

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LOQ4085 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

PROFESSORA: LÍVIA CHAGURI E CARVALHO – Maio 2019

SEPARAÇÕES MECÂNICAS

SEDIMENTAÇÃO

1. Introdução

A finalidade da operação de sedimentação é a separação das partículas sólidas ou gotas de líquido através de um fluido, que pode ser um gás ou um líquido, ou de líquidos imiscíveis de diferentes densidades de uma solução, em que a força motriz de separação é a gravidade ou a força centrífuga.

A sedimentação é muito realizada em operações de tratamento de água e esgoto, como por exemplo, para eliminar os sólidos dos esgotos, clarificar o caldo de cana pela sedimentação se suas impurezas, separação de misturas líquido-líquido provenientes da etapa de extração com dissolvente de um sedimentador. Portanto, em muitos casos esta operação é realizada para eliminar as partículas da corrente de um fluido para que o mesmo 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 dispena de uma extração líquido-líquido, sendo comum classificar este tipo de sedimentador como espessador.

Quando as partículas estão suficientemente distantes uma das outras e das paredes do sedimentador, esta operação é denominada sedimentação livre, dado que esta operação ocorre com uma maior velocidade.

Quando as partículas estão muito próximas o processo de sedimentação ocorre a uma menor velocidade.

O mecanismo da sedimentação é facilmente compreendido por meio do teste de proveta, conforme representado na Figura 1. No início do ensaio a suspensão é homogênea e a concentração da fase particulada é constante em todos os pontos ao longo da altura da proveta. Instantes depois, as partículas (aglomerados) maiores (ou

mais densas) começam a sedimentar e a formar uma fina camada de partículas no fundo da proveta, que é a região de compactação. Esta 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 as partículas começam a sedimentar, tem-se início da região de líquido clarificado, isenta de partículas sólidas. Com o decorrer do teste as alturas das regiões variam: as regiões de líquido clarificado e de compactação tornam-se maiores em virtude do desaparecimento da região de sedimentação livre. A seguir, o teste atinge uma situação na qual somente existe uma região de compactação e uma região de líquido clarificado. A partir deste momento, a sedimentação ocorre em uma compressão lenta da fase particulada, que expulsa o líquido existente entre as partículas para a região do líquido clarificado.

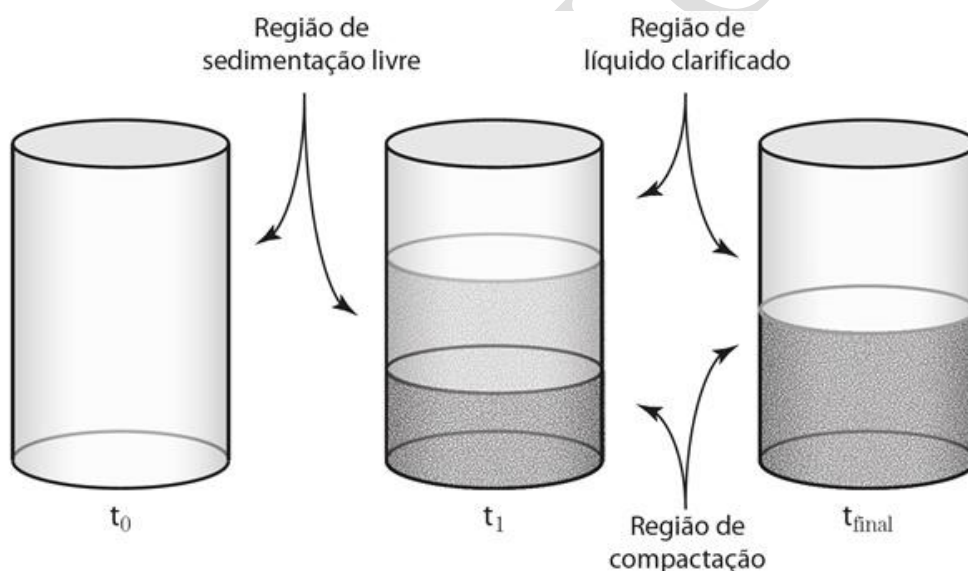


Figura 1. Regiões características de um ensaio de sedimentação em proveta.

Fonte: Cremasco, 2012.

2. Fatores que afetam a sedimentação

Uma ideia qualitativa da operação de sedimentação pode ser analisada por meio da velocidade terminal de uma partícula isolada. Partículas esféricas, com maior diâmetro e densidade terão uma maior velocidade terminal, portanto, decantarão mais rapidamente, quando comparadas a partículas não esféricas de menor diâmetro e densidade. A concentração da fase particulada, a natureza morfológica e granulométrica das

partículas e as características do sedimentador, também podem afetar essa operação unitária.

Com a finalidade de aumentar a esfericidade (próxima ao valor unitário) e o diâmetro das partículas que compõem a suspensão à técnica de *floculação/coagulação* é realizada, fazendo com que as partículas que compõem a suspensão se aglomerem.

O grau de flocação de uma suspensão depende de dois fatores antagônicos:

- Probabilidade de haver choque entre as partículas que vão formar o floco, portanto, é necessária uma agitação para aumentar a energia disponível das partículas em suspensão. Sendo que uma agitação branca favorece o choque entre as partículas e aumenta o grau de flocação e uma agitação intensa pode desaglomerar os aglomerados formados.
- Probabilidade de que, depois da colisão, as partículas permaneçam aglomeradas.

Agentes floclantes

Os agentes floclantes aumentam a probabilidade dos aglomerados recém formados não se desagregarem espontaneamente. Os mais comuns são:

Eletrólitos – neutralizam a dupla camada elétrica existente nas partículas sólidas em suspensão, eliminando a força de repulsão que favorece a dispersão. O poder aglomerante do eletrólito será maior quanto maior a valência dos íons;

Coagulantes – forma precipitados gelatinosos capazes de arrastar, durante a decantação, as partículas finas existentes em suspensão. Os hidróxidos de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) são utilizados para clarificação da água;

Agentes tensoativos e alguns materiais como amido, gelatina e cola – decantam e arrastam os finos de difícil decantação;

Polieletrólitos – polímeros de cadeia longa com grande número de pontos ativos nos quais as partículas sólidas se fixam.

A escolha do melhor agente floclante deve ser feita experimentalmente e a concentração utilizada pode variar entre 0,1 e 100 ppm.

A operação de sedimentação com a realização de coagulação e flocação pode ser observada na Figura 2.

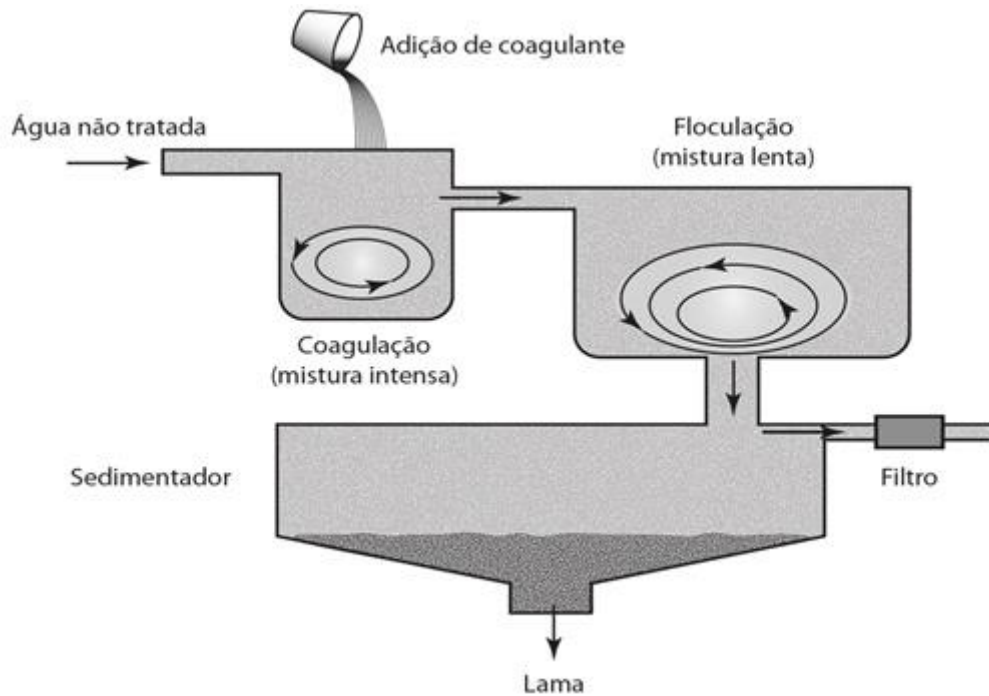


Figura 2. Sistema de sedimentação com as etapas de coagulação e floculação.

Fonte: Cremasco, 2012.

3. Tipos de sedimentadores

O tanque de sedimentação clássico (Figura 3), também chamado de sedimentador contínuo convencional, dispõe de dutos de alimentação da suspensão de retirada do clarificado (overflow) e do espessado (underflow). Esse tipo de sedimentador é dotado de raspadores que auxiliam no descarte do espessado.

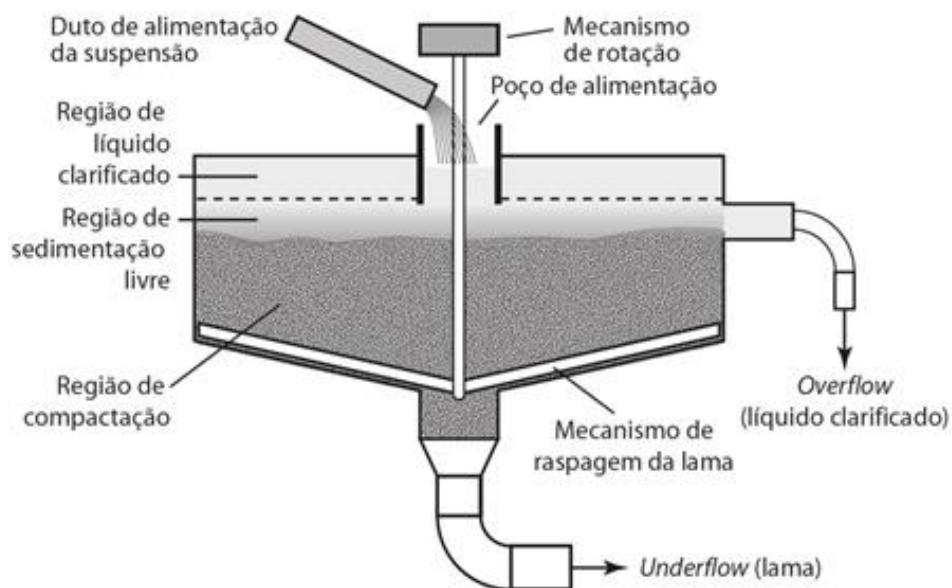


Figura 3. Esquema de um sedimentador contínuo convencional.

Fonte: Cremasco, 2012.

A inclusão de lamelas para aumentar a região de compactação sem modificar o diâmetro do sedimentador contínuo convencional dá origem ao sedimentador de alta capacidade, também chamado de sedimentador de lamela (Figura 4). Este equipamento apresenta um conjunto de placas inclinadas (lamelas) com um espaço entre as si, de modo a formar canais preferenciais para o escoamento da suspensão. Por sua vez, a suspensão pode ser alimentada diretamente no compartimento da alimentação ou na câmara de mistura de floculação. As partículas sedimentam sobre as lamelas e deslizam até o fundo do equipamento, dando origem a lama que será bombeada ou transportada até a unidade armazenadora. Para o escoamento e retirada de suspensões concentradas, o sedimentador apresenta um sistema de vibração em substituição aos raspadores rotativos dos espaçadores convencionais.

Esse tipo de equipamento é utilizado na separação de finos de carvão, de minério de ferro, de ouro, tratamento de água entre outras aplicações.

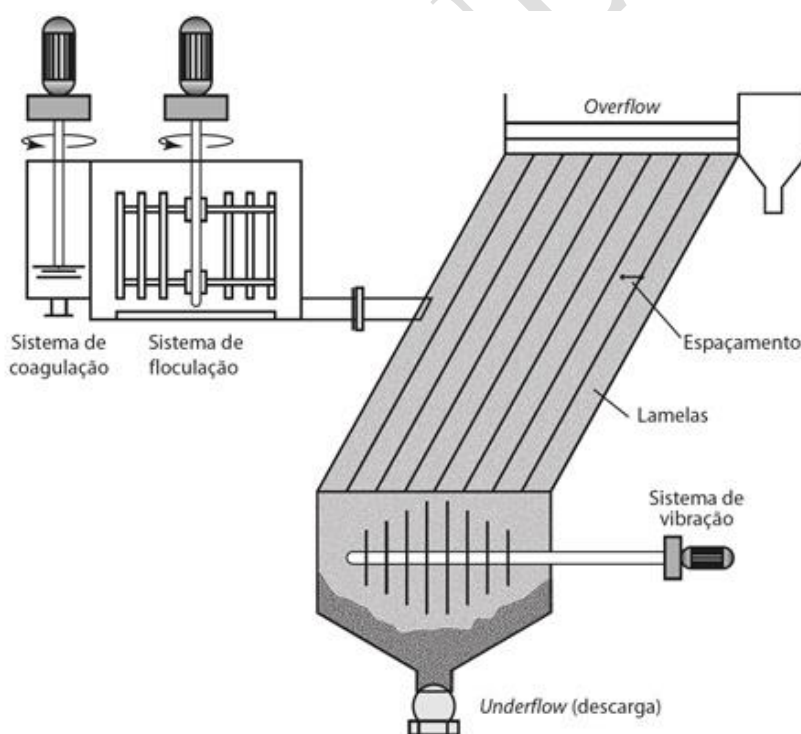


Figura 4. Esquema de um sedimentador lamelado.

Fonte: Cremasco, 2012.

4. Fundamentos teóricos

Os fundamentos sobre o movimento de uma partícula escoando através do fluido já foram apresentados e discutidos anteriormente. Independente do tipo de equipamento, o balanço de forças descreve o movimento de uma partícula com velocidade v em uma suspensão. Portanto, na queda de uma partícula em uma suspensão, o tempo necessário para a queda da partícula é calculada somente considerando o período de velocidade constante ($dv/dt = 0$), sendo a velocidade máxima denominada de velocidade terminal ou neste caso, velocidade de sedimentação livre (v_t):

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg(\rho_p - \rho)}{C_D A_p \rho_p \rho}} \quad (1)$$

Em que: v_t é a velocidade terminal (m/s); m é a massa (kg) g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$); ρ_p é a densidade da partícula (kg/m^3); ρ é a densidade do fluido (kg/m^3); C_D é o coeficiente de arraste (adimensional) e A_p é a área projetada da partícula m^2 .

Para partículas esféricas de diâmetro D_p , tem-se que a v_t é:

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)gD_p}{3C_D \rho}} \quad (2)$$

Para regime laminar, a velocidade de sedimentação livre é proveniente da lei de Stokes:

$$v_t = \frac{(\rho_p - \rho)gD_p^2}{18\mu} \quad (3)$$

Em que: $N_{Re,p} < 0,4$ e $C_D = \frac{24}{N_{Re,p}}$.

Em que μ é a viscosidade do fluido dispersante (Pa.s) e $N_{Re,p}$ é o número de Reynolds da partícula (adimensional):

$$N_{Re,p} = \frac{\rho v_t D_p}{\mu} \quad (4)$$

A determinação do C_D também pode ser determinada a partir do índice K (adimensional) segundo as equações (5) e (6) propostas por Lapple e Sheperd (1940):

$$K = D_p \left[\frac{g\rho(\rho_p - \rho)}{\mu^2} \right]^{0,33} \quad (5)$$

Se: $K > 0,33$ ou $N_{Re,p} < 1,9$ a equação $C_D = \frac{24}{N_{Re,p}}$ pode ser empregada.

Se: $1,3 < K < 44$ ou $1,9 < N_{Re,p} < 500$, a seguinte expressão pode ser utilizada:

$$C_D = \frac{18,5}{N_{Re,p}^{0,6}} \quad (6)$$

Se $K > 44$, $C_D = 0,44$.

Exemplo 1. Calcular a velocidade de sedimentação de uma partícula esférica de 1×10^{-4} m de diâmetro e de 1400 kg/m^3 de densidade, em água ($\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$).

5. Dimensionamento de sedimentadores contínuos

Na sedimentação descontínua, verifica-se uma variação nas alturas das zonas de decantação com o tempo, por exemplo, quando a decantação ocorre em provetas.

Já em sedimentadores contínuos, observa-se que uma vez atingido o regime permanente, as alturas destas zonas são constantes, conforme observa-se na Figura 5.

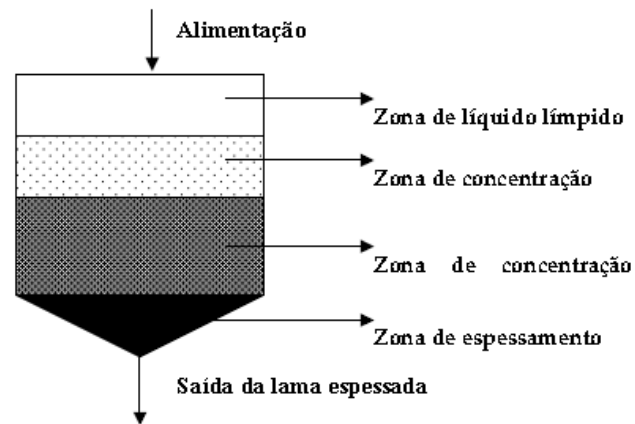


Figura 5. Representação das zonas de um sedimentador contínuo.

O dimensionamento dos sedimentadores pode ser feito com os seguintes métodos:

- Coe e Clevenger
- Kynch
- Talmadge e Fitch

Método de Cloe e Clevenger (1916)

Este método é a base para os demais. A área de um sedimentador contínuo deve ser suficiente para permitir a decantação de todas as partículas alimentadas. Se a área for insuficiente haverá acúmulo de sólidos numa dada seção do sedimentador e então as partículas sólidas serão arrastadas com o líquido clarificado.

Este método tem como etapa inicial, a determinação do perfil de alturas na zona de interface de sedimentação de uma suspensão em função do tempo. Para tanto, utiliza-se uma proveta graduada será observada a separação de fases da suspensão à medida que transcorre o tempo de decantação das partículas sólidas. Duas fases poderão ser observadas, uma em que se encontra o líquido límpido e outra em que o processo de decantação prossegue. Na fase de decantação, existe uma região em que as partículas sedimentam livremente, e outra fase em que as partículas já não caem livremente, em razão da presença de outras partículas, nesta segunda fase, ainda há uma região no fundo da proveta com os sedimentos depositados, denominados lamas ou lodos.

Na Figura 6 pode-se observar a altura da interface (H) formada entre o líquido claro e resto do sistema, em função do tempo (t).

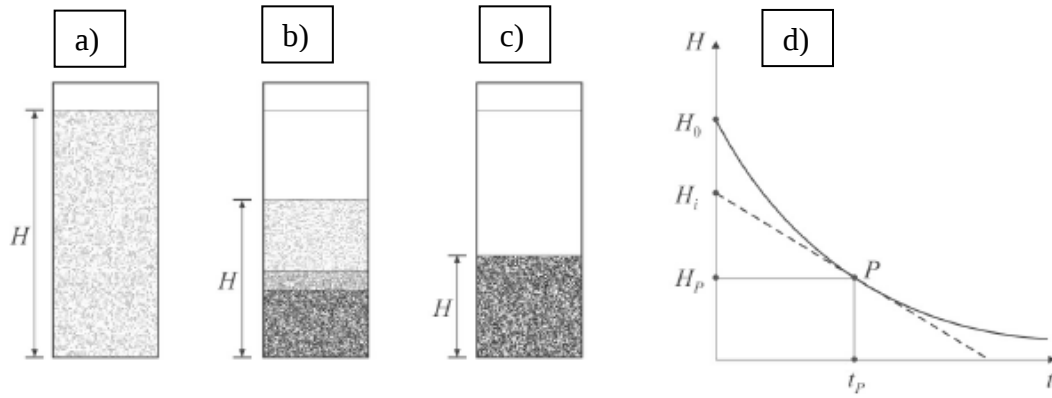


Figura 6. Esquema de decantação uniforme por lotes: a) suspensão inicial e uniforme, b) zonas de sedimentação, c) compactação dos sedimentos, d) altura da interface do líquido (H) em função do tempo de sedimentação (t).

A velocidade de sedimentação v pode ser determinada traçando uma tangente a curva da Figura 6d) em um tempo dado (t_p) em que:

$$v = \frac{dH}{dt} = \frac{H_i - H_p}{t_p - 0} \quad (7)$$

Portanto, a concentração c é a concentração média da suspensão se H_i é a altura desta suspensão, sendo calculada por:

$$c_i H_i = c_0 H_0 \quad (8)$$

Em que c_0 é a concentração inicial em (kg/m³) na altura H_0 e $t = 0$. Esta relação se repete para outros tempos e então é possível fazer um gráfico da velocidade de sedimentação em função da concentração.

Para projetar um sedimentador como mostra a Figura 7, considera-se que a velocidade de sedimentação em uma camada denominada limite é função da concentração. Nesta zona limite, para que não haja arraste de partículas sólidas na saída do líquido clarificado, a velocidade com que o líquido clarificado ascende deve ser menor do que a velocidade de decantação das partículas:

$$v_{\text{ascensão líquido}} < v_{\text{decantação partículas}}$$

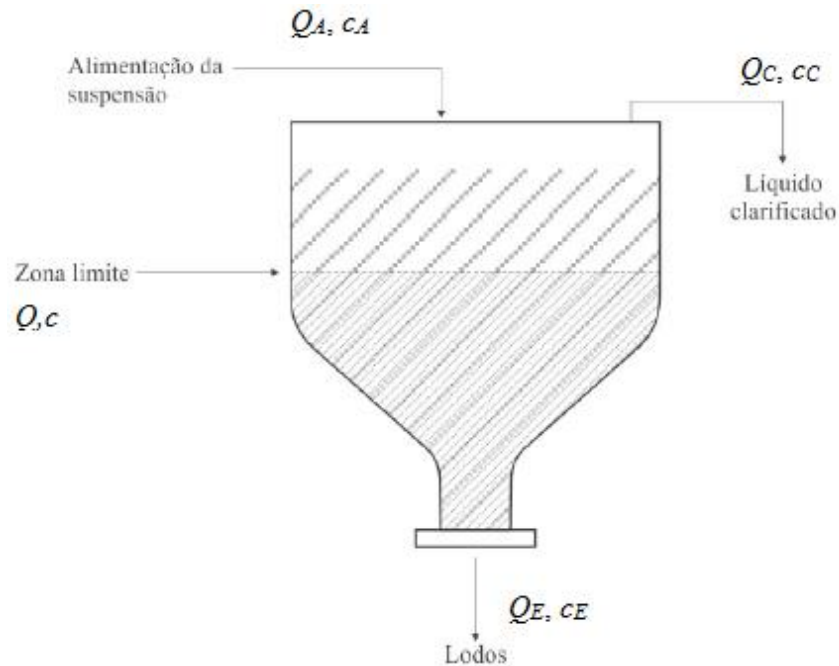


Figura 7. Esquema de sedimentador contínuo (vazões e concentrações).

Não havendo arraste de partículas para cima, todo sólido que chega a zona limite sairá necessariamente pelo fundo do sedimentador quando se opera em regime permanente.

Realizando um balanço de massa na camada limite de velocidade, a vazão de líquido clarificado que sobe pelo sedimentador é:

$$\dot{Q} - \dot{Q}_E = v \cdot A \quad (9)$$

Em que:

Q_A = vazão da alimentação da suspensão (m^3/h)

c_A = concentração da suspensão (kg/m^3)

Q_C = vazão de líquido clarificado (m^3/h)

c_C = concentração do líquido clarificado (kg/m^3)

Q_E = vazão da lama ou lodo espessado (m^3/h)

c_E = concentração da lama ou lodo espessado (kg/m^3)

Q = vazão da suspensão na zona limite (m^3/h)

c = concentração da suspensão na zona limite (kg/m^3)

Sendo:

Considerando o regime permanente e que não há arraste de sólidos, o balanço de massa em relação aos sólidos é:

$$\dot{Q}_A \cdot c_A = \dot{Q} \cdot c = \dot{Q}_E \cdot c_E \quad (10)$$

Então:

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_A \cdot c_A}{c} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_E = \frac{\dot{Q}_A \cdot c_A}{c_E} \quad (12)$$

Substituindo (10) em (9):

$$A = \frac{\dot{Q}_A \cdot c_A}{v} \left[\frac{1}{c} - \frac{1}{c_E} \right] \quad (13)$$

Em que A é a área do sedimentador (m^2).

Com os correspondentes valores de c e v , determinados experimentalmente, diversos cálculos de A são feitos com os pares dos valores dessas grandezas. O projeto final é baseado no maior valor de A obtido, que será a área mínima de sedimentação.

Dependendo do tipo de suspensão a ser empregada no projeto, pode-se especificar um fator de segurança para correção da área calculada.

Método de Kynch

Este método somente requer um único ensaio de decantação em laboratório que forneça a curva de decantação, H versus t , como na Figura 8:

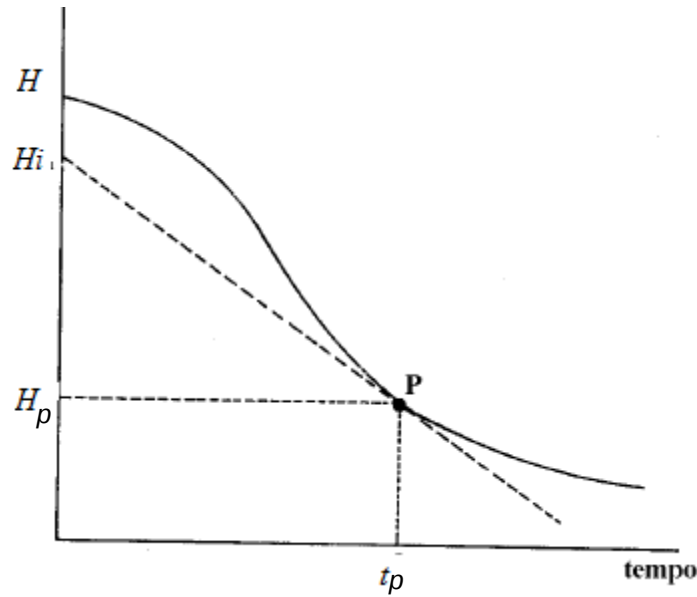


Figura 8. Esquema de ensaio de laboratório para obter a curva de decantação.

Supondo que um ensaio inicie com uma suspensão de concentração uniforme e inicial c_0 , na zona de transição, a concentração varia de c_0 até o valor máximo que corresponde à zona de espessamento, sedimentação (Figura 6c). Tangentes em diversos pontos são traçada a fim de determinar os valores de t_p , H_p e H_i .

A velocidade (v) e a concentração c são calculadas por:

$$v = \frac{dH}{dt} = \frac{H_p - H_i}{t_p - t_i} \quad (14)$$

$$c = \frac{H_0 c_0}{H_i} \quad (15)$$

Com os valores de t , H e H_i , a expressão do método de Coe Clevenger é usada para obter as áreas da seção transversal:

$$A = \frac{\dot{Q}_A \cdot c_A}{v} \left[\frac{1}{c} - \frac{1}{c_E} \right] \quad (13)$$

O valor máximo da área obtida corresponderá à área mínima que o sedimentador poderá ter.

A Tabela 1 esquematiza os dados experimentais coletados e os valores de v e A calculados:

t_p	H_p	H_i	c	v	A
t_{p1}	H_{p1}	H_{i1}	c_1	v_1	A_1
t_{p2}	H_{p2}	H_{i2}	c_2	v_2	A_2
t_{p3}	H_{p3}	H_{i3}	c_3	v_3	A_3
...	...	...	...	...	...
t_{pn}	H_{pn}	H_{in}	c_n	v_n	A_n

Método de Talmadge e Fitch

Este método permite calcular diretamente a área mínima do sedimentador, uma vez que se determina o ponto crítico P_c na curva de decantação (Figura 9). Um vez determinado o ponto crítico, o instante em que a mudança de comportamento (região de clarificação para a de espessamento) é determinada, podendo calcular a respectiva concentração no ponto crítico.

Constrói-se o gráfico, como na Figura 9, que fornece diretamente t_E pelo cruzamento da tangente no ponto P_c com a horizontal em que $H=H_E$, em que H_E é a altura da interface correspondente a concentração c_E , especificada para a lama espessada.

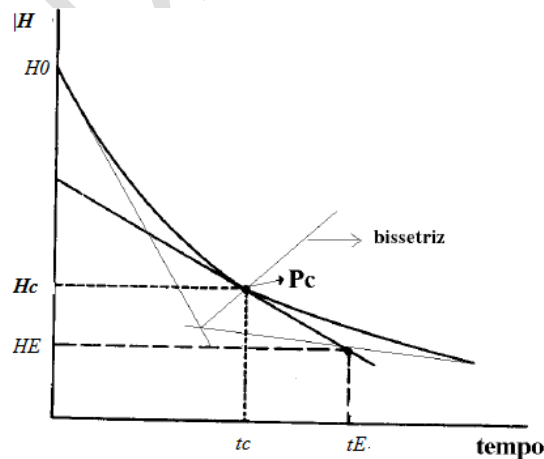


Figura 9. Esquema de ensaio de laboratório para curva de decantação Método Talmadge e Fitch.

Fazendo um balanço de massa do sólido:

$$H_0 \cdot A \cdot c_0 = H_E \cdot A \cdot c_E \quad (16)$$

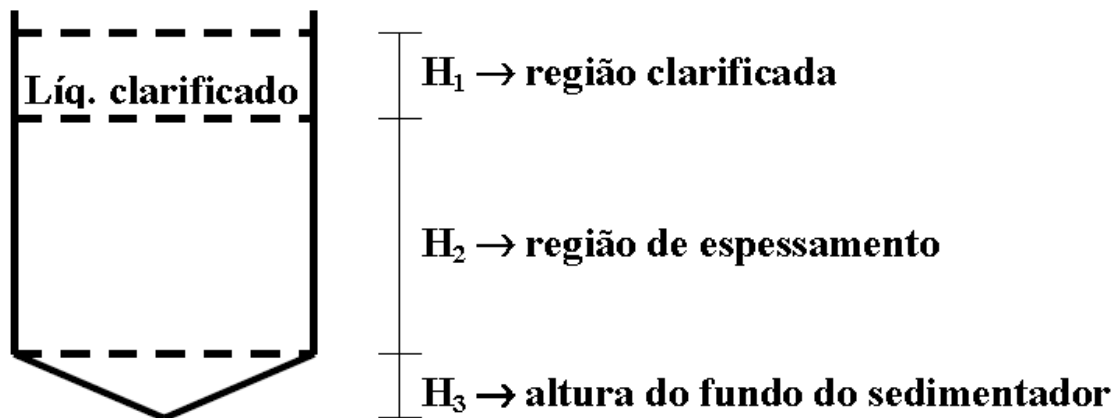
Conhecendo o valor de H_E , no gráfico encontra-se o valor de t_E e então, pode-se calcular a área mínima do sedimentador ($A_{\min}$):

$$A_{\min} = \frac{\dot{Q}_A \cdot c_A \cdot t_E}{H_0 \cdot c_0} \quad (17)$$

6. Determinação da altura do sedimentador

A altura do sedimentador, considerando as regiões delimitadas por H_1 , H_2 e H_3 da Figura 10, pode ser calculada por:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 \quad (18)$$



Em que H_1 é altura do líquido clarificado, que pode variar entre 0,45 e 0,75 m; H_2 é a altura da região de espessamento e H_3 é a altura do fundo do sedimentador.

A altura da região de espessamento H_2 é calculada por meio de balanço de massa:

$$H_2 = \frac{4 \dot{Q}_A \cdot c_A \cdot \Delta t \cdot (\rho_p - \rho)}{3 A \cdot \rho_p \cdot (\rho_E - \rho)} \quad (19)$$

Em que: ρ_p é a densidade do sólido (partícula), ρ é a densidade da suspensão (líquido) e ρ_E é a densidade do lodo ou lama espessada e Δt é diferença $t_2 - t_1$ que pode ser obtida da curva de sedimentação.

A densidade do lodo espessado pode ser calculada por:

$$\rho_E = \frac{m(\text{sólido} + \text{líquido})}{v(\text{sólido} + \text{líquido})}$$

Que é diferente da concentração do lodo espessado:

$$c_E = \frac{m_{\text{sólido}}}{v(\text{sólido} + \text{líquido})}$$

Já a altura do fundo do sedimentador H_3 é calculada pela seguinte expressão:

$$H_3 = 0,073 \cdot D_t \quad (20)$$

Em que D_t é o diâmetro do tanque sedimentador (m).

Exercícios

1. Um lodo biológico proveniente de um tratamento secundário de rejeitos, deve ser concentrado de 2500 até 10900 mg/ml, em um decantador contínuo. A vazão de entrada é $4,5 \times 10^6$ litros por dia.
Determine a área necessária a partir dos dados da tabela.
2. Uma suspensão com 167g de sólidos / kg de água deve ser espessada até uma concentração final de 893 g/kg, dando um líquido perfeitamente clarificado. Cinco ensaios foram realizados em laboratório obtendo-se os resultados da tabela abaixo. Calcular o diâmetro que deverá ter o decantador para uma vazão de sólidos de 40 t/h.

Ensaio	Concentração (t de sólidos / m ³)	Velocidade de decantação (m/h)
1	0,167	0,665
2	0,202	0,363
3	0,250	0,262
4	0,285	0,236
5	0,333	0,186

3. 50 t/h da suspensão de um minério de densidade 4,5 g/ml em água devem ser espessadas desde uma concentração de 210 g/l até 1300 g/l. Os resultados de um ensaio piloto de decantação em batelada com uma suspensão de concentração inicial 186 g/l são apresentados abaixo. Calcular a área e o diâmetro do espessador pelos métodos de Kynch e de Talmadge-Fitch.

θ (min)	0	5	15	30	45	60	120	240
Z (cm)	91,4	60,7	42,7	27,4	20,7	14,3	7,6	3,1

Bibliografia:

- 1) CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 423p. 2012;
- 2) FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. 2ed. Princípios das operações unitárias. Rio de Janeiro: Guanabara Dois/LTC, 670p. 2008;
- 3) GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4ed. New York: Prentice Hall, 1026p. 2010;
- 4) MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 1140 p. 2005;
- 5) PERRY's chemical engineers handbook. Editor in Chief Don W. Green; Late Editor Robert H. Perry New York: McGraw-Hill, 2008.
- 6) TADINI, C. Telis, V.R.; Meirelles, A.J.A.; Pessoa, P.A. Operações Unitárias na indústria de alimentos. v1 1. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016.

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

NAO DIVULGAR