

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Descrição Teórica do Sistema</b>	<b>1</b>
2.1	Etapas de Sedimentação e o teste da proveta . . . . .	1
2.2	Balanco de Massa . . . . .	3
2.3	Método de Kynch . . . . .	6
2.4	Método de Biscaia Jr. . . . .	8
2.5	Fatores de Correção . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Objetivo</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>10</b>
4.1	Materiais . . . . .	10
4.2	Métodos . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>11</b>
5.1	Propriedades físico-químicas . . . . .	11
5.2	Determinação da concentração e densidade de $\text{CaCO}_3$ na suspensão . . . . .	11
5.2.1	Cálculos . . . . .	12
5.3	Teste de Proveta . . . . .	13
5.3.1	Altura inicial da proveta . . . . .	13
5.3.2	Curva de sedimentação (altura da proveta x tempo) . . . . .	14

5.3.3	Método de Kynch . . . . .	14
5.3.4	Método de Biscaia Jr. . . . .	15
5.3.5	Comparação entre os métodos . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>15</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>16</b>

# 1 | Introdução

## 2 | Descrição Teórica do Sistema

Para se projetar um sedimentador industrial é preciso determinar a área e a altura deste, com base no valor de concentração da alimentação e a concentração desejada na saída do sedimentador. Para isso, é necessário realizar testes de proveta para determinar alguns parâmetros em escala de laboratório.

Durante os testes de proveta, utiliza-se uma suspensão com as mesmas condições de temperatura e pH que são encontradas no processo industrial. O teste de proveta permite obter a curva de posição da interface em função do tempo. A partir dessa curva, são obtidos parâmetros *cinéticos* que permitem estimar a área e altura do sedimentador industrial.

### 2.1 Etapas de Sedimentação e o teste da proveta

Durante o processo de sedimentação, quatro zonas são formadas e nos testes de proveta realizados em escala de bancada, elas não são muito bem definidas. A fim de entender melhor como ocorre o mecanismo da sedimentação e como ela ocorre ao passar do tempo, pode-se analisar a Figura 2.1.

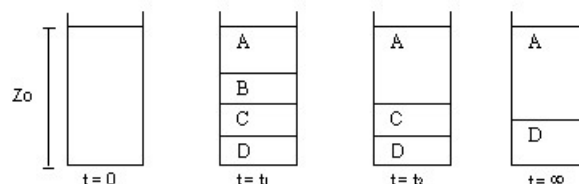


Figura 2.1: Mecanismo de sedimentação.

No início da decantação ( $t = 0$ ), a suspensão encontra-se a uma altura  $Z_0$  e sua concentração é uniforme. Pouco tempo depois ( $t = t_1$ ) é possível distinguir quatro zonas distintas. São elas:

- A - Líquido Clarificado: esta camada pode ficar turva durante certo tempo devido à presença de partículas mais finas que permanecem em suspensão;
- B - Região de Concentração constante ou concentração inicial: tem-se a sedimentação livre, isto é, desconsideram-se os efeitos de concentração, como se as partículas sedimentassem de forma isolada;
- C - Região de Concentração Variável: nesta região a concentração da suspensão aumenta gradativamente, variando da concentração inicial até a concentração da suspensão espessada, e já se observa o efeito da concentração;
- D - Região de Lama (compactação): à medida que ocorre a sedimentação a espessura desta região aumenta.

À medida que a sedimentação ocorre, as regiões A e D tornam-se mais importantes e as regiões B e C tendem a desaparecer. A velocidade de sedimentação aumenta na região de clarificado (aceleração) e, a partir deste ponto, permanece constante até o final da região B. A velocidade tende a diminuir (desaceleração) em seguida até alcançar o ponto crítico de sedimentação, momento em que a região B desaparece (McCabe et al., 2004).

Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.2.



Figura 2.2: Processo de Sedimentação.

O ponto crítico pode ser determinado, pois enquanto a região B, de concentração igual à inicial, ainda existe, a velocidade de sedimentação é constante e, assim, a variação da altura da interface com o tempo é linear. Porém, ao B desaparecer, a velocidade de sedimentação começa a variar, devido ao fato da concentração também ser variável. Conforme a concentração aumentar, a velocidade de sedimentação diminui, como ilustrado na Figura 2.3.

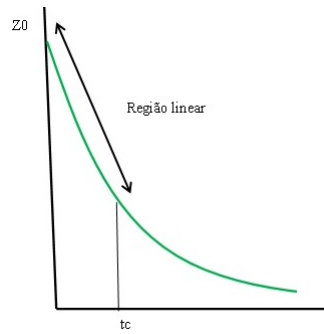


Figura 2.3: Determinação gráfica do tempo crítico ( $t_C$ ).

## 2.2 Balanço de Massa

Um sedimentador, com suas respectivas correntes e concentrações, é representado no esquema da Figura 2.4.

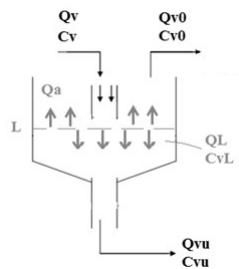


Figura 2.4: Esquema de um sedimentador e suas variáveis.

Em que:

- $Q$  – Vazão da alimentação
- $C_v$  – Concentração volumétrica de sólidos na alimentação
- $Q_o$  – Vazão volumétrica do overflow (líquido clarificado)
- $C_{vo}$  – Concentração volumétrica de sólidos no overflow
- $Q_u$  – Vazão volumétrica do underflow (sólidos concentrados, “lama”)
- $C_{vu}$  – Concentração volumétrica de sólidos no underflow

- $Q_a$  – Vazão volumétrica de líquido límpido no nível L em sentido ascendente
- $Q_L$  – Vazão volumétrica no nível L em sentido descendente
- $C_{vL}$  – Concentração de sólidos no nível L em sentido descendente

Para se iniciar o balanço de massa, considera-se que a concentração de sólidos na corrente de líquido clarificado é igual à zero. Logo, a vazão ascendente consiste apenas de líquido clarificado ( $C_{V0} = 0$ ). Portanto, temos o seguinte balanço de massa para os sólidos:

$$\rho_s \times Q \times C_v = \rho_s \times Q_u \times C_{vu} = \rho_s \times Q_L \times C_{vL} \quad (2.1)$$

Sendo  $\rho_s$  a densidade das partículas sólidas. Portanto:

$$Q_u = Q \times \frac{C_v}{C_{vu}} \quad (2.2)$$

Já para o líquido, temos o seguinte balanço de massa, no nível L:

$$\rho \times Q_L \times (1 - C_{vL}) = \rho \times Q_a + \rho \times Q_u \times (1 - C_{vu}) \quad (2.3)$$

Sendo  $\rho$  a densidade do líquido. Assim,

$$Q_u = \frac{Q_L \times C_{vL}}{C_{vu}} \quad (2.4)$$

$$Q_L \times (1 - C_{vL}) = Q_a + \frac{Q_L \times C_{vL}}{C_{vu}} \times (1 - C_{vu}) \quad (2.5)$$

$$Q_a = Q_L - Q_L \times C_{vL} - \frac{Q_L \times C_{vL}}{C_{vu}} + Q_L \times C_{vL} \quad (2.6)$$

$$Q_L \times C_{vL} = Q \times C_v \quad (2.7)$$

$$Q_a = Q_L - \frac{Q_L \times C_{VL}}{C_{vu}} = Q_L \times C_{vL} \times \left( \frac{1}{C_{VL}} - \frac{1}{C_{vu}} \right) \quad (2.8)$$

$$Q_a = Q \times C_v \times \left( \frac{1}{C_{vL}} - \frac{1}{C_{vu}} \right) \quad (2.9)$$

$$\frac{Q_a}{A} = \frac{Q \times C_v}{A} \times \left( \frac{1}{C_{vL}} - \frac{1}{C_{vu}} \right) \quad (2.10)$$

A hipótese do método de Coe e Clevenger se baseia na sedimentação das partículas. Este método foi o primeiro a ser desenvolvido e é a fundamentação dos demais. Ele parte da ideia de que todas as partículas alimentadas devem seguir para zona de espessado. Caso isto não ocorra, acarretará no acúmulo de partículas, devido ao arraste, numa dada região chamada de zona limite.

Para tanto, tomando como base que  $C_{V0} = 0$ , a velocidade de ascensão do líquido deve ser menor que a velocidade de sedimentação das partículas, evitando, assim, que elas sejam arrastadas no sentido ascendente. Portanto, deve-se ter:

$$\frac{Q_a}{A} \leq v \quad (2.11)$$

Onde:  $\frac{Q_a}{A}$  = velocidade de ascensão do fluido e  $v$  = velocidade de sedimentação das partículas.

No limite, tem-se:

$$\frac{Q_a}{A} = v \quad (2.12)$$

Assim:

$$\frac{Q \times C_v}{A} \times \left( \frac{1}{C_{vL}} - \frac{1}{C_{vu}} \right) = v \quad (2.13)$$

Chegamos, então, à fórmula da área mínima:

$$A = \frac{Q \times C_v}{v} \times \left( \frac{1}{C_v L} - \frac{1}{C_v u} \right) \quad (2.14)$$

## 2.3 Método de Kynch

Kynch desenvolveu um método de dimensionamento de sedimentadores que necessita de apenas um ensaio experimental, diferentemente do método de Cloe e Clevenger, que exige inúmeros experimentos.

O ensaio é iniciado com uma concentração uniforme  $C_0$ . Supondo que, numa determinada seção do decantador, onde a concentração possui um valor  $C$ , a capacidade do equipamento passa por um mínimo e chega até um máximo quando o sistema está em operação, é nesse momento que uma zona característica começará a se formar nessa seção (Foust, 1982).

Se a seção transversal  $S$  for insuficiente, ocorrerá acúmulo de sólidos e a zona limite será deslocada para mais perto da saída de clarificado. Mas se a área for suficiente, em regime permanente, os sólidos que entram no sistema também saem.

O procedimento proposto por Kynch requer apenas um ensaio de decantação que forneça a curva de decantação ( $Z$  em função de  $t$ ), através do qual se traçam tangentes em diversos pontos da curva e determinam-se os valores de  $t$ ,  $Z$  e  $Z_i$ . Com esses valores ( $t$ ,  $Z$  e  $Z_i$ ), utiliza-se a expressão do método de Coe e Clevenger para obter as áreas da seção transversal.

O valor máximo de área obtida corresponderá à área mínima que o decantador poderá ter.

O método gráfico pode ser verificado na Figura 2.5.

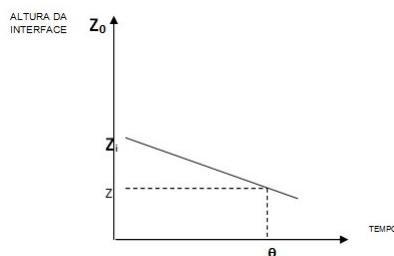


Figura 2.5: Exemplo de resultado do método de Kynch.

A reta tangente pode ser obtida após o cálculo de cada derivada, para cada altura da interface



de sedimentação  $z$ , correspondente a um tempo de sedimentação  $t$ , utilizando as fórmulas a seguir:

$$z = \frac{dz}{dt}t + z_i \quad z_i = z - \frac{dz}{dt}t \quad (2.15)$$

Assim, a concentração de sólidos em um nível  $L$  qualquer  $C_{vL}$  pode ser calculada, a partir dos valores de  $z_i$  correspondentes a cada altura da interface  $z$ , através da seguinte relação:

$$C_{vL} = C_v \times \frac{z_0}{z_i} \quad (2.16)$$

Finalmente, calcula-se a área mínima do sedimentador pela equação obtida pelo balanço de massa realizado acima:

$$A_{\min} = \frac{Q \times C_v}{v} \times \left( \frac{1}{C_{vL}} - \frac{1}{C_{vU}} \right) \quad (2.17)$$

No final do experimento, tem-se um conjunto de áreas mínimas calculadas, que podem ser organizadas em uma tabela como a representada abaixo:

<b>t</b>	<b>z</b>	$\left(\frac{dz}{dt}\right)$	<b>z<sub>i</sub></b>	<b>C<sub>vL</sub></b>	<b>A</b>
t1	z1	$\left(\frac{dz}{dt}\right)_1$	zi1	CvL1	A1
t2	z2	$\left(\frac{dz}{dt}\right)_2$	zi2	CvL2	A2
...	...	...	...	...	...
tn	zn	$\left(\frac{dz}{dt}\right)_n$	zin	CvLn	An

Tabela 2.1: Organização dos dados no método de Kynch.

Dentre todas as áreas mínimas calculadas pelo método de Kynch, a de maior valor deve ser utilizada como base de cálculo da área de projeto.

## 2.4 Método de Biscaia Jr.

Esse método é relativamente mais simples do que o método de Kynch. No método de Biscaia Jr., assume-se que a curva da altura da interface em função do tempo pode ser representada por uma função composta, sendo a primeira parte da curva linear e a segunda exponencial.

$Z_{\min}$  tem seu valor determinado a partir da seguinte relação:

$$Z_{\min} = z_0 * \frac{C_{vO}}{C_{vU}} \quad (2.18)$$

E com o valor de  $z_{\min}$ , através do gráfico da Figura 2.6, obtém-se o valor de  $t_{\min}$ .

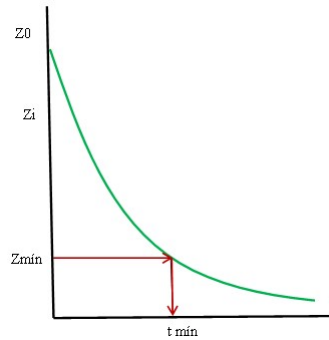


Figura 2.6: Representação gráfica do método de Biscaia Jr.

Com o valor de  $t_{\min}$  obtido, pode-se então determinar  $A_{\min}$ :

$$A_{\min} = Q \times \frac{t_{\min}}{z_0} \quad (2.19)$$

## 2.5 Fatores de Correção

A área determinada por ambos os métodos é a área mínima que o sedimentador deve ter para que se tenha a sedimentação desejada. Porém, é necessário o ajuste de alguns parâmetros para reproduzir as condições operacionais de um sedimentador industrial mais fielmente.

$$A_{proj} = A_{\min} \times f_1 \times f_2 \quad (2.20)$$

O fator  $f_1$  considera efeitos de pH, temperatura, diâmetro dos flocos e concentração das partículas. Esse fator é especialmente importante em locais onde há grande variação de temperatura.

$$1,10 \leq f_1 \leq 1,25 \quad (2.21)$$

Já o fator  $f_2$  é função do diâmetro das partículas e considera a turbulência causada pela alimentação da suspensão no sedimentador. Como a velocidade nos tubos de alimentação é muito maior que a velocidade dentro do sedimentador, há geração de uma zona de turbulência na região de alimentação, dificultando a sedimentação. O fator de segurança visa amortecer o efeito da zona de turbulência através do aumento do diâmetro.

$$1,10m < D_{\min} < 1,25m \quad 1,2 \leq f_2 \leq 1,5 \quad (2.22)$$

$$D_{\min} \leq 5m \quad f_2 = 1,5 \quad (2.23)$$

$$D_{\min} \geq 30m \quad f_2 = 1,2 \quad (2.24)$$

### 3 | Objetivo

O experimento tem como objetivo determinar o dimensionamento de um sedimentador a partir dos dados coletados em um teste de proveta para a suspensão de  $CaCO_3$ , utilizando os métodos de Kynch e Biscaia Jr. e fazer comparações com os valores obtidos.

O sedimentador industrial deverá operar com uma suspensão de carbonato de cálcio, de aproximadamente 3% em peso de  $CaCO_3$ , para obtenção de uma lama de concentração de sólidos 2 vezes superior à da alimentação.

## **4 | Materiais e Métodos**

### **4.1 Materiais**

- Suspensão de carbonato de cálcio;
- 1 Proveta graduada de 2L;
- 3 Vidros de relógio;
- Pipeta;
- Bastão de Vidro;
- Balança analítica digital;
- Cronômetro;
- Tira de papel milimetrado;
- Estufa.

### **4.2 Métodos**

Realizou-se o teste de proveta usando 2 L da suspensão de carbonato de cálcio. Para determinar a concentração real da suspensão, antes do início do teste, colocou-se 3 amostras em vidros de relógios secos previamente pesados. Após a adição da suspensão, os vidros foram novamente pesados. As amostras foram à estufa por, aproximadamente, 100°C até peso constante e então novamente os vidros foram pesados.

O teste de proveta iniciou assim que os 2L de solução estavam bem homogeneizados na proveta, com o auxílio do bastão de vidro, iniciando o cronômetro. A sedimentação iniciou e foi possível observar a formação de 2 fases, uma mais opaca com alto teor de sólidos e uma

clarificada. A interface foi monitorada e o tempo anotado a cada decréscimo da mesma em 0,5 cm de altura. Com os pontos, foi possível plotar o gráfico  $Z \times t$ .

## 5 | Resultados e Discussão

### 5.1 Propriedades físico-químicas

- Densidade da água ( $\rho$ ) :  $1 \frac{g}{cm^3}$
- Densidade do carbonato de cálcio ( $\rho_S$ ) :  $2,711 \frac{g}{cm^3}$  (a  $25^\circ C$ )
- Viscosidade da água ( $\mu$ ) :  $0,01 \frac{g \cdot cm}{s}$

### 5.2 Determinação da concentração e densidade de $CaCO_3$ na suspensão

Para determinação das concentrações mássica e volumétrica, utilizaram-se os dados da Tabela 5.1.

Numeração	M1: Vidro de relógio vazio (g)	M2: Vidro de relógio com suspensão inicial (g)	M3: Vidro de relógio com suspensão seca (g)
S1	36,0549		39,1954
S2	44,723		44,8572
S3	36,0498		36,1928

Tabela 5.1: Tabela com as massas em cada etapa do procedimento.

A partir dos resultados experimentais, os cálculos realizados foram:  $H_2O$  e  $CaCO_3$  foram determinados do seguinte modo:

- Massa de  $H_2O$  :  $M_2 - M_3$
- Massa de  $CaCO_3$  :  $M_3 - M_1$

- Volume de  $H_2O$ :  $\frac{(M_2 - M_3)}{\rho}$
- Volume de  $CaCO_3$ :  $\frac{(M_3 - M_1)}{\rho_s}$

### 5.2.1 Cálculos

Determinar a concentração mássica significa efetuar a seguinte razão:

$$C_m = \frac{\text{massa de sólido (CaCO}_3\text{)}}{\text{massa de suspensão}} = \frac{\text{massa de sólido (CaCO}_3\text{)}}{\text{massa de água} + \text{massa de CaCO}_3} \quad (5.1)$$

Determinar a concentração volumétrica significa efetuar:

$$C_V = \frac{V_{\text{sólido (CaCO}_3\text{)}}}{V_{\text{suspensão}}} \quad (5.2)$$

$$V_{\text{sólido}} = \frac{\text{massa sólidos (CaCO}_3\text{)}}{\rho_s} \quad (5.3)$$

$$V_{\text{suspensão}} = V_{\text{água}} + V_{\text{sólidos}} \quad (5.4)$$

$$V_{\text{suspensão}} = \frac{\text{massa água}}{\rho} + \frac{\text{massa sólidos (CaCO}_3\text{)}}{\rho_s} \quad (5.5)$$

$$C_V = \frac{\frac{\text{massa sólidos}}{\rho_s}}{\frac{\text{massa água}}{\rho} + \frac{\text{massa sólidos}}{\rho_s}} \quad (5.6)$$

Determinar a densidade da suspensão significa efetuar:

$$\rho_{\text{suspensão}} = \frac{\text{massa suspensão}}{V_{\text{suspensão}}} \quad (5.7)$$

$$\rho_{\text{suspensão}} = \frac{\text{massa suspensão}}{\text{volume CaCO}_3 + \text{volume H}_2\text{O}} \quad (5.8)$$

$$\rho_{\text{suspensão}} = \frac{\text{massa suspensão}}{\frac{\text{massa CaCO}_3}{\rho_S} + \frac{\text{massa H}_2\text{O}}{\rho}} \quad (5.9)$$

Numeração	Massa de água (g)	Massa de CaCO <sub>3</sub> (g)	Volume de água (mL)	Volume de CaCO <sub>3</sub> (mL)
S1		3,1405		
S2		0,1342		
S3		0,143		

Tabela 5.2: Cálculos do volume de água e de sólido.

Numeração	Concentração Volumétrica (% v/v)	Concentração Mássica (% m/m)	Densidade da Suspensão (g/cm <sup>3</sup> )
S1			
S2			
S3			
Média			

Tabela 5.3: Cálculos das concentrações de sólido.

## 5.3 Teste de Proveta

### 5.3.1 Altura inicial da proveta

Sabendo-se que a Área =  $\frac{\pi D^2}{4}$  e  $Volume = Área \cdot Z_0$ , temos:

<b>Diâmetro da proveta (cm)</b>	8,1
<b>Área da seção transversal da proveta (cm<sup>2</sup>)</b>	51,53
<b>Volume inicial (cm<sup>3</sup> = mL)</b>	2000
<b>Altura inicial de líquido (cm)</b>	38,81

Tabela 5.4: Dados do sistema montado para o teste de proveta.

### 5.3.2 Curva de sedimentação (altura da proveta x tempo)

Uma vez iniciada a sedimentação, o grupo anotou o tempo para a suspensão sedimentar a cada 0,5 cm, obtendo a seguinte curva:

Diante da curva apresentada, efetuaram-se dois ajustes, um linear, inicialmente, e um exponencial. Considerou-se adequado, uma vez que os coeficientes de correlação estão próximos a 1. Com as equações ajustadas, utilizaram-se os métodos para determinação da área do sedimentador.

### 5.3.3 Método de Kynch

Segundo o método de Kynch, a área mínima do sedimentador pode ser calculada pela equação abaixo:

$$A_{\min} = \frac{Q * C_V}{v} * \left( \frac{1}{C_{VL}} - \frac{1}{C_{VU}} \right) \quad (5.10)$$

Onde:

- $Q = \frac{Q_{\text{mássica}}}{P_{\text{suspensão}}}$ ;
- $C_v$  Concentração volumétrica de alimentação;



- $v = \frac{-dz}{dt}$
- $C_{VL} = C_V * \frac{z_0}{z_I}$
- $z_I = z - \frac{dz}{dt} * t$
- 

**Tabela com os valores calculados para área**

**Fatores de correção**

**Projeto de sedimentador**

### **5.3.4 Método de Biscaia Jr.**

**Determinação de  $Z_{\min}$  e  $t_{\min}$**

$$Z_{\min} = Z_0 * \frac{C_{V0}}{C_{VU}} \quad (5.11)$$

**Determinação de  $A_{\min}$**

$$A_{\min} = Q * \frac{t_{\min}}{Z_0} \quad (5.12)$$

**Fatores de correção**

**Projeto do sedimentador**

### **5.3.5 Comparação entre os métodos**

## **6 | Conclusões**

# Bibliografia

Foust, A. S. Princípios Das Operações Unitárias. *LTC* **1982**,

Peçanha, R. Sistemas Particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluídos. *Elsevier* **2014**,

McCabe, W.; Smith, J.; Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering. *McGraw Hill - CHEMICAL ENGINEERING SERIES* **2004**,