas se sedimentam individualmente não ocorrendo interferência das demais; sedimentação de partículas floculadas (flocos de baixa concentração), onde a massa das partículas ficam maiores provocando aumento da velocidade de sedimentação; sedimentação em massa (flocos com alta concentração), que devido à grande quantidade de partículas torna a zona clarificada mais perceptível e, por fim, a sedimentação por compressão, onde as partículas começam a se aglomerar no fundo e com o peso vão arrastando as que estão próximas, onde esse tipo de sedimentação é influenciada pelo tempo de retenção e pela altura das lamelas. (PERRY&GREEN, 1998)

Quando temos uma sedimentação livre com partículas discretas, é possível caracterizá-la levando em consideração somente a mecânica clássica (Figura 1), já que conta-se apenas com as características físico-químicas da partícula como agentes na sedimentação tendo como base o princípio de Arquimedes, em que o empuxo é igual à massa de água deslocada pela partícula e a força gravitacional que age sobre a partícula (GUIMARÃES, 2010)

Figura 1 – Diagrama de forças na sedimentação de partículas discretas



Fonte: Guimarães (2010)

Onde:

F_f – força de fricção entre partículas e o fluido;

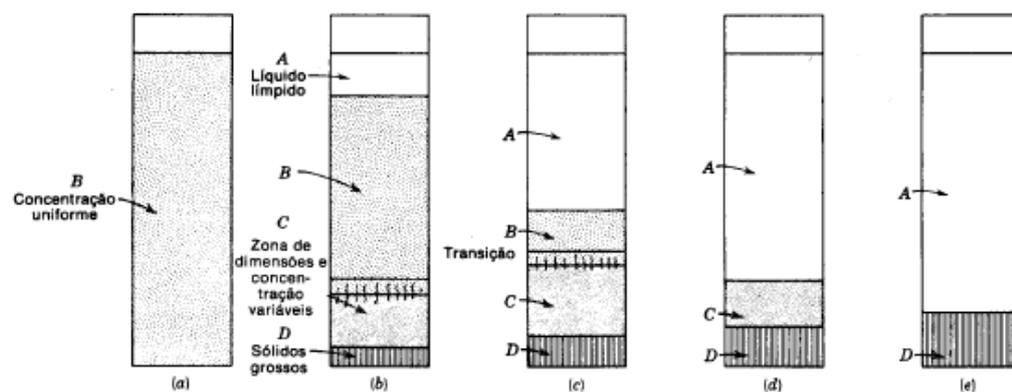
F_l – força de empuxo;

F_g – força gravitacional.

3.2.1 Zonas de Sedimentação

De acordo com o estudo de Foust *et al.*, (1982), a melhor forma de visualizar o mecanismo de sedimentação é através da observação de um ensaio de proveta contendo uma suspensão de sólidos (Figura 2).

Figura 2 – Ensaio de sedimentação em proveta



Fonte: Foust (1982)

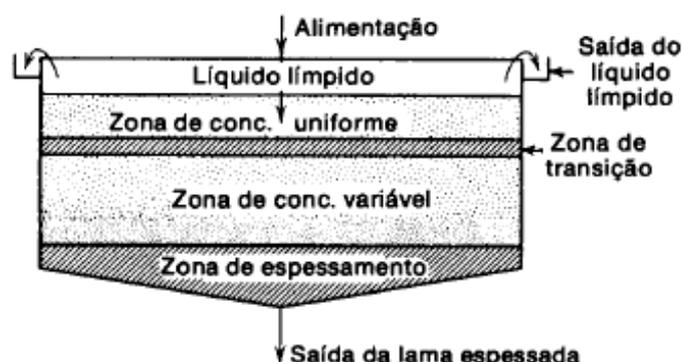
Como é ilustrado na Figura 2, no início todas as partículas começam a sedimentar e rapidamente se aproximam de suas respectivas velocidades terminais, estabelecendo zonas de concentração diferentes. Sendo elas:

- A. Região de líquido límpido, onde encontra-se a menor concentração de sólidos da suspensão.
- B. Região de concentração uniforme, com aproximadamente a mesma concentração e distribuição que a solução inicial. Nesta zona, quando a suspensão inicial for de partículas bem uniformes em dimensões menores, a linha entre A e B é bastante nítida.
- C. Região de distribuição variável de tamanhos e de concentração não-uniforme.
- D. Região de sólidos sedimentados que inclui, predominantemente, as partículas mais pesadas e com sedimentação mais rápida.

Os experimentos para obter curvas de sedimentação para soluções concentradas ou diluídas devem ser conduzidos de maneira diferente, visto que, em testes de sedimentação de soluções concentradas é perceptível a formação de interfaces e regiões de diferentes concentrações de sólidos. Já em soluções diluídas não é possível esta diferenciação, onde as únicas fases perceptíveis são o depósito de sólidos ao fundo e a própria solução. (MEDEIROS, 2014)

Quando se trata de um equipamento de sedimentação (sedimentadores), seja operando em regime contínuo ou descontínuo, as mesmas zonas estarão presentes. A Figura 3 apresenta as zonas de sedimentação em um sedimentador de fluxo contínuo.

Figura 3 – Zonas de sedimentação apresentadas em um sedimentador contínuo



Fonte: Foust (1982)

3.2.2 Fatores que influenciam a sedimentação

Aspectos da partícula como a forma, densidade e tamanho são alguns dos fatores que influenciam a sedimentação de uma suspensão. A distribuição das partículas também é um fator importante, pois nota-se que as de diâmetro maior sedimentam mais rápido, enquanto as de diâmetro menor tendem a ter um tempo de retenção maior. (MEDEIROS, 2014)

Segundo Simões (2014) a natureza das partículas, o pré-tratamento, o efeito de concentração de sólidos e a área do sedimentador, são fatores que influenciam o processo de sedimentação. Suspensões muito concentradas em relação a uma partícula isolada apresentam características de sedimentação bem diferentes, pois assumem uma sedimentação obstada onde a taxa de sedimentação deixa de ser constante e passa a assumir um perfil decrescente, evidenciando o efeito da concentração.

De modo geral, o tipo de sedimentação depende da concentração de sólidos na suspensão. Em sólidos finos, quando sem interferência mútua das partículas, a sedimentação é denominada como sedimentação livre e, havendo interferência, sedimentação retardada. Já na separação de sólidos grosseiros, a operação é mais simples de conduzir, podendo ser realizada em tanques que operam em batelada ou em processo contínuo, onde as partículas podem ser retiradas pelo fundo do decantador e o fluido um pouco acima. (GOMIDE, 1980)

A geometria e as dimensões do sedimentador também são fatores que exercem influência. As paredes ou presença de obstáculos no trajeto da partícula promovem a redução da taxa de sedimentação, por isso, é importante que o tanque tenha uma área grande o suficiente para que o processo de sedimentação aconteça livremente, sem que as partículas sejam indevidamente desaceleradas. (LUZ et al., 2010)

3.3 Tipos de Sedimentadores

Os sedimentadores se classificam em convencionais e não-convencionais. Os convencionais apresentam o diâmetro bem maior que a altura e são constituídos de um tanque com alimentação e dispositivos para descarga do *overflow* (saída do líquido límpido ou clarificado) e do *underflow* (saída do espessado ou lama). Já os não-convencionais são classificados assim quando são submetidos a qualquer tipo de modificação, se diferindo do convencional, como as alterações mecânicas nos mecanismos de raspagem e retirada da lama ou no modo de alimentação da suspensão, a fim de se adaptar a uma situação específica. (LIRA, 2010)

Um sedimentador pode apresentar dois tipos de operação: Contínua ou descontínua. O sedimentador contínuo convencional é mais usual em processos industriais, onde possui três correntes de fluxo: a alimentação, contendo a suspensão que se deseja processar; o *overflow* e a corrente de *underflow*. (FRANÇA & MASSARANI, 2002)

Quanto a geometria, os principais modelos encontrados são os sedimentadores retangulares, circulares e quadrados. Na hora da escolha do melhor modelo a ser utilizado deve-se levar em consideração as vantagens e desvantagens apresentadas por cada um (Tabela 1).

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos tipos de sedimentadores, de acordo com a geometria

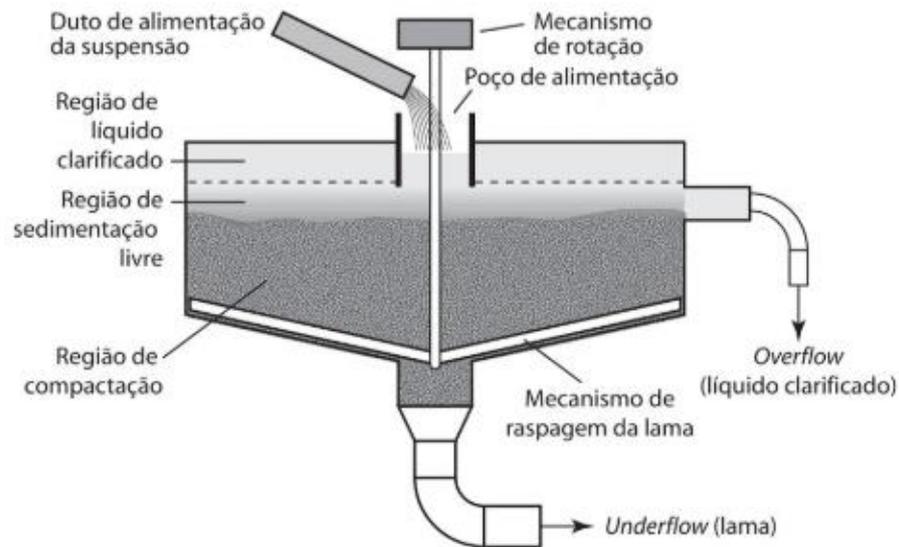
Tipo de Sedimentador			
	Circular	Retangular	Quadrado
Vantagens	Tempos de retenção menores para as lamas, melhor efeito de filtragem, baixos requisitos de manutenção mais simples e mais confiável.	Menores custos na construção, maior fluxo e menor probabilidade de curto-circuito do que os sedimentadores circulares e perda de carga baixa para a distribuição de fluxo.	Menor área de implementação.
Desvantagens	Perda de carga elevada.	Menor tempo de retenção para as lamas, menos eficaz para sólidos de alta carga e aumento na manutenção dos coletores.	Acumulação de sólidos nos cantos, sendo necessário instalar equipamento de limpeza e estagnação nos cantos.

Fonte: Adaptado de LIMA (2014)

Em escala industrial, um sedimentador circular costuma ter diâmetros que variam entre 3 e 60 metros, sendo os valores mais frequentes entre 10 e 40 metros. Como é ilustrado na Figura 4, a entrada de alimentação no sedimentador pode ser processada através do fornecimento na parte central (onde poderá ter acoplado um poço de floculação) ou através do

fornecimento lateral, que é uma opção menos utilizada industrialmente. O sistema de remoção de lama do sedimentador circular é efetuado através de estruturas circulares de raspagem mecânica ou de sucção (FONSECA, 2012; LUNA, 2018).

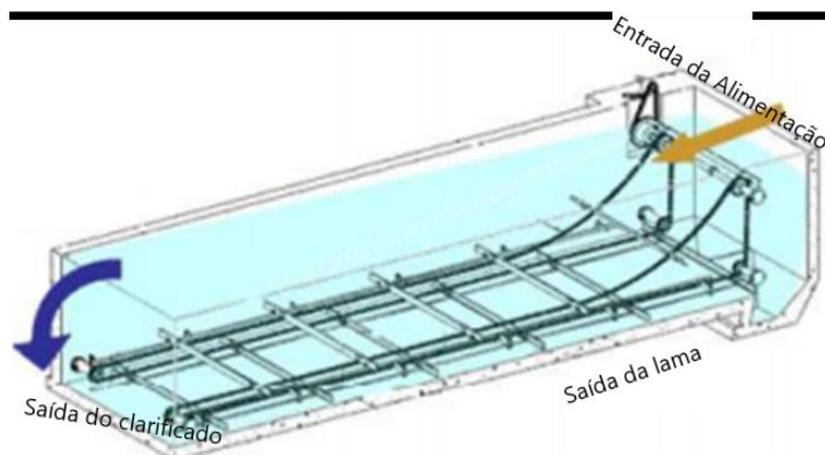
Figura 4 – Esquema operacional de um sedimentador contínuo convencional



Fonte: Cremasco (2012)

Os sedimentadores de geometria quadrada e retangular, atualmente, são menos utilizados devido ao fato de ocorrerem acumulações indesejadas de lamas nos cantos do equipamento, demandando mais tempo para higienização, o que pode acarretar prejuízos à indústria. A Figura 5 apresenta a vista interior de um modelo de sedimentador retangular.

Figura 5 – Interior de um sedimentador retangular



Fonte: Adaptado de Luna (2018)

3.4 Dimensionamento de Sedimentadores

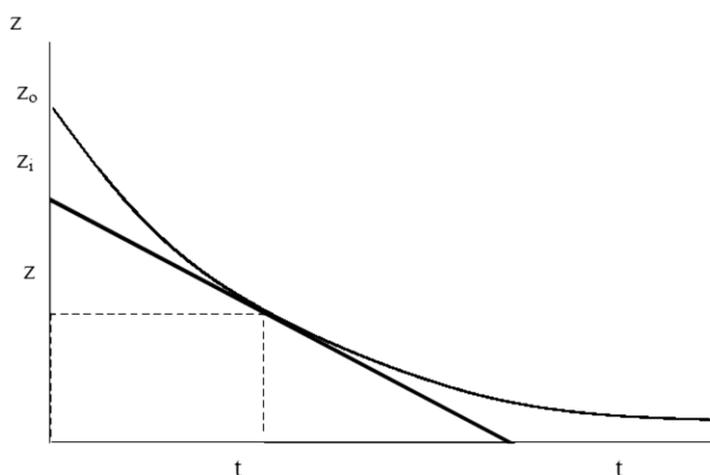
O dimensionamento de sedimentadores contínuos pode ser realizado a partir de dados experimentais obtidos em ensaios de proveta realizados em laboratório, uma vez que, as informações da sedimentação descontínua servem como base para o projeto de sedimentadores contínuos. Os ensaios de laboratório permitem obter a curva de sedimentação da suspensão, sendo conduzidos de modo diferente quando se tratar de suspensão diluída ou concentrada. (GOMIDE, 1980)

De forma geral, o projeto consiste sobretudo no cálculo do diâmetro e da altura do sedimentador, com a finalidade de espessar ou clarificar uma determinada solução (DAMASCENO e MASSARANI, 1993). Uma forma de conhecer melhor os sedimentadores é utilizar modelos matemáticos para o seu projeto.

3.4.1 Método de Kynch (1952)

Um dos precursores a sugerir um modelo matemático para a sedimentação foi Kynch, em 1952. Kynch desenvolveu um método de dimensionamento que propunha apenas um ensaio que forneça a curva de sedimentação de altura (Z) em relação ao tempo (T), Figura 6, possibilitando que a concentração (C) e velocidade de sedimentação (v_s) possam ser retirados diretamente da curva.

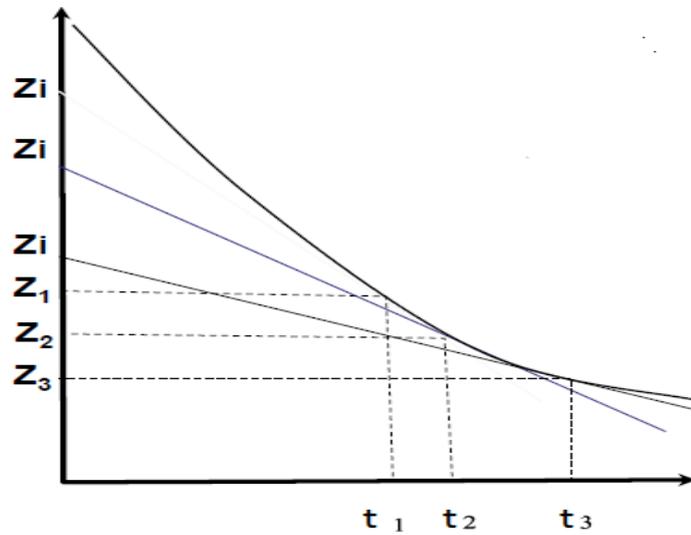
Figura 6 – Determinação gráfica do método de Kynch.



Fonte: Lira (2010).

A seguir, traçam-se tangentes em diversos pontos da curva e determinam-se os valores de T , Z e Z_i (ponto no qual a tangente toca o eixo y), como é apresentado na Figura 7. (GUIMARÃES, 2010).

Figura 7 – Determinação gráfica das tangentes pelo método de Kynch



Fonte: Farias Neto (2011)

A Equação (1), apresentada abaixo é utilizada para o cálculo da concentração (C) e a Equação (2) para o cálculo da velocidade de sedimentação (vs):

$$C = \frac{C_0 Z_0}{Z_i} \quad (1)$$

$$vs = \frac{Z_i - Z}{T} \quad (2)$$

Onde:

C_0 – concentração inicial da suspensão;

Z_0 – altura inicial da suspensão;

Z_i – ponto no qual a tangente toca o eixo y;

Z – altura da interface;

T – tempo até atingir a altura da interface em análise.

Com a construção gráfica descrita, calculam-se os diversos pares de valores da concentração e da velocidade de sedimentação, com os quais são calculados os pontos correspondentes a área de seção transversal, Equação (3).

$$A = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_e} \right)}{vs} \quad (3)$$

Onde:

A – área de sedimentação = seção transversal do sedimentador;

Q_A – vazão volumétrica da suspensão alimentada ao decantador;

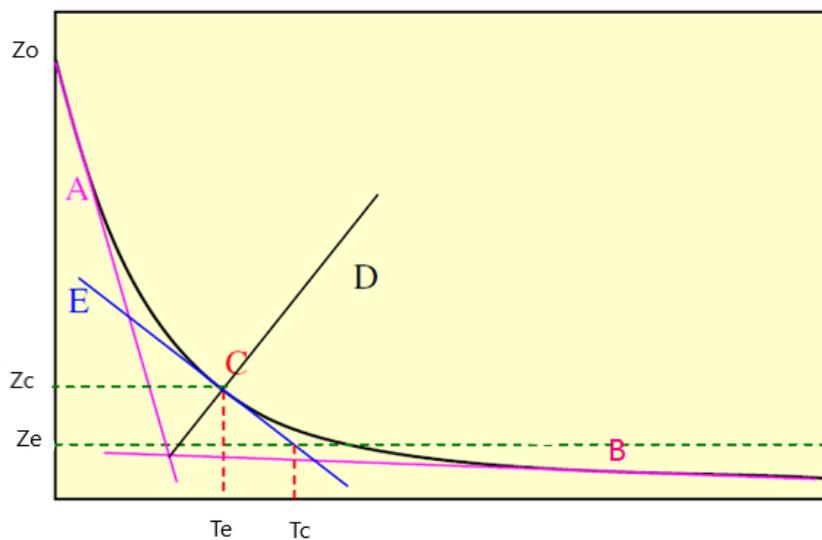
C_A – concentração de sólidos na suspensão alimentada;

C_e – concentração ao final do período de espessamento.

3.4.2 Método de Talmadge e Fitch (1955)

Talmadge e Fitch (1955), também inspirados na Teoria de Kynch, publicaram um estudo baseado na determinação do Ponto Crítico (Z_c , T_c) através de análise da curva de sedimentação, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Determinação das variáveis de projeto pelo método de Talmadge e Fitch



Fonte: Adaptado de Reis (2010)

Onde:

Z_0 – altura inicial da suspensão;

Z_c – altura da interface no ponto crítico;

Z_e – altura ao final do período de espessamento;

T_c – tempo necessário para se atingir o ponto crítico;

T_e – tempo necessário para o espessamento.

Medeiros (2014), resumiu este método nas seguintes 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. Localizar o ponto crítico (Z_c , T_c);
4. Traçar a bissetriz entre as duas retas;
5. Traçar uma tangente à curva de sedimentação passando pelo ponto crítico.

No ensaio de proveta a massa de sólidos é constante. No processo de espessamento ocorre a remoção de certa quantidade de líquido para que ocorra a alteração da concentração, tendo que:

$$C_0AZ_0 = C_CAZ_C = C_eAZ_e \quad (4)$$

Podendo ser reduzida a Equação (4.1), tratando-se de área constante.

$$C_0Z_0 = C_CZ_C = C_eZ_e \quad (4.1)$$

Onde:

C_0 – concentração inicial da suspensão;

A – área da seção transversal do sedimentador;

Z_0 – altura inicial da suspensão;

C_C – concentração no ponto crítico;

Z_C - altura da interface no ponto crítico;

C_e – concentração ao final do período de espessamento;

Z_e – altura ao final do período de espessamento.

A partir dos dados de um ensaio de sedimentação em proveta, a determinação da área mínima de um sedimentador contínuo se baseia no fato de que tendo C_0 , Z_0 e C_e , determina-se Z_e pela Equação (4.1) e, traçando uma reta até a tangente do ponto crítico encontra-se T_e , que é o tempo necessário para o espessamento. Com isso, a partir da aplicação da Equação (5) é possível o cálculo da área:

$$A = \frac{QT_e}{Z_0} \quad (5)$$

Onde:

A – área da seção transversal do sedimentador;

Q – vazão volumétrica de alimentação.

3.4.3 Método de Biscaia Junior (1982)

Creiasco (2012) destaca que um fator desfavorável do Método de Kynch está na necessidade de observação e análise detalhada da curva de sedimentação na região de transição, a fim de obter o valor máximo para a área do sedimentador. Partindo deste pressuposto, Biscaia Junior (1982) sugeriu uma simplificação ao procedimento de Kynch para o cálculo da área com a minimização da Equação (3), se baseado no fato de que a curva de sedimentação resulta na combinação de uma reta com uma exponencial, resultando na Equação (6).

$$A = \frac{Q \cdot T_{min}}{Z_0} \quad (6)$$

Onde:

A – área da seção transversal do sedimentador;

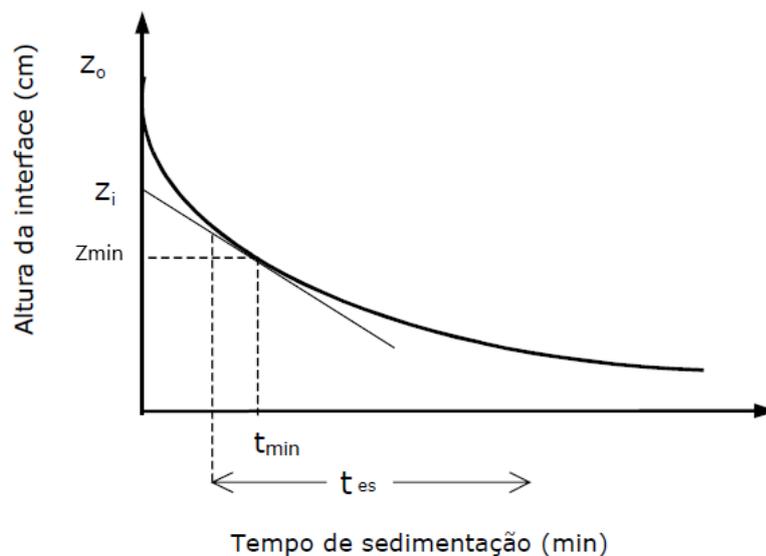
Q – vazão volumétrica de alimentação;

T_{min} – tempo mínimo necessário à formação do espessado.

Z_0 – altura inicial da suspensão;

Na figura 9 pode-se observar a representação gráfica para a determinação das variáveis de projeto pelo método de Biscaia Junior (1982).

Figura 9 – Determinação das variáveis de projeto pelo método de Biscaia Junior



Fonte: Medeiros (2014)

Calculando o Z_{\min} pela Equação (7) e, prolongado este ponto até a reta tangente e depois até a abscissa, têm-se o T_{\min} , que é o tempo mínimo necessário para a formação do espessado com uma dada percentagem de sólidos.

$$Z_{\min} = Z_0 \frac{C_0}{C_e} \quad (7)$$

Onde:

Z_{\min} – altura mínima necessário à formação do espessado;

C_0 – concentração inicial da suspensão;

C_e – concentração ao final do período de espessamento;

Vicente e Brito (2015) destacam que após a aplicação da Equação (7) deve-se plotar a curva de sedimentação exponencial, Z versus T , e assim, encontrar a respectiva equação da curva, como é apresentado na Equação (8). As variáveis a e b são os valores encontrados de acordo com a curva de sedimentação, e é possível determinar o T_{\min} isolando-o, como mostra a Equação (8.1).

$$Z_{\min} = a \cdot e^{-b \cdot t_{\min}} \quad (8)$$

$$t_{\min} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{Z_{\min}}{a} \right) \quad (8.1)$$

A Equação (9) permite calcular a velocidade de sedimentação (v_s) de sólidos em diferentes alturas da proveta, durante o ensaio de sedimentação.

$$v_s = \frac{Z_i - Z}{T_{\min}} \quad (9)$$

Após determinar o valor de T_{\min} e substituí-lo na Equação (6), é possível encontrar a área do sedimentador, A .

3.5 Metodologia de Superfície de Resposta

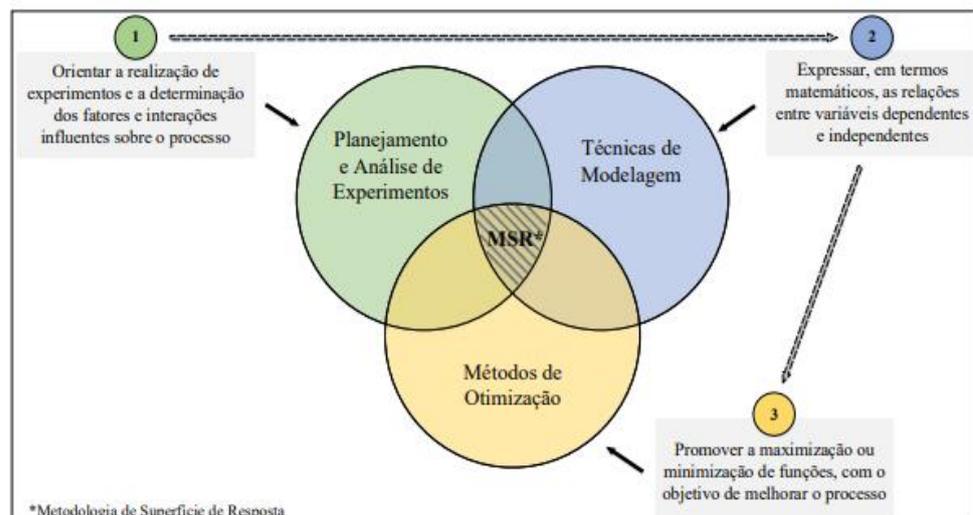
Um planejamento experimental fundamenta-se em um conjunto de experimentos definidos por uma matriz formada por diferentes combinações de níveis das variáveis estudadas e deve atender critérios desejáveis como: proporcionar boas estimativas para os coeficientes da função que será ajustada aos dados experimentais exigindo o menor número de experimentos possíveis e fornecer condições de avaliação dos coeficientes e do modelo matemático usado. (BEZERRA et al., 2008)

Entre as técnicas de planejamento experimental se destaca a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), devido a sua alta eficiência, poder de modelagem e capacidade de exploração dos sistemas estudados, principalmente para quantificar e interpretar as relações entre as respostas e os efeitos dos fatores. (ORLANDINI et. al, 2014)

Esse planejamento é, sobretudo, muito importante no início de um estudo experimental, pois permite realizar a seleção de variáveis destacando as mais significativas e quantificando suas interações, o que agrega uma grande economia de experimentos e, conseqüentemente, tempo, esforços e custos. A MSR é um agrupamento de métodos matemáticos e estatísticos, e consiste em encontrar uma relação funcional adequada entre a(s) resposta(s) de interesse e um conjunto de variáveis independentes, que são controláveis, no pressuposto de que existe esta relação funcional. (BREITKREITZ et. al, 2014; LEAL, 2015)

Quando se assume que existe uma relação funcional entre as variáveis independentes e a variável resposta, que sendo desconhecida tem que ser estimada, o objetivo do planejamento é explorar a superfície de resposta procurando o modelo a estimar que melhor se adequa aos dados experimentais e que melhor poderá caracterizar a verdadeira resposta. (LEAL, 2015)

Figura 10 – Componentes técnicos da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), seqüência geral de execução e descrição resumida de seus objetivos



Fonte: Oliveira (2018)

O que caracteriza a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é a interseção entre o planejamento e análise de experimentos, as técnicas de modelagem e os métodos de otimização. A Figura 10 fornece uma ilustração de seus componentes, como a descrição resumida de seus objetivos, e as setas unidirecionais expõem uma sequência geral de execução. De modo geral, o resultado dessa análise fornecerá os valores dos parâmetros de controle que produzem os melhores cenários para as respostas que, na prática, representam as características críticas para a qualidade dos processos. (OLIVEIRA, 2018)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Planejamento Experimental

Para a etapa de planejamento experimental utilizou-se o planejamento estatístico Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), realizando quatro repetições no ponto central e a interação de duas variáveis independentes: volume (x_1) e concentração (x_2), como mostrado na Tabela 2. A matriz DCCR apresentado na Tabela 3 foi desenvolvida pelo software Statistica 7.0 e gerou doze ensaios.

Tabela 2 – Valores das variáveis independentes utilizados no DCCR para sedimentação em proveta

Nível	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Volume (mL) (x_1)	77	200	500	800	923
Concentração (g/L) (x_2)	25	41	80	119	135

Tabela 3 – Matriz do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Ensaio	Volume (mL)	Concentração (g/L)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1,41	0
6	+1,41	0
7	0	-1,41
8	0	+1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

4.2 Ensaio de sedimentação em proveta

Os ensaios de sedimentação em proveta desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Operações Unitárias, localizado na unidade experimental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), campus Palmas. Foram selecionadas cinco provetas de capacidades volumétricas diferentes, onde cada uma atendia a um determinado volume, como é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Características das provetas utilizadas para cada volume do experimento

Volume (mL)	Proveta utilizada (mL)	Diâmetro (cm)
77	100	2,5
200	250	3,5
500	500	4,9
800	1000	6,3
923	2000	8,3

O carbonato de cálcio P.A. (CaCO_3) do fabricante Neon (Tabela 5) foi previamente padronizado em peneira Série Tyler malha 28, a fim de obter uma granulometria uniforme. Foram preparadas em balões volumétricos cada uma das suspensões (descritas nas Tabela 2 e 3 do DCCR), e o fluido utilizado foi água a 25°C. O balão volumétrico foi agitado visando a homogeneização da suspensão e, em seguida, todo o conteúdo transferido para a proveta. Um cronômetro foi acionado dando início ao experimento. Com o auxílio de uma escala milimétrica mediu-se a altura inicial da suspensão na proveta e, durante a sedimentação, mediu-se as alturas da interface em intervalos de tempo pré-determinados de 30 segundos. Cada ensaio foi finalizado quando as alturas das interfaces sólido-líquido apresentaram quatro marcações consecutivas com intervalo inferior a 0,5 mm.

Tabela 5 – Especificação Técnica do Carbonato de cálcio

Especificações	
Marca	Neon
Aparência	Pó fino branco
Peso molecular	100,09 g/mol

Fonte: Neon Comercial Ltda

4.3 Análise dos Dados

A partir dos dados obtidos nos ensaios de sedimentação em batelada da suspensão de carbonato de cálcio, foram construídas as curvas de sedimentação (altura em função do tempo) para cada experimento. Neste trabalho foram aplicados três modelos matemáticos para o dimensionamento da área do sedimentador: Modelo de Kynch (1952), Modelo de Talmagde e Fitch (1955) e Modelo de Biscaia Junior (1982). Estabeleceram-se as seguintes condições de entrada para realização dos cálculos: vazão volumétrica (Q) de 1000 $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e concentração desejada ao final do período de espessamento (C_e) de 400 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. Os resultados obtidos foram avaliados através da aplicação de Metodologia de Superfície de Resposta (MSR).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Curvas de sedimentação e dimensionamento da área

As curvas de sedimentação construídas a partir dos experimentos em proveta estão ilustradas nas Figuras 11 a 22.

Figura 11 – Curva de sedimentação do Ensaio 1: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 41 g.L^{-1}

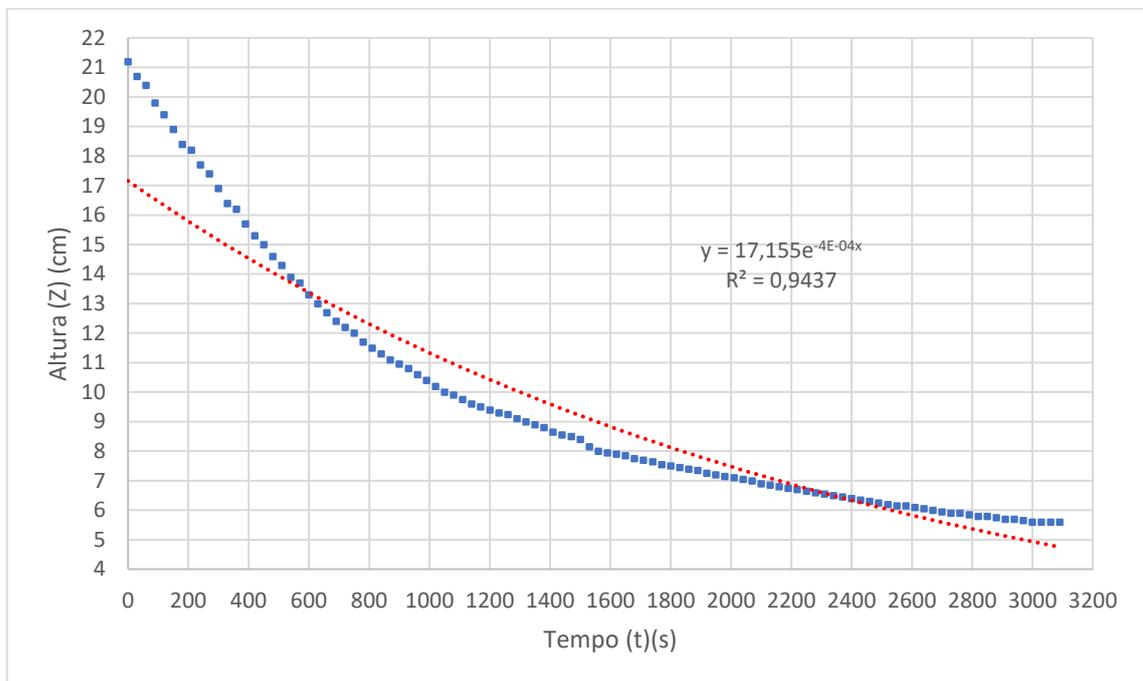


Figura 12 – Curva de sedimentação do Ensaio 2: Proveta de 1000 mL, utilizando volume de 800 mL e concentração de 41 g.L⁻¹

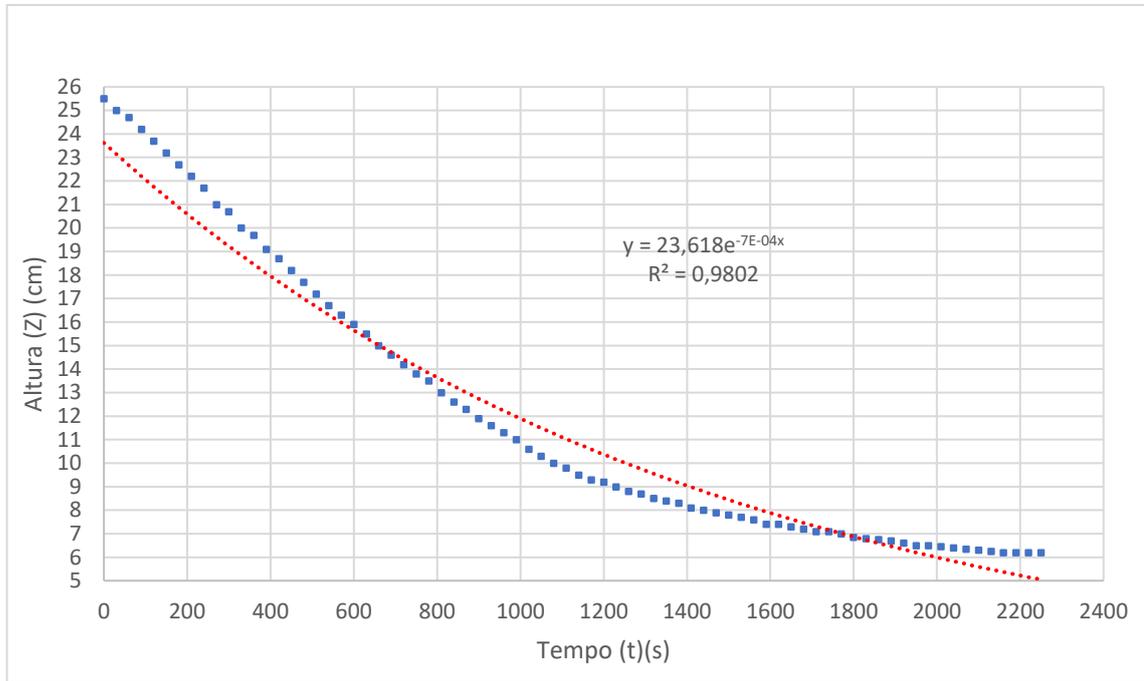


Figura 13 – Curva de sedimentação do Ensaio 3: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 119 g.L⁻¹

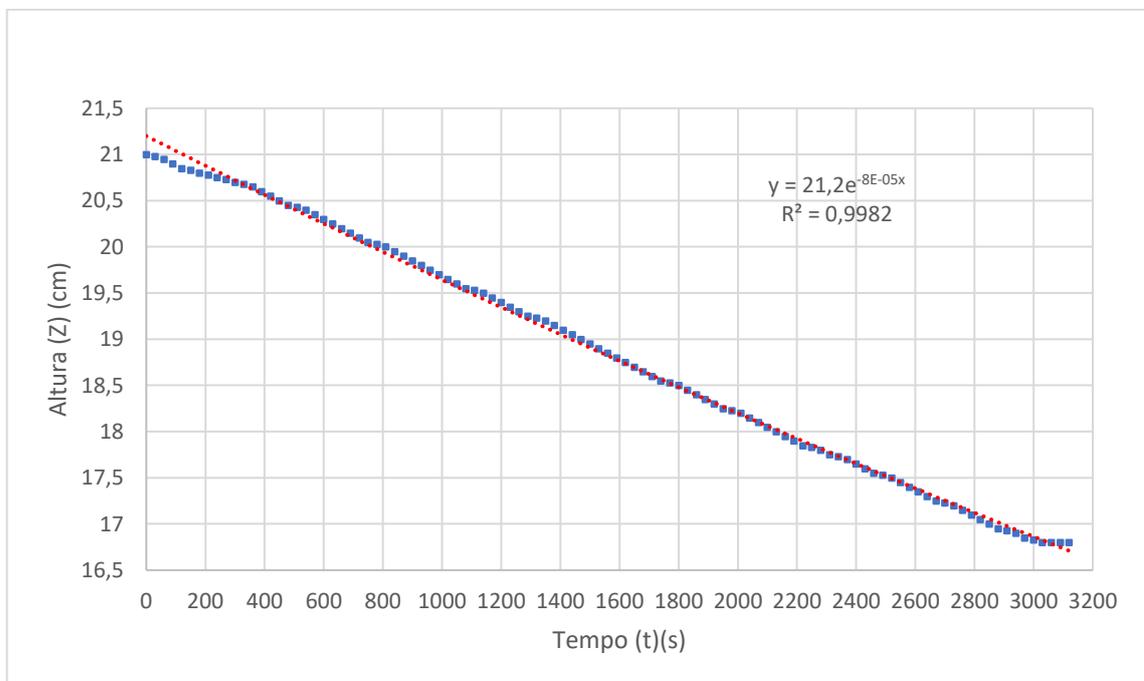


Figura 14 – Curva de sedimentação do Ensaio 4: Proveta de 1000 mL, utilizando volume de 800 mL e concentração de 119 g.L⁻¹

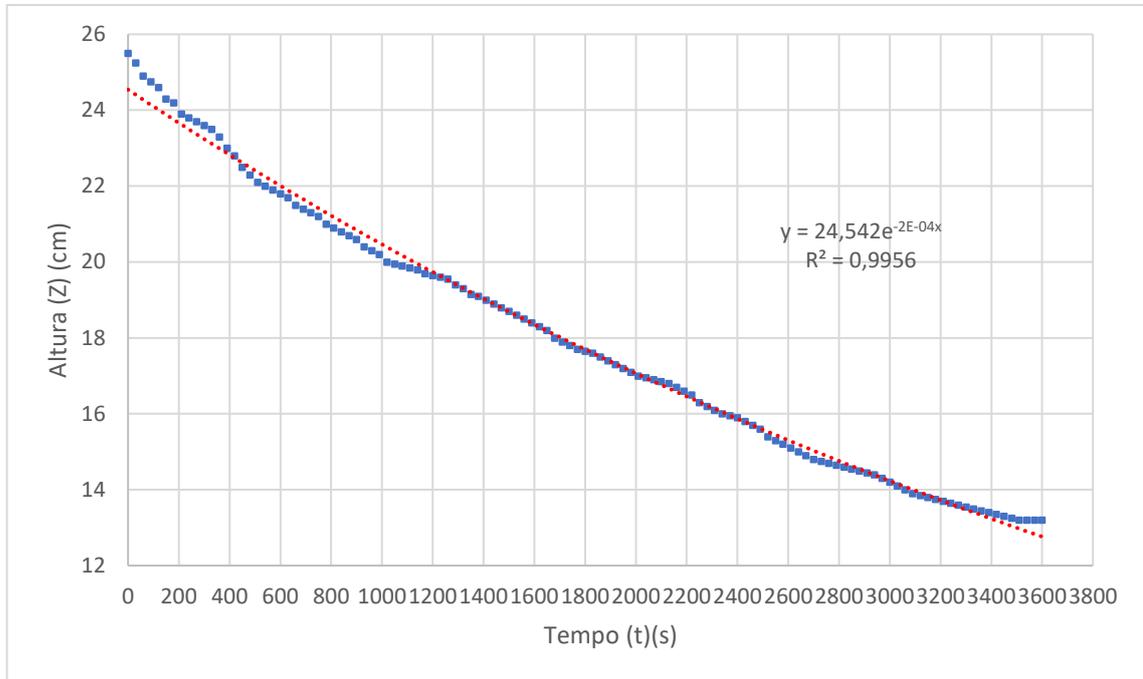


Figura 15 – Curva de sedimentação do Ensaio 5: Proveta de 100 mL, utilizando volume de 77 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

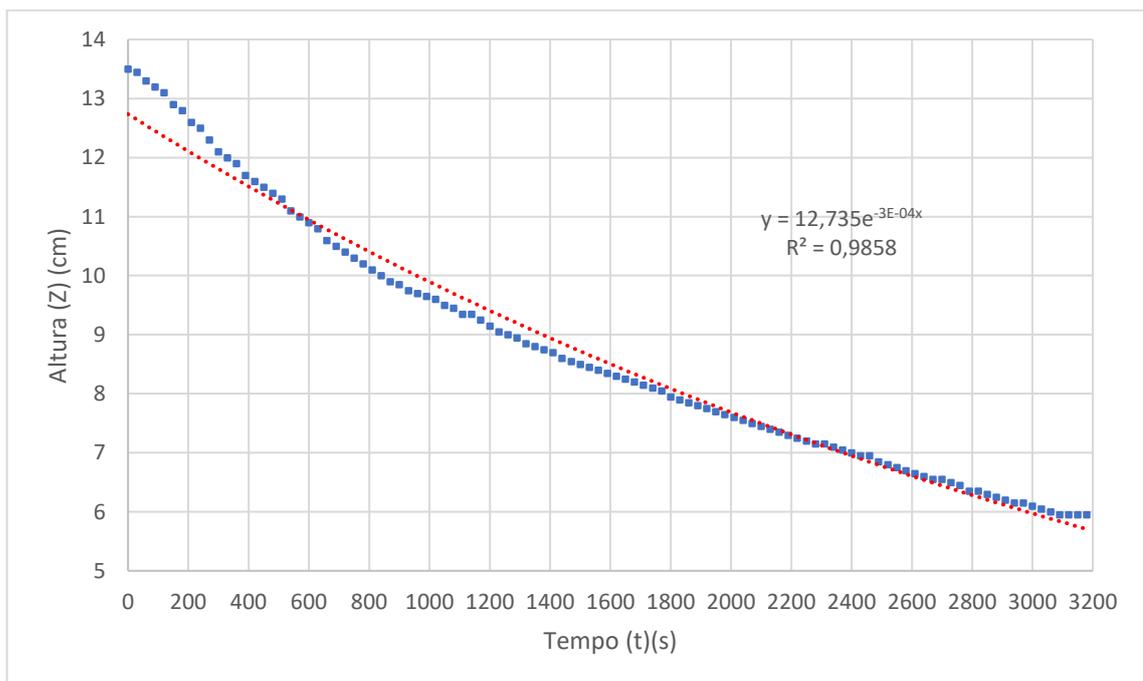


Figura 16 – Curva de sedimentação do Ensaio 6: Proveta de 2000 mL, utilizando volume de 923 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

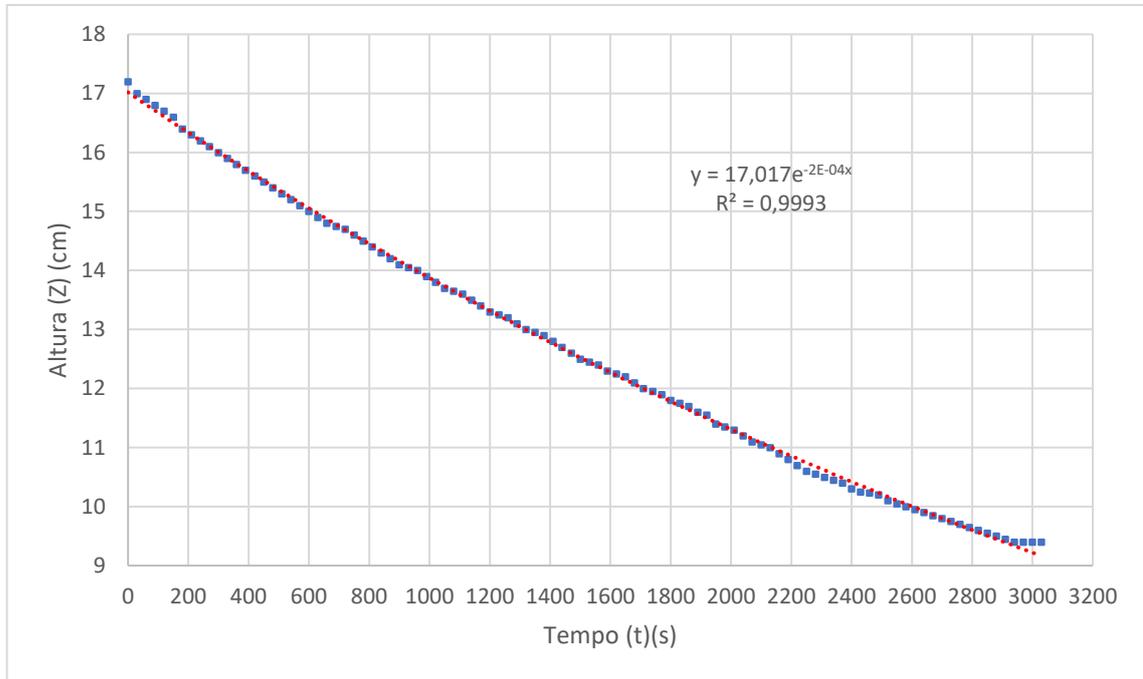


Figura 17 – Curva de sedimentação do Ensaio 7: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 25 g.L⁻¹

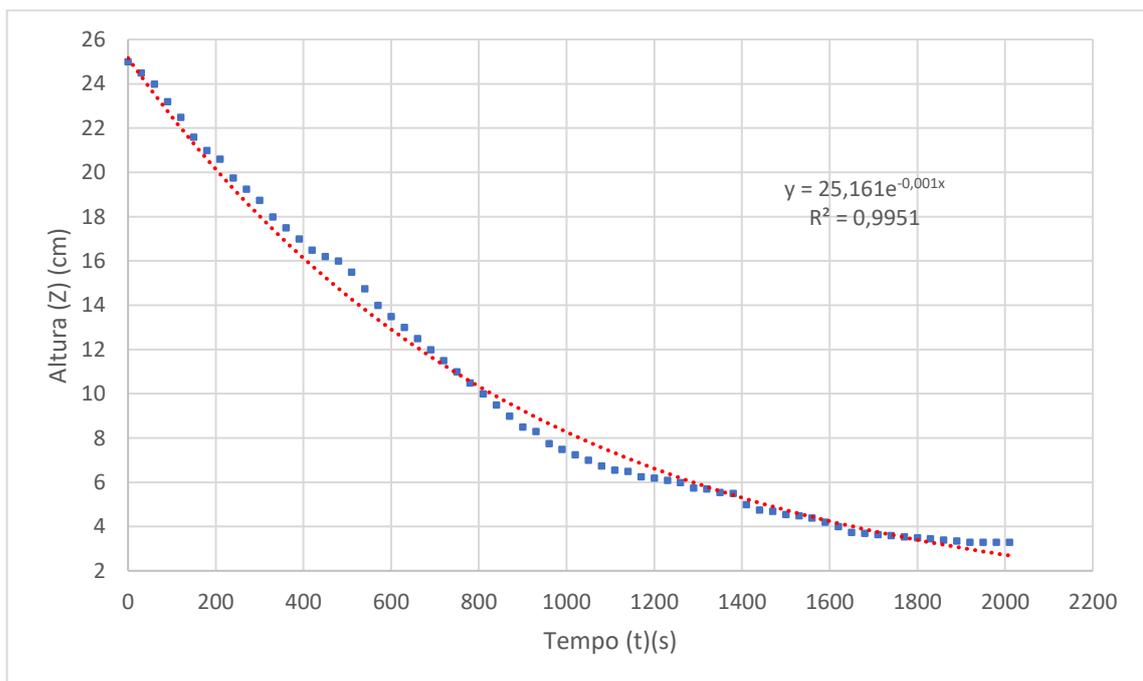


Figura 18 – Curva de sedimentação do Ensaio 8: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 135 g.L⁻¹

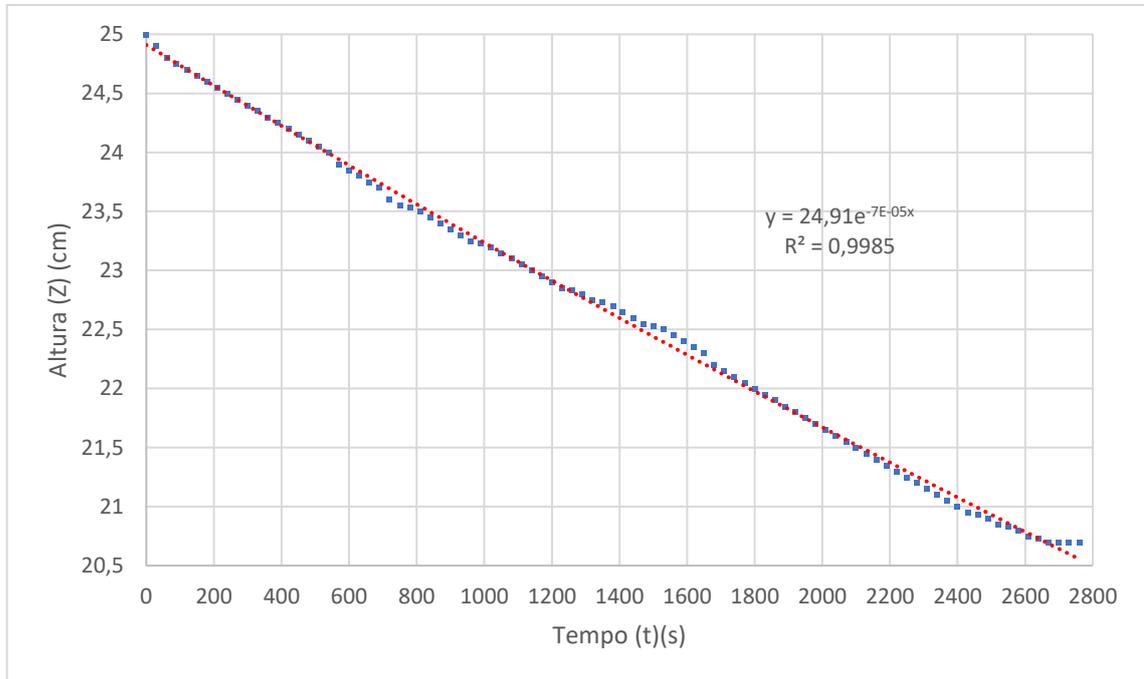


Figura 19 – Curva de sedimentação do Ensaio 9: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

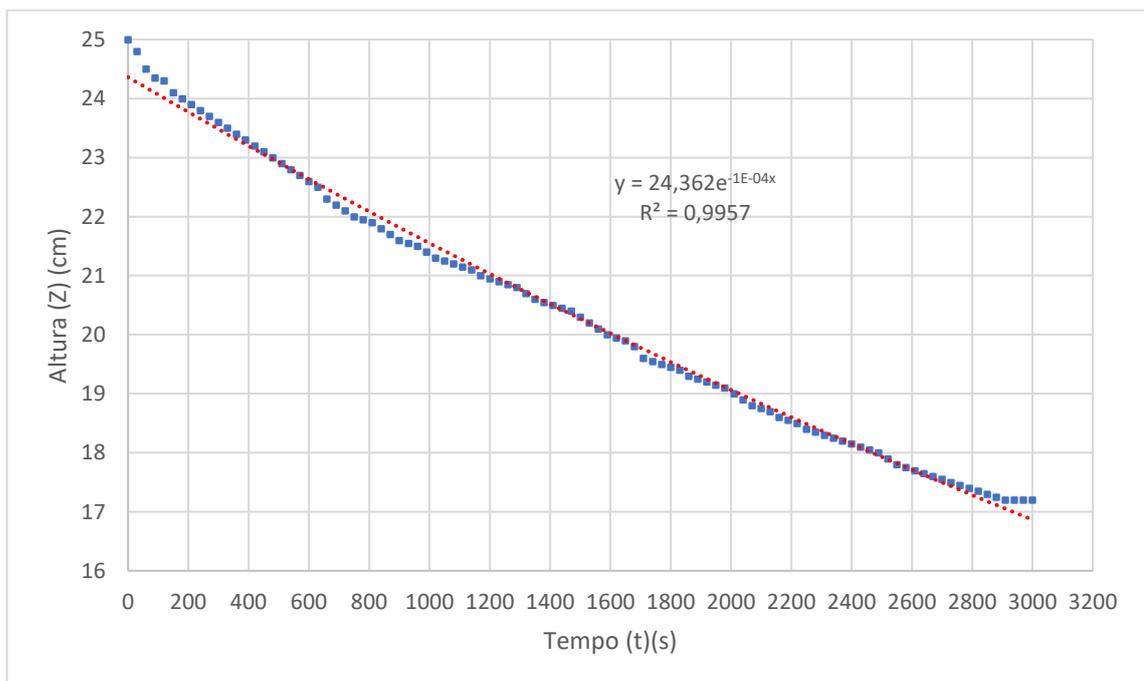


Figura 20 – Curva de sedimentação do Ensaio 10: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

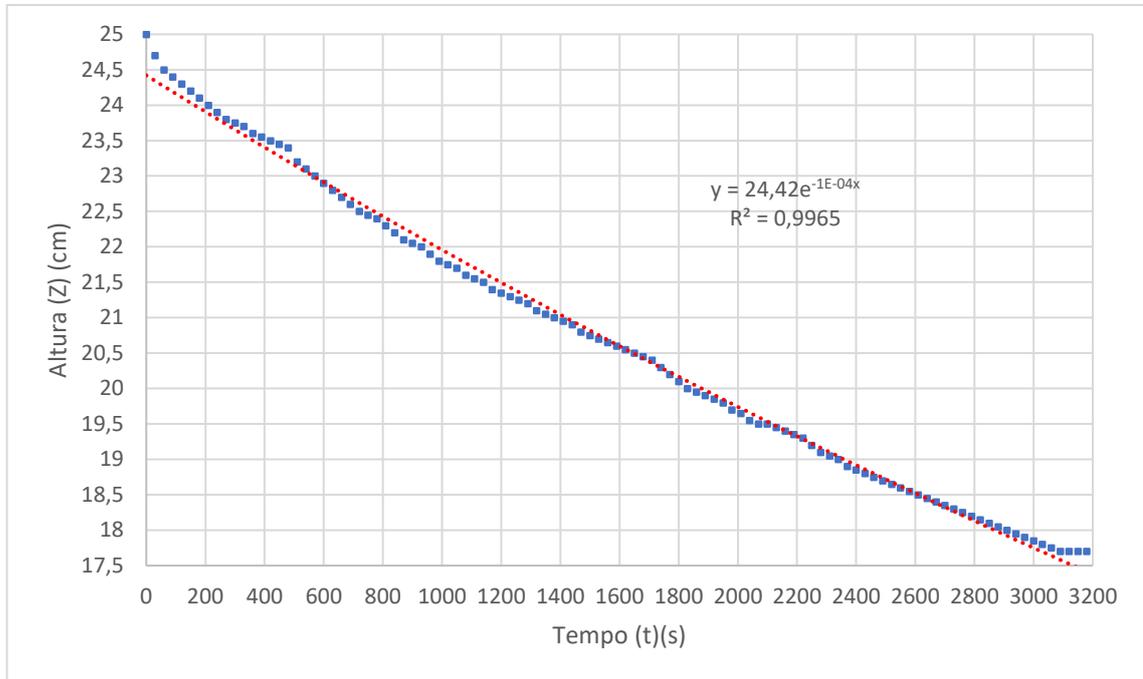


Figura 21 – Curva de sedimentação do Ensaio 11: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

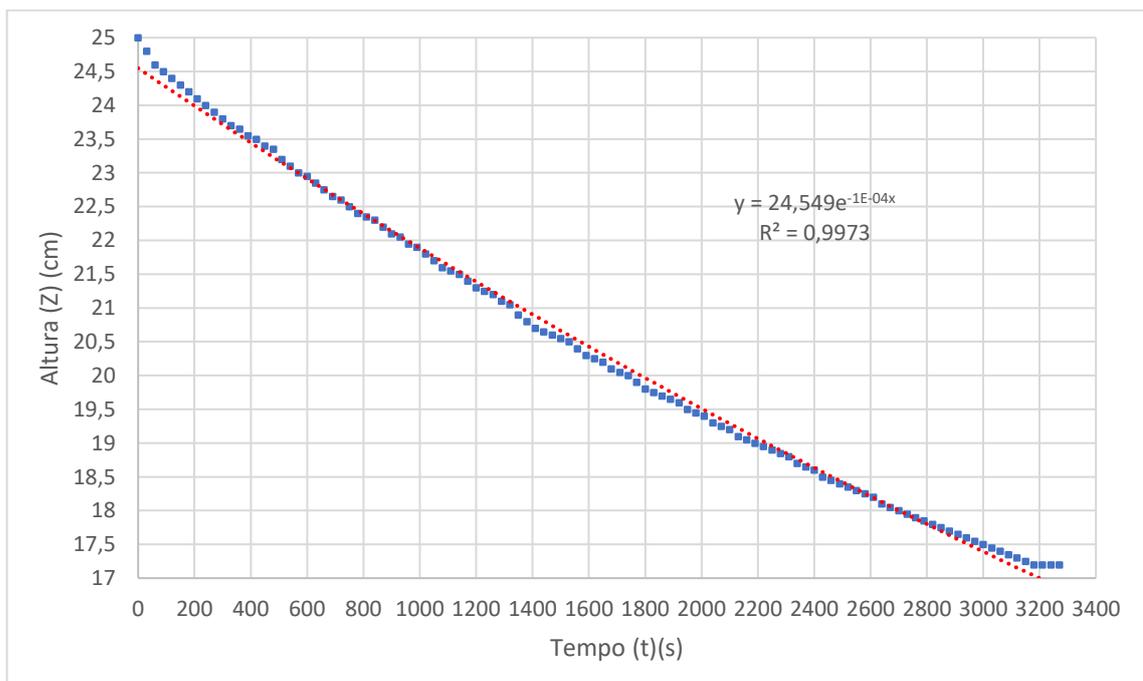
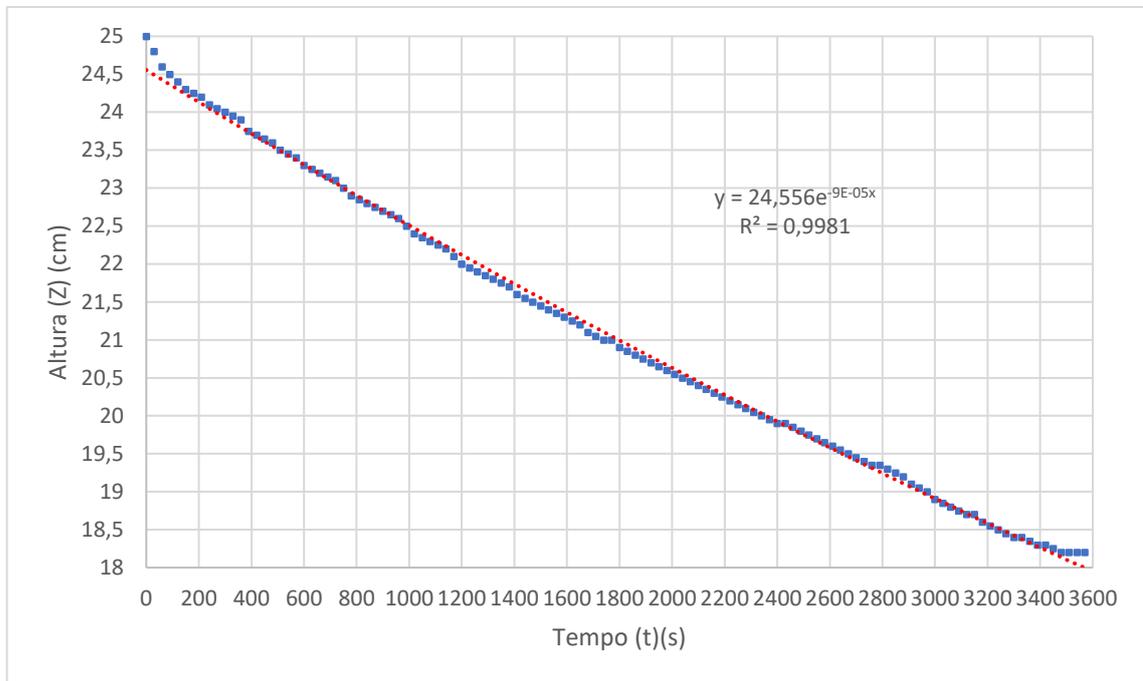


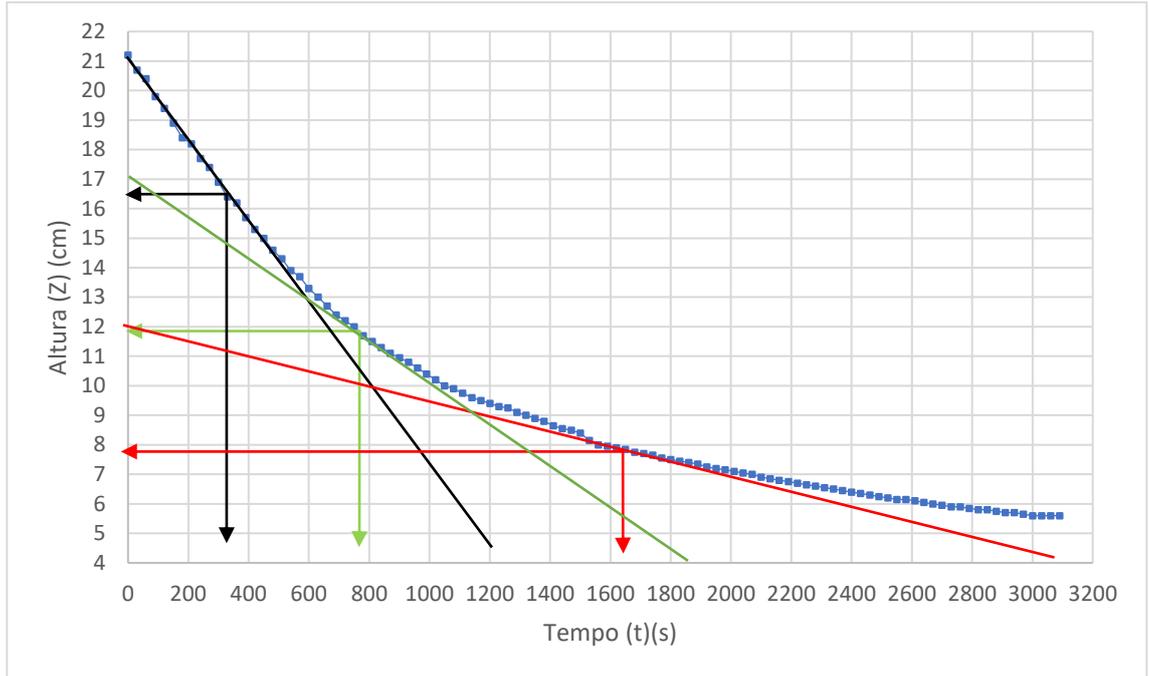
Figura 22 – Curva de sedimentação do Ensaio 12: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹



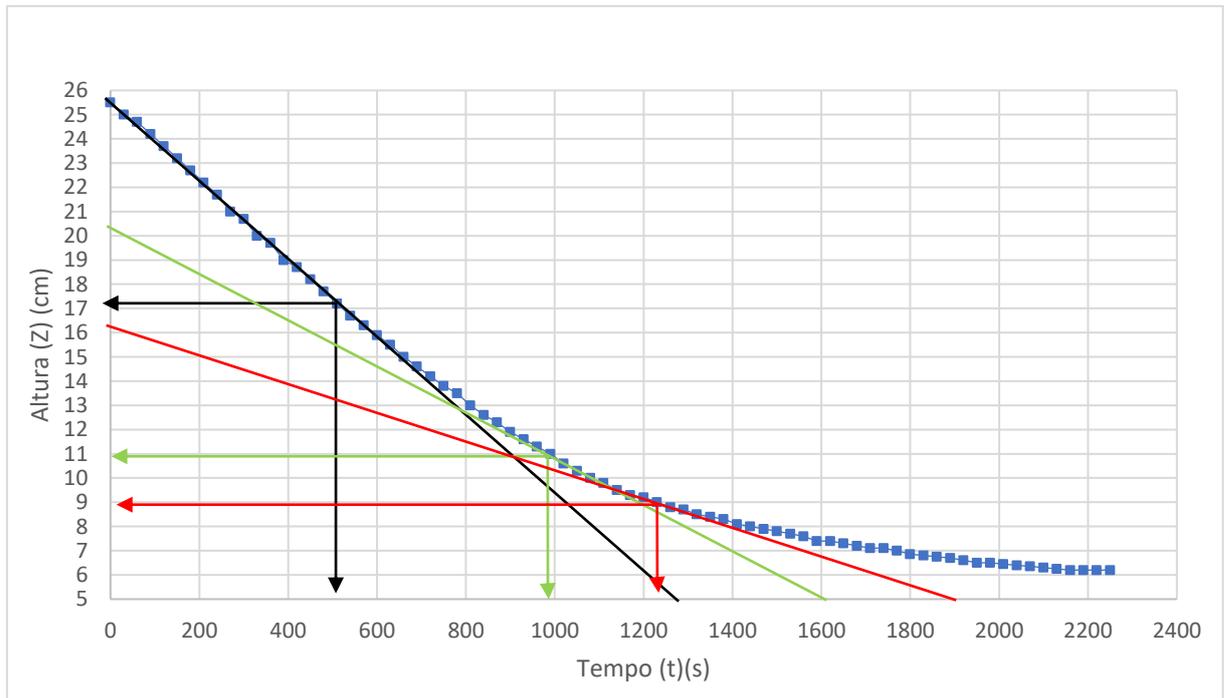
As curvas de sedimentação construídas tiveram excelentes coeficientes de correlação, com valores entre 0,9437 a 0,999, atestando que os dados experimentais fornecem confiabilidade para o dimensionamento da área de um sedimentador contínuo.

Os resultados obtidos para o dimensionamento da área do sedimentador a partir dos modelos matemáticos de Kynch (1952), Talmagde e Fitch (1955) e Biscaia Junior (1982) estão descritos na Tabela 6.

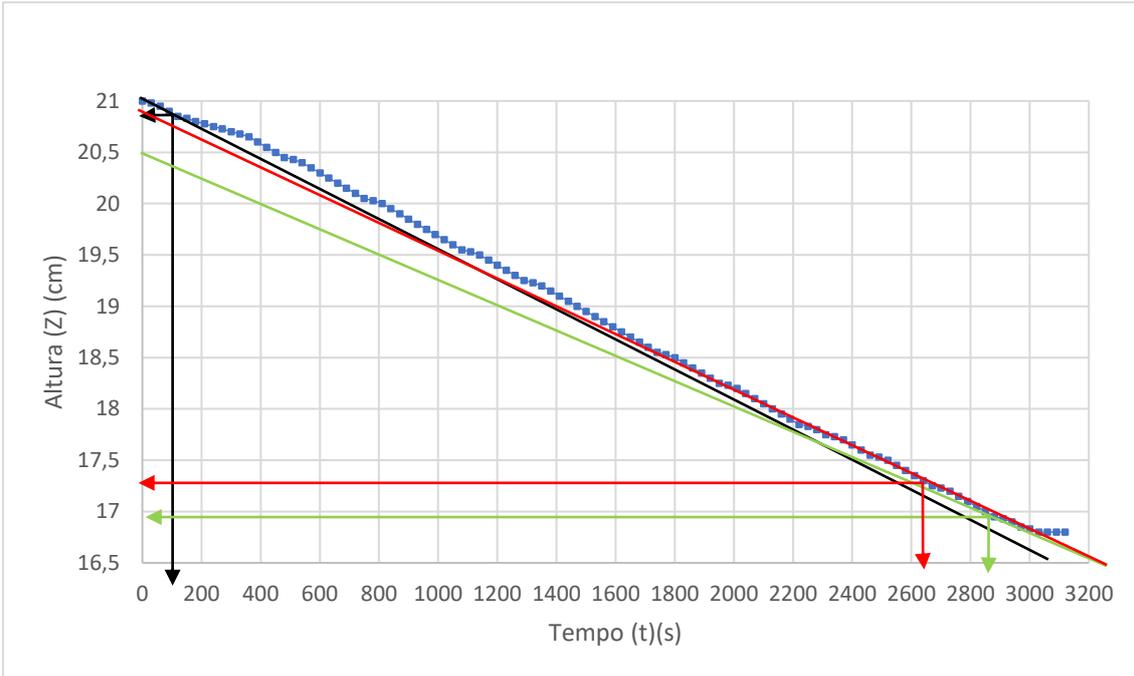
Ensaio 1



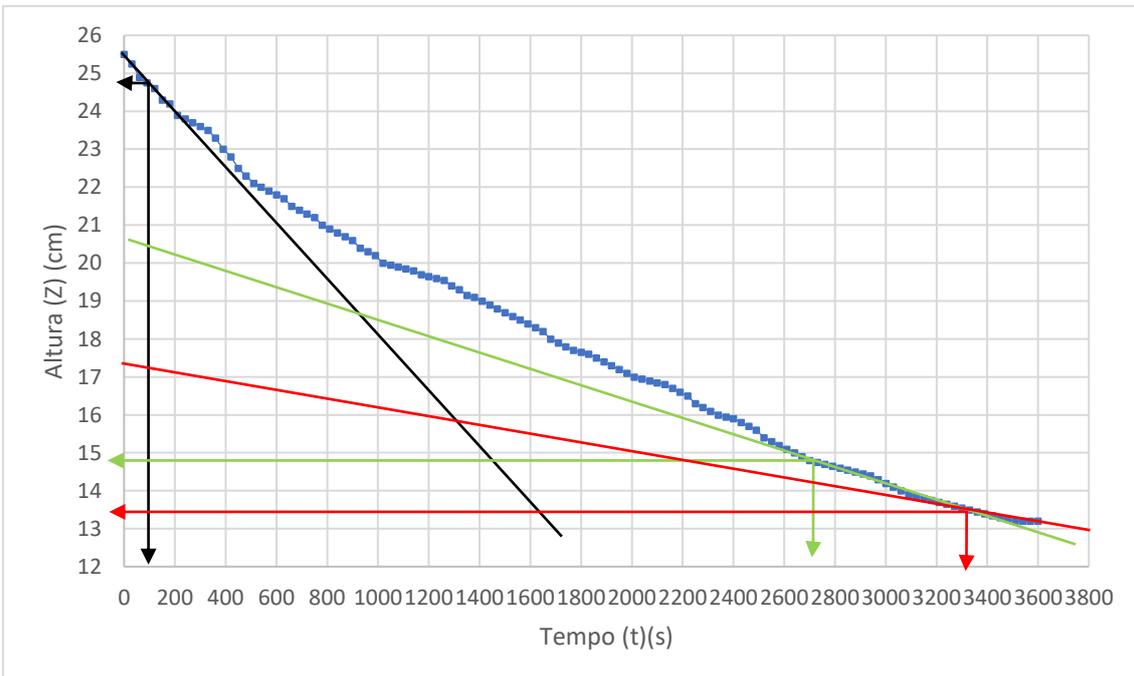
Ensaio 2



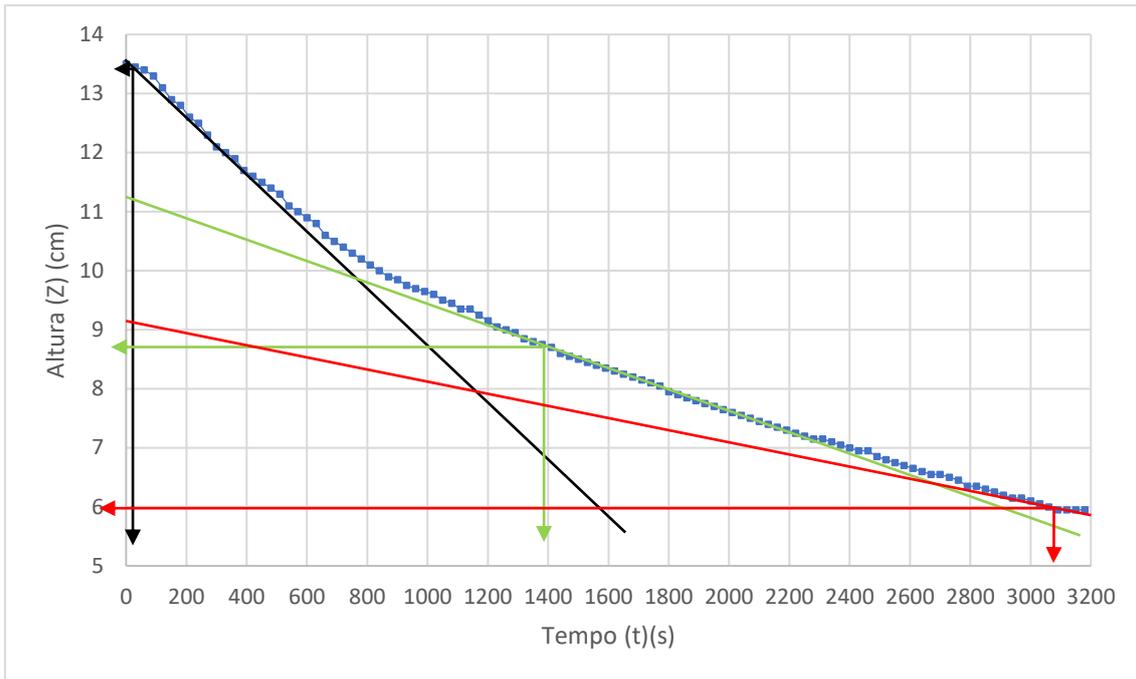
Ensaio 3



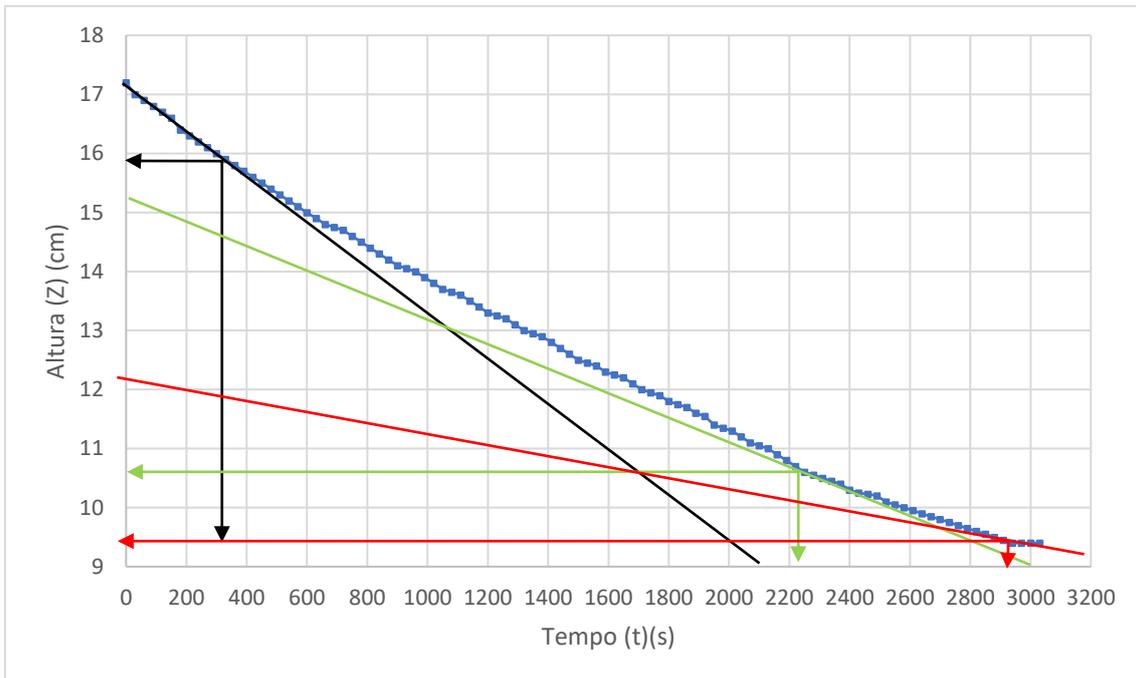
Ensaio 4



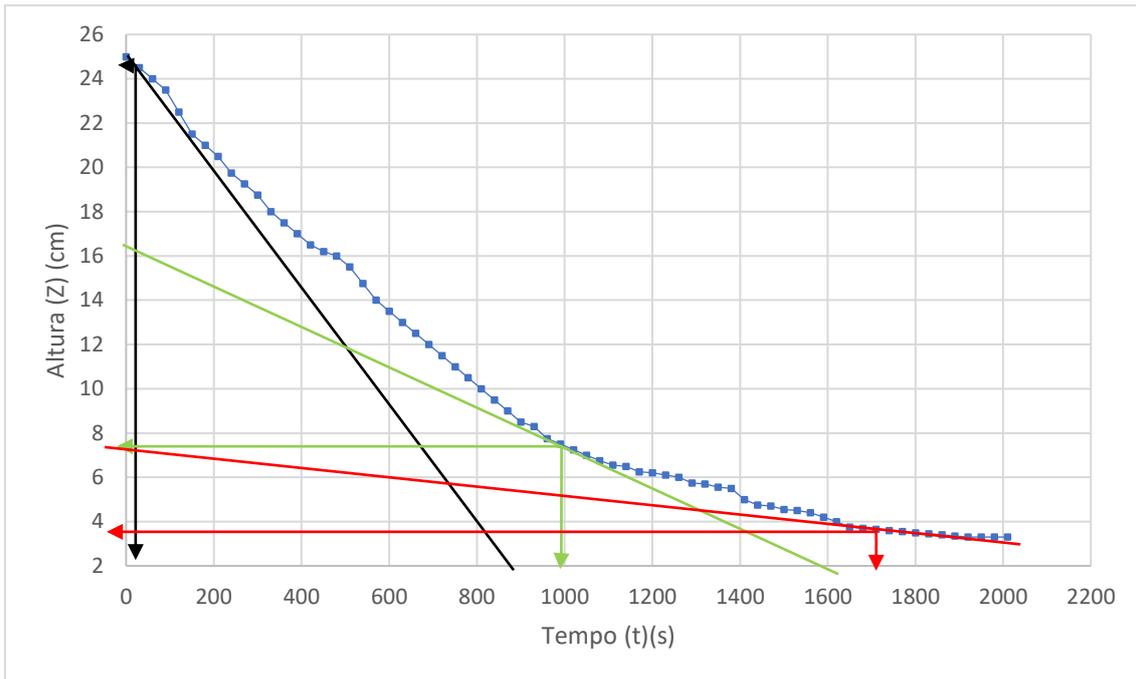
Ensaio 5



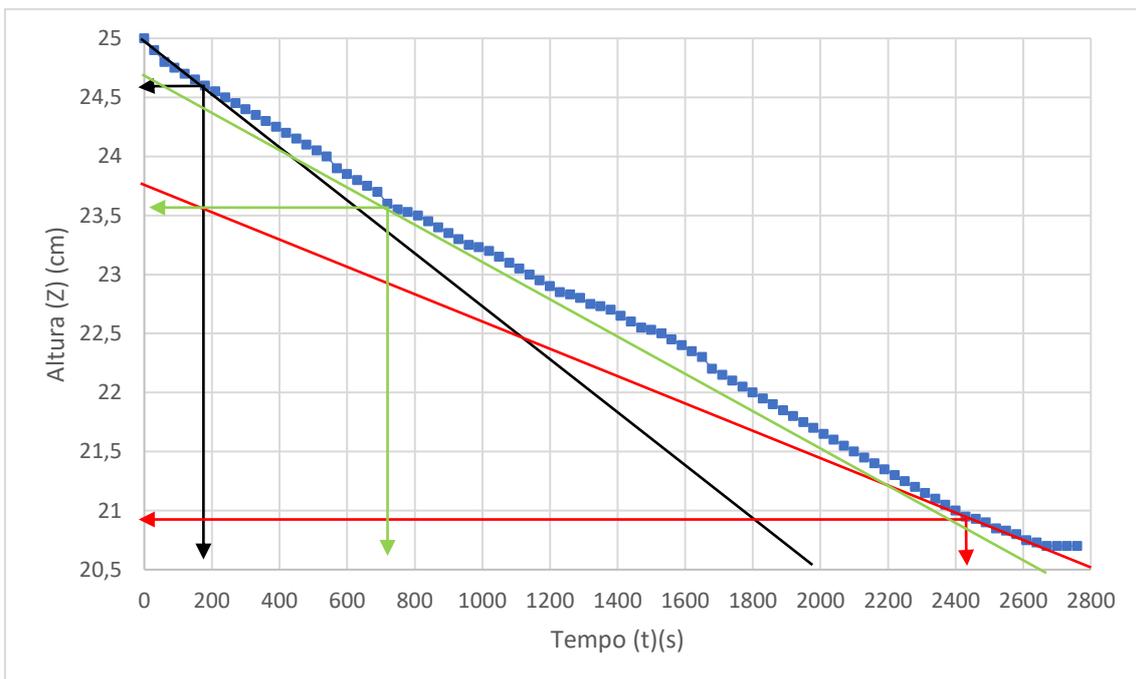
Ensaio 6



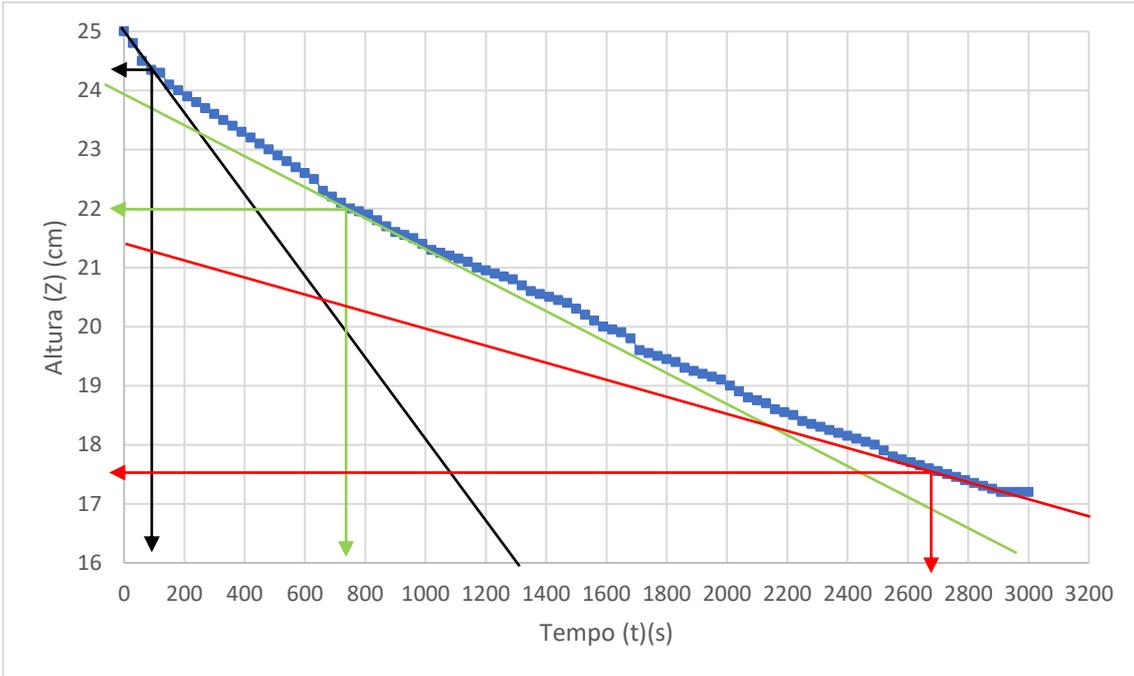
Ensaio 7



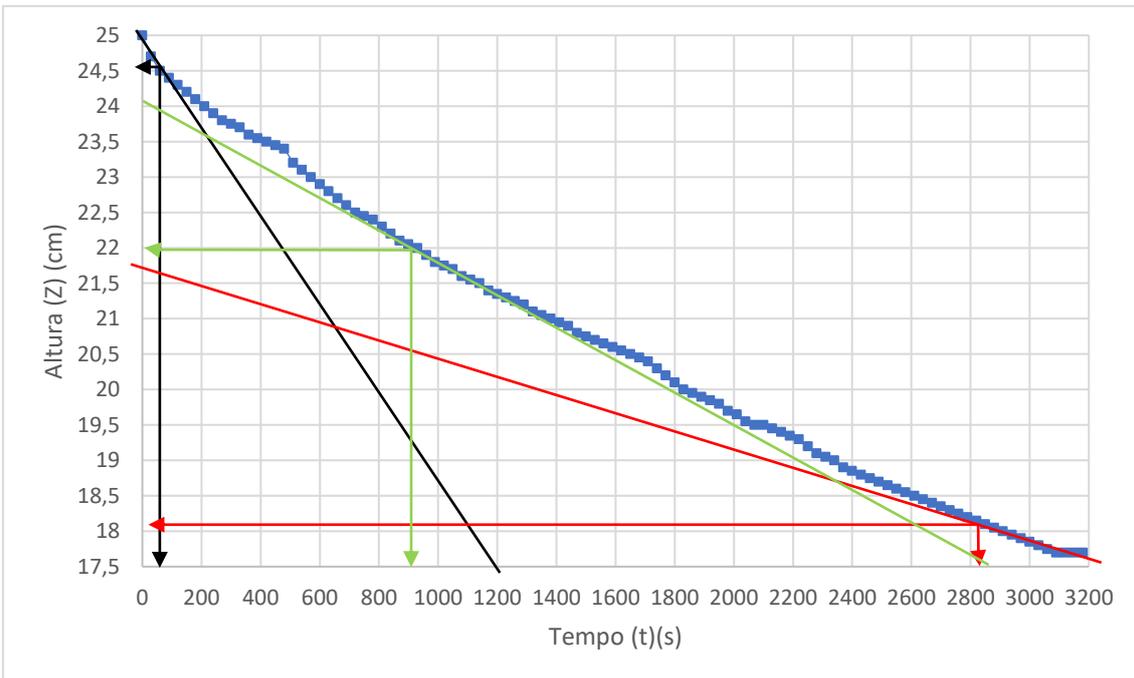
Ensaio 8



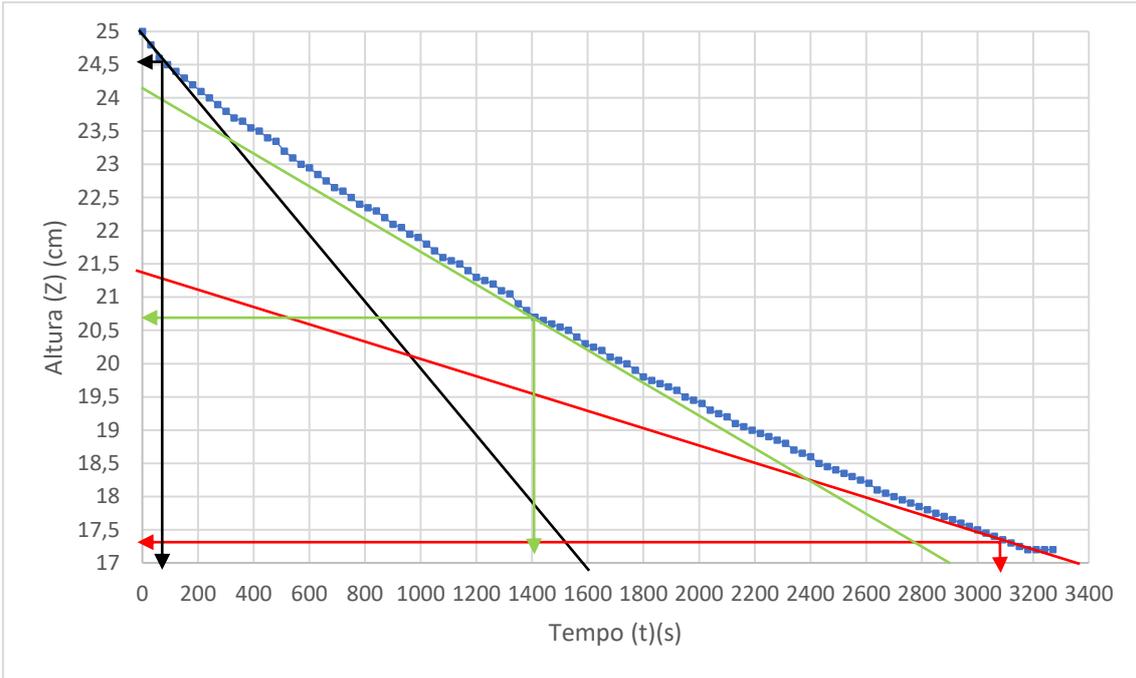
Ensaio 9



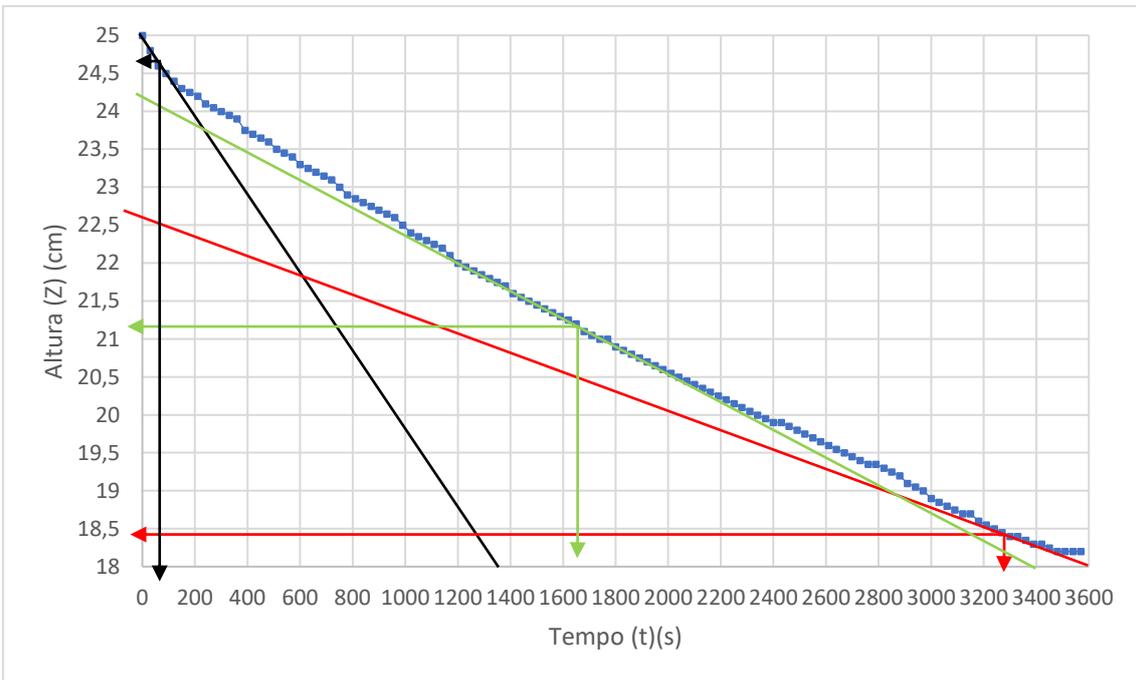
Ensaio 10



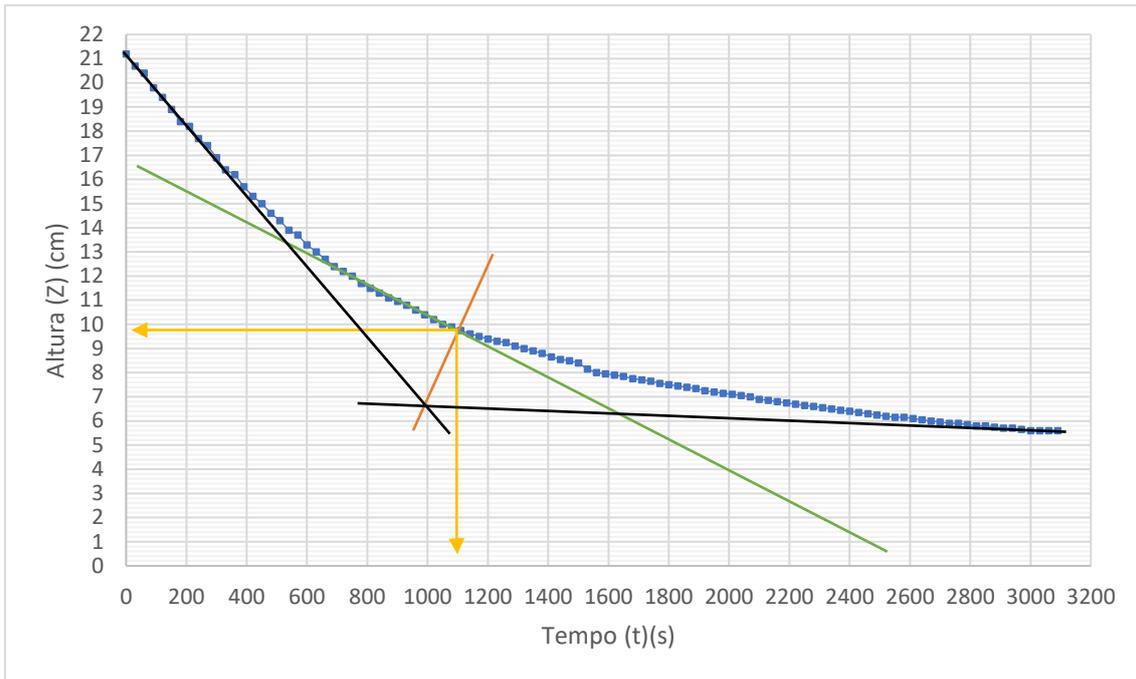
Ensaio 11



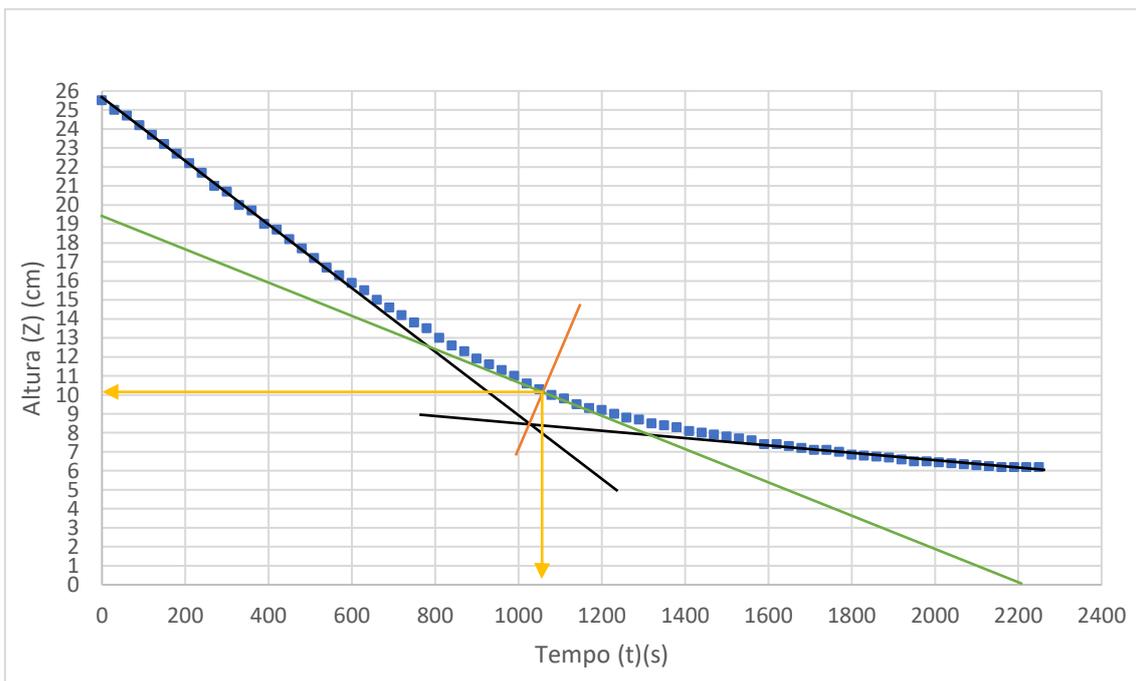
Ensaio 12



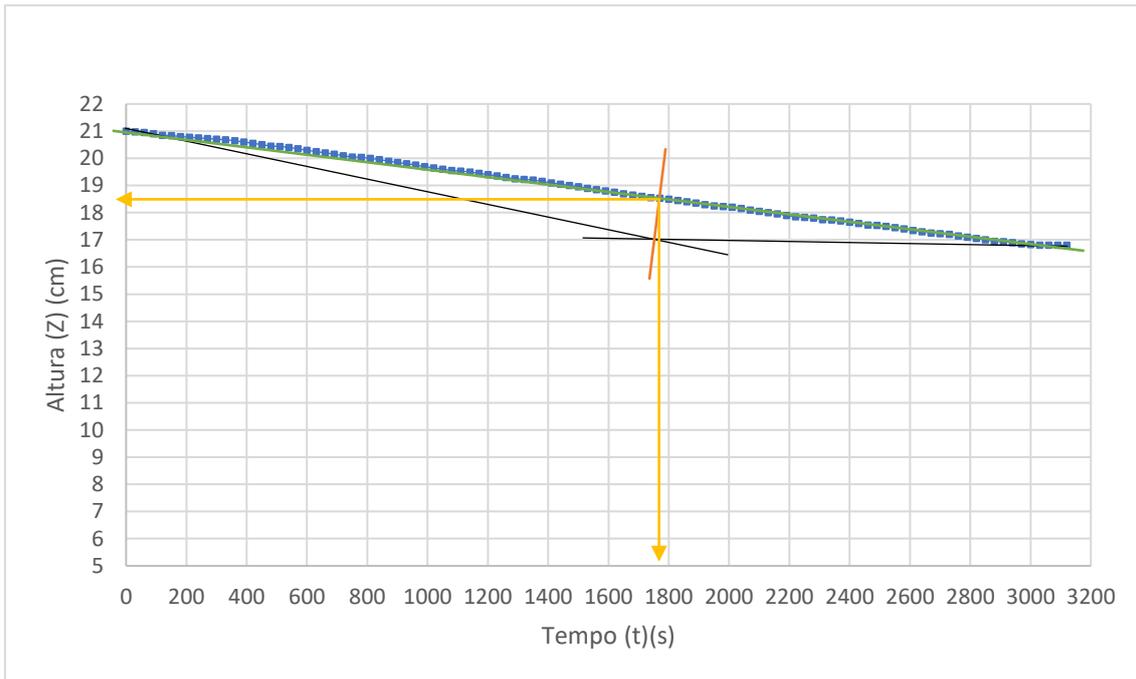
Ensaio 1



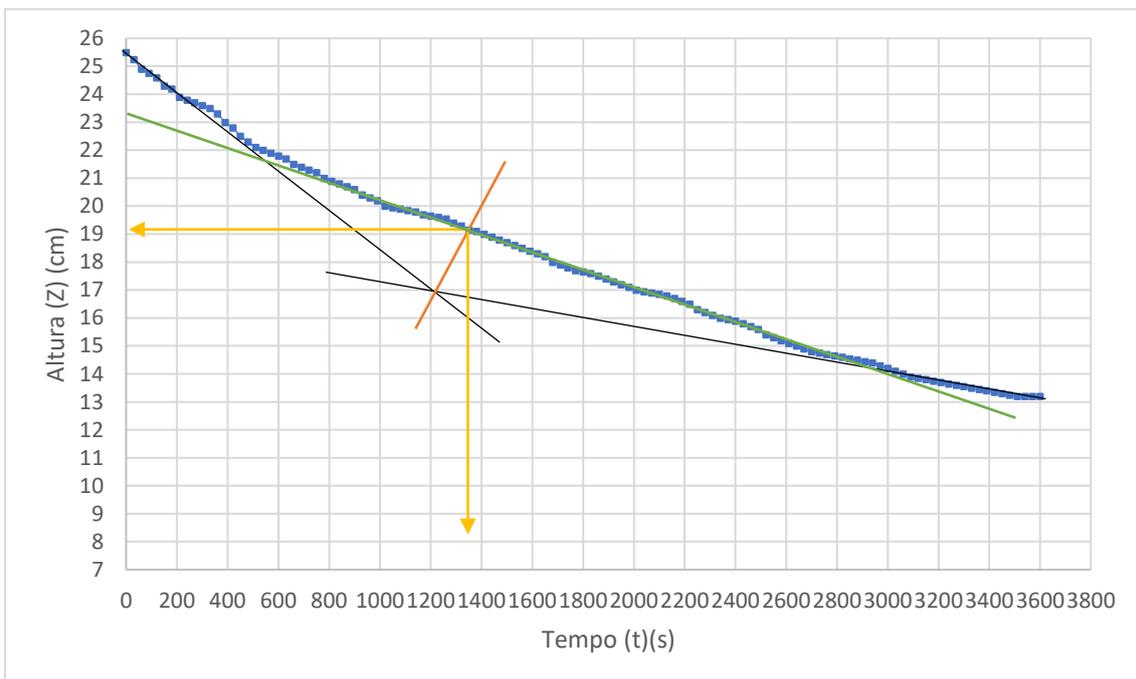
Ensaio 2



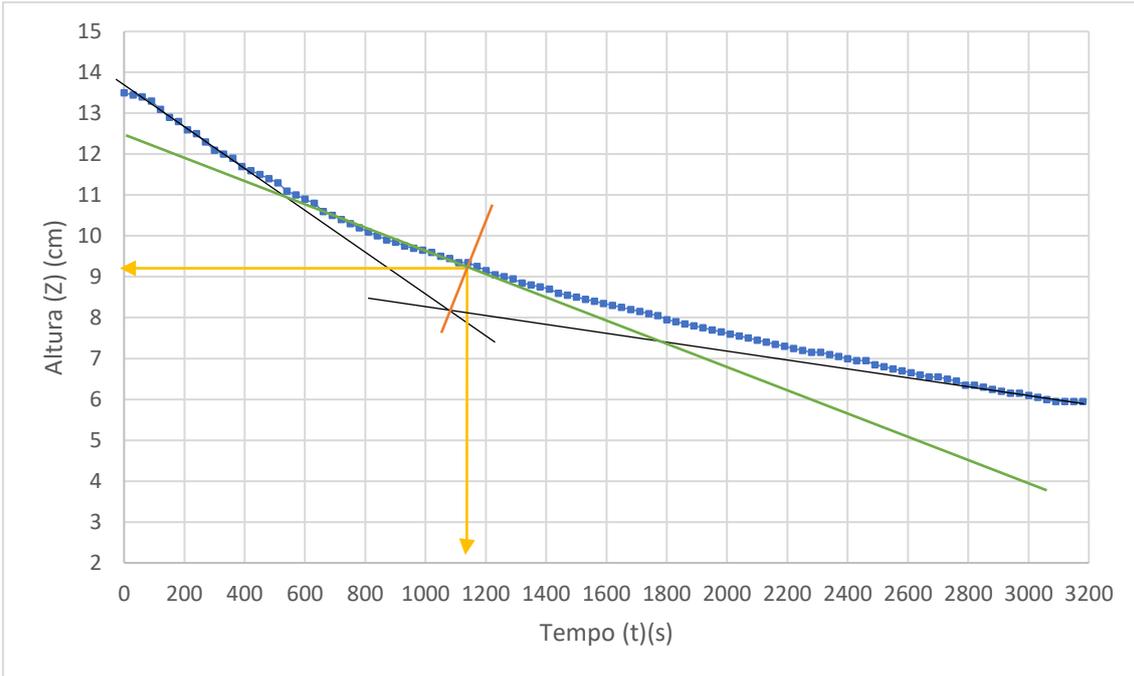
Ensaio 3



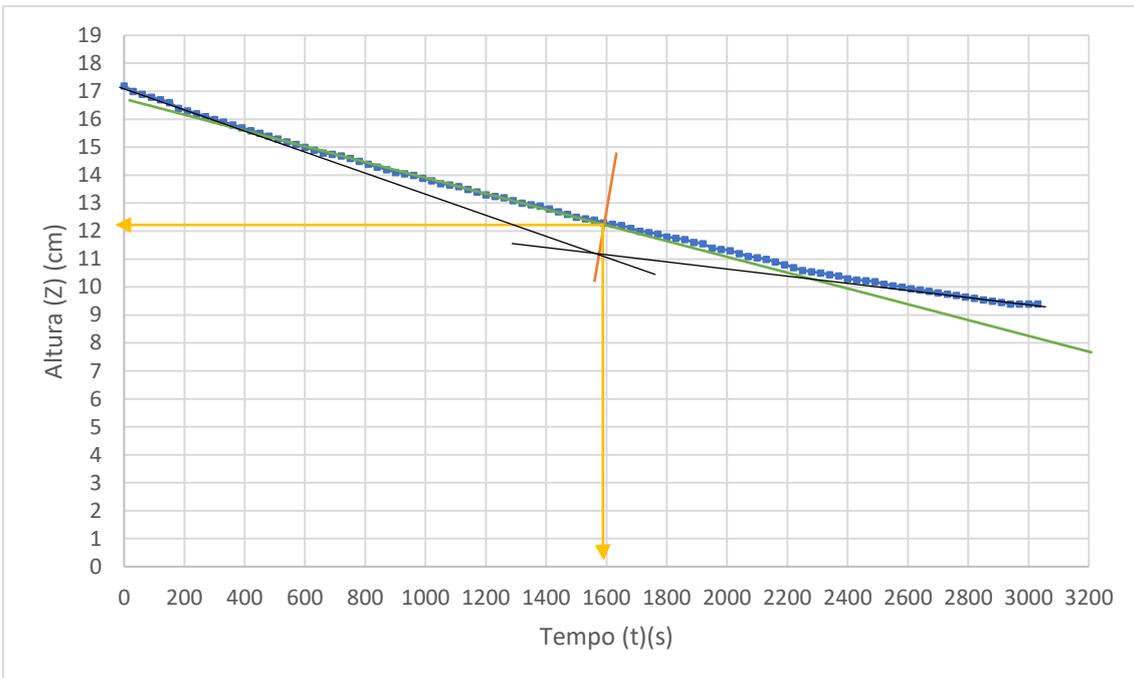
Ensaio 4



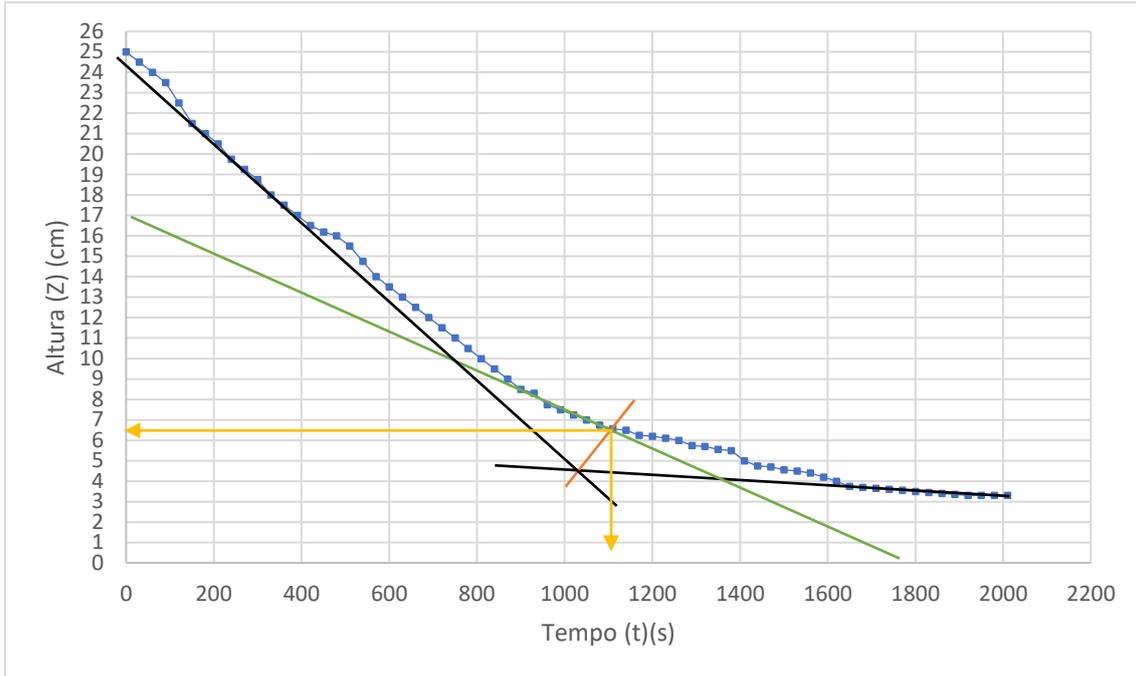
Ensaio 5



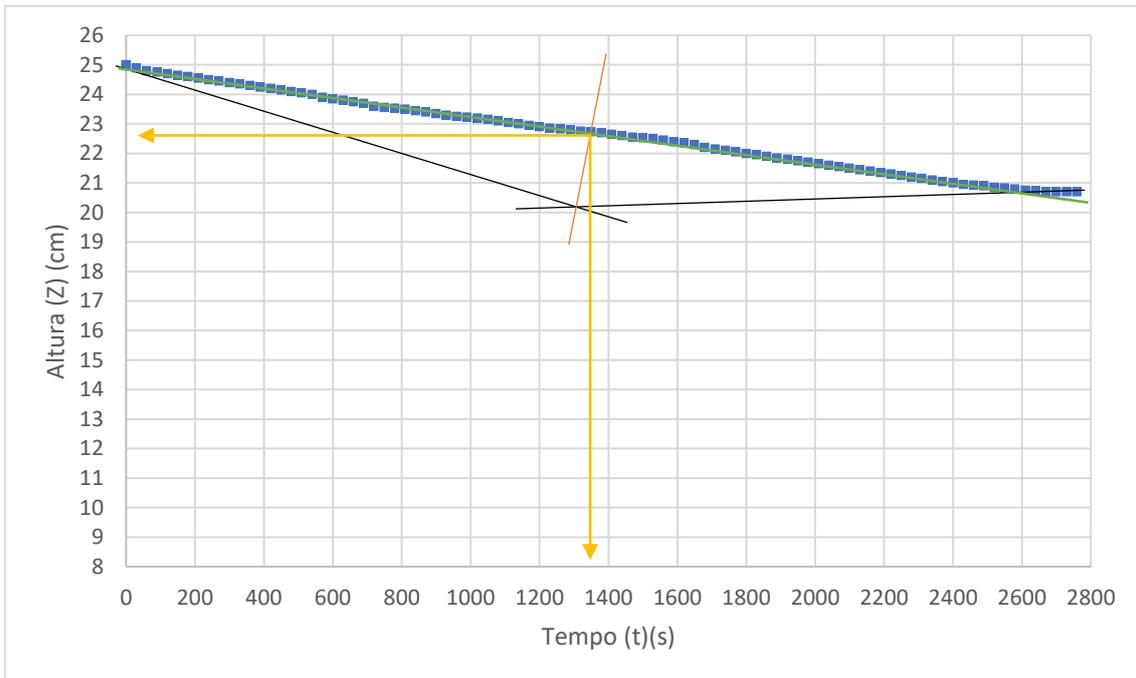
Ensaio 6



Ensaio 7



Ensaio 8



Ensaio 9

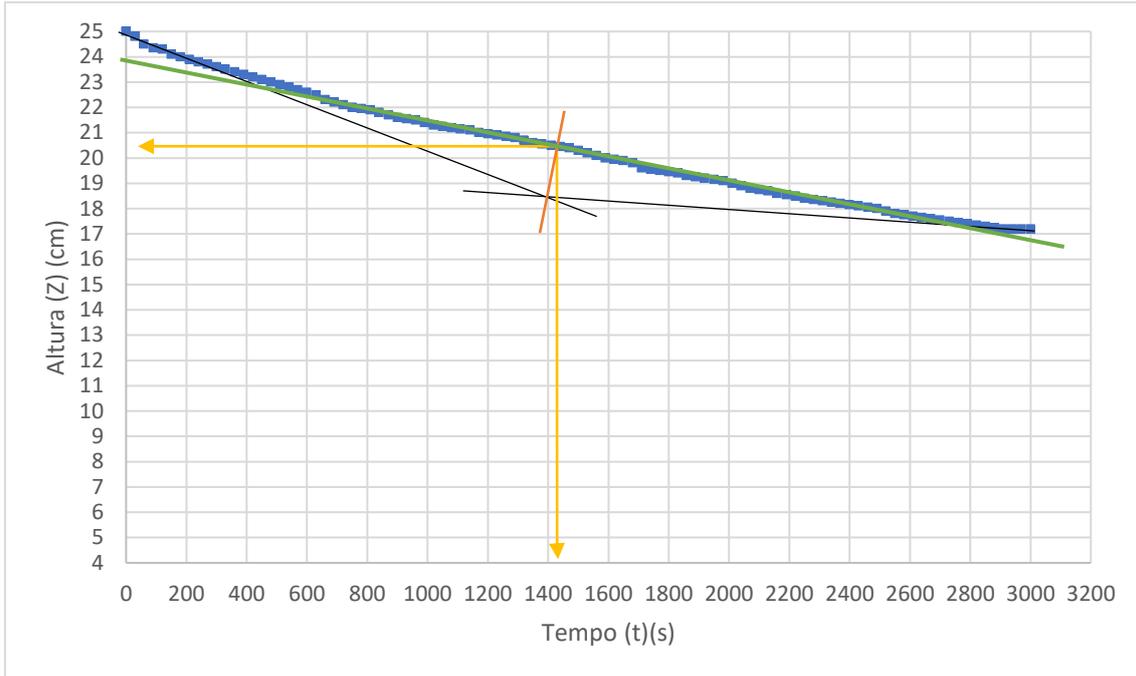


Tabela 6 – Área do sedimentador contínuo a partir de ensaios de proveta para os modelos matemáticos de: (a) Kynch, (b) Talmadge e Fitch e (c) Biscaia Junior

Ensaio	Área (m ²)		
	(a) Kynch	(b) Talmadge e Fitch	(c) Biscaia Junior
1	18,42981	10,33019	24,36534
2	9,043292	7,647059	12,33178
3	58,06308	12,28571	72,72737
4	32,36548	14,50980	23,02056
5	48,00000	18,66667	38,29882
6	52,59608	16,74419	46,47504
7	60,90000	5,76000	11,11603
8	51,65845	10,96000	61,86190
9	45,25714	12,36000	63,34347
10	52,65634	12,36000	63,43858
11	50,05037	12,36000	63,64933
12	54,96714	12,72000	70,73415

Analisando as informações da Tabela 6, verificou-se que os métodos de Kynch e Biscaia Junior apresentaram uma grande similitude nos resultados. Já os valores obtidos pelo método de Talmadge e Fitch foram sempre inferiores para todos os experimentos, sendo cerca de 1/3 a relação entre sua maior área (18,66667 m²) e as dos demais modelos.

Simões (2014) destaca que os métodos apresentam falhas e dificuldades de execução com relação à incerteza da localização das retas tangentes e bissetrizes a curvas de sedimentação, bem como as leituras a serem tomadas pelas retas que interceptam ou tangenciam o ponto de compressão, o que explicaria essa discrepância encontrada. Portanto, o uso de dois ou mais modelos matemáticos concedem maior segurança para o projeto da área.

5.2 Efeitos dos Fatores e Superfície de Resposta

A Tabela 7 apresenta os valores gerados pelo software Statistica 7.0 para os efeitos principais dos fatores para a área calculada pelo método de Kynch.

Tabela 7 – Efeitos dos fatores para a área calculada a partir do Método de Kynch

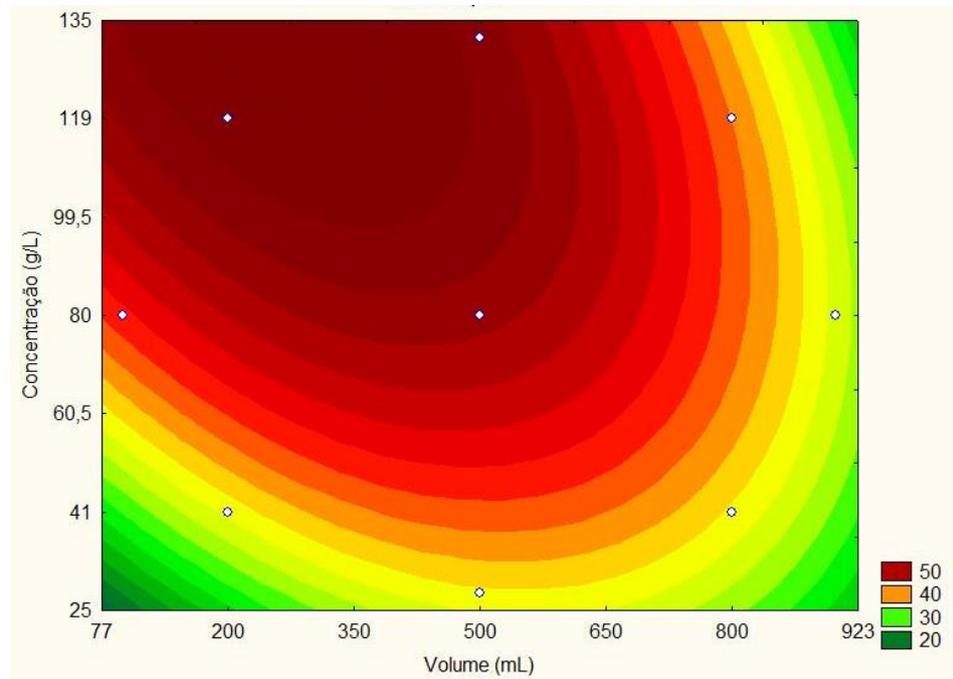
Efeitos Estimados										
R ² = 0,26053										
Fator	Efeito	σ	t _{cal}	p	-95% CL	+95% CL	Cf	C σ	-95% CL	+95% CL
Média	50,732	9,409	5,391	0,001	27,708	73,7566	50,732	9,409	27,708	73,756
x₁ (Ln)	-7,145	13,306	-0,537	0,610	-39,706	25,4149	-3,572	6,653	-19,853	12,707
x₁ (Qd)	-12,341	14,877	-0,829	0,438	-48,745	24,0629	-6,170	7,438	-24,372	12,031
x₂ (Ln)	12,471	13,306	0,937	0,384	-20,089	45,0321	6,235	6,653	-10,044	22,516
x₂ (Qd)	-6,360	14,877	-0,427	0,683	-42,764	30,0437	-3,180	7,438	-21,382	15,021
Interação x₁x₂ (Ln)	-8,155	18,818	-0,433	0,679	-54,203	37,8923	-4,077	9,409	-27,101	18,946

Legenda: x₁ = Volume; x₂ = concentração; Ln = modelo linear; Qd = modelo quadrático; σ = erro padrão; t = valor de influência no processo (estatística do teste); p = probabilidade de significância de 5% do teste t; CL = coeficiente limite; Cf = coeficiente de regressão; C σ = coeficiente do erro padrão.

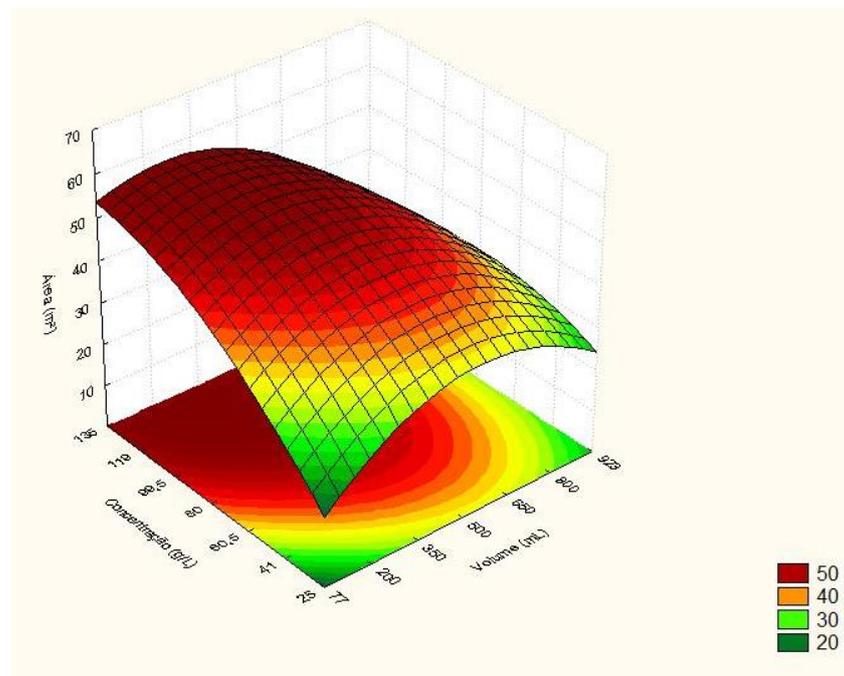
A análise da Tabela 7 indica que a concentração da suspensão e o volume da proveta não exercem influência sobre o dimensionamento da área do sedimentador. Apenas a média de todos os experimentos foi considerada significativa. O valor obtido para o coeficiente de correlação (R²) foi de 0,26053, indicando que apenas 26% da variabilidade na resposta podem ser explicadas pelo modelo, e embora seja considerado um valor baixo, era esperado, visto que o método consiste em traçar retas tangentes ao longo da curva de sedimentação encontrando uma variação grande de área para cada região escolhida.

Através da superfície de resposta gerada pelo modelo (Figura 23) pode-se obter as condições de concentração e volume da proveta que minimizam as incertezas no cálculo da área do sedimentador. É possível verificar preliminarmente que, para concentrações altas não é indicado a condução do experimento em provetas pequenas, pois podem levar a superestimar a área. Em vista disso, para as condições iniciais estabelecidas para o projeto, o indicado é se trabalhar com provetas de maior volume, que em contrapartida reduziriam os efeitos de parede.

Figura 23 – Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) da interação dos fatores concentração e volume para o método de Kynch



(a) Curvas de contorno



(b) Superfície de resposta

Para o método de Biscaia Junior, os principais efeitos estão descritos na Tabela 8, e demonstraram que assim como no método de Kynch, apenas a média dos experimentos foi considerada significativa.

Tabela 8 – Efeitos dos fatores para a área calculada a partir do Método de Biscaia Junior

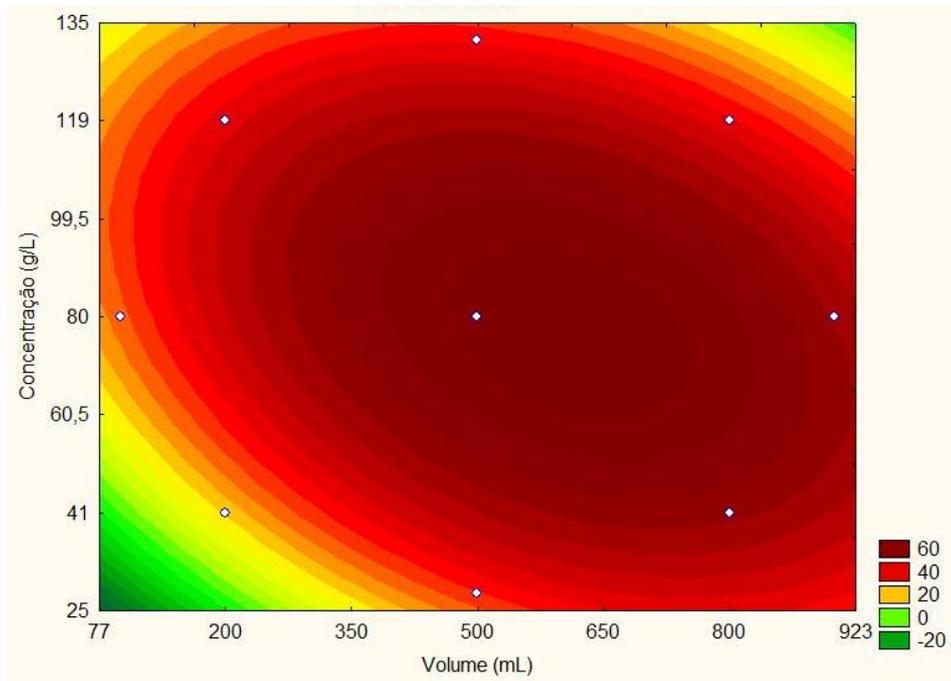
Efeitos Estimados										
R ² = 0,55434										
Fator	Efeito	σ	t _{cal}	p	-95% CL	+95% CL	Cf	C σ	-95% CL	+95% CL
Média	65,291	10,467	6,238	0,001	39,679	90,904	65,291	10,467	39,679	90,904
x₁ (Ln)	17,653	14,803	1,193	0,278	-18,568	53,875	8,827	7,401	-9,284	26,937
x₁ (Qd)	-26,068	16,550	-1,575	0,166	-66,564	14,429	-13,034	8,275	-33,282	7,214
x₂ (Ln)	2,506	14,803	0,169	0,871	-33,715	38,727	1,253	7,401	-16,857	19,364
x₂ (Qd)	-31,966	16,550	-1,931	0,102	-72,462	8,531	-15,983	8,275	-36,231	4,265
Interação x₁x₂ (Ln)	-18,837	20,934	-0,900	0,403	-70,061	32,388	-9,418	10,467	-35,030	16,194

Legenda: x₁ = Volume; x₂ = concentração; Ln = modelo linear; Qd = modelo quadrático; σ = erro padrão; t = valor de influência no processo (estatística do teste); p = probabilidade de significância de 5% do teste t; CL = coeficiente limite; Cf = coeficiente de regressão; C σ = coeficiente do erro padrão.

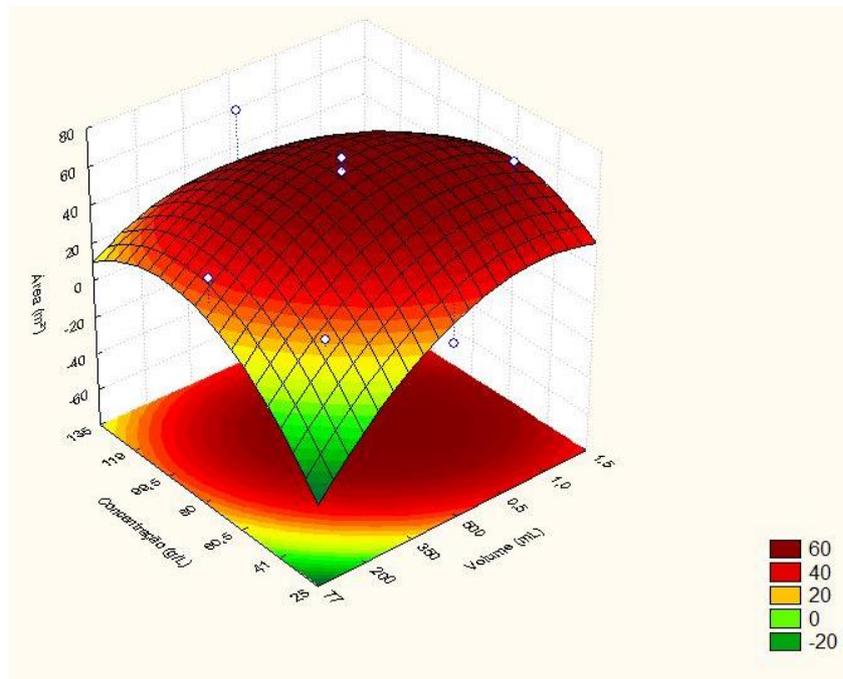
O modelo de Biscaia Junior é considerado uma simplificação do modelo de Kynch, e essa similaridade pode ser notada quando se observa a Figura 24. O valor obtido para o coeficiente de correlação foi de 0,55434 e, embora considerado moderadamente baixo, permitiu a construção da superfície de resposta e curvas de contorno. É possível afirmar preliminarmente, que quando se trabalha com concentrações muito baixas e provetas muito pequenas, segundo as condições estabelecidas nesse trabalho, as estimativas para as áreas não fornecem um significado físico, pois apresentam valores negativos que variam entre 0 e -20 m². Com isso, quando as concentrações são mais elevadas não é recomendado o uso de provetas de volumes menores para o experimento.

Observa-se também que os maiores valores de áreas estão localizados em torno do ponto central e, neste ponto, independente de se trabalhar com provetas de volume maior ou menor e com concentrações altas ou baixas, nos levará a resultados de áreas grandes. Portanto, para qualquer proveta ou volume escolhido para se trabalhar, nessa região as áreas estimadas variariam entre 20 e 60 m², confirmando que o efeito da concentração da suspensão e do volume não são significativos.

Figura 24 – Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) da interação dos fatores concentração e volume para o método de Biscaia Junior



(a) Curvas de contorno



(b) Superfície de resposta

A Tabela 9 apresenta valores para os efeitos principais para a área calculada pelo método de Talmadge e Fitch, e verificou-se que a média, o volume e a concentração foram estatisticamente significativos.

Tabela 9 – Efeitos dos fatores para a área calculada a partir do Método de Talmadge e Fitch

Efeitos Estimados										
R ² = 0,89826										
Fator	Efeito	σ	t _{cal}	p	-95% CL	+95% CL	Cf	C σ	-95% CL	+95% CL
Média	12,450	0,760	16,373	0,000	10,589	14,311	12,450	0,760	10,589	14,311
x ₁ (Ln)	-0,452	1,075	-0,421	0,689	-3,084	2,179	-0,226	0,538	-1,542	1,089
x ₁ (Qd)	4,105	1,202	3,414	0,014	1,163	7,047	2,052	0,601	0,581	3,523
x ₂ (Ln)	4,215	1,075	3,920	0,008	1,584	6,847	2,108	0,538	0,792	3,423
x ₂ (Qd)	-5,001	1,202	-4,159	0,006	-7,943	-2,059	-2,500	0,601	-3,971	-1,029
Interação x ₁ x ₂ (Ln)	1,770	1,521	1,164	0,289	-1,952	5,491	0,885	0,760	-0,976	2,745

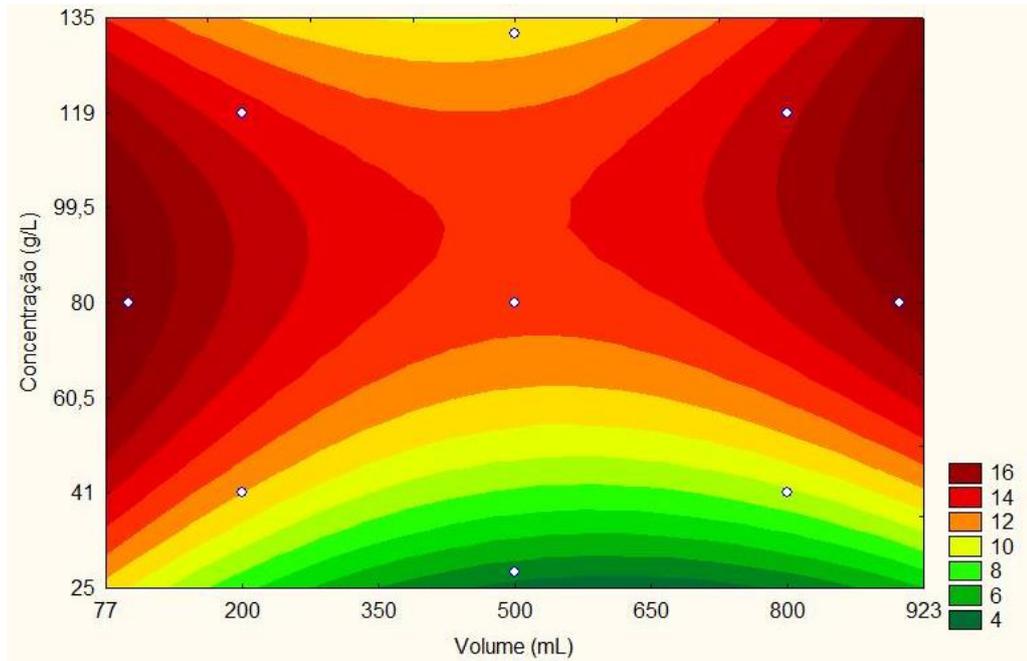
Legenda: x₁ = Volume; x₂ = concentração; Ln = modelo linear; Qd = modelo quadrático; σ = erro padrão; t = valor de influência no processo (estatística do teste); p = probabilidade de significância de 5% do teste t; CL = coeficiente limite; Cf = coeficiente de regressão; C σ = coeficiente do erro padrão.

O valor obtido para o R² foi de 0,89826, indicando que aproximadamente 90% das variações são explicadas pelo modelo ajustado. Logo, a modelagem mostrou-se adequada, diferentemente dos métodos anteriores que precisariam de experimentos adicionais para validá-los. Com exceção do termo linear do volume (x₁) e da interação da concentração e volume (x₁x₂), todos os parâmetros do modelo foram altamente significativos (p < 0,05), podendo-se elaborar com os dados encontrados pelo método de Talmadge e Fitch um modelo com as variáveis codificadas, como é apresentado na Equação 10:

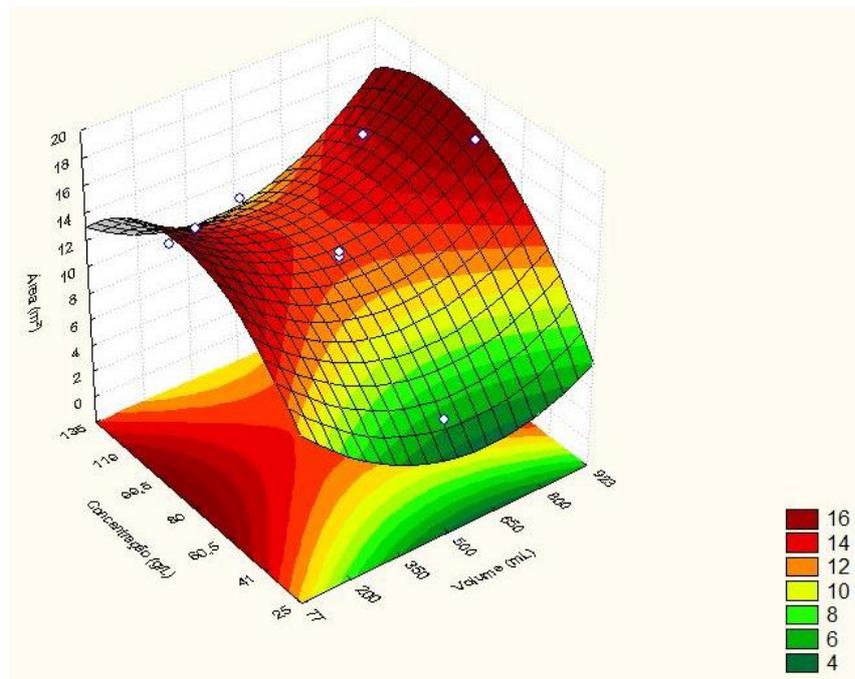
$$A = 12,450 + 4,105x_1^2 + 4,215x_2 - 5,001x_2^2 \quad (10)$$

Nota-se que o modelo quadrático da concentração (x₂²) foi o único que impactou negativamente, ou seja, quanto maior o valor atribuído a essa variável, menor será a área, e vice-versa.

Figura 25 – Curvas de contorno (a) e Superfície de resposta (b) da interação dos fatores concentração e volume para o método de Talmadge e Fitch



(a) Curvas de contorno



(b) Superfície de resposta

As curvas de contorno e superfícies de respostas ilustradas na Figura 25 indicam de modo geral que, nas condições estabelecidas para o projeto do sedimentador, quando se trabalha

com altas concentrações, independente da utilização de provetas com um diâmetro maior ou menor, as áreas estimadas serão altas, evidenciando que o volume não exerce tanta influência sob o método. A Figura 25 destaca também que, mesmo quando se trabalha com uma concentração baixa é recomendado evitar a utilização de provetas menores (que estão relacionadas diretamente com volumes menores), porque elas estimaram áreas grandes que em condições reais pode resultar no superdimensionamento do equipamento.

6 CONCLUSÃO

Com base nas condições estabelecidas no presente estudo foi possível concluir que:

- As curvas de sedimentação construídas tiveram excelentes coeficientes de correlação, com valores entre 0,9437 a 0,999, atestando que os dados experimentais fornecem confiabilidade para o dimensionamento de um sedimentador contínuo;
- Aplicando os modelos matemáticos de Kynch (1952) e Biscaia Junior (1982) encontrou-se variações de áreas muito semelhantes, entre 9 a 60 m² e 11 a 72 m², respectivamente. Os dois indicaram preliminarmente que, a concentração e o volume não exercem efeitos significativos sobre o cálculo da área desses métodos, e quando se trabalha com concentrações altas, é indicado optar por provetas de maior volume para a realização dos ensaios, para evitar o superdimensionamento do equipamento, que pode acontecer quando se utiliza provetas de volume pequeno;
- O método de Talmagde e Fitch resultou em valores de áreas que variaram entre 5 a 18 m², e apresentou a modelagem mais adequada, indicando que aproximadamente 90% variações são explicadas pelo modelo ajustado ($A = 12,450 + 4,105x_1^2 + 4,215 x_2 - 5,001x_2^2$). Verificou-se que de modo geral, quando se trabalha com altas concentrações, independente da utilização de provetas com um diâmetro grande ou pequeno, as áreas estimadas serão altas, evidenciando que o volume não exerce um efeito significativo sob esse método, e sim a concentração, juntamente com a média;

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Por apresentarem bastante sensibilidade e incertezas na hora da elaboração das tangentes para o cálculo da área, é proposto para os modelos de Biscaia Junior e Kynch aumentar o nível de significância de 5 para 10%, visando proporcionar uma melhora no coeficiente de correlação. Indica-se também a realização de experimentos adicionais nas regiões que apresentam as maiores áreas para que seja possível afirmar com segurança que a concentração e o volume, de fato, não exercem efeito significativo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, C. G. **Simulação da operação de sedimentadores contínuos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- BASTOS, A. R.; AFONSO, J.C. Separação Sólido-Líquido: Centrífugas e papéis de filtro. **Revista Química Nova**, vol. 38, Nº 5, p. 749, 2015.
- BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. **Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry**. Talanta, 2008.
- BISCAIA JUNIOR, E. C. Simplificação matemática do método de Kynch. Comunicação pessoal, 1982. Apud MASSARANI, G., 1997. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. Editora UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.
- BREITKREITZ, M. C.; SOUZA, A. M.; POPPI, R. J. **Experimento didático de quimiometria para planejamento de experimentos: Avaliação das condições experimentais na determinação espectrofotométrica de ferro com o-fenantrolina**. Um tutorial, Parte III. Química Nova, 2014.
- BUTZE, A.C.; LINDEMANN, C.; SCHMIDT, V.W. **Sedimentação**. Relatório. Programa de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. Chemical Engineering Desing. VI vol. An Introduction to Chemical Engineering Desing. Edição da Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 1989. Pg 380-419.
- CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo. 2012.
- 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, Ouro Preto, Brasil, 1993.
- FARIAS NETO, S. R **Dimensionamento de sedimentadores**. Programa de notas de aulas. Operações Unitárias I, 2011.

FONSECA, J. C. M. C. **Desempenho do sedimentador primário em ETAR**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2012.

FOUST, ALAN S.; WENSEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípio das operações unitárias**. 2.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Separação Sólido-Líquido**. Comunicação Técnica elaborada para a 3ª Edição do Livro de Tratamento de Minérios, Cap.14, p.571-609, Rio de Janeiro, 2002.

GOMIDE, R. **Operações unitárias: Separações mecânicas**. vol 3; p. 38-68. Edição do autor, 1980.

GUIMARÃES, F. A. V. **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

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

LEAL, M. C. D. **Fundamentos e Aplicações da Metodologia de Superfície de Resposta**. Mestrado em Estatística, Matemática e Computação (especialização em Estatística Computacional). Universidade Aberta. 2015.

LIMA, J. P. T. F. **Estudo Experimental da Influência da Configuração de Entrada na Eficiência de Remoção de um Sedimentador Primário**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Universidade do Minho. 2014.

LIRA, J. R. **Estudo dos Parâmetros que Influenciam a Floculação na Sedimentação Contínua**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

LUNA, F. D. T. **Estudo de sedimentador contínuo usando fluidodinâmica computacional**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química, 2018.

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.

MEDEIROS, F. A. F. **Dimensionamento da área de um Sedimentador Contínuo**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual da Paraíba, 2014.

OLIVEIRA, L. G. **Fundamentos da Metodologia de Superfície de Resposta e suas aplicações em manufatura avançada: Uma análise crítica**. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá. 2018.

NEON COMERCIAL LTDA. **Especificação Técnica do Produto Carbonato de cálcio P.A.** Disponível em: <<http://api.neoncomercial.com.br/api/Produto/produtoEspecificacaoTecnica?codProduto=428>>. Acesso em 27 de março de 2019.

ORLANDINI, S.; GOTTI, R.; FURLANETTO, S. **Multivariate optimization of capillary electrophoresis methods: A critical review**. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2014.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 1998, 7 ed. Mc Graw Hill. 18-60.

REIS, K. M. **Dimensionamento de Espessores**. Monografia (Especialização em Beneficiamento Mineral). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

SIMÕES, V. N. **Projeto de sedimentador contínuo a partir de ensaio de proveta: Estudo da influência da concentração da suspensão de carbonato de cálcio e dimensões da proveta**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

SMANIOTTO, A. L. A. **Aplicação de Sedimentadores de Fluxo vertical na separação Sólido-Líquido se água de processo em usinas de beneficiamento de carvão mineral na Região Sul de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

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

VICENTE, M. A.; BRITO, M. A. S. **Projeto Conceitual e Básico de Tratamento de Efluente Líquido da Empresa M&G.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Alfenas, 2015.

8 APÊNDICE A

- Dados obtidos nos ensaios de sedimentação em batelada da suspensão de carbonato de cálcio.

Tabela 10 – Ensaio 1: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 41 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	21,20	1020	10,20	2070	7,00
30	20,70	1050	10,00	2100	6,90
60	20,40	1080	9,90	2130	6,85
90	19,80	1110	9,75	2160	6,80
120	19,40	1140	9,60	2190	6,75
150	18,90	1170	9,50	2220	6,70
180	18,40	1200	9,40	2250	6,65
210	18,20	1230	9,30	2280	6,60
240	17,70	1260	9,25	2310	6,55
270	17,40	1290	9,10	2340	6,50
300	16,90	1320	9,00	2370	6,45
330	16,40	1350	8,90	2400	6,40
360	16,20	1380	8,80	2430	6,35
390	15,70	1410	8,65	2460	6,30
420	15,30	1440	8,55	2490	6,25
450	15,00	1470	8,50	2520	6,20
480	14,60	1500	8,40	2550	6,15
510	14,30	1530	8,15	2580	6,15
540	13,90	1560	8,00	2610	6,10
570	13,70	1590	7,95	2640	6,05
600	13,30	1620	7,90	2670	6,00
630	13,00	1650	7,85	2700	5,95
660	12,70	1680	7,75	2730	5,90
690	12,40	1710	7,70	2760	5,90
720	12,20	1740	7,65	2790	5,85
750	12,00	1770	7,55	2820	5,80
780	11,70	1800	7,50	2850	5,80
810	11,50	1830	7,45	2880	5,75
840	11,30	1860	7,40	2910	5,70
870	11,10	1890	7,35	2940	5,70
900	10,95	1920	7,25	2970	5,65
930	10,80	1950	7,20	3000	5,60
960	10,60	1980	7,15	3030	5,60
990	10,40	2010	7,10	3060	5,60
		2040	7,05	3090	5,60

Tabela 11 – Ensaio 2: Proveta de 1000 mL, utilizando volume de 800 mL e concentração de 41 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,50	750	13,80	1500	7,80
30	25,00	780	13,50	1530	7,70
60	24,70	810	13,00	1560	7,60
90	24,20	840	12,60	1590	7,40
120	23,70	870	12,30	1620	7,40
150	23,20	900	11,90	1650	7,30
180	22,70	930	11,60	1680	7,20
210	22,20	960	11,30	1710	7,10
240	21,70	990	11,00	1740	7,10
270	21,00	1020	10,60	1770	7,00
300	20,70	1050	10,30	1800	6,85
330	20,00	1080	10,00	1830	6,80
360	19,70	1110	9,80	1860	6,75
390	19,10	1140	9,50	1890	6,70
420	18,70	1170	9,30	1920	6,60
450	18,20	1200	9,20	1950	6,50
480	17,70	1230	9,00	1980	6,50
510	17,20	1260	8,80	2010	6,45
540	16,70	1290	8,70	2040	6,40
570	16,30	1320	8,50	2070	6,35
600	15,90	1350	8,40	2100	6,30
630	15,50	1380	8,30	2130	6,25
660	15,00	1410	8,10	2160	6,20
690	14,60	1440	8,00	2190	6,20
720	14,20	1470	7,90	2220	6,20
				2250	6,20

Tabela 12 – Ensaio 3: Proveta de 250 mL, utilizando volume de 200 mL e concentração de 119 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	21,00	1020	19,65	2070	18,10
30	20,98	1050	19,60	2100	18,05
60	20,95	1080	19,55	2130	18,00
90	20,90	1110	19,53	2160	17,95
120	20,85	1140	19,50	2190	17,90
150	20,83	1170	19,45	2220	17,85
180	20,80	1200	19,40	2250	17,83
210	20,78	1230	19,35	2280	17,80
240	20,75	1260	19,30	2310	17,75
270	20,73	1290	19,25	2340	17,73
300	20,70	1320	19,23	2370	17,70
330	20,68	1350	19,20	2400	17,65
360	20,65	1380	19,15	2430	17,60
390	20,60	1410	19,10	2460	17,55
420	20,55	1440	19,05	2490	17,53
450	20,50	1470	19,00	2520	17,50
480	20,45	1500	18,95	2550	17,45
510	20,43	1530	18,90	2580	17,40
540	20,40	1560	18,85	2610	17,35
570	20,35	1590	18,80	2640	17,30
600	20,30	1620	18,75	2670	17,25
630	20,25	1650	18,70	2700	17,23
660	20,20	1680	18,65	2730	17,20
690	20,15	1710	18,60	2760	17,15
720	20,10	1740	18,55	2790	17,10
750	20,05	1770	18,53	2820	17,05
780	20,03	1800	18,50	2850	17,00
810	20,00	1830	18,45	2880	16,95
840	19,95	1860	18,40	2910	16,93
870	19,90	1890	18,35	2940	16,90
900	19,85	1920	18,30	2970	16,85
930	19,80	1950	18,25	3000	16,83
960	19,75	1980	18,23	3030	16,80
990	19,70	2010	18,20	3060	16,80
		2040	18,15	3090	16,80
				3120	16,80

Tabela 13 – Ensaio 4: Proveta de 1000 mL, volume de 800 mL e concentração de 119 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,50	1200	19,65	2400	15,90
30	25,25	1230	19,60	2430	15,80
60	24,90	1260	19,55	2460	15,70
90	24,75	1290	19,40	2490	15,60
120	24,60	1320	19,30	2520	15,40
150	24,30	1350	19,15	2550	15,30
180	24,20	1380	19,10	2580	15,20
210	23,90	1410	19,00	2610	15,10
240	23,80	1440	18,90	2640	15,00
270	23,70	1470	18,80	2670	14,90
300	23,60	1500	18,70	2700	14,80
330	23,50	1530	18,60	2730	14,75
360	23,30	1560	18,50	2760	14,70
390	23,00	1590	18,40	2790	14,65
420	22,80	1620	18,30	2820	14,60
450	22,50	1650	18,20	2850	14,55
480	22,30	1680	18,00	2880	14,50
510	22,10	1710	17,90	2910	14,45
540	22,00	1740	17,80	2940	14,40
570	21,90	1770	17,70	2970	14,30
600	21,80	1800	17,65	3000	14,20
630	21,70	1830	17,60	3030	14,10
660	21,50	1860	17,50	3060	14,00
690	21,40	1890	17,40	3090	13,90
720	21,30	1920	17,30	3120	13,85
750	21,20	1950	17,20	3150	13,80
780	21,00	1980	17,10	3180	13,75
810	20,90	2010	17,00	3210	13,70
840	20,80	2040	16,95	3240	13,65
870	20,70	2070	16,90	3270	13,60
900	20,60	2100	16,85	3300	13,55
930	20,40	2130	16,80	3330	13,50
960	20,30	2160	16,70	3360	13,45
990	20,20	2190	16,60	3390	13,40
1020	20,00	2220	16,50	3420	13,35
1050	19,95	2250	16,30	3450	13,30
1080	19,90	2280	16,20	3480	13,25
1110	19,85	2310	16,10	3510	13,20
1140	19,80	2340	16,00	3540	13,20
1170	19,70	2370	15,95	3570	13,20
				3600	13,20

Tabela 14 – Ensaio 5: Proveta de 100 mL, utilizando volume de 77 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	13,50	1050	9,5	2130	7,40
30	13,45	1080	9,45	2160	7,35
60	13,30	1110	9,35	2190	7,30
90	13,20	1140	9,35	2220	7,25
120	13,10	1170	9,25	2250	7,20
150	12,90	1200	9,15	2280	7,15
180	12,80	1230	9,05	2310	7,15
210	12,60	1260	9	2340	7,10
240	12,50	1290	8,95	2370	7,05
270	12,30	1320	8,85	2400	7,00
300	12,10	1350	8,8	2430	6,95
330	12,00	1380	8,75	2460	6,95
360	11,90	1410	8,7	2490	6,85
390	11,70	1440	8,6	2520	6,80
420	11,60	1470	8,55	2550	6,75
450	11,50	1500	8,5	2580	6,70
480	11,40	1530	8,45	2610	6,65
510	11,30	1560	8,4	2640	6,60
540	11,10	1590	8,35	2670	6,55
570	11,00	1620	8,3	2700	6,55
600	10,90	1650	8,25	2730	6,50
630	10,80	1680	8,2	2760	6,45
660	10,60	1710	8,15	2790	6,35
690	10,50	1740	8,1	2820	6,35
720	10,40	1770	8,05	2850	6,30
750	10,30	1800	7,95	2880	6,25
780	10,20	1830	7,9	2910	6,20
810	10,10	1860	7,85	2940	6,15
840	10,00	1890	7,8	2970	6,15
870	9,90	1920	7,75	3000	6,10
900	9,85	1950	7,7	3030	6,05
930	9,75	1980	7,65	3060	6,00
960	9,70	2010	7,6	3090	5,95
990	9,65	2040	7,55	3120	5,95
1020	9,60	2070	7,5	3150	5,95
		2100	7,45	3180	5,95

Tabela 15 – Ensaio 6: Proveta de 2000 mL, utilizando volume de 923 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	17,20	990	13,90	2010	11,30
30	17,00	1020	13,80	2040	11,20
60	16,90	1050	13,70	2070	11,10
90	16,80	1080	13,65	2100	11,05
120	16,70	1110	13,60	2130	11,00
150	16,60	1140	13,50	2160	10,90
180	16,40	1170	13,40	2190	10,80
210	16,30	1200	13,30	2220	10,70
240	16,20	1230	13,25	2250	10,60
270	16,10	1260	13,20	2280	10,55
300	16,00	1290	13,10	2310	10,50
330	15,90	1320	13,00	2340	10,45
360	15,80	1350	12,95	2370	10,40
390	15,70	1380	12,90	2400	10,30
420	15,60	1410	12,80	2430	10,25
450	15,50	1440	12,70	2460	10,23
480	15,40	1470	12,60	2490	10,20
510	15,30	1500	12,50	2520	10,10
540	15,20	1530	12,45	2550	10,05
570	15,10	1560	12,40	2580	10,00
600	15,00	1590	12,30	2610	9,95
630	14,90	1620	12,25	2640	9,90
660	14,80	1650	12,20	2670	9,85
690	14,75	1680	12,10	2700	9,80
720	14,70	1710	12,00	2730	9,75
750	14,60	1740	11,95	2760	9,70
780	14,50	1770	11,90	2790	9,65
810	14,40	1800	11,80	2820	9,60
840	14,30	1830	11,75	2850	9,55
870	14,20	1860	11,70	2880	9,50
900	14,10	1890	11,60	2910	9,45
930	14,05	1920	11,55	2940	9,40
960	14,00	1950	11,40	2970	9,40
		1980	11,35	3000	9,40
				3030	9,40

Tabela 16 – Ensaio 7: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 25 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,00	660	12,50	1350	5,55
30	24,50	690	12,00	1380	5,50
60	24,00	720	11,50	1410	5,00
90	23,20	750	11,00	1440	4,75
120	22,50	780	10,50	1470	4,70
150	21,60	810	10,00	1500	4,55
180	21,00	840	9,50	1530	4,50
210	20,60	870	9,00	1560	4,40
240	19,75	900	8,50	1590	4,20
270	19,25	930	8,30	1620	4,00
300	18,75	960	7,75	1650	3,75
330	18,00	990	7,50	1680	3,70
360	17,50	1020	7,25	1710	3,65
390	17,00	1050	7,00	1740	3,60
420	16,50	1080	6,75	1770	3,55
450	16,20	1110	6,55	1800	3,50
480	16,00	1140	6,50	1830	3,45
510	15,50	1170	6,25	1860	3,40
540	14,75	1200	6,20	1890	3,35
570	14,00	1230	6,10	1920	3,30
600	13,50	1260	6,00	1950	3,30
630	13,00	1290	5,75	1980	3,30
		1320	5,70	2010	3,30

Tabela 17 – Ensaio 8: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 135 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,00	900	23,35	1830	21,95
30	24,90	930	23,30	1860	21,90
60	24,80	960	23,25	1890	21,85
90	24,75	990	23,23	1920	21,80
120	24,70	1020	23,20	1950	21,75
150	24,65	1050	23,15	1980	21,70
180	24,60	1080	23,10	2010	21,65
210	24,55	1110	23,05	2040	21,60
240	24,50	1140	23,00	2070	21,55
270	24,45	1170	22,95	2100	21,50
300	24,40	1200	22,90	2130	21,45
330	24,35	1230	22,85	2160	21,40
360	24,30	1260	22,83	2190	21,35
390	24,25	1290	22,80	2220	21,30
420	24,20	1320	22,75	2250	21,25
450	24,15	1350	22,73	2280	21,20
480	24,10	1380	22,70	2310	21,15
510	24,05	1410	22,65	2340	21,10
540	24,00	1440	22,60	2370	21,05
570	23,90	1470	22,55	2400	21,00
600	23,85	1500	22,53	2430	20,95
630	23,80	1530	22,50	2460	20,93
660	23,75	1560	22,45	2490	20,90
690	23,70	1590	22,40	2520	20,85
720	23,60	1620	22,35	2550	20,83
750	23,55	1650	22,30	2580	20,80
780	23,53	1680	22,20	2610	20,75
810	23,50	1710	22,15	2640	20,73
840	23,45	1740	22,10	2670	20,70
870	23,40	1770	22,05	2700	20,70
		1800	22,00	2730	20,70
				2760	20,70

Tabela 18 – Ensaio 9: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,00	990	21,40	2010	19,00
30	24,80	1020	21,30	2040	18,90
60	24,50	1050	21,25	2070	18,80
90	24,35	1080	21,20	2100	18,75
120	24,30	1110	21,15	2130	18,70
150	24,10	1140	21,10	2160	18,60
180	24,00	1170	21,00	2190	18,55
210	23,90	1200	20,95	2220	18,50
240	23,80	1230	20,90	2250	18,40
270	23,70	1260	20,85	2280	18,35
300	23,60	1290	20,80	2310	18,30
330	23,50	1320	20,70	2340	18,25
360	23,40	1350	20,60	2370	18,20
390	23,30	1380	20,55	2400	18,15
420	23,20	1410	20,50	2430	18,10
450	23,10	1440	20,45	2460	18,05
480	23,00	1470	20,40	2490	18,00
510	22,90	1500	20,30	2520	17,90
540	22,80	1530	20,20	2550	17,80
570	22,70	1560	20,10	2580	17,75
600	22,60	1590	20,00	2610	17,70
630	22,50	1620	19,95	2640	17,65
660	22,30	1650	19,90	2670	17,60
690	22,20	1680	19,80	2700	17,55
720	22,10	1710	19,60	2730	17,50
750	22,00	1740	19,55	2760	17,45
780	21,95	1770	19,50	2790	17,40
810	21,90	1800	19,45	2820	17,35
840	21,80	1830	19,40	2850	17,30
870	21,70	1860	19,30	2880	17,25
900	21,60	1890	19,25	2910	17,20
930	21,55	1920	19,20	2940	17,20
960	21,50	1950	19,15	2970	17,20
		1980	19,10	3000	17,20

Tabela 19 – Ensaio 10: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L-1

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,00	1050	21,70	2130	19,45
30	24,70	1080	21,60	2160	19,40
60	24,50	1110	21,55	2190	19,35
90	24,40	1140	21,50	2220	19,30
120	24,30	1170	21,40	2250	19,20
150	24,20	1200	21,35	2280	19,10
180	24,10	1230	21,30	2310	19,05
210	24,00	1260	21,25	2340	19,00
240	23,90	1290	21,20	2370	18,90
270	23,80	1320	21,10	2400	18,85
300	23,75	1350	21,05	2430	18,80
330	23,70	1380	21,00	2460	18,75
360	23,60	1410	20,95	2490	18,70
390	23,55	1440	20,90	2520	18,65
420	23,50	1470	20,80	2550	18,60
450	23,45	1500	20,75	2580	18,55
480	23,40	1530	20,70	2610	18,50
510	23,20	1560	20,65	2640	18,45
540	23,10	1590	20,60	2670	18,40
570	23,00	1620	20,55	2700	18,35
600	22,90	1650	20,50	2730	18,30
630	22,80	1680	20,45	2760	18,25
660	22,70	1710	20,40	2790	18,20
690	22,60	1740	20,30	2820	18,15
720	22,50	1770	20,20	2850	18,10
750	22,45	1800	20,10	2880	18,05
780	22,40	1830	20,00	2910	18,00
810	22,30	1860	19,95	2940	17,95
840	22,20	1890	19,90	2970	17,90
870	22,10	1920	19,85	3000	17,85
900	22,05	1950	19,80	3030	17,80
930	22,00	1980	19,70	3060	17,75
960	21,90	2010	19,65	3090	17,70
990	21,80	2040	19,55	3120	17,70
1020	21,75	2070	19,50	3150	17,70
		2100	19,50	3180	17,70

Tabela 20 – Ensaio 11: Proveta de 500 mL, utilizando volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,00	1080	21,60	2190	19,00
30	24,80	1110	21,55	2220	18,95
60	24,60	1140	21,50	2250	18,90
90	24,50	1170	21,40	2280	18,85
120	24,40	1200	21,30	2310	18,80
150	24,30	1230	21,25	2340	18,70
180	24,20	1260	21,20	2370	18,65
210	24,10	1290	21,10	2400	18,60
240	24,00	1320	21,05	2430	18,50
270	23,90	1350	20,90	2460	18,45
300	23,80	1380	20,80	2490	18,40
330	23,70	1410	20,70	2520	18,35
360	23,65	1440	20,65	2550	18,30
390	23,55	1470	20,60	2580	18,25
420	23,50	1500	20,55	2610	18,20
450	23,40	1530	20,50	2640	18,10
480	23,35	1560	20,40	2670	18,05
510	23,20	1590	20,30	2700	18,00
540	23,10	1620	20,25	2730	17,95
570	23,00	1650	20,20	2760	17,90
600	22,95	1680	20,10	2790	17,85
630	22,85	1710	20,05	2820	17,80
660	22,75	1740	20,00	2850	17,75
690	22,65	1770	19,90	2880	17,70
720	22,60	1800	19,80	2910	17,65
750	22,50	1830	19,75	2940	17,60
780	22,40	1860	19,70	2970	17,55
810	22,35	1890	19,65	3000	17,50
840	22,30	1920	19,60	3030	17,45
870	22,20	1950	19,50	3060	17,40
900	22,10	1980	19,45	3090	17,35
930	22,05	2010	19,40	3120	17,30
960	21,95	2040	19,30	3150	17,25
990	21,90	2070	19,25	3180	17,20
1020	21,80	2100	19,20	3210	17,20
1050	21,70	2130	19,10	3240	17,20
		2160	19,05	3270	17,20

Tabela 21 – Ensaio 12: Proveta de 500 mL, volume de 500 mL e concentração de 80 g.L⁻¹

Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)	Tempo (s)	Altura (cm)
0	25,00	1170	22,10	2370	19,95
30	24,80	1200	22,00	2400	19,90
60	24,60	1230	21,95	2430	19,90
90	24,50	1260	21,90	2460	19,85
120	24,40	1290	21,85	2490	19,80
150	24,30	1320	21,80	2520	19,75
180	24,25	1350	21,75	2550	19,70
210	24,20	1380	21,70	2580	19,65
240	24,10	1410	21,60	2610	19,60
270	24,05	1440	21,55	2640	19,55
300	24,00	1470	21,50	2670	19,50
330	23,95	1500	21,45	2700	19,45
360	23,90	1530	21,40	2730	19,40
390	23,75	1560	21,35	2760	19,35
420	23,70	1590	21,30	2790	19,35
450	23,65	1620	21,25	2820	19,30
480	23,60	1650	21,20	2850	19,25
510	23,50	1680	21,10	2880	19,20
540	23,45	1710	21,05	2910	19,10
570	23,40	1740	21,00	2940	19,05
600	23,30	1770	21,00	2970	19,00
630	23,25	1800	20,90	3000	18,90
660	23,20	1830	20,85	3030	18,85
690	23,15	1860	20,80	3060	18,80
720	23,10	1890	20,75	3090	18,75
750	23,00	1920	20,70	3120	18,70
780	22,90	1950	20,65	3150	18,70
810	22,85	1980	20,60	3180	18,60
840	22,80	2010	20,55	3210	18,55
870	22,75	2040	20,50	3240	18,50
900	22,70	2070	20,45	3270	18,45
930	22,65	2100	20,40	3300	18,40
960	22,60	2130	20,35	3330	18,40
990	22,50	2160	20,30	3360	18,35
1020	22,40	2190	20,25	3390	18,30
1050	22,35	2220	20,20	3420	18,30
1080	22,30	2250	20,15	3450	18,25
1110	22,25	2280	20,10	3480	18,20
1140	22,20	2310	20,05	3510	18,20
		2340	20,00	3540	18,20
				3570	18,20