



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



PATRIK FERREIRA SILVA

Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Projeto de um Sedimentador

Uberlândia - MG

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



PATRIK FERREIRA SILVA

Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Projeto de um Sedimentador

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Uberlândia - MG

2022

Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Projeto de um Sedimentador

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Uberlândia, 05 de março de 2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
(Orientador – FEQUI / UFU)

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
(FEQUI / UFU)

Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão
(CTEC / UFAL)

Dedico este trabalho ao meu Senhor, pois assim está escrito: fazei tudo para a glória de Deus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à Deus, porque Ele cuidava de mim antes mesmo de eu servir à Ele. Reconheço sua participação no meu ingresso no curso de Engenharia Química, no meio da jornada, e principalmente agora, nesse último estágio do curso. Obrigado, meu Senhor, por se apresentar a mim. Nos meus momentos de maior aflição, foi o meu socorro, e quando em 2021 tudo parecia não ter solução, me apresentou um milagre. A Ti seja dada toda honra e toda glória. Amém.

Quero agradecer aos meus pais: Adilson e Marlucia por me incentivarem a estudar, a seguir meus sonhos e por me ensinar o valor do trabalho. Mesmo quando pedia a suas opiniões a respeito de qual área seguir, nunca tomaram essa decisão por mim, e eu sou grato por isso.

À minha irmã Isabelly, que não me ajudou em nada na obtenção do diploma, mas apareceu aqui porque eu a amo.

Aos meus amigos que tornaram essa jornada de responsabilidade tão divertida e prazerosa. Quero nomeá-los para que recebam os méritos: Amanda, Bruna, Iury, Leticia, Raquel, Renata, Warlen. Aprendi tanto com vocês, de tantas formas. Cada um com as suas lutas, mas sempre dispostos a lutar comigo nas minhas. Em especial a minha amiga Bruna, que traçou um plano de ação rigoroso para não atrasar o curso e deu certo. Seu riso levo marcado nas minhas lembranças.

Ao Dr. Rodolfo Junqueira Brandão, que além de ser meu doutorando se tornou meu amigo. Obrigado por me ajudar não só com o TCC, mas também na jornada acadêmica.

Gostaria de agradecer ao Professor Dr. Cláudio Roberto Duarte pela confiança confiada a mim para elaboração deste trabalho e orientação.

Aos membros da banca, muito obrigado pelos seus comentários e avaliações.

E por fim, mas não menos importante, obrigado UFU pelo suporte, pelos auxílios, pelo trabalho prestado com qualidade. Eu tenho orgulho de carregar o nome dessa Universidade e prometo representa-la bem. É um sonho que se realiza.

Os jovens se cansarão e os moços certamente cairão, mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças, subirão com asas como águias: correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão.

Isaías 40-30:31

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a readequação da prática da disciplina Laboratório de Engenharia Química 2, denominada sedimentação, através da implementação de uma ferramenta capaz de confeccionar uma representação gráfica para aferição das variáveis de interesse do método de Kynch. Para isso foi implementado um algoritmo em linguagem *Python*. O programa de análise de imagens foi capaz de fazer a leitura da gravação do teste em vídeo e gerar uma representação gráfica da altura do líquido clarificado em função do tempo. A implementação do método de análise de imagens se mostrou eficiente, uma vez que os resultados obtidos estavam em concordância com o ensaio utilizando a metodologia antiga. Entre os benefícios da implantação da nova metodologia destaca-se: a redução de erros de leitura, diminuição do trabalho de coleta de dados durante o ensaio, e o aumento significativo da quantidade de pontos (dados) do gráfico, tornando sua análise mais eficiente.

Palavras chave: Sedimentação; Kynch; Python; Análise de imagens.

ABSTRACT

The objective of this work is to readjust the practice of the Chemical Engineering Laboratory 2 discipline, called sedimentation, through the implementation of a tool capable of making a graphical representation to measure the variables of interest in the Kynch method. For this, an algorithm was implemented in Python language. The image analysis program was able to read the video recording of the test and generate a graphic representation of the height of the clarified liquid as a function of time. The implementation of the image analysis method proved to be efficient, since the results obtained were in agreement with the test using the old methodology. Among the benefits of implementing the new methodology, the following stand out: the reduction of reading errors, reduction of data collection work during the test, and the significant increase in the number of points (data) of the graph, making its analysis more efficient.

Keywords: Sedimentation; Kynch; Python; Image analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 DIAGRAMA ILUSTRATIVO DE UM ESPESSADOR CONTÍNUO CONVENCIONAL, TIPO DORR-OLIVER	3
FIGURA 2 DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE SEDIMENTAÇÃO BATELADA DE ACORDO COM O MÉTODO DE KYNCH.....	5
FIGURA 3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROJETO PELO MÉTODO DE KYNCH.....	7
FIGURA 4 ENSAIO DE PROVETA COM POLPA DE CaCO_3 TINGIDA COM AZUL DE METILENO	11
FIGURA 5 CURVA DE SEDIMENTAÇÃO PARA A POLPA DE CaCO_3 (20G/L)	14
FIGURA 6 DETERMINAÇÃO DO PONTO DE INFLEXÃO	17
FIGURA 7 DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DO PONTO DE INFLEXÃO	18
FIGURA 8 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS T_F E T_{RES}	19
FIGURA 9 ABRINDO A IMAGEM NO IMAGEJ	20
FIGURA 10 DEFININDO A ESCALA USANDO O SOFTWARE IMAGEJ	21
FIGURA 11 PROCEDIMENTO PARA AFERIR A MAGNITUDE DA RETA TRAÇADA	22

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- PLANILHA PARA REGISTRO DE DADOS DE ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	13
TABELA 2 PARÂMETROS DA CURVA DE SEDIMENTAÇÃO PARA O PROCEDIMENTO MANUAL	15
TABELA 3 ESPECIFICAÇÕES DO SEDIMENTADOR USANDO O GRÁFICO GERADO DE FORMA MANUAL.	17
TABELA 4 PARÂMETROS DA CURVA DE SEDIMENTAÇÃO PELO MÉTODO DE ANÁLISE DE IMAGENS.	22
TABELA 5 DIMENSÕES DO SEDIMENTADOR USANDO O GRÁFICO GERADO PELO ALGORITMO	23
TABELA 6 COMPARAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO SEDIMENTADOR UTILIZANDO O MÉTODO USUAL E O MÉTODO DE ANÁLISE DE IMAGENS	23

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>1</i>
1.2.2	<i>Objetivo Específico</i>	<i>1</i>
2	- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	MÉTODO DE KYNCH E BISCAIA JR.	3
3	– METODOLOGIA	10
4	– RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
4.1	PROCEDIMENTO MANUAL	13
4.2	ANÁLISE DE IMAGEM.....	17
4.2.1	<i>Utilizando o ImageJ.....</i>	<i>19</i>
5	CONCLUSÃO	25
6	REFERÊNCIAS	26

I INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os alunos do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia têm tido a oportunidade de estudar e projetar alguns equipamentos utilizados nas linhas de produção industrial. Os sedimentadores são um destes equipamentos e são utilizados em muitos processos como: beneficiamento de minério, processamento de alimentos, tratamento de efluentes e nas indústrias química, têxtil e farmacêutica.

O primeiro contato se dá na disciplina Operações Unitárias 1, na qual os alunos aprendem os cálculos referentes ao dimensionamento do sedimentador. Após esta aprendizagem teórica, na disciplina Laboratório de Engenharia Química 2, os discentes têm a oportunidade de compreender de forma dinâmica e investigativa o processo, adquirindo maior domínio sobre o assunto. Entretanto, apesar de a unidade referente a esta operação unitária estar adequada para uso, faz-se necessário sua automatização através da criação de um software capaz de capturar informações, ordená-las através de algoritmos e apresentá-las de forma gráfica. Os discentes utilizarão o software como uma ferramenta para realizar os cálculos pertinentes ao dimensionamento do sedimentador.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa promover a automatização da prática de sedimentação e facilitação do entendimento sobre o projeto de sedimentadores por parte dos alunos do curso de Engenharia Química, devido a importância do processo e sua vasta aplicação.

1.2.2 Objetivo Específico

Readequar a prática da disciplina Laboratório de Engenharia Química 2, denominada sedimentação, através da implementação de uma ferramenta que seja capaz de confeccionar uma representação gráfica para aferição das variáveis de interesse do método de Kynch.

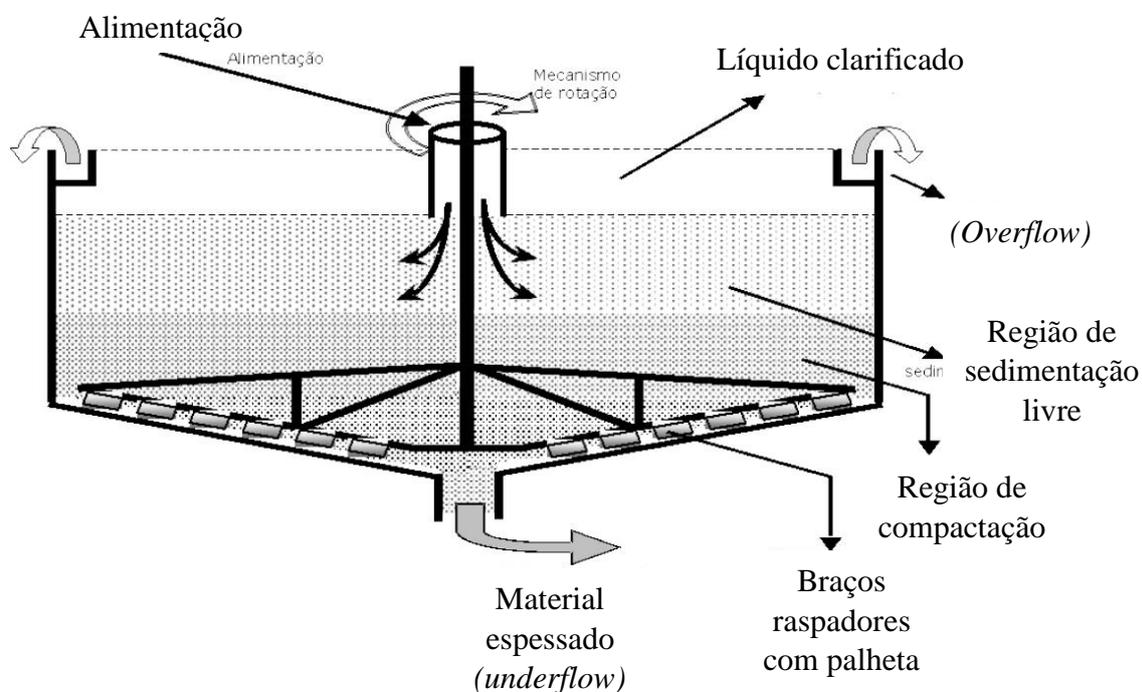
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A operação de sedimentação é um processo baseado em fenômenos de transporte, no qual a partícula sólida em suspensão está sujeita à ação das forças da gravidade, do empuxo e de resistência ao movimento. Esse processo é utilizado para promover a separação entre as fases sólida e líquida. O equipamento utilizado para esse fim é denominado sedimentador. Os objetivos básicos que este equipamento deve atender varia desde a concentração de material particulado até a produção de uma corrente líquida clarificada, com um nível de qualidade suficientemente satisfatório para realizar sua recirculação direta ou que demande tratamentos simples e com baixo custo. Os sedimentadores são equipamentos que utilizam a força gravitacional como agente separador, o qual atua sobre os constituintes que compõem a solução promovendo a sedimentação, que é a deposição da fase sólida (peso molecular maior) na base do equipamento. Tais instrumentos são comuns nas indústrias químicas, de tratamento de água e efluentes, em indústrias de beneficiamento mineral e metalúrgicos. (SILVA,2004)

O projeto de um equipamento para realização da separação das fases sólida e líquida depende das necessidades específicas do processo, bem como das características da alimentação. Os sedimentadores são divididos em dois grupos. Os espessadores cujo objetivo é concentrar material com valor comercial ou rejeito, visando a sua disposição em barragens, cavas de minas ou como aterro de galerias de minas subterrâneas. Estes são os mais utilizados na indústria mineral. Os clarificadores, são utilizados quando o interesse básico é a obtenção de um sobrenadante limpo, com concentração de partículas relativamente baixa. Nas indústrias os espessadores são os mais utilizados e geralmente operam em regime contínuo. (Azevedo, 2009).

O espessador contínuo convencional apresentam três correntes de fluxo, como ilustra a Figura 1. A alimentação contendo a suspensão que se deseja processar é feita pela parte superior do equipamento de modo a diminuir a turbulência, o overflow ou corrente de clarificado isento de sólidos e a corrente de *underflow* ou lama na qual as partículas sedimentam e formam no fundo do equipamento a região de compactação ou de espessado. É um tanque provido de entrada para a suspensão e retirada de espessado, com auxílio de braços raspadores equipados com paletas, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional, tipo Dorr-Oliver



Fonte: Adaptada de FRANÇA (2007)

2.1 Método de Kynch e Biscaia Jr.

Kynch (1952) desenvolveu uma teoria simplificada para descrever o fenômeno da sedimentação em batelada. O projeto de sedimentadores utilizando o método de Kynch utiliza um teste de proveta, e estabelece que a partir do conhecimento do movimento da interface descendente e da concentração de alimentação do sedimentador pode-se determinar o par de variáveis, concentração e velocidade de sedimentação necessárias para a estimação da área do sedimentador contínuo. Ademais, o método de Kynch produz resultados satisfatórios principalmente para o caso de formação de sedimentos incompressíveis ou suspensões diluídas.

O processo de sedimentação é regido pela lei de Stokes, que se refere à força de fricção experimentada por objetos esféricos que se movem no seio de um fluido viscoso, num regime laminar. Esta lei considera que a velocidade de sedimentação de uma

partícula isolada ($V_{t\infty}$) é função da sua densidade (ρ_s) e do seu diâmetro (D_p), como expressa a Equação 1.

$$V_{t\infty} = \frac{(\rho_s - \rho_f)g D_p^2}{18 \mu} \quad (1)$$

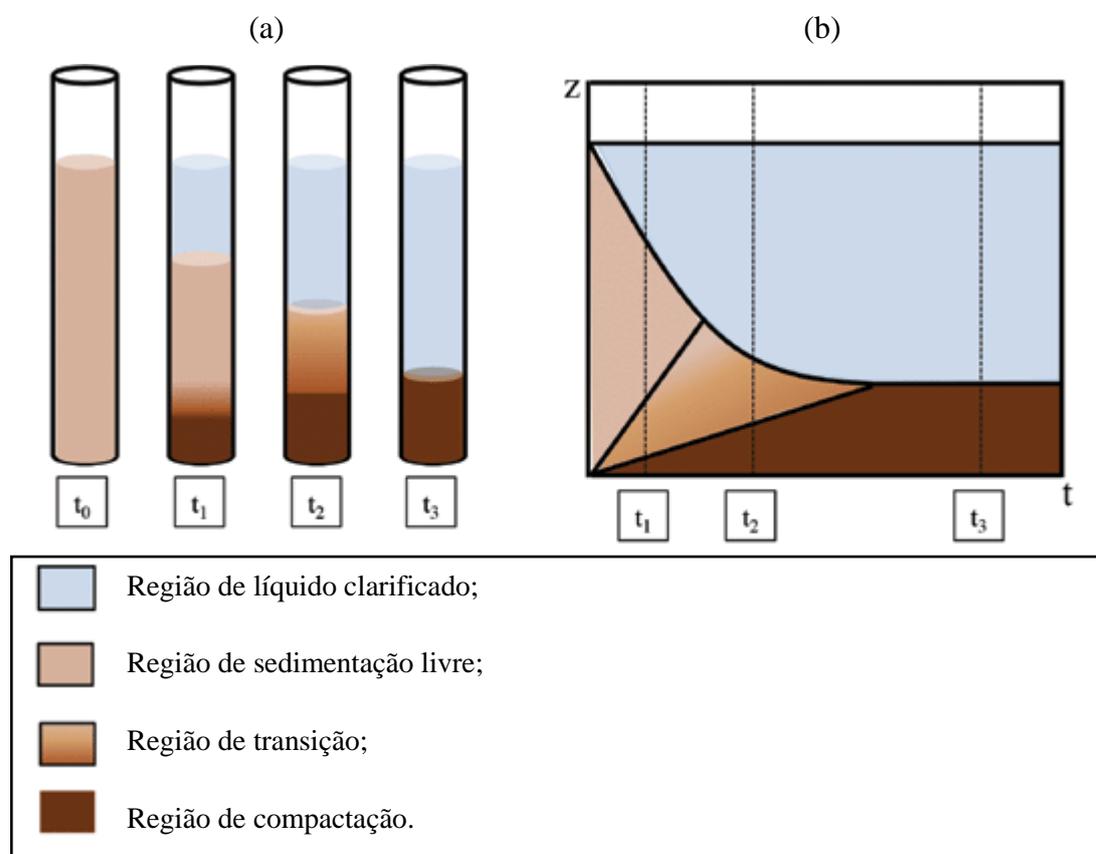
Em que:

- $V_{t\infty}$ = velocidade de sedimentação;
- ρ_s = massa específica da partícula;
- ρ_f = massa específica do fluido;
- g = aceleração da gravidade;
- D_p = diâmetro da partícula;
- μ = viscosidade do fluido.

Porém, existem alguns fatores que influenciam o processo de sedimentação, tais como as características físicas da partícula (tamanho, esfericidade e densidade), a presença de pré tratamento da polpa (floculação e coagulação) e o efeito de concentração de sólidos. A velocidade de sedimentação está diretamente relacionada ao tamanho e a densidade da partícula. A presença de pré-tratamento faz com que as partículas se aglomerem aumentando seu tamanho e sua esfericidade, contribuindo para um aumento na velocidade de sedimentação. Por outro lado, nota-se que o efeito de concentração desacelera as partículas pois a trajetória delas é retilínea em direção a base da proveta e o aumento na quantidade de partículas implica num maior número de colisões.

O teste de proveta é baseado no deslocamento da interface superior da suspensão com o tempo. A teoria de Kynch indica que durante o teste é possível ser observada a existência de quatro regiões distintas que são apresentadas na Figura 2, a qual representa a dinâmica da sedimentação em provetas (a) e a respectiva curva de sedimentação (b).

Figura 2 Descrição do fenômeno de sedimentação batelada de acordo com o método de Kynch



Fonte: Adaptada de MOREIRA, 2014, p. 23.

No início do ensaio ($t=0$), a mistura é homogênea e a concentração de sólidos é constante em todos os pontos da proveta. Durante esse teste, pode ser observada a coexistência de quatro regiões distintas: a região de líquido clarificado, a de sedimentação livre, a região de transição e a de compactação. Para caracterizar cada região são assumidas algumas considerações físicas:

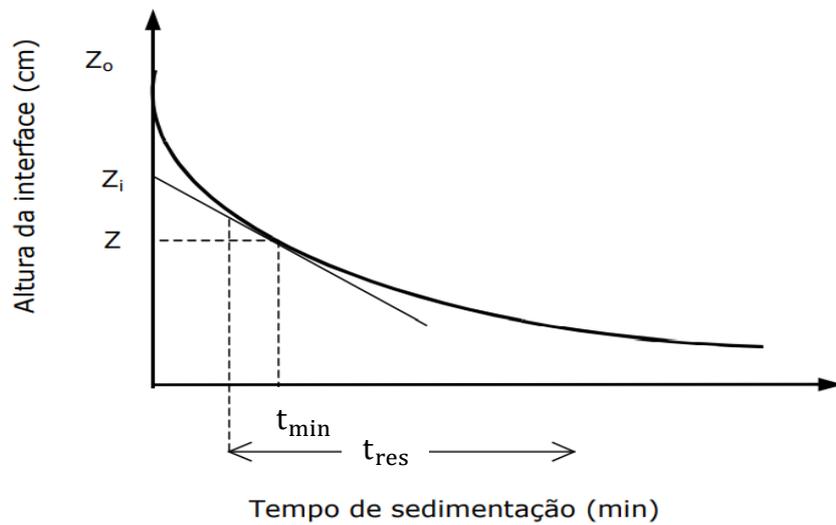
- Na região de líquido clarificado não há presença de sólidos;
- Na região de sedimentação livre, as partículas sólidas sedimentam sem que haja interação entre elas e a velocidade de sedimentação e a concentração de sólidos são consideradas constantes;
- Na região de transição a velocidade de sedimentação é decrescente com concentração variável

- Na região de compactação, as partículas sólidas já começam a interagir entre si, sendo notada a variação da concentração de sólidos ao longo dessa região, devido à desaceleração sofrida por essas partículas. (MOREIRA, 2014).

Em seu trabalho Kynch elabora o um método que relaciona o cálculo da altura e da área de seção transversal do tanque de sedimentação com base em dados de velocidade de sedimentação e concentração da polpa formada. Observou-se que existem dificuldades e incertezas no estabelecimento das equações constitutivas para as lamas compressíveis, o que levou o projeto do sedimentador a ser baseado nos ensaios em batelada ou testes de proveta conduzidos diretamente com a suspensão a ser tratada. (MASSARANI, 2001)

O ensaio de proveta consiste em um teste de sedimentação descontínua, que tem o objetivo de acompanhar o deslocamento da interface superior de uma suspensão ao longo do tempo, numa proveta. O teste se inicia com a preparação da solução com concentração inicial conhecida, que se deseja estudar. Ao completar o volume da proveta e homogeneizar a polpa, deve-se anotar a altura inicial da interface e acionar o cronômetro para marcar o tempo do ensaio. Para registrar a variação da altura de líquido clarificado com o tempo utiliza-se uma escala milimetrada fixada na proveta, e em tempo pré-definido faz-se a coleta do par ordenado (altura do líquido clarificado e tempo de ensaio). Ao final do ensaio, a variação da altura da interface se dará lentamente e o intervalo de coleta de dados pode ser aumentado. O ensaio tem o seu fim quando ocorrer a estabilidade no valor da altura da região de compactação de sólidos e isso se dá quando a altura da interface se mover pouco em um grande intervalo de tempo. Nesse instante tem-se o líquido clarificado por cima e o leito de partículas empacotadas no fundo da proveta (produto espessado). (MASSARANI, 2001)

De posse da representação (altura vs tempo) é traçada uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de sedimentação, como mostrado na Figura 3. A representação gráfica auxilia na obtenção de parâmetros para a estimação da concentração de lodo e velocidade de sedimentação.



Fonte: Adaptada de FRANÇA (2007)

A simplificação do método de Kynch proposta por Biscaia (1988) determina que:

- Z_i : é o ponto no qual a tangente toca o eixo y;
- Z_0 : é a altura inicial da interface no início do teste;
- Z : é o ponto no qual a reta tangente toca a curva (eixo y), representa a altura da região de compactação;
- t_{min} : é o ponto no qual a reta tangente toca a curva (eixo x), representa o tempo mínimo necessário à formação da região de compactação;
- t_{res} : o tempo de residência da partícula sólida na região de compactação, necessário à formação do material espessado.

Em 1988 Biscaia Jr. Introduziu uma simplificação matemática da metodologia de Kynch facilitando a determinação gráfica das variáveis de projeto, que são determinadas pelas Equações [2] e [3]. Essas equações permitem calcular a concentração a e velocidade de sedimentação de sólidos em diferentes alturas da proveta, durante o ensaio de sedimentação, respectivamente.

$$C_s = \frac{(C_{s0} * Z_0)}{Z} \quad (2)$$

$$V_s = \frac{(Z_i * Z)}{t_{min}} \quad (3)$$

Em que:

- C_s Concentração da polpa em qualquer instante;
- C_{s0} Concentração da polpa no instante $t=0$;
- Z_0 Altura inicial da interface no teste;
- Z Altura da região de compactação;
- Z_i Ponto no qual a tangente toca o eixo y ;
- t_{min} Tempo mínimo necessário à formação da região de compactação;
- V_s Velocidade de sedimentação.

A vazão máxima de suspensão que poderá ser alimentada pela área da seção transversal ou a capacidade de projeto do sedimentador é dada pela Equação 4.

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{projeto} = \frac{Z_0}{t_{min}} \quad (4)$$

Em que:

- Q Vazão de alimentação da polpa;
- A Área da seção transversal do espessador;
- Z_0 Altura inicial da interface no teste;
- t_{min} Tempo mínimo necessário à formação da região de compactação.

Desse modo, conhecendo a vazão de polpa que irá alimentar o sedimentador, e de posse dos parâmetros da Equação 4 (Z e t_{min}) obtido através do teste de proveta calcula-se a área e o diâmetro do espessador.

Para especificar o sedimentador é preciso definir sua altura. A altura é calculada por meio da soma das alturas de três regiões específicas:

- H_1 - Altura da região de líquido clarificado;
- H_2 - Altura da região de compactação;
- H_3 - Altura da camada de espessado já no ponto de retirada.

E, portanto, a altura total do sedimentador é expressa pela Equação 5

$$H_{TOTAL} = H_1 + H_2 + H_3 \quad (5)$$

Por convenção, o valor de H_1 pode variar entre 0,45 e 0,75 m. A altura H_2 é definida de acordo com a Equação 6.

$$H_2 = \frac{4}{3} \left(\frac{Q}{A} \right) \frac{C_{S0} t_{res}}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_{esp} - \rho_f} \right) \quad (6)$$

Em que:

- Q Vazão de alimentação da polpa;
- A Área da seção transversal do espessador;
- C_{S0} Concentração da polpa no instante $t=0$;
- t_{res} : o tempo de residência da partícula sólida na região de compactação;
- ρ_s Massa específica do sólido;
- ρ_f Massa específica do fluido;
- ρ_{esp} Massa específica do espessado.

O valor de H_3 é definido de acordo com a Equação 7.

$$H_3 = 0,146R \quad (7)$$

3 – METODOLOGIA

3.1 Procedimento Experimental

O escopo deste trabalho visa a atualização da unidade de sedimentação, utilizando uma técnica de tratamento de imagens para gerar a curva de sedimentação resultante do ensaio de proveta.

Os materiais utilizados durante a execução do procedimento experimental estão listados a abaixo:

- Azul de metileno 2g;
- Balança;
- Balão volumétrico de 1000ml;
- Béquer 500ml;
- Câmera
- Caneta para marcação;
- Carbonato de Cálcio ($CaCO_3$) 20 g;
- Cronômetro;
- Escala graduada milimetrada;
- Funil;
- Pisseta com água destilada;
- Proveta 1000ml;
- Régua;
- Tripé.

Antes de mais nada, foram feitos alguns testes de ajuste da luminosidade e de posição para atingir uma melhor observação da sedimentação e consequente coleta de dados.

Inicialmente, mediu-se uma amostra de 20g de carbonato de cálcio em um béquer e, em seguida, transferiu-se para um balão volumétrico com o auxílio de um funil e uma pisseta, a fim de preparar uma solução de carbonato de cálcio com concentração de 20g/L. Em seguida, a polpa foi homogeneizada e alimentada à proveta, como ilustra a

Figura 4. Ao completar o volume da proveta com a polpa, anotou-se a altura inicial da interface e acionou-se o cronômetro para marcar o tempo do ensaio.

Figura 4 Ensaio de proveta com polpa de CaCO_3 tingida com azul de metileno



Fonte: Própria.

3.2 Análise de imagens

Antes de mais nada, foram feitos alguns testes de ajuste da luminosidade e de posição (proveta e câmera) para atingir uma melhor observação da sedimentação e consequente coleta de dados. Foi então montado o aparato de filmagem para câmera. Preparou-se a solução de 20g/L de CaCO_3 , homogeneizou-se a mistura na proveta e deu-se início ao teste iniciando a filmagem.

Abaixo está listado o algoritmo de resolução da problemática em questão.

- a) Importações das bibliotecas necessárias;
- b) Implementação de uma rotina para obtenção dos frames do vídeo (1 frame a cada 5 segundos);

- c) Determinação do corte vertical do frame para análise da concentração;
- d) Conversão do frame para escala de cinza;
- e) Contagem e conversão dos pixels em centímetros;
- f) Criação de um arquivo *.csv* com o par ordenado altura (cm) x tempo (s);
- g) Criação da curva de sedimentação.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Procedimento manual

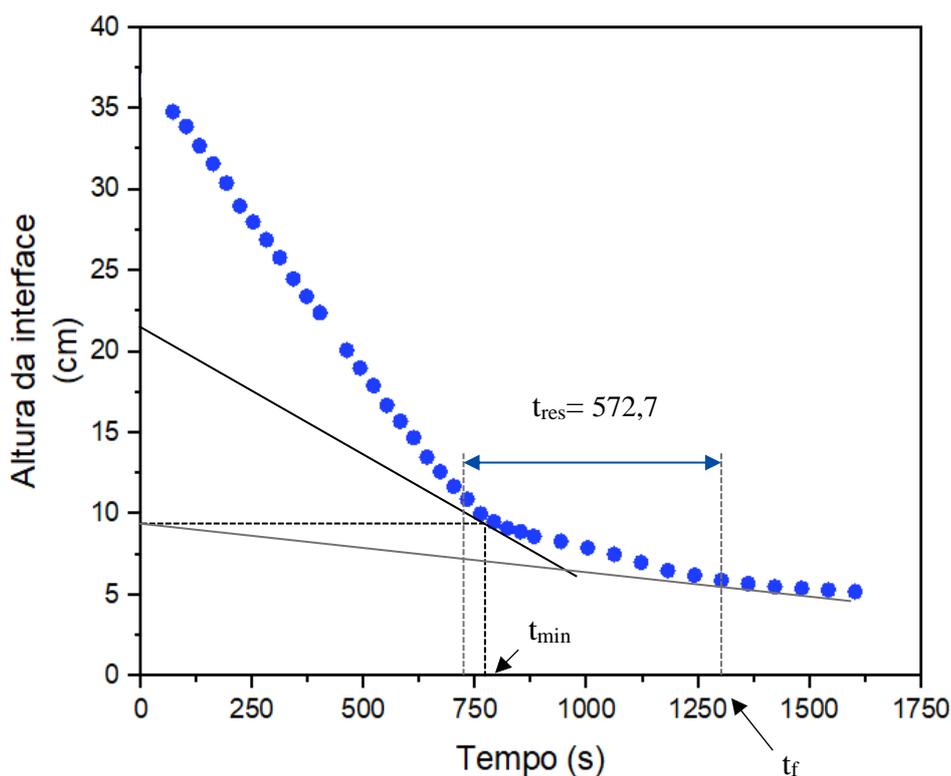
Na Tabela 1 encontram-se os resultados de um teste de proveta para uma polpa de carbonato de cálcio (CaCO_3), com concentração de 20 g/L.

Tabela 1- Planilha para registro de dados de ensaio de sedimentação

Material fino de CaCO_3			
Concentração 20g/L		Densidade do sólido: 2,33 g/L	
Tempo (min)	Altura de interface (cm)	Tempo (min)	Altura de interface (cm)
0,0	35,4	11,2	12,6
1,2	34,8	11,7	11,7
1,7	33,9	12,2	10,9
2,2	32,7	12,7	10,0
2,7	31,6	13,2	9,5
3,2	30,4	13,7	9,1
3,7	29,0	14,2	8,9
4,2	28,0	14,7	8,6
4,7	26,9	15,7	8,3
5,2	25,8	16,7	7,9
5,7	24,5	17,7	7,5
6,2	23,4	18,7	7,0
6,7	22,4	19,7	6,5
7,2	31,3	20,7	6,2
7,7	20,1	21,7	5,9
8,2	19,0	22,7	5,7
8,7	17,9	23,7	5,5
9,2	16,7	24,7	5,4
9,7	15,7	25,7	5,3
10,2	14,7	26,7	5,2
10,7	13,5		

Na Figura 5 consta a curva de sedimentação resultante desse teste. Verifica-se a determinação de t_{\min} pelo método da tangente. Todos os traçados foram feitos usando o software *Paint*.

Figura 5 Curva de sedimentação para a polpa de CaCO_3 (20g/L)



Fonte: Própria

Ao aplicar o método das tangentes é determinado os parâmetros $t_{\min} = 768,8$ segundos (12,8 minutos) e $Z = 9,5$ centímetros. Para determinar o tempo de residência t_{res} é realizada a diferença entre o ponto t_f e o ponto crítico da curva (ponto no qual a derivada da função é nula). O ponto t_f é determinado traçando uma reta tangente a curva de sedimentação passando pelo ponto Z. Os valores foram lidos no gráfico utilizando o software *ImageJ*. Esse software é capaz de medir a distância em pixels e elaborar uma nova escala de tempo e distância para leitura direta. O passo a passo para utilizar o *ImageJ* está descrito no item 4.2.1 utilizando o software *ImageJ*. Os valores lidos no gráfico são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros da curva de sedimentação para o procedimento manual

Parâmetros da curva de sedimentação	
Tempo final da região de sedimentação livre (s)	730,5
t_{min} (s)	768,8
$t_{rés}$ (s)	572,7
t_f (s)	1303,2
Z (cm)	9,5
Z_0 (cm)	35,4

A vazão de operação é função da demanda estabelecida no projeto, nesse trabalho seu valor será fixado em 30m³/h., portanto, a capacidade de projeto do sedimentador é dada pela Equação 8.

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{projeto} = \frac{Z_0}{t_{min}}$$

$$A_{projeto} = \frac{Qt_{min}}{Z_0} \quad (8)$$

$$A_{projeto} = \frac{30 * 768,8}{35,4} * \frac{100}{3600}$$

$$A_{projeto} = 18,10 \text{ m}^2$$

$$A_{projeto} = \mathbf{19,91 \text{ m}^2}$$

Foi aplicado a área encontrada um fator de segurança de 10%. A área da seção transversal do sedimentador é dada pela Equação 7, e por ela determina-se o diâmetro do espessador, que é uma das variáveis importantes do projeto. O diâmetro é calculado utilizando-se a Equação 9.

$$A_{transversal} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (9)$$

$$D = \sqrt{\frac{A_{transversal} * 4}{\pi}}$$

$$D = 5,03 \text{ m}$$

Para determinar o sedimentador é necessário especificar sua altura total, esta é a soma de H_1 , H_2 e H_3 . H_1 será definido como 0,6 m, que é a média dos valores extremos que essa variável pode assumir. H_2 é a altura de sedimentação e é apela Equação 10

$$H_2 = \frac{4}{3} \left(\frac{Q}{A} \right) \frac{C_{S0} t_{res}}{\rho_s} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_{esp} - \rho_f} \right)$$

$$H_2 = \frac{4}{3} \left(\frac{30}{19,91} \right) \frac{20 * 572,7}{2,33} \left(\frac{2,33 - 1,00}{1,01 - 1,00} \right) * \frac{1}{3600 * 1000} \quad (10)$$

$$H_2 = 0,36 \text{ m}$$

Para determinar o parâmetro H_3 (altura da camada de espessado no ponto para retirada), utiliza-se a Equação 11.

$$H_3 = 0,146R$$

$$H_3 = 0,146*(4,95/2) \quad (11)$$

$$H_3 = 0,37 \text{ m}$$

Por fim, a altura total H_{TOTAL} é dada pela Equação 12 e o sedimentador está especificado.

$$H_{TOTAL} = H_1 + H_2 + H_3$$

$$H_{TOTAL} = 0,6 + 0,36 + 0,37 \quad (12)$$

$$H_{TOTAL} = 1,33 \text{ m}$$

Na Tabela 3 é apresentado as especificações do sedimentador usando o gráfico gerado na forma manual.

Tabela 3 Especificações do sedimentador usando o gráfico gerado de forma manual.

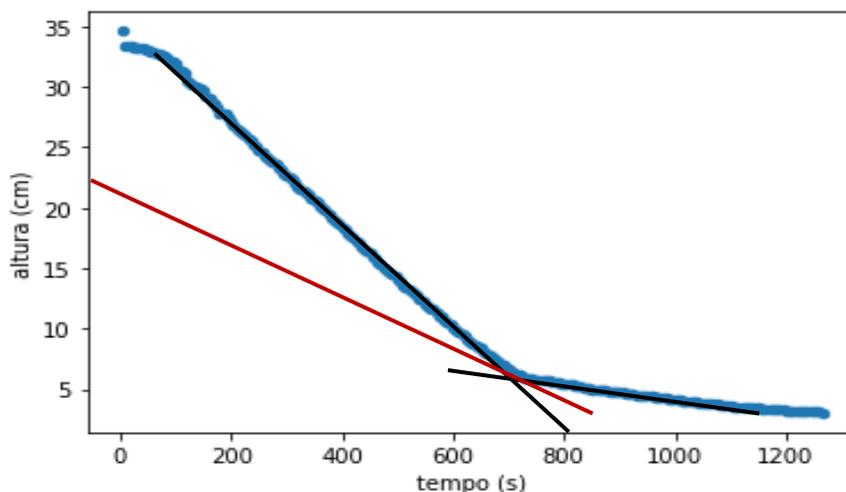
Dimensão	Valor
Área (m ²)	19,91
Altura (m)	1,33
Diâmetro (m)	5,03

4.2 Análise de Imagem

Após a execução do algoritmo é gerado um arquivo no formato *.png* nomeado *Altura_Tempo* que é a representação gráfica do processo de sedimentação. Abaixo é descrito o procedimento detalhado para obtenção dos parâmetros da curva de sedimentação.

Primeiramente é necessário encontrar o ponto de inflexão da curva. Um método rápido e visual é mostrado na Figura 6. Este método se baseia em traçar duas retas tangentes às regiões de sedimentação livre e de compactação. A interseção entre as retas é o ponto de inflexão.

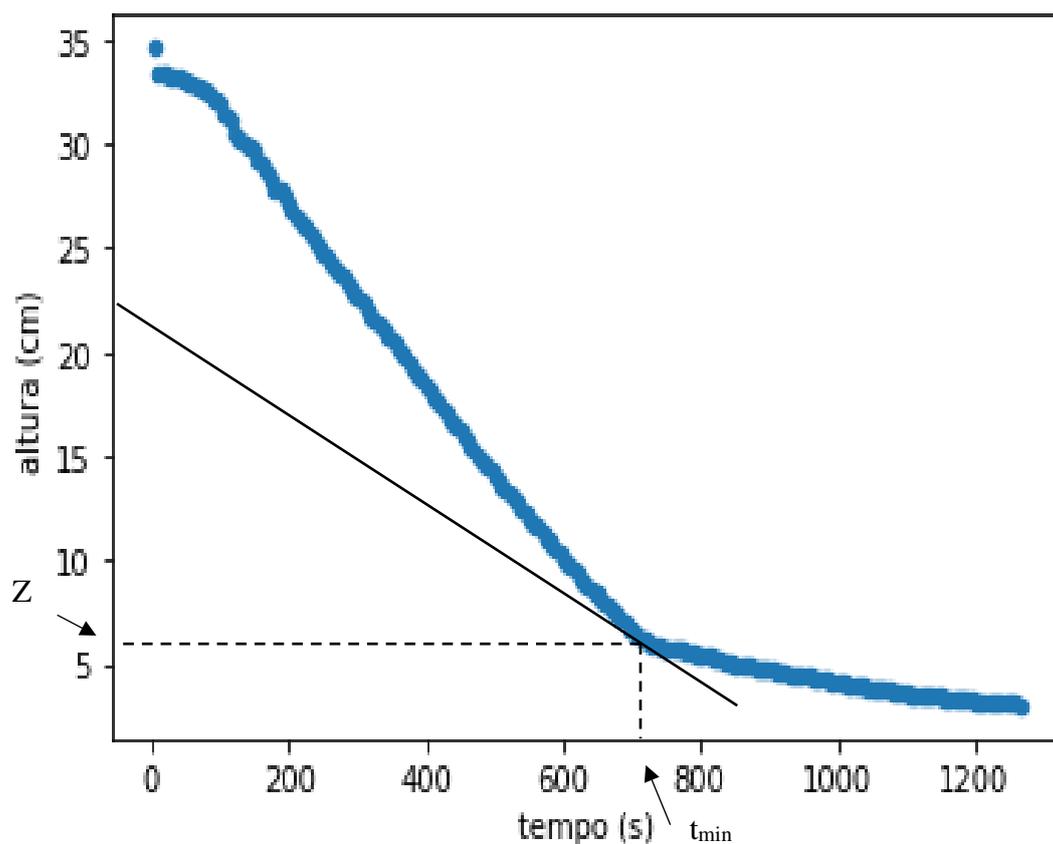
Figura 6 Determinação do ponto de inflexão



Fonte: O autor

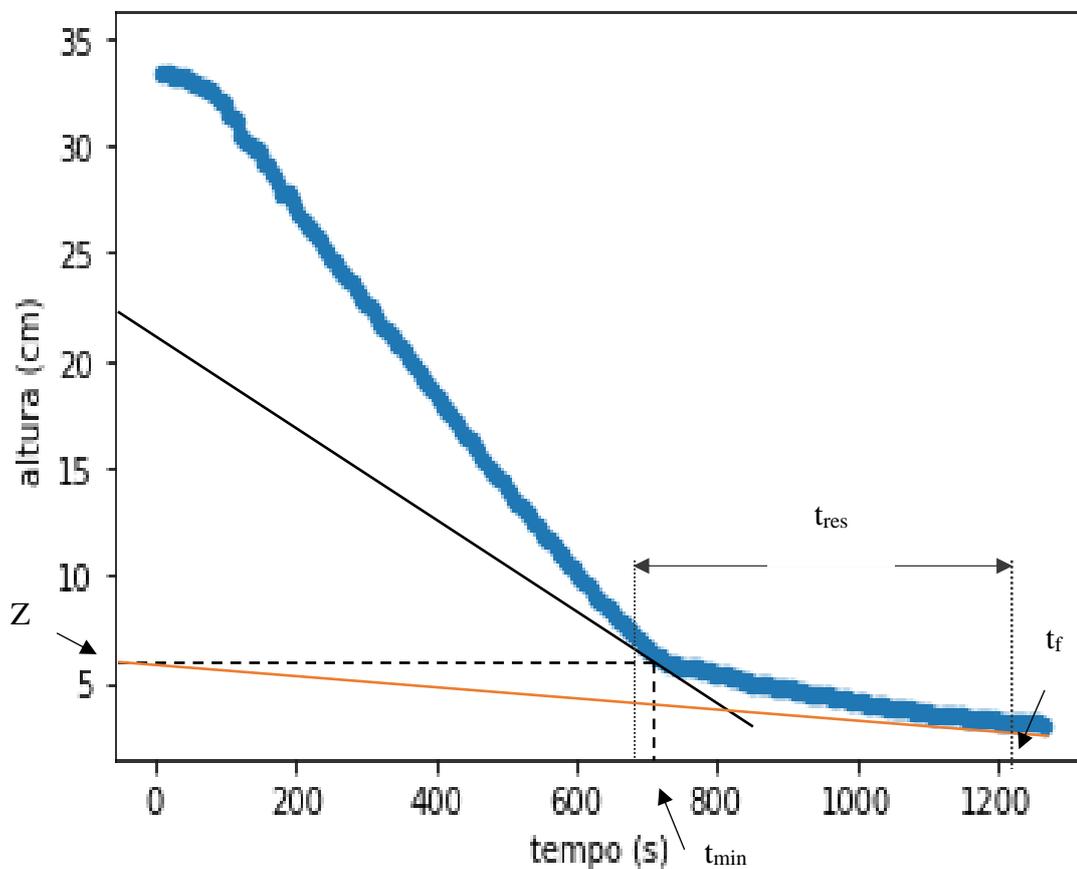
De posse da reta que tangencia a curva no ponto de inflexão é possível determinar o parâmetro t_{\min} , que é definido como a abscissa do par ordenado no ponto de inflexão e Z (a ordenada) Na Figura 7 é mostrado esse procedimento.

Figura 7 Determinação das coordenadas do ponto de inflexão



Fonte: O autor

Os próximos parâmetros a serem determinados são t_f e t_{res} . A variável t_{res} é a diferença entre o tempo no qual a região de sedimentação livre termina e o tempo final da compactação (t_f). O parâmetro t_f é determinado traçando uma reta tangente a curva de sedimentação passando pelo ponto Z. A localização desses pontos é mostrada na Figura 7.

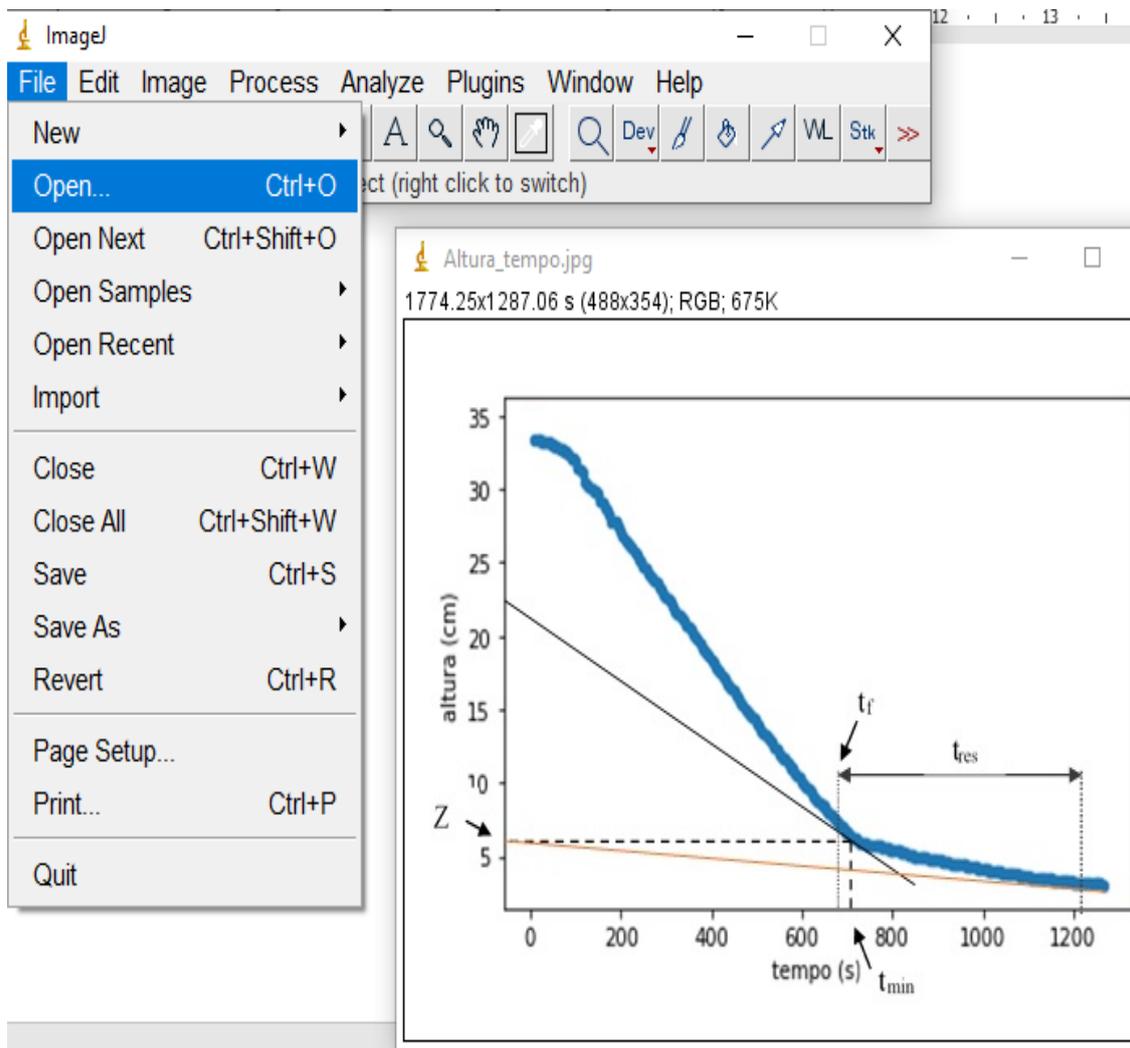
Figura 8 Determinação dos parâmetros t_f e t_{res} 

Fonte: O autor

Para mensurar os parâmetros foi utilizado o software *ImageJ*, para isso é recomendado copiar e colar a imagem no *paint* e exportá-la como um arquivo do tipo (*.jpg* ou *.png*). O procedimento para determinar os parâmetros no *ImageJ* está descrito no tópico seguinte.

4.2.1 Utilizando o *ImageJ*

Abaixo será apresentado o passo a passo para leitura dos pontos de interesse. Primeiramente é preciso abrir a imagem no programa (Ctrl + O), como mostrado na Figura 9.

Figura 9 Abrindo a imagem no *ImageJ*

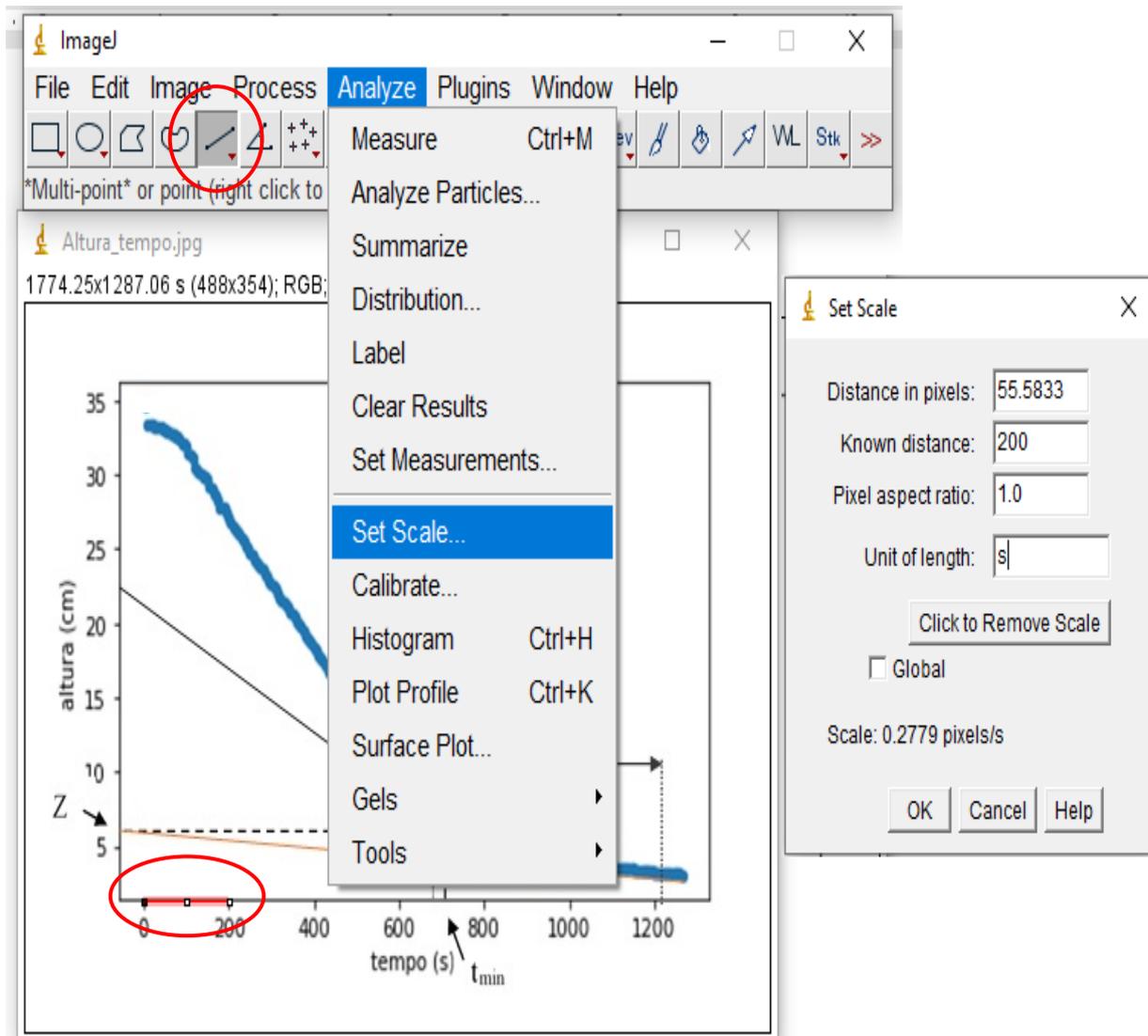
Fonte: O autor

Após a abertura da imagem no programa é preciso fazer uma calibração para definir a escala. Para isso primeiro foi traçado um segmento do ponto zero (0) até um ponto de valor conhecido na escala (nesse caso usou-se o segmento 0-200), como mostrado na Figura 10. Então seguiu-se o caminho *Analyze > Set Scale*.

- Em *Know distance* preencheu-se com o valor do segmento (200);
- Especificou-se a unidade em *unit of length*, nesse caso, segundos (s).

Esse processo é mostrado na Figura 10.

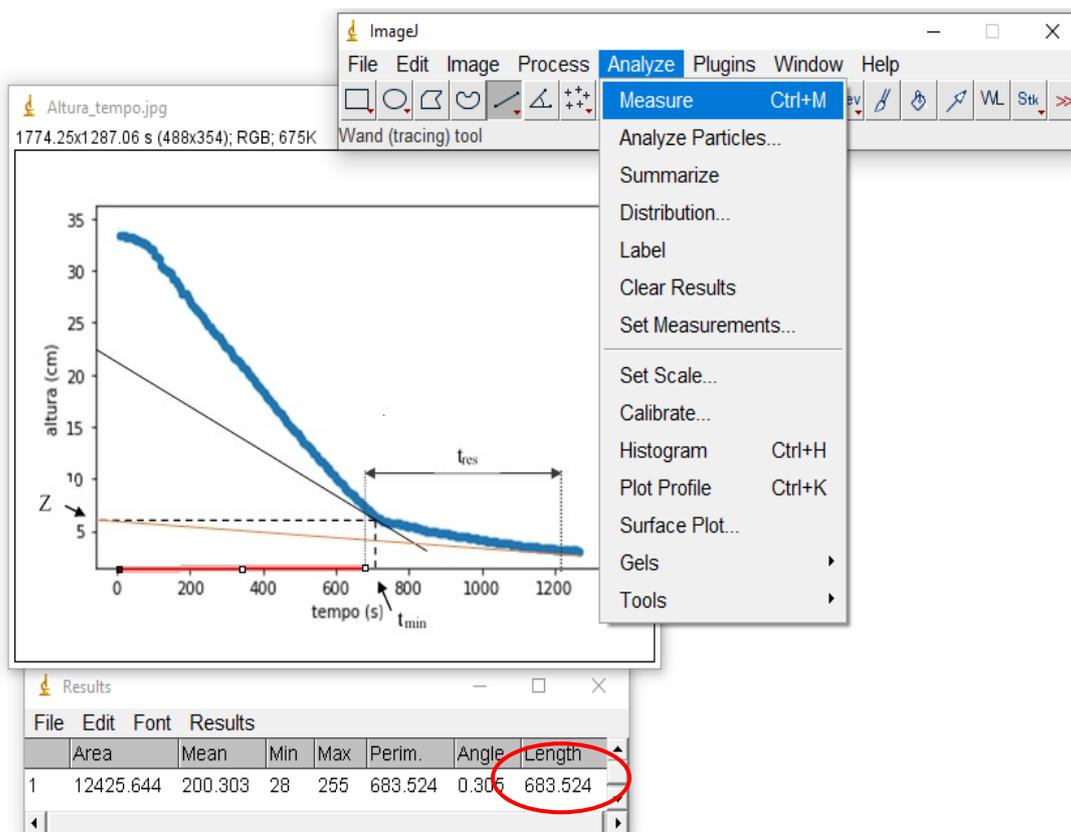
Figura 10 Definindo a escala usando o software *ImageJ*



Fonte: O autor

Depois de definir a escala pode-se traçar uma nova reta referente a medida de interesse. Como exemplo foi mensurado a abcissa do ponto t_f . Depois de fazer o traçado seguiu-se o caminho: *Analyze > Measure* (Ctrl+M). O valor do comprimento (*length*) da reta representa justamente a medida de interesse, nesse caso $t_f = 683,5$ s. Na Figura 11 é apresentado este procedimento.

Figura 11 Procedimento para aferir a magnitude da reta traçada



Fonte: O autor

Os demais parâmetros foram aferidos utilizando a mesma metodologia. A Tabela 4 contém a magnitude dos parâmetros de interesse do método Biscaia Jr.

Tabela 4 Parâmetros da curva de sedimentação pelo método de análise de imagens.

Parâmetros da curva de sedimentação	
Tempo final da região de sedimentação livre (s)	683,5
t_{min} (s)	709,9
t_{res} (s)	538,6
t_f (s)	683,5
Z (cm)	6,2
Z_0 (cm)	35,4

O cálculo da área, diâmetro e das alturas (H_1 , H_2 e H_3) foram calculados de forma análoga apresentado no item 4.1 Procedimento manual, e os resultados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 Dimensões do sedimentador usando o gráfico gerado pelo algoritmo

Dimensão	Valor
Área (m ²)	18,38
H_1 (m)	0,60
H_2 (m)	0,37
H_3 (m)	0,35
Altura Total (m)	1,32
Diâmetro (m)	4,84

Na Tabela 6 é apresentada a comparação das medidas do sedimentador utilizando o método usual e o método de análise de imagens.

Tabela 6 Comparação das especificações do sedimentador utilizando o método usual e o método de análise de imagens

Dimensão	Método manual	Método Automático	Desvio (%)
Área (m ²)	19,91	18,38	7,7
Altura (m)	1,33	1,32	0,7
Diâmetro (m)	5,03	4,84	3,8

Uma análise da Tabela 6 sugere que o sedimentador contínuo é um tanque raso, isto é, seu diâmetro é maior que sua altura. Isso porque uma área maior implica na diminuição dos efeitos de interação partícula-parede e partícula-partícula. Tais efeitos trazem como consequência a diminuição da velocidade de sedimentação.

Ao comparar as duas metodologias verifica-se que ambas especificam um sedimentador semelhante. Nesse caso a diferença de altura entre os sedimentadores apresentou um desvio de 0,7%, enquanto o desvio entre os diâmetros foi 3,8%. Esses resultados testificam a eficiência do método de análise de imagens.

Além do mais, a implementação desse método diminui a mão de obra durante a execução do teste, e reduz a possibilidade de existência de erros grosseiros como leituras enganosas e manuseio errado de equipamentos.

Ademais, além de tornar a prática de laboratório em questão mais eficiente, este trabalho tem como propósito incentivar outros estudantes a explorar mais o campo de programação e usar suas infinitas aplicações para facilitar ou melhorar processos do cotidiano, sejam eles na vida acadêmica ou não.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho conseguiu abranger o objetivo proposto. A implementação do método de análise de imagens se mostrou eficiente, uma vez que os resultados obtidos estavam em concordância com o ensaio utilizando a metodologia antiga. Portanto, conclui-se que a implantação do método trouxe os seguintes benefícios:

- ✓ Diminuição da mão de obra dos alunos durante a execução do teste;
- ✓ Redução dos erros sistemáticos que são de responsabilidade do operador;
- ✓ Aumento significativo da quantidade de pontos (dados) para posterior análise gráfica;
- ✓ Apresentação dos dados num formato mais técnico.

6 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Claudia Gonçalves de. Simulação da operação de sedimentadores contínuos. 2009. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

BISCAIA JR., E.C. Simplificação matemática do método de Kynch. Comunicação pessoal, 1988. Apud MASSARANI, G., 1997. Fluidodinâmica em Sistemas Particulados. Editora UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.

FRANÇA, S. C. A.; CASQUEIRA, R. G. Ensaio de sedimentação. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 393-408, 2007.

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

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2001.

MOREIRA, Bruno Arantes. Estudo da sedimentação em suspensões de fluidos com características reológicas pseudoplásticas. 2014. Dissertação de Doutorado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SILVA, Tiago Assis. Estudo Teórico – Experimental da Operação de Sedimentadores Divergentes. 2004. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

7 ANEXO

Segue em anexo o código utilizado para tratamento das imagens.

Importações

```
import PIL
import cv2
import numpy as np
import os
import glob
import csv
import operator
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from google.colab.patches import cv2_imshow
from matplotlib import image
from matplotlib import pyplot
from PIL import Image, ImageOps

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

from google.colab import drive
caminho_das_imagens = '/content/*.jpg'
```

Obtenção dos Frames

```

vidcap = cv2.VideoCapture('/content/drive/My Drive/LEQ2/VID_1.mp4')
def getFrame(sec):
    vidcap.set(cv2.CAP_PROP_POS_MSEC,sec*1000)
    hasFrames,image = vidcap.read()
    if hasFrames:
        cv2.imwrite("image"+str(count)+".jpg", image)    # salva o frame no
formato JPG
        return hasFrames
sec = 0
frameRate = 50 #//Capitula um frame a cada 5 segundos
count=1
success = getFrame(sec)
while success:
    count = count + 1
    sec = sec + frameRate
    sec = round(sec, 2)
    success = getFrame(sec)

print("Acabei")

```

Corta rotaciona e salva

```

path0 = glob.glob(caminho_das_imagens)

for file in path0:
    img = Image.open(file)
    img_resize = img.resize((1920,1920))
    rotate = img_resize.rotate(270)
    new_resize = rotate.resize((1080,1920))

```

```

left, right, upper, lower = [540, 545, 550, 1755]
cortada = new_resize.crop((left,upper,right,lower))
imagem_cinza = ImageOps.grayscale(cortada)
img = imagem_cinza
img.save(file, format='jpeg')

```

Converte em P&B

```
path = glob.glob(caminho_das_imagens)
```

```
for imag in path:
```

```

    gray = cv2.imread(imag)
    retval, peb = cv2.threshold(gray, 98, 255, cv2.THRESH_BINARY)
    filename = os.path.basename(imag)
    cv2.imwrite("/content/" + filename,peb)
    gray

```

```
# Contagem de pixels e conversão em cm
```

```
caminho = glob.glob('/content/*.jpg')
```

```
arquivo = open('tabela.csv', 'w')
```

```
try:
```

```

    writer = csv.writer(arquivo)
    writer.writerow ( ('tempo (s)', 'altura (cm)' ) )

```

```
finally:
```

```
    arquivo.close()
```

```
i=0
```

```
for foto in caminho:
```

```

picture = cv2.imread(foto)
normalizada = picture/255
i= (i+1)
soma = 0
for coluna in range(0,1205):
    soma += normalizada [coluna][0]
altura_cm = soma[0]/33.4
arquivo = open('tabela.csv', 'a')
try:
    writer = csv.writer(arquivo)
    writer.writerow ( ((i*5),altura_cm) )
finally:
    arquivo.close()

```

#Ordenando o arquivo CSV

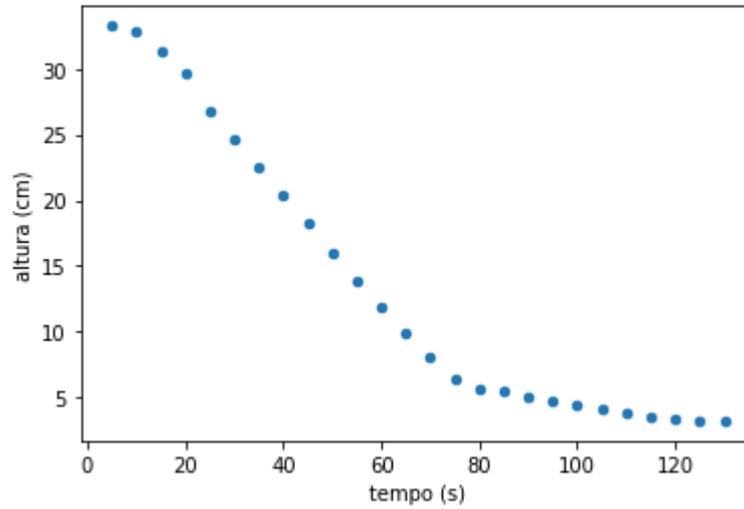
```

file = pd.read_csv('/content/tabela.csv')
altura = file.filter(items=['altura (cm)'])
tempo = file.filter(items=['tempo (s)'])
altura_sort = altura.sort_values(by=['altura (cm)'],ascending=False)
new_alt =altura_sort.reset_index()
result = pd.concat([tempo, new_alt], axis=1, sort=False)
done = result.drop(labels='index',axis=1)
done.to_csv("ordenado.csv")

done.plot.scatter('tempo (s)', 'altura (cm)')

```

```
<matplotlib.axes._subplots.AxesSubplot at 0x7f7cd327a750>
```



```
teste = done.plot.scatter('tempo (s)', 'altura (cm)');
```

```
plt.savefig('teste.png', format='png')
```

