

PRÁCTICA MF-SED-CyTA

Sedimentación

ÍNDICE

1. OBJETIVO _____	1
2. FUNDAMENTO TEÓRICO _____	1
2.1 Movimiento de partículas sólidas en el seno de un fluido	1
2.2 Sedimentación discontinua	3
2.2.1 Relación velocidad-concentración	4
2.3 Sedimentación continua	6
2.3.1 Capacidad de sedimentación y área	6
2.3.2 Cálculo de la altura	7
3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL _____	8
3.1 Descripción del equipo	8
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL _____	8
5. BIBLIOGRAFÍA _____	8

1. OBJETIVO.

Los objetivos principales de esta práctica se centran en determinar la **curva característica de un sedimentador discontinuo** y determinar los **parámetros de diseño de un sedimentador continuo** a partir de los datos experimentales obtenidos en el laboratorio.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

La sedimentación es una operación unitaria que consiste en la separación, por acción de la gravedad, de las fases sólida y líquida de una suspensión diluida, de manera que se obtiene una suspensión concentrada y un líquido claro. La sedimentación gravitatoria se emplea en la industria alimentaria para la separación de partículas sólidas contenidas en líquidos así como para la separación de emulsiones de dos fases líquidas inmiscibles. La fuerza impulsora es la diferencia de densidades entre ambas fases, que en muchas ocasiones es pequeña, por lo que es frecuente que esta operación sea desplazada por la centrifugación, más costosa pero de mayor efectividad para la separación. Cuanto mayor sea la diferencia entre la densidad del sólido y la densidad del fluido, más fácil será la separación.

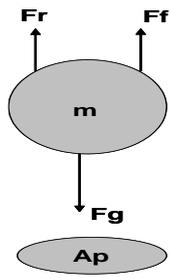
El diseño de sistemas industriales de sedimentación continua se suele realizar a partir de datos experimentales obtenidos con la misma suspensión con la que se desee trabajar, utilizando probetas de vidrio en las que se determina visualmente la velocidad de sedimentación.

En la industria alimentaria el proceso de sedimentación se aplica en procesos de refinado de aceites, desgomado, eliminación de jabones, clarificación de zumos, separación de suero para mantequería y quesería, refinado de azúcar... Si las dos fases obtenidas son recuperadas de forma análoga, la sedimentación ejerce un papel de *separación* (desnatado de la leche). Cuando se rechaza la fase minoritaria y se recupera la mayoritaria (medio de dispersión), la sedimentación ejerce un papel de *clarificación* (zumo de frutas). Por último, si la fase mayoritaria se rechaza y se recupera la minoritaria, la sedimentación ejerce un papel de *concentración* (obtención de levaduras).

El fundamento de esta operación es el movimiento de partículas sólidas en el seno de un fluido, por lo que en primer lugar se estudiará dicho movimiento.

2.1 Movimiento de partículas sólidas en el seno de un fluido.

Cuando una partícula desciende por gravedad en el seno de un fluido está sometida a una serie de fuerzas que actúan a favor o en contra de dicho movimiento (Figura 1).



$$F_G \text{ (fuerza de gravedad)} = m \cdot g \quad [1]$$

$$F_F \text{ (fuerza flotación)} = \frac{m \cdot g \cdot \rho_F}{\rho_P} \text{ (Ppo. empuje Arquímedes)} \quad [2]$$

$$F_R \text{ (fuerza de rozamiento)} = C_D \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_F \cdot v^2 \right) \cdot A_P \quad [3]$$

Figura 1. Fuerzas que actúan sobre la partícula que desciende en el seno de un fluido.

Donde:

m : masa de la partícula sólida.

g : aceleración de la gravedad.

ρ_F : densidad del fluido.

ρ_P : densidad de la partícula sólida.

C_D : coeficiente de rozamiento función del número de Re ; $Re_p = \frac{\rho_F \cdot D_p \cdot v}{\mu_F}$ [4]

A_P : área proyectada por la partícula sobre un plano perpendicular al movimiento.

v : velocidad de descenso.

La fuerza resultante que actúa sobre la partícula será:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = F_G - F_R - F_F \quad [5]$$

$$\frac{dv}{dt} = g \cdot \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_P} \right) - \frac{C_D \cdot v^2 \cdot \rho_F}{2m} \cdot A_P \quad [6]$$

El movimiento descendente de la partícula presenta dos periodos:

- *Periodo I.* La fuerza resultante es positiva en el sentido de avance ($F_G > (F_F + F_R)$) y por tanto se produce un movimiento descendente acelerado que incrementa la velocidad de la partícula a lo largo del tiempo.
- *Periodo II.* El aumento de velocidad produce un aumento de la fuerza de rozamiento, hasta que $F_G = F_F + F_R$. En este momento la fuerza global que actúa sobre la partícula es cero, y se alcanza una velocidad máxima y constante que se conoce como *Velocidad Terminal Gravitatoria* (ecuación [7]).

$$V_{TG} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\rho_P - \rho_F) \cdot m}{A_P \cdot \rho_P \cdot C_D \cdot \rho_F}} \quad [7]$$

Cuando la partícula es esférica:

$$m = \frac{\pi}{6} \cdot D_p^3 \cdot \rho_p \quad [8]$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} \cdot D_p^2 \quad [9]$$

Sustituyendo las ecuaciones [8] y [9] en la ecuación [7] se tiene la ecuación [10] que calcula la velocidad terminal para partículas esféricas:

$$V_{TG} = \sqrt{\frac{4 \cdot D_p \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g}{3 \cdot \rho_f \cdot C_D}} \quad [10]$$

Para el caso que nos ocupa de partículas esféricas, el valor de C_D puede determinarse en función del número de Reynolds con las siguientes expresiones:

$$- \text{Re}_p \leq 1, \text{ régimen laminar (ley de Stokes), } C_D = 24/\text{Re}_p \quad [11]$$

$$- 1 < \text{Re}_p < 10^3, \text{ régimen de transición, } C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \cdot (1 + 0,15 \cdot \text{Re}_p^{0,687}) \quad [12]$$

$$- 10^3 \leq \text{Re}_p \leq 10^5, \text{ régimen turbulento (ley de Newton), } C_D = 0,44 \quad [13]$$

Para otro tipo de geometrías existen tablas y gráficas con las que se puede calcular C_D en función del Re_p , aunque también se podrían usar las expresiones anteriores utilizando un *diámetro equivalente* (diámetro de una partícula esférica ficticia que tuviera la misma masa y velocidad de sedimentación que la partícula real).

Cuando la sedimentación se produce de acuerdo a las ecuaciones enunciadas anteriormente, se conoce con el nombre de *Sedimentación Libre*. En la realidad industrial la concentración de partículas suele ser suficientemente elevada para que no se puedan despreciar las interacciones entre ellas, que chocan y retardan la sedimentación. En estas condiciones, la velocidad de sedimentación depende de la concentración de sólidos y el proceso se conoce como *Sedimentación Retardada o Impedida* siendo la velocidad de descenso considerablemente inferior a la predicha por las expresiones para sedimentación libre.

Por otro lado, según sea la forma de operar, la sedimentación puede ser *intermitente, discontinua o por cargas*, dependiendo de si el flujo volumétrico total de materia es nulo, o *continua*, si se alimenta una suspensión diluida que se separa continuamente en un líquido claro y una segunda suspensión más concentrada.

2.2 Sedimentación discontinua.

La sedimentación por cargas se lleva a cabo en tanques cilíndricos de gran tamaño en los que se introduce la suspensión original dejándola sedimentar durante un cierto periodo de tiempo. Transcurrido éste, el líquido claro se extrae por la parte superior y el lodo concentrado se elimina a través de una salida situada en el fondo del tanque. Este tipo de sedimentación también es la que tiene lugar en una probeta de laboratorio, donde una

suspensión se deja reposar. En la Figura 2 se muestra la evolución del proceso en el que se pueden distinguir cuatro fases.

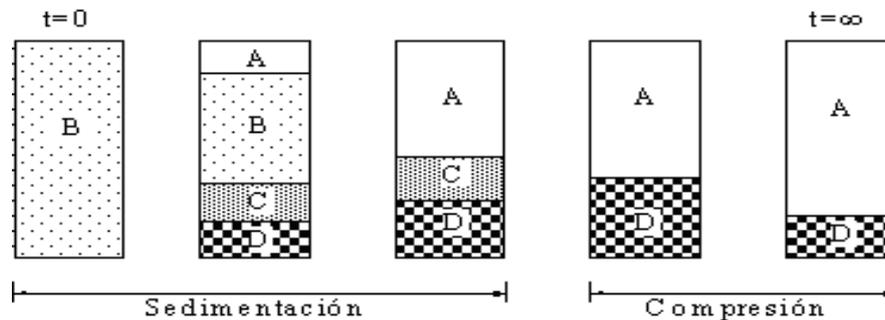


Figura 2. Proceso de sedimentación.

- A. Zona de líquido claro.
- B. Zona de concentración constante: $V = \text{cte}$.
- C. Zona de concentración variable. Sedimentación impedida: $V = f(\text{concentración})$.
- D. Zona de compresión.

Al comienzo del ensayo todas las partículas descienden en sedimentación libre con velocidad y concentración de sólidos constantes (zona B). Posteriormente, por encima de esta zona aparece una zona de líquido claro, zona A, y en el fondo de la probeta aparece una zona D, con partículas sedimentadas, al tiempo que aparece una zona C, donde la concentración de sólidos no es constante. Conforme la sedimentación va avanzando, las zonas B y C disminuyen hasta desaparecer, marcando el principio de la etapa de compresión de la zona D. Este instante se denomina *punto crítico*, y la duración de esta etapa de compresión representa una fracción importante del tiempo total.

2.2.1 Relación velocidad-concentración

Supongamos un experimento discontinuo. Si tomamos un nivel con valores fijos de concentración (C) y velocidad (V), éste aparecerá en el fondo de la probeta e irá ascendiendo hasta desaparecer al encontrarse con la interfase A-B (líquido claro-suspensión) que a su vez irá descendiendo. Cuando esto ocurre, todos los sólidos que hay en la probeta habrán pasado a través de este nivel.

La cantidad de sólido total en la probeta será:

$$m_s = A \cdot h_0 \cdot C_0 \quad [14]$$

siendo A el área de la sección transversal de la probeta, y C_0 y h_0 la concentración y altura iniciales de la interfase A-B.

Haciendo un balance de masas de la situación inicial y final de la probeta, se llega a la siguiente expresión:

$$h_0 \cdot C_0 = h_\infty \cdot C_\infty \quad [15]$$

siendo C_∞ y h_∞ la concentración y altura finales de la interfase A-B.

Por otra parte por el nivel L considerado, pasa un caudal de suspensión durante un tiempo t_L , que es el que ese nivel tarda en alcanzar la interfase A-B, a una altura h_L . Haciendo un balance en la interfase A-B, se llega a la siguiente relación:

$$h_L = \frac{C_0 \cdot h_0}{C_L} - V_L \cdot t_L \quad [16]$$

Esta ecuación representa el movimiento de la interfase A-B (h_L) con el tiempo t_L , que por otra parte puede obtenerse experimentalmente, como se indica en la Figura 3. La pendiente en cada punto de la curva representa la velocidad de los sólidos en ese nivel, V_L , pudiendo obtenerse de la ordenada en el origen su concentración correspondiente, C_L .

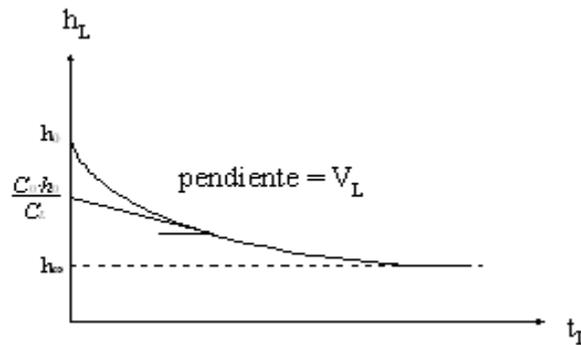


Figura 3. Curva de variación de la altura de sólidos con el tiempo.

Puede obtenerse gráficamente la función $V_L = f(C_L)$ de la sedimentación retardada, tal como se indica en la Figura 4.

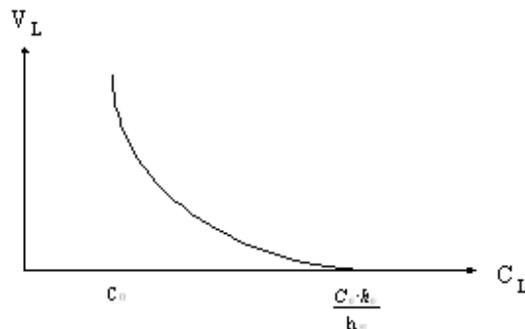


Figura 4. Representación gráfica de la velocidad de sedimentación en función de la concentración.

2.3 Sedimentación continua.

2.3.1 Capacidad de sedimentación y área.

Suponiendo un sedimentador continuo (Figura 5), llamaremos V_L y Q_L a los caudales volumétricos de la suspensión descendente y del líquido claro ascendente en un nivel determinado.

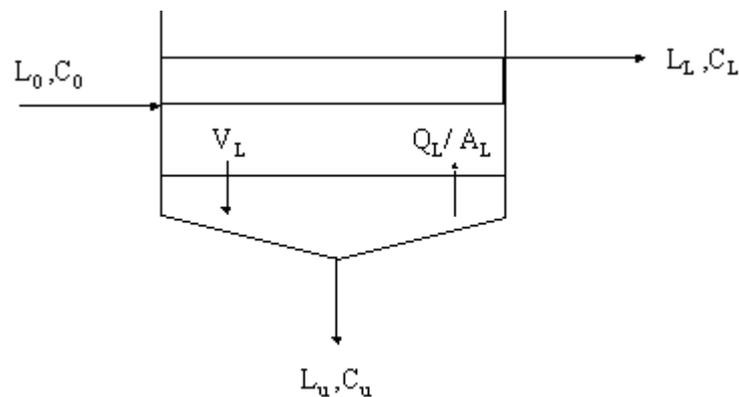


Figura 5. Sedimentador continuo.

La concentración requerida C_u se conseguirá siempre dejando salir un caudal L_u de suspensión final, siempre y cuando no salgan sólidos con el líquido claro que rebosa.

La magnitud que calcula la admisión de sólidos para cada nivel, se llama *Capacidad de Sedimentación* G_L , y se define como la máxima cantidad de sólidos que el nivel admite por unidad de tiempo y superficie, en virtud de su concentración y velocidad.

$$G_L = \frac{L_0 \cdot C_0}{A_L} = \frac{V_L}{\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_u}} \quad [17]$$

El área del sedimentador (A_L) se calculará entonces, de acuerdo con el nivel de menor capacidad de sedimentación, es decir, el que necesita mayor área para que los sólidos pasen a su través, y que se llama *capa controlante*.

El cálculo es gráfico, a partir de un experimento discontinuo, en el que se obtienen datos de h_L para cada t_L , con los cuales se puede calcular el C_L y G_L , gracias a las ecuaciones [16] y [17] respectivamente. Se obtiene así una serie de datos, de manera que representando G_L frente a C_L , para todos los niveles, se puede calcular el mínimo de G_L , y con él, el A_L máxima.

2.3.2 Cálculo de la altura.

En un sedimentador industrial continuo, hay una parte de la altura que no se calcula, concretamente las alturas correspondiente a la zona de clarificación (A) y a la zona cónica del fondo. Por esto, se suele dar una corrección de altura entre 80 y 120 cm. La altura correspondiente a las zonas de sedimentación y compresión, se obtiene calculando su volumen, y dividiendo por el área del sedimentador que ya se habrá calculado.

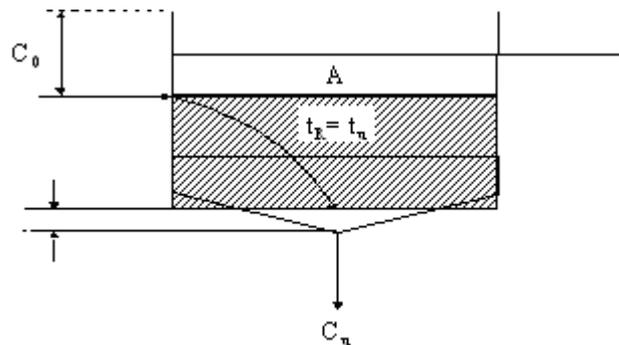


Figura 6. Esquema sedimentador continuo

El volumen del sedimentador se compone del volumen ocupado por los sólidos y el ocupado por el líquido. El volumen total se puede expresar de la siguiente forma:

$$V_T = \frac{L_0 \cdot C_0}{\rho_s} \cdot t_R + L_0 \cdot C_0 \cdot \int_0^{t_R} \frac{1}{C_L} dt \quad [18]$$

La integral se puede calcular gráficamente si se representa $1/C_L$ frente a t , y se mide el área bajo la curva entre los límites de integración (Figura 7). Tanto para este cálculo como para el cálculo de t_R , necesitamos una relación tiempos-concentraciones, $C_L = C_L(t)$, por lo que, se emplearán los datos obtenidos experimentalmente en el sedimentador discontinuo.



Figura 7. Cálculo de la integral gráficamente.

3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.

3.1 Descripción del equipo.

La instalación experimental está compuesta de una probeta de vidrio cilíndrica graduada que contiene una suspensión de un alimento en agua. A esta suspensión se le ha añadido un colorante soluble para así apreciar mejor la separación entre la zona de líquido claro y la zona de la suspensión.

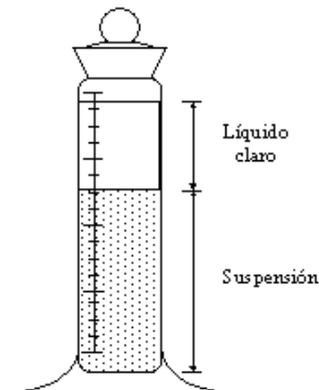


Figura 8. Probeta de sedimentación

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

- Medir la altura de sedimentación a tiempo infinito, h_{∞} .
- Agitar la probeta hasta homogeneizar toda la suspensión.
- A partir de este momento se comienza a medir la variación de la altura de la suspensión con el tiempo. La probeta debe estar apoyada sobre una superficie horizontal sin que existan vibraciones que puedan alterar el proceso. Al principio, la sedimentación es rápida, por lo que deberán tomarse datos de altura (h_L) a intervalos cortos, pudiendo aumentar éstos con el transcurso de la práctica.
 - De 0 a 10 minutos se tomarán medidas cada 30 segundos.
 - De 10 a 20 minutos se tomarán medidas cada 60 segundos.
 - De 20 a 120 minutos se tomarán medidas cada 5 minutos.

5. BIBLIOGRAFÍA:

- Pierre Mafart y Emile Béliard. Ingeniería Industrial Alimentaria, Volumen II Técnicas de separación. Ed. ACRIBIA, S.A., 1994.
- F. Rodríguez y col. Ingeniería de la Industria Alimentaria. Volumen II. Operaciones de Procesado de Alimentos. Ed. Síntesis, 2002.