

**Sedimentación  
intermitente.**

**Cálculo de un  
sedimentador continuo**

## Objetivos de la práctica

- Obtener la velocidad de sedimentación de un sólido a partir de un ensayo de sedimentación intermitente de laboratorio.
- Utilizar los datos obtenidos para diseñar un sedimentador continuo, calculando su diámetro y su altura.

## Fundamento teórico

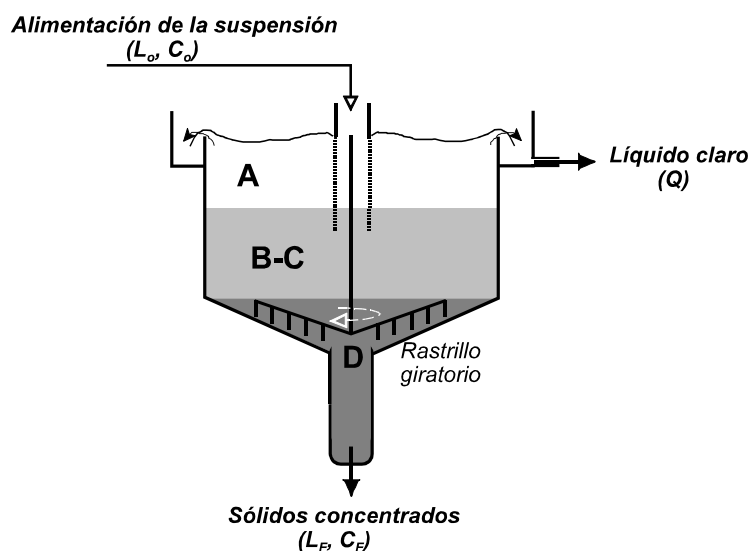
Existen operaciones básicas de separación sólido-fluido que tienen gran aplicación y se presentan en muchos de los procesos industriales: filtración, sedimentación, centrifugación, fluidización, separación neumática, flotación, etc. Estas operaciones físicas están basadas en el *flujo externo* de los fluidos, es decir, el flujo alrededor de cuerpos sumergidos en el seno del fluido. Las fuerzas que intervienen en estas operaciones son fuerzas de gravedad, centrífugas y de flotación, así como las fuerzas mecánicas asociadas al propio movimiento del fluido. Todas estas fuerzas determinan la velocidad relativa entre el fluido y el sólido y, por tanto, la velocidad de desplazamiento o separación fluido-sólido.

La *sedimentación* es una operación de separación sólido-fluido en la que las partículas sólidas de una suspensión, más densas que el fluido, se separan de éste por la acción de la gravedad. Cuanto mayor sea la diferencia entre la densidad del sólido y la del fluido, más fácil será la separación. El producto de mayor interés en unos casos es el fluido libre de partículas sólidas, y en otros es el propio producto sólido, lo que puede determinar la forma de llevar a cabo la operación.

Cuando la suspensión es muy diluida y la relación entre diámetro de la partícula y diámetro del recipiente es muy pequeña (alrededor de  $1/200$ ), las partículas se sedimentan libremente, sin choques entre ellas, por lo que su movimiento no está afectado sensiblemente por el de las demás. En estas condiciones ideales, el fenómeno se conoce como *sedimentación libre*. Sin embargo, cuando la concentración inicial de sólidos es mayor o el recipiente tiene un diámetro relativamente pequeño, las partículas chocan continuamente entre sí durante la sedimentación, retrasándose el proceso al reducirse la velocidad de descenso de las partículas. En este caso, más frecuente en la práctica, se conoce como *sedimentación impedida* o *sedimentación retardada*.

Industrialmente la mayoría de las separaciones se llevan a cabo de forma continua en equipos donde se alimenta continuamente la suspensión, mientras que los sólidos sedimentados y el líquido claro salen continuamente en corrientes distintas. Los **sedimentadores** o **espesadores**, consisten en un depósito cilíndrico que suele tener fondo cónico de poca inclinación. La suspensión se alimenta por el centro del sedimentador, a una cierta profundidad por debajo del nivel del líquido; el líquido claro se retira por la parte superior a través de un rebosadero y los sólidos por el fondo, mediante una bomba de lodos. La relación diámetro/altura de estos equipos es muy elevada, del orden de 5/1.

En los sedimentadores continuos pueden distinguirse zonas de clarificación, sedimentación y de compresión, como se muestra en la figura siguiente:



Si en un sedimentador continuo se aumenta el caudal  $L_0$  de la suspensión a tratar, llegará un momento en que se arrastrarán los sólidos que saldrán con el líquido claro del rebosadero; con caudales pequeños de suspensión se obtendrán lodos muy concentrados. Por tanto, existirá un caudal que permitirá un funcionamiento óptimo del sedimentador. El cálculo de un sedimentador se plantea generalmente de la siguiente forma: conocido el caudal  $L_0$  ( $m^3/s$ ) y la concentración  $C_0$  ( $kg/m^3$ ), de la suspensión que se va a tratar y fijada la concentración final deseada,  $C_F$  ( $kg/m^3$ ), de los lodos, se determina su área y su altura.

Se ha comprobado experimentalmente que la variable que determina la capacidad del sedimentador es la sección o diámetro del mismo por lo que lógicamente será la variable de diseño a determinar en los métodos de cálculo del mismo. Es

evidente que en el sedimentador continuo, a distintas alturas del mismo se encontrarán todas las concentraciones comprendidas entre  $C_o$  y  $C_F$ ; conocida la velocidad de sedimentación de los sólidos, y, para una determinada concentración,  $C$ , el área de sedimentación necesaria será aquella que permita que todos los sólidos alimentados pasen a su través.

En cualquier sección **A** del sedimentador, por debajo del tubo de entrada, la velocidad del sólido debido a la corriente de entrada será:

$$v_o \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{L_F \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{A \left[ m^2 \right]}$$

mientras que la velocidad del sólido debido a la fuerza de gravedad se representará por **v**.

La velocidad total del sólido que pasa a través de la sección **A** será, pues:

$$v_t \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{L_F}{A} + v$$

Por tanto, el caudal másico de sólido que atraviesa dicha sección podrá expresarse como:

$$\begin{aligned} M \left[ \frac{kg}{s} \right] &= v_t \left[ \frac{m}{s} \right] \cdot A \left[ m^2 \right] \cdot C \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \\ &= \left( \frac{L_F}{A} + v \right) \cdot A \cdot C \end{aligned}$$

Como el sedimentador opera en estado estacionario, este valor deberá coincidir con el caudal másico de sólidos que entra en el sedimentador, es decir:

$$M_o \left[ \frac{kg}{s} \right] = L_o \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot C_o \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

o, lo que es lo mismo:

$$\left( \frac{L_F}{A} + v \right) \cdot A \cdot C = L_o C_o$$

Teniendo en cuenta que los parámetros de diseño son  $L_o$ ,  $C_o$  y  $C_F$ , el balance de sólidos alrededor del sedimentador permite poner (por el rebosadero no han de salir

sólidos):

$$L_o \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot C_o \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = L_F \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot C_F \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

de donde:

$$L_F = \frac{L_o C_o}{C_F}$$

y, por tanto:

$$v \cdot A \cdot C = L_o C_o - L_F C = L_o C_o - L_o C_o \frac{C}{C_F}$$

obteniéndose finalmente:

$$A = \frac{L_o C_o}{v} \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_F} \right)$$

Esta ecuación permitirá el cálculo del área del sedimentador para todas las concentraciones,  $C$ , comprendidas entre  $C_o$  y  $C_F$ , tomándose el valor máximo resultante como el área mínima necesaria para la separación propuesta. Naturalmente, para poder llevar a cabo estos cálculos es necesario disponer de los valores de  $v$  correspondientes a todas las concentraciones comprendidas entre  $C_o$  y  $C_F$ , y para ello se requieren datos de sedimentación intermitente,  $h - t$ , es decir, la evolución de la altura de la interfase del líquido claro con el tiempo a la concentración de la suspensión inicial,  $C_o$ .

Una vez conocida el área del sedimentador, se podrá obtener su **altura** a partir del cálculo de su volumen, que será la suma del ocupado por los sólidos y del ocupado por el líquido.

El volumen ocupado por los sólidos se podrá calcular como el producto del caudal volumétrico de sólidos y el tiempo de permanencia (o tiempo de residencia) de los mismos en el sedimentador (ya que no salen sólidos por el rebosadero), que será aquél en que la concentración de la suspensión alcance el valor establecido por diseño para el lodo:

$$V_S [m^3 \text{ sól.}] = \frac{L_o \left[ \frac{m^3 \text{ susp.}}{s} \right] C_o \left[ \frac{kg \text{ sól.}}{m^3} \right]}{\rho_s \left[ \frac{kg \text{ sól.}}{m^3 \text{ sól.}} \right]} \cdot t_R [s]$$

$$= L_o C_o \frac{t_R}{\rho_s}$$

Obsérvese que todos los parámetros de la primera fracción son datos de diseño, mientras que  $t_R$  ha de determinarse a partir de los datos de sedimentación intermitente como el tiempo al cual se alcanza en la curva  $h - t$  la concentración deseada,  $C_F$ .

Para calcular el volumen ocupado por el líquido habrá que suponer, en principio, que el volumen ocupado por la suspensión es aproximadamente igual al ocupado por el líquido solo (o que las densidades de ambos son casi iguales), de forma que:

$$C \left[ \frac{kg \text{ sól.}}{m^3 \text{ susp.}} \right] \approx C \left[ \frac{kg \text{ sól.}}{m^3 \text{ liq.}} \right]$$

Además, como sale líquido claro por el rebosadero, a lo largo del tiempo de residencia de la suspensión en el sedimentador,  $t_R$ , la concentración de la suspensión irá variando con el tiempo, por lo que será necesario utilizar un valor medio,  $C_m$ , a lo largo de  $t_R$ , que habrá de obtenerse por integración. La ecuación del volumen ocupado por el líquido podrá ponerse, pues, de la forma:

$$V_L [m^3 \text{ liq.}] = \frac{L_o C_o \left[ \frac{kg \text{ sól.}}{s} \right]}{C_m \left[ \frac{kg \text{ sól.}}{m^3 \text{ liq.}} \right]} \cdot t_R [s]$$

$$= L_o C_o \int_0^{t_R} \frac{1}{C} dt$$

En este caso, los factores externos a la integral son datos de diseño, mientras que los valores  $1/C - t$  habrán de ser determinados a partir de los datos de sedimentación intermitente,  $h - t$ .

Conocidos ahora ambos volúmenes, la altura teórica del sedimentador será:

$$h_{teór.} [m] = \frac{V_S + V_L}{A} = \frac{V_T}{A}$$

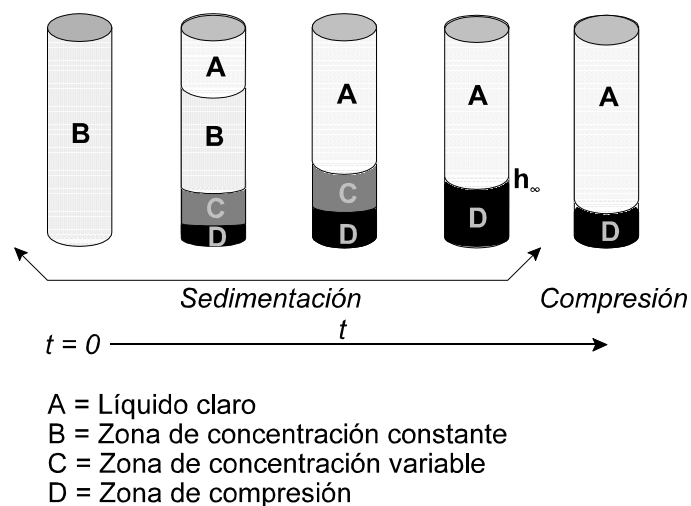
A esta altura teórica habría que sumarle las correspondientes a la zona del rebosadero y a la zona troncocónica del fondo que, al no corresponder a secciones rectas, no se han considerado. Suele realizarse esta corrección de forma empírica,

sumando una altura adicional comprendida entre **0,8** y **1,2** m. Se tendrá así, en definitiva:

$$h_{total} = h_{teór.} + h_{corr.}$$

que será la altura real de diseño.

Para la obtención experimental en el laboratorio de las velocidades reales de sedimentación se realiza un ensayo que consiste en la sedimentación de una suspensión, de concentración de sólidos conocida, en una probeta. Las distintas etapas que se observan se esquematizan en la siguiente figura:

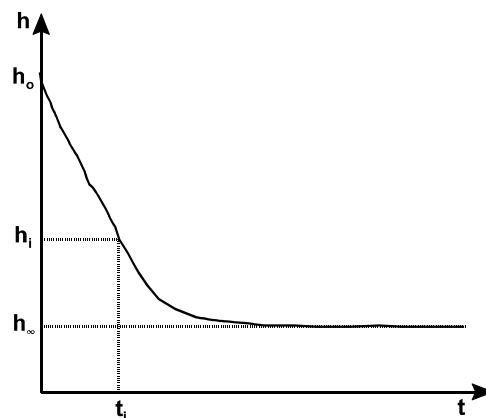


Al comienzo del ensayo de sedimentación todas las partículas descienden en sedimentación libre y velocidad constante en la zona (B) de la suspensión, cuya concentración de sólidos es también constante. Por encima de esta zona aparece una zona (A), de líquido claro. A lo largo del ensayo la altura  $h$  del límite de separación del líquido claro (A) y la zona de sólidos suspendidos (B), disminuye a velocidad constante y en el fondo de la probeta aparece una nueva zona (D), que contiene las partículas sedimentadas, al tiempo que entre las zonas (B) y (D) surge una zona de transición (C) cuyo contenido en sólidos varía entre el que existe en la zona (B) hasta el que hay en la zona (D).

Cuando la sedimentación avanza, las zonas (B) y (C) disminuyen de tamaño hasta desaparecer, marcando en ese momento el comienzo de la etapa de compresión

de la zona (D). Este instante se denomina *punto crítico* y, a partir del mismo, el líquido contenido en la zona A es desplazado por los sólidos, al tiempo que el espesor de la zona de compresión disminuye.

Los datos  $h - t$  obtenidos a partir del ensayo de laboratorio tienen la forma que muestra la siguiente figura:



A partir de estos datos será necesario determinar de qué forma la velocidad de descenso de las partículas sólidas,  $v$ , es decir, la velocidad de sedimentación, es afectada por la concentración de la suspensión,  $C$ , con objeto de poder sustituir dicha relación en la ecuación que permite calcular el área de un sedimentador continuo.

Así, si se llama  $h_i$  a la altura del límite inferior de la zona (A), su posición en cada momento vendrá dada por:

$$h_i = h_o - v t_i$$

es decir, si se miden las alturas desde la base de la probeta, la diferencia entre la altura inicial,  $h_o$  (a la que le corresponde la concentración inicial,  $C_o$ ), y el espacio recorrido por los sólidos, que sedimentan a la velocidad  $v$ . Obsérvese en este punto que para continuar con el razonamiento, se aceptará la hipótesis propuesta por Kynch (1952), que considera que la velocidad de sedimentación,  $v$ , solamente depende de la concentración de la suspensión,  $C$ .

Reordenando los términos de la ecuación anterior:

$$h_i - v t_i = h_o$$

y teniendo en cuenta que a esa velocidad  $v$  le corresponde una concentración  $C$ , podrá establecerse el balance de materia:

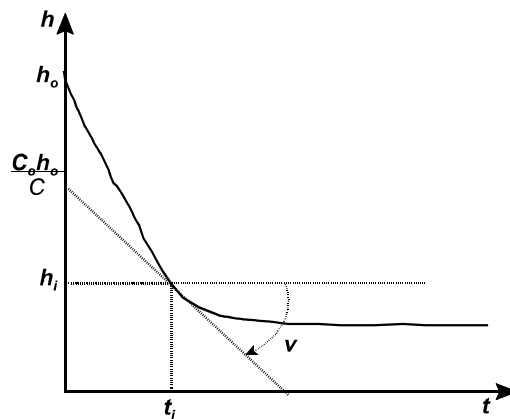
$$(h_i - v t_i) \cdot C \cdot A \text{ [kg]} = h_o \cdot C_o \cdot A \text{ [kg]}$$

ya que todos los sólidos presentes al principio en la suspensión ( $C_o$  en  $h_o$ ) tendrán que pasar por la interfase de separación entre el líquido claro y los sólidos suspendidos.

Operando esta ecuación se obtiene:

$$h_i = \frac{h_o C_o}{C} - v t_i$$

ecuación de una recta en la gráfica experimental de sedimentación intermitente  $h - t$ , que representa la pendiente (tangente) en cualquier punto  $i$  de la curva obtenida (velocidad de desplazamiento de la interfase,  $dh/dt$ , variable a lo largo del experimento).



La pendiente de esta recta será la velocidad de sedimentación,  $v$ , a la concentración  $C$ , que puede obtenerse a partir de su ordenada en el origen (ya que se conocen  $h_o$  y  $C_o$ ).

En resumen, trazando varias tangentes a la curva  $h - t$  de sedimentación intermitente podrán obtenerse las parejas de valores  $v - C$  necesarias para el cálculo del área del sedimentador continuo. Evidentemente, se obtendrán tantos valores del área como pendientes se determinen. El valor utilizado para el diseño tendrá que ser el mayor de todos los obtenidos, con objeto de asegurar que el área utilizada permita el paso de todos los sólidos contenidos en la suspensión.

Obsérvese que las tangentes pueden ser trazadas partiendo de valores predeterminados de la ordenada en el origen, o lo que es lo mismo, de la concentración (ya que  $L_o$  y  $C_o$  son datos de diseño del sedimentador continuo), lo que facilita no

sólo el trazado geométrico, sino también la obtención del tiempo de residencia,  $t_R$ , de los sólidos en el sedimentador, dato imprescindible para el cálculo de la altura del sedimentador continuo.

## Dispositivo experimental

El ensayo de sedimentación intermitente se realizará en una probeta de vidrio de 1 l de capacidad, que dispone de una escala graduada de alturas, utilizando una suspensión de carbonato cálcico. Esta suspensión se preparará con una concentración de **60 g/l** a partir de  $\text{CaCO}_3$  comercial ( $\rho_s = 2,63 \text{ g/cm}^3$ ). El tiempo se medirá con un cronómetro y para poder ver mejor el avance de la interfase, se iluminará la probeta por la parte posterior a la de su observación mediante un flexo.

## Realización práctica

Se introduce la suspensión en la probeta hasta una altura determinada ( $h_0$ ), se agita vigorosamente y se deposita la probeta sobre una superficie horizontal, momento en que se pone en marcha el cronómetro. Durante la primera media hora de sedimentación se tomarán medidas de altura de la interfase descendente a intervalos de **1 min.**; durante la segunda media hora, a intervalos de **2 min.** y durante la tercera media hora, a intervalos de **5 min.**

Con ayuda de los datos obtenidos se desea calcular las dimensiones (área y altura) de un sedimentador continuo que se alimentará con una suspensión de  $\text{CaCO}_3$  comercial de concentración **60 kg/m<sup>3</sup>** a un caudal de **100 m<sup>3</sup>/h** con objeto de producir una suspensión concentrada de **120 kg/m<sup>3</sup>** y un sobrenadante limpio.

## Presentación de los resultados

1. Identificar los datos de diseño del sedimentador continuo,  $L_0$ ,  $C_0$  y  $C_F$ . ¿Cuál es la relación entre la concentración de la suspensión de la probeta y los datos de diseño?
2. Obtener los datos de variación de la altura de la interfase en la probeta con el tiempo. Representarlos gráficamente y trazar a través de los puntos obtenidos la mejor curva posible.

3. Calcular los valores de las ordenadas en el origen que se obtendrían de tangentes de concentraciones comprendidas entre el 60% y el 100% de la concentración del lodo (cinco valores, al menos).
4. A partir de las ordenadas calculadas, trazar las correspondientes tangentes a la curva  $h - t$ , determinando los respectivos valores de  $h_i$ ,  $t_i$  y  $v$ . Obtener el tiempo de residencia de los sólidos en el sedimentador,  $t_R$ .
5. Representar la curva de variación de la velocidad de sedimentación con la concentración.
6. Calcular las áreas que le corresponden a cada pareja  $v - C$ ; representar los valores de  $A$  obtenidos frente a la concentración y determinar gráficamente el área mínima del sedimentador.
7. Demuéstrese la suposición realizada de que el volumen ocupado por la suspensión es aproximadamente igual al ocupado por el líquido solo. Realícese el cálculo obteniendo el volumen de  $\text{CaCO}_3$  que contiene  $1 \text{ m}^3$  del lodo concentrado.
8. Calcular el volumen de sólidos, y el volumen del líquido mediante integración numérica o gráfica. Obtener el volumen teórico del sedimentador.
9. Calcular la altura teórica del sedimentador y corregirla con un valor intermedio del intervalo recomendado para obtener la altura real de diseño.

## Bibliografía

- Calleja, G. (ed.); "Introducción a la Ingeniería Química", Ed. Síntesis, Madrid (1999).
- McCabe, W.L. y Smith, J.C.; "Operaciones básicas de Ingeniería Química", Ed. Reverté, Barcelona (1973).
- Svarovsky, L. (ed.); "Solid-liquid separation", Chemical Engineering Series, Butterworths, London (1977).