



## C A P Í T U L O 2

# SEDIMENTAÇÃO

**Fabiola Dias da Silva Curbelo**

**Débora Vitória Firmino Andrade Silva**

**Iara Caroline Assunção Dorigon**

**João Pedro Gonçalves de Souza Soares**

**Maria Eduarda Araújo Pessoa**

**Rafael Peixoto Alves**

**Ted Johnson Vasconcelos Leitão**

## 1. INTRODUÇÃO

A sedimentação, ou decantação, é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria química. Nesta operação, as fases sólida e líquida são separadas devido à diferença de densidade entre elas, sendo o processo baseado no gradiente de concentrações das fases presentes, sob a ação da gravidade. A sedimentação consiste em concentrar suspensões de sólidos em líquidos ou em purificar o líquido. Em geral, as partículas sólidas são mais densas do que a fase fluida, embora existam casos em que a decantação ocorra com sólidos ou líquidos presentes em gases (Gomide, 1983).

A sedimentação é muito realizada em operações de tratamento de água e esgoto, como por exemplo, para eliminar os sólidos dos esgotos ou ainda para clarificar o caldo de cana pela sedimentação de suas impurezas, separação de misturas líquido-líquido provenientes da etapa de extração com solvente de um sedimentador. Em muitos casos, esta operação é realizada para eliminar as partículas da corrente de um fluido para que ele fique livre de contaminantes, sendo comum classificar este tipo de sedimentador como clarificador. Em outros casos, o objetivo é recuperar as partículas (produtos), como por exemplo, isolar a fase dispersa de uma extração líquido-líquido, sendo comum classificar este tipo de sedimentador como espessador (Cremasco, 2018).

Fatores como a densidade do sólido e do líquido, diâmetro e forma das partículas e, ainda, a viscosidade do meio tendem a impactar na velocidade com que ocorre a sedimentação. Sendo a viscosidade afetada pela temperatura, é possível aplicar temperaturas maiores em certos casos para aumentar essa velocidade. Em sistemas coloidais, em que o movimento aleatório das partículas no fluido em conjunto com a repulsão elétrica entre elas promove a anulação da gravidade, o aumento do seu tamanho é essencial (Gomide, 1983).

Alguns parâmetros como o aumento do diâmetro das partículas, através da aglomeração da fase particulada a partir da coagulação e da floculação; o aumento da massa específica; e o aumento da velocidade terminal podem potencializar a velocidade final da operação de sedimentação (Cremasco, 2018).

Na indústria, a otimização deste processo é fundamental para melhorar a separação sólido-líquido, reduzindo custos operacionais e melhorando a qualidade dos efluentes tratados. E, com isso, a compreensão detalhada das fases da sedimentação contribui para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, como clarificadores e espessadores (Foust, 1982).

Quando uma solução homogênea contendo partículas sólidas é deixada em repouso, no início do ensaio ( $t_0$ ) a concentração da fase particulada é constante em todos os pontos ao longo da altura da proveta. A sedimentação ocorre através de um conjunto de fenômenos que resultam na separação das fases. Esse processo pode ser analisado em termos de regiões distintas, que variam em concentração e comportamento das partículas (Figura 1).

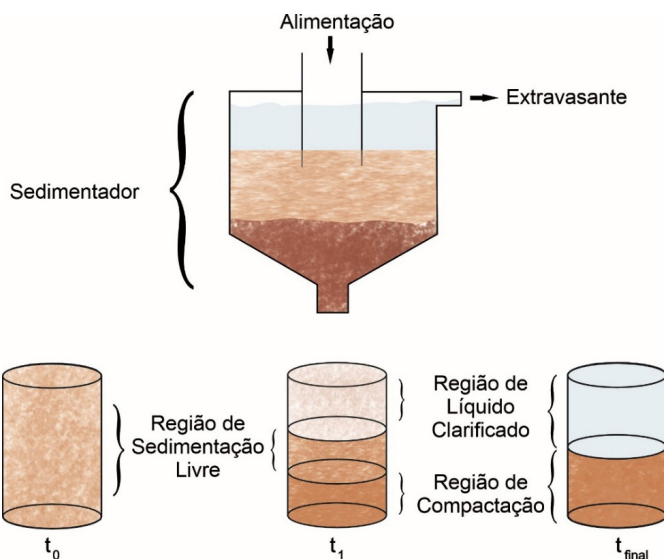


Figura 1. Regiões formadas na operação de sedimentação.

No decorrer do experimento, as partículas maiores ou mais densas começam a sedimentar e a formar uma camada fina de partículas no fundo da proveta, que é a região de compactação, formando uma interface bem definida entre o líquido clarificado e a zona de concentração uniforme. Tal região é formada por aglomerados mais concentrados e com maior velocidade de sedimentação.

Aglomerados finos (menos concentrados) sedimentam mais lentamente, originando uma região intermediária, que é a região de sedimentação livre. Quando todas as partículas atingem a base do sistema e se compactam, chega-se ao ponto de sedimentação crítico, onde a interface entre o líquido e os sólidos torna-se bem definida. A partir desse momento, o processo passa a ser dominado pela compressão dos sólidos e pela expulsão do líquido intersticial (Cremasco, 2018; Foust, 1982).

Kynch criou um método de desenvolvimento de um sedimentador baseado apenas na realização de um experimento. A partir de um ensaio de proveta, é possível obter pares experimentais de altura *versus* tempo, demonstrando o movimento da interface superior em uma operação de sedimentação em batelada.

Algumas hipóteses foram determinadas para a fundamentação, como por exemplo considerar uma sedimentação unidimensional, em que a concentração tende a aumentar no fundo do sedimentador com o decorrer do tempo. Com isso, a velocidade de sedimentação tende a zero uma vez que a concentração se aproxima do seu valor máximo. Neste caso, a velocidade de sedimentação é dependente apenas da concentração local das partículas e os efeitos de paredes são desconsiderados (Cremasco, 2018).

## PROJETO DE UM SEDIMENTADOR

Para projetar um sedimentador em maior escala (*scale up*), é possível utilizar um dos métodos existentes, como o Método de Kynch. Neste método, o dimensionamento do sedimentador pode ser feito a partir de dados experimentais de altura de sedimentação da fase particulada *versus* tempo. A facilidade deste método está em poder utilizar apenas um experimento para o projeto do dimensionamento do sedimentador.

A área do sedimentador pode ser determinada utilizando a equação 1, em que é considerada a vazão volumétrica da suspensão alimentada ao sedimentador ( $Q_A$ ), que será estimada; a concentração de sólidos da suspensão alimentada ( $C_A$ ); a velocidade de decantação ( $v$ ); a concentração da suspensão na zona limite ( $C$ ) e a concentração da lama espessa ( $C_E$ ).

$$A = \left( \frac{Q_A \cdot C_A}{v} \right) \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_E} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

## 2. OBJETIVOS

Os objetivos principais da prática “Sedimentação” são:

1. Estudar a operação de sedimentação em batelada através do teste da proveta.
2. Determinar a velocidade de sedimentação de suspensões com diferentes granulometrias e concentrações de material particulado, como areia, carbonato de cálcio e pó da concha de marisco.
3. Utilizar as curvas de sedimentação construídas com dados experimentais para projetar um sedimentador em maior escala (*scale up*).

## 3. METODOLOGIA

Como exemplo de um experimento típico de sedimentação realizado em laboratório, pesa-se, uma determinada massa de material particulado de granulometria homogênea e apropriada; transfere-se o material pesado para uma proveta; acrescenta-se água destilada até o menisco da proveta; tampa-se a proveta e agita-a para homogeneizar todo o material contido nela. Após este preparo, coloca-se a proveta preenchida em um local adequado e inicia-se o cronômetro para a observação dos pares de sedimentação, altura de sedimentação *versus* tempo.

No decorrer do experimento, observa-se a formação das regiões de sedimentação. O experimento é finalizado quando é possível verificar a completa sedimentação/decantação/separação das fases líquida e particulada, conforme mostrado na Figura 2.

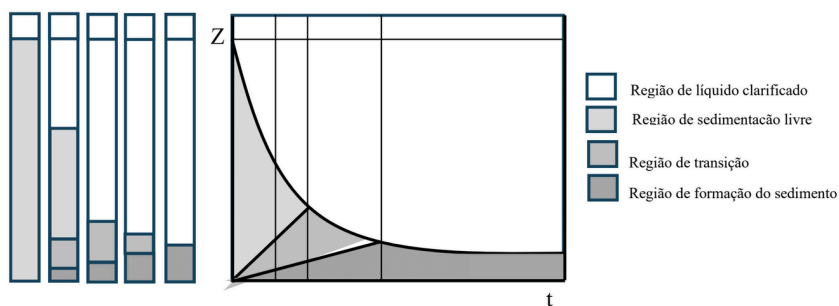


Figura 2. Regiões encontradas numa curva típica de sedimentação.

A partir do gráfico gerado, escolhe-se pontos na curva de sedimentação e, então, traça-se as retas tangentes nestes pontos e os valores correspondentes são denominados de  $Z$  (eixo  $y$ ) e  $t$  (eixo  $x$ ). O ponto em que a reta tangente toca no eixo  $y$  é onde obtém-se o valor de  $Z_i$ , conforme mostrado na Figura 3.

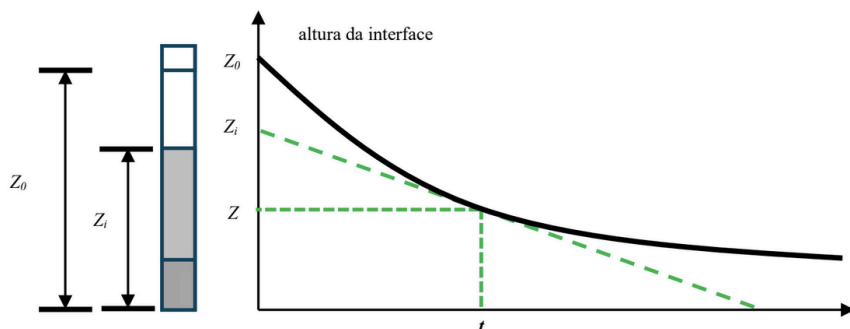


Figura 3. Determinação da altura da interface.

A obtenção dos pontos correspondentes às retas tangentes deve ser realizada para comparação de resultados. A partir da aplicação da equação 2, a concentração da suspensão na zona limite (C), em g/mL, pode ser determinada com os valores da concentração inicial ( $C_0$ ), em g/mL, altura inicial da suspensão ( $Z_0$ ) em cm, e o valor de  $Z_i$  em cm.

$$C = \frac{C_0 \cdot Z_0}{Z_i} \quad (\text{Equação 2})$$

A velocidade com que a interface se move ao longo do tempo indica a taxa de sedimentação. Para determinar essa velocidade, aplica-se os valores de  $Z_i$ ,  $Z$  e  $t$ , conforme a equação 3:

$$v = \frac{Z_i - Z}{t} \quad (\text{Equação 3})$$

Por fim, a equação 1 é aplicada para o dimensionamento do sedimentador, indicando qual deve ser a área da seção transversal apropriada para que o equipamento opere de forma eficiente. Ao final da aplicação dos diferentes pontos obtidos no gráfico altura *versus* tempo, são obtidos valores correspondentes para a área do sedimentador. Com estes valores, seleciona-se o maior valor encontrado, uma vez que representa a condição mais crítica da operação de sedimentação.

## 4. ESTUDO DE CASO

Uma suspensão foi formulada na concentração de 0,30 g/mL de PCM e sua sedimentação foi estudada. Para isto, utilizou-se uma proveta de 50 mL. A faixa granulométrica do PCM utilizada foi de -170 + bandeja, correspondendo a um diâmetro médio de partículas de 0,044 mm. Os experimentos foram realizados em duplicata, e os dados estão mostrados na Tabela 1.

Experimento 1			Experimento 2		
Tempo (s)	Volume (mL)	Altura (cm)	Tempo (s)	Volume (mL)	Altura (cm)
0	50	11,1	0	50	11,1
13	48	10,6	52	43	9,5
28	46	10,2	75	40	8,8
41	44	9,7	86	38	8,4
54	42	9,3	100	36	8,0
107	26	5,7	115	34	7,5
134	32	7,1	134	32	7,1
172	28	6,2	152	30	6,6
188	26	5,7	170	28	6,2
207	24	5,3	182	26	5,7
235	22	4,9	215	24	5,3
269	20	4,4	243	22	4,9
289	19	4,2	275	20	4,4
440	16	3,5	323	18	4,0

Tabela 1. Dados experimentais de Sedimentação.

A plotagem dos dados da Tabela 1 gera a curva de sedimentação mostrada na Figura 4, onde estão traçadas as tangentes para obter os dados necessários para o cálculo da área do sedimentador.

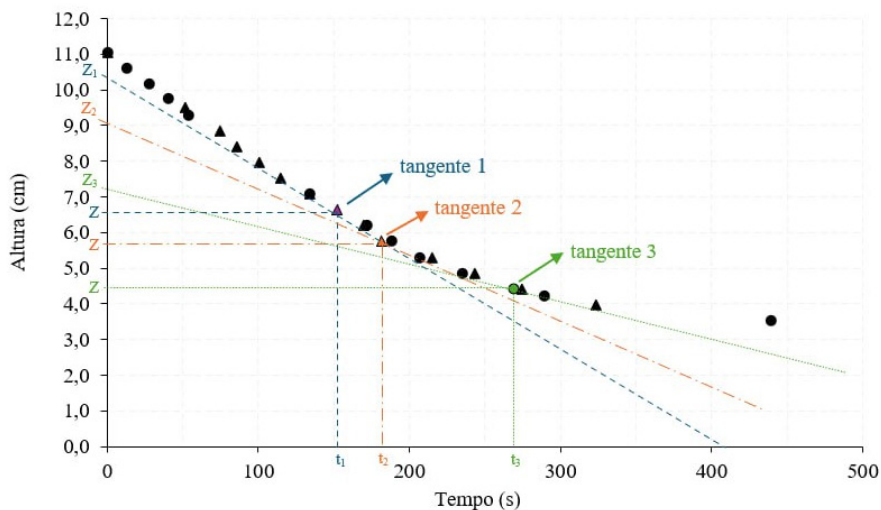


Figura 4. Tangentes da curva de sedimentação.

Após a finalização da sedimentação, é possível observar o volume da lama formada que corresponde a região de compactação do material particulado (Figura 5).

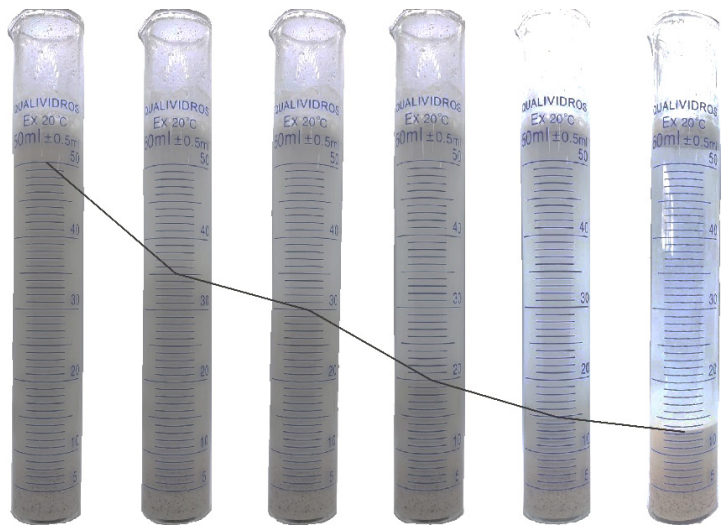


Figura 5. Região de compactação do PCM após a sedimentação.

A Tabela 2 mostra os valores de  $Z_i$ ,  $Z$  e  $t$  das três tangentes traçadas na Figura 4, assim como os valores calculados da concentração da suspensão, da velocidade de sedimentação e da área do sedimentador, sabendo-se que  $C_0 = 0,30 \text{ g/mL}$  e  $Z_0 = 11,1 \text{ cm}$  e adotando-se uma vazão volumétrica de  $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Da Figura 5, observa-se que o volume de lama formado foi de  $14 \text{ mL}$ .

Dados	$Z_i \text{ (cm)}$	$Z \text{ (cm)}$	$t \text{ (s)}$	$V \text{ (cm/s)}$	$C_i \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$A \text{ (cm}^2\text{)}$
Tangente 1	10,4	6,6	152	0,025	0,320	13.142,5
Tangente 2	9,0	5,7	182	0,018	0,370	14.642,7
Tangente 3	7,2	4,4	269	0,010	0,463	17.717,3

Tabela 2. Dados experimentais da sedimentação e cálculo dos parâmetros associados.

Desta forma, baseado nos dados experimentais e para uma vazão volumétrica de  $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ , a área mais apropriada para o projeto do sedimentador é de  **$17.717,3 \text{ cm}^2$** .

### QUESTIONAMENTOS AOS LEITORES

1. Quais métodos podem ser utilizados em laboratório para determinar a velocidade de sedimentação e a altura da interface sólido-líquido ao longo do tempo?

2. Por que o vinho ou o azeite de oliva pode apresentar borras ou resíduos no fundo da garrafa? A sedimentação está presente nesse processo?
3. Por que é importante evitar a agitação ou perturbação do sistema durante o processo de sedimentação em laboratório?
4. Como as estações de tratamento de água removem o lodo e as partículas sólidas da água bruta?

## NOTÁVEIS CIENTISTAS EM OPERAÇÕES UNITÁRIAS

- George James Kynch (1915 – 1987)



(Kynch, 1952)

George Kynch foi um cientista e engenheiro britânico que se destacou por suas contribuições fundamentais à mecânica dos fluidos aplicada à sedimentação de partículas em suspensão. Seu trabalho mais famoso é o artigo clássico publicado em 1952, onde ele apresentou a Teoria da Sedimentação em Leito Espesso. A teoria de Kynch é usada até hoje para dimensionar decantadores industriais (por exemplo, em mineração, papel e celulose, e tratamento de efluentes); estimar a velocidade de interface entre zona clara e zona densa de partículas; entender e prever formação de lodo e compactação de sólidos no fundo de tanques; e analisar processos de separação sólido-líquido onde a interação entre partículas não pode ser ignorada. Sua contribuição permanece essencial no estudo de processos de separação e no dimensionamento de equipamentos amplamente utilizados na indústria química, de mineração e ambiental.



## REFERÊNCIAS

CREMASCO, Marco Aurélio. Operações Unitárias em Sistema Particulados fluido mecânicos e outro trabalhos. 3ª ed. – São Paulo: Blucher, 2018. 424p.

FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., ANDERSEN, L. B. Princípio das Operações Unitárias. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

GOMIDE, R. Operações unitárias: Volume 1 – Operações com sistemas sólidos granulares. São Paulo: Edição do Autor, 1983.

KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. Transactions of the Faraday Society, v. 48, p. 166, 1952.

MATOS, S. P. Operações Unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos. 1ª ed. - São Paulo, 2015.