

CAPÍTULO 7
SEDIMENTACIÓN

Ing. Víctor Maldonado Yactayo

1. CONCEPTOS GENERALES

Se entiende por *sedimentación* la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios. La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido resuspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de *clarificación* y *espesamiento*. Se habla de *clarificación* cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de *espesamiento* cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

1.1 Sedimentación de partículas discretas

Se llama *partículas discretas* a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

Se denomina *sedimentación* o *sedimentación simple* al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimen-

tadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

1.2 Sedimentación de partículas floculentas

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas —forma, tamaño, densidad— sí cambian durante la caída.

Se denomina sedimentación *floculenta* o *decantación* al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

1.3 Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno *caída libre*. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina *depósito* o *caída interferida* o *sedimentación zonal*.

Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una *compresión* o *zona de compresión*. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

1.4 Expresiones de velocidad de sedimentación

1.4.1 Partículas discretas con caída libre

El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre, también denominado *en soluciones diluidas*, puede describirse por medio de la mecánica clásica.

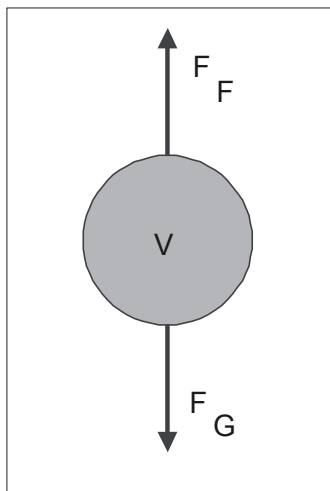


Figura 7-1. Fuerzas actuantes en una partícula (1)

En este caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas según se demuestra a continuación.

Imaginemos el caso de una partícula que se deja caer en el agua. Esta partícula estará sometida a dos fuerzas (figura 7-1): fuerza de flotación (FF), que es igual al peso del volumen del líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes), y fuerza gravitacional (FG).

$$\text{Si } FF = \rho \cdot g \cdot V \quad (1)$$

$$\text{Y } FG = \rho_s \cdot g \cdot V \quad (2)$$

donde:

ρ = densidad del líquido

ρ_s = densidad del sólido

V = volumen de la partícula

De la acción de ambas fuerzas tenemos la fuerza resultante, que será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:

$$F_i = g \cdot V \cdot (\rho_s - \rho) \quad (3)$$

donde:

F_i = fuerza resultante o fuerza de impulsión

Arrastrada por esta fuerza (F_i), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la Ley de Newton, cuyo valor es:

$$F_R = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{V_s^2}{2} \quad (4)$$

donde:

F_R = fuerza de rozamiento

$\frac{V_s^2}{2}$ = energía cinética

A = área transversal al escurrimiento

V_s = velocidad de sedimentación

C_D = coeficiente de arrastre

Después de un corto periodo, la aceleración pasa a ser nula y el valor de la fuerza de fricción (F_R) iguala a la de impulsión (F_i), momento en el cual la partícula adquiere una velocidad constante, conocida como *velocidad de asentamiento* o *sedimentación*. En ese momento se cumple que (3) y (4) son iguales; por lo tanto:

$$g \cdot V (\rho_s - \rho) = C_D \cdot A \cdot \frac{V_s^2}{2} \rho \quad (5)$$

Despejando el valor de V_s se obtiene:

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{C_D} \cdot \frac{g}{\rho} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)}{A} \cdot V} \quad (6)$$

Para el caso particular de partículas esféricas:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{y} \quad V = \frac{\pi d^3}{6}$$

Siendo d = diámetro de la partícula:

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi/6}{\pi/4} \frac{d^3}{d^2} = \frac{2}{3} d$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \cdot d} \quad (7)$$

En la cual:

$$\begin{aligned} V_s &= \text{velocidad de sedimentación} \\ d &= \text{diámetro de la partícula} \\ g &= \text{aceleración de la gravedad} \\ \rho_s &= \text{densidad de la partícula} \\ \rho &= \text{densidad del fluido} \end{aligned}$$

El coeficiente de arrastre de Newton es una función del Número de Reynolds y de la forma de las partículas:

$$C_D = a \cdot Re^{-n} \quad (8)$$

$$\text{Siendo: } Re = \frac{V_s \cdot d}{\nu} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a &= \text{constante específica} \\ Re &= \text{número de Reynolds} \\ \nu &= \text{viscosidad cinemática (Stokes)} \end{aligned}$$

Si $d < 0,085 \text{ mm}$, $Re < 1$, entonces prevalece flujo laminar, siendo:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \text{y} \quad \frac{\rho_s}{\rho} = S_s$$

al reemplazar en la ecuación (7), se origina la ecuación de Stokes:

$$V_s = \frac{g}{18} (S_s - 1) \frac{d^2}{\nu} \quad (10)$$

Cuando $d > 1,0 \text{ mm}$, $Re > 1.000$, presenta flujo turbulento, para lo cual:

$$C_D = 0,4$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación (7), se obtiene una velocidad terminal de:

$$V_s = \sqrt{(3,3 \cdot g (S_s - 1) d)} \quad (11)$$

conocida como la ecuación de Newton.

Para los casos de diámetro de partículas comprendidas entre 0,85 y 1,0 mm y especialmente números de Reynolds de 1 a 1.000, se presenta flujo de transición para el cual los valores de C_D son variables y su determinación puede realizarse a través de cualquiera de las ecuaciones indicadas en el cuadro 7-1.

Cuadro 7-1. Valores de coeficiente de arrastre (2)

| Autor | Expresión |
|-----------------|--|
| Rich | $C_D = \frac{18,5}{Re^{0,60}}$ |
| Hatch | $C_D = \frac{14}{Re^{0,50}}$ |
| Allen | $C_D = \frac{12,65}{Re^{0,50}}$ |
| Fair-Geyer-Okun | $C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$ |
| Schiller-Newman | $C_D = \frac{12}{Re} (1 + 0,14 Re^{0,687})$ |
| Goldstein | $C_D = \frac{12}{Re} + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1.280} Re^2 + \frac{71}{20.480} Re^3$ |

Si se desconoce cómo se comporta la sedimentación de una determinada partícula (zona laminar, turbulenta o en transición), el cálculo de la velocidad de sedimentación debe hacerse por tanteos.

Fair, Geyer y Okun (3) determinan la velocidad de sedimentación utilizando los ábacos de las figuras 7-2 y 7-3, que tienen la ventaja de que permiten visualizar directamente y en forma simultánea distintas soluciones. Este método, que permite el cálculo directo, se aplica resolviendo las siguientes ecuaciones:

Término del diámetro (X_1):

$$\left[\frac{g (S_s - 1)}{v^2} \right]^{1/3} d = K_1 d = X_1 \quad (12)$$

Término de velocidad (X_2):

$$\frac{V_s}{[g(S_s - 1)v]^{1/3}} = \frac{V_s}{K_2} = X_2 \quad (13)$$

Se puede, entonces, representar K_1 y K_2 en función de la densidad relativa S_s y la temperatura, tal como se muestra en el gráfico de la figura 7-2. También se puede representar X_2 en función de X_1 , tal como se muestra en el gráfico de la figura 7-3.

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

Conociendo las características de las partículas y del agua, se obtiene K_1 y K_2 de la figura 7-2. Conociendo, por otra parte, $X_1 = K_1 d$, se entra al gráfico de la figura 7-3 y se obtiene X_2 , con lo cual se calcula $V_s = K_2 X_1$.

Ejemplo: Se quiere conocer la velocidad de sedimentación de una partícula esférica discreta cuyo peso específico es de 1,01 y cuyo diámetro es de 0,01 para una temperatura de 10 °C. Del gráfico de la figura 7-2 obtenemos: $K_1 = 38,5$; $K_2 = 0,505$.

Por lo tanto, $X_1 = K_1 d = 38,5 \times 0,01 = 0,385$

Con este valor de 0,385 entramos al gráfico de la figura 7-3 y encontramos que $X_2 = 0,0075$ $V_s = X_2 K_2 = 0,0075 \times 0,505 = 0,0037$ cm/s.

1.4.2 Sedimentación interferida

Cuando una partícula discreta sedimenta a través de un líquido en caída libre, el líquido desplazado por la partícula se mueve hacia arriba a través de un área suficientemente grande sin afectar el movimiento. En la sedimentación interferida, las partículas se encuentran colocadas a distancias tan reducidas que el líquido desplazado se confina como dentro de un tubo y la velocidad aumenta conforme se interfiere en los campos situados alrededor de las partículas individuales.

El flujo no sigue líneas paralelas, sino trayectorias irregulares, a causa de la interferencia de las partículas en suspensión, lo que produce un fenómeno similar al que se genera en el retrolavado de un filtro.

Para estas condiciones, la velocidad de sedimentación será:

$$V_i = \frac{g}{k} \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} \frac{p^2}{(1-p)} \left[\frac{\psi d}{6} \right]^2 \quad (14)$$

Reemplazando las constantes, se obtiene:

$$V_i = 5,45 \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} \frac{p^2}{(1-p)} \psi^2 d^2 \quad (15)$$

Siendo:

- V_i = velocidad de sedimentación, cm/s
- μ = viscosidad dinámica, Poises
- ρ = porosidad
- ψ = factor de forma

En una forma aproximada, se puede obtener esta velocidad por medio de la siguiente ecuación:

$$V_i = \frac{V_s}{\rho} \quad (16)$$

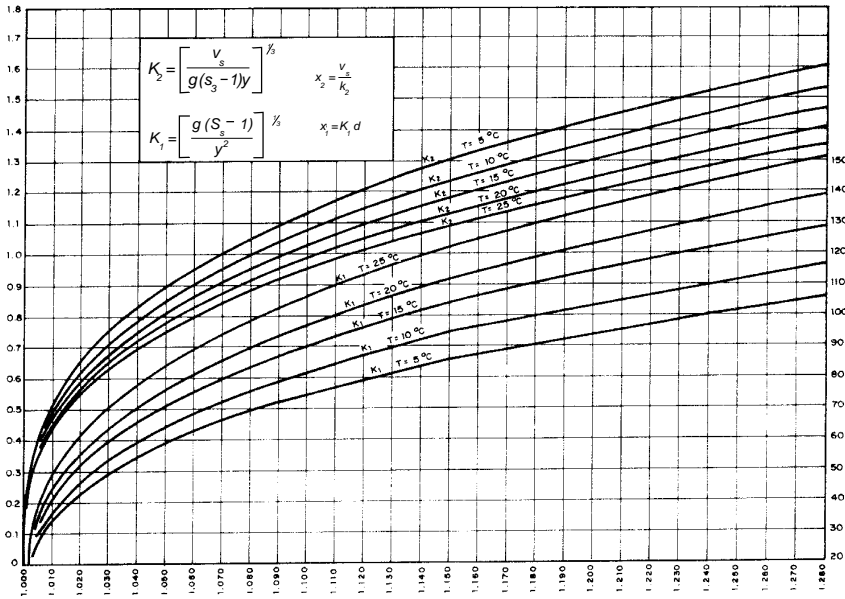


Figura 7-2. Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático $V_s = K_2 X_2(2)$

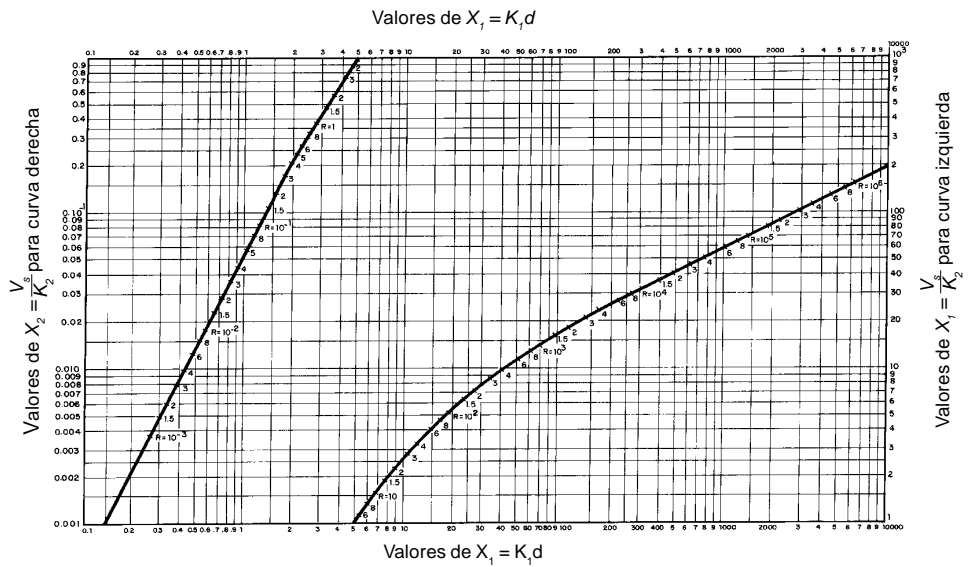


Figura 7-3. Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático $V_s = K_2 X_2(1)$

1.4.3 Sedimentación de partículas floculentas

Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua son sólidos inorgánicos y orgánicos. Los factores primordiales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad.

La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo. La densidad original de las partículas es cercana a 2,60. El color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de origen vegetal con densidades variables de 1 a 1,5 dependiendo de su concentración. Las partículas se presentan principalmente en estado coloidal y es necesario añadirles coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación para incrementar su tamaño o densidad antes del proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1,002 cuando predomina el color y 1,03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1,20.

El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Willcomb clasifica los flóculos por su tamaño, tal como se indica en la figura 7-4.

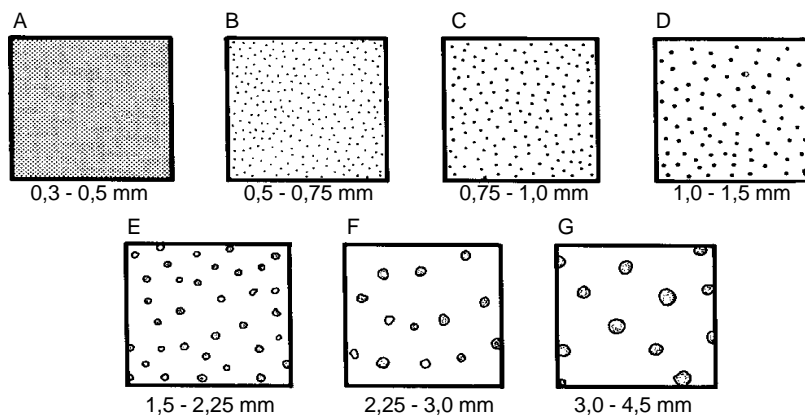


Figura 7-4. Índices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo (1)

La velocidad de sedimentación de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencia de velocidades de sedimentación de los flóculos, influencia de turbulencia y variación de gradientes de velocidad, factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general. Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorio o plantas piloto con el propósito de predecir las eficiencias teóricas remocionales en función de cargas superficiales o velocidades de sedimentación preseleccionadas. En ellos se deben tomar las siguientes precauciones:

Que la muestra de la suspensión sea representativa y que se mantenga a igual temperatura.

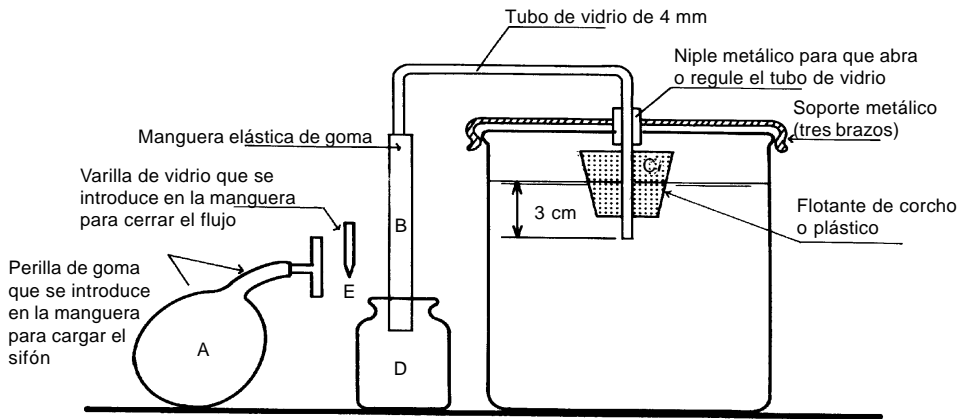
Sedimentación de partículas floculentas con caída libre. Si en una suspensión tenemos una concentración $(1-C)$ de partículas que tienen una velocidad de sedimentación V_s , la proporción adicional de partículas removidas que tiene una velocidad de sedimentación V_s será:

$$R = \frac{1}{V_s} \int_0^{C_0} V \cdot dc \quad (17)$$

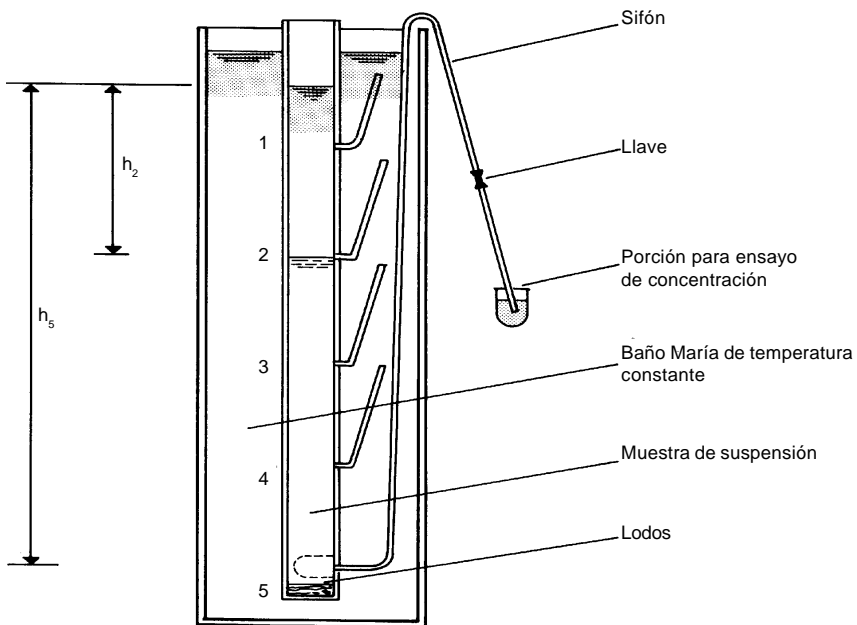
La remoción total R_T será: $R_T = (1 - C) + \frac{1}{V_s} \int_0^{C_0} V \cdot dc \quad (18)$

El segundo término de la ecuación (18) se determina experimentalmente mediante columnas de sedimentación o el equipo modificado de prueba de jarras indicado en la figura 7-5.

Se determinan las concentraciones del material en suspensión (C) cada cierto tiempo (t) y para una profundidad específica (h) . Conociendo la concentración inicial (C_0) y la velocidad de sedimentación $V_s = h/t$, es posible obtener la eficiencia remocional.



a) Equipos de jarras



b) Columnas de sedimentación

Figura7-5. Equipo de laboratorio para ensayos de sedimentación (1)

Al graficar estos parámetros, se establece la curva teórica de velocidad de sedimentación *versus* eficiencia (figura 7-6).

En la figura anterior, es importante observar lo siguiente:

La curva no pasa por el origen. Esto implica que siempre se tendrá una fracción C_f de partículas que no serán removidas por el sedimentador aun cuando se apliquen velocidades muy bajas de sedimentación. Esto implica, en la práctica, la necesidad de contar con una unidad posterior al sedimentador que sea capaz de remover estas partículas. En una planta de tratamiento de agua esta unidad es el filtro.

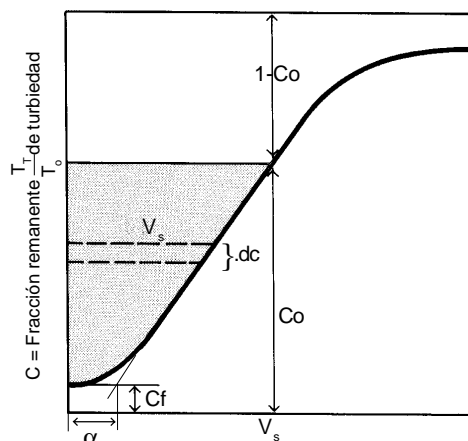


Figura 7-6. Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de sedimentación (1)

Otra característica de esta curva es la tendencia asintótica cuando esta se aproxima al eje de las ordenadas. Esta tendencia permite definir una velocidad de sedimentación mínima para aplicaciones prácticas de diseño. No tendrá ningún sentido práctico seleccionar velocidades de sedimentación menores a este valor mínimo, ya que se incrementaría el área de la unidad y no se conseguiría mayor eficiencia de remoción.

Entonces, si se tiene en cuenta que no todos los sólidos serán removidos en esta unidad, la curva no pasa por el origen y el primer término de la ecuación 18 es igual a:

$$(1 - C) = [1 - (C_o - C_f)]$$

El segundo término, a su vez, es igual al área sombreada de la figura 6.

$$\frac{1}{V_s} \int_0^{C_o} V_s \cdot dc = \frac{a + V_s}{2 V_s} (C_o - C_f)$$

Por lo tanto, la remoción total será:

$$R_T = \left[1 - (C_o - C_f) \right] + \frac{a + V_s}{2 V_s} (C_o - C_f) \quad (19)$$

Conocido el porcentaje de remoción total alcanzado para cierta velocidad de sedimentación, es posible encontrar una velocidad de sedimentación que permita conseguir una remoción total para lograr una determinada calidad de agua efluente del decantador.

Sedimentación de partículas floculentas con caída interferida. En bajas concentraciones de partículas, estas sedimentan o decantan libremente; en cambio, con alta concentración de partículas floculentas (superiores a 500 mg/L), las partículas se encuentran a distancias tan reducidas que se adhieren entre sí y sedimentan masivamente. Así, se crea una clara superficie de separación entre los flóculos y el líquido que sobrenada y esto da origen al fenómeno de sedimentación conocido con los nombres de *decantación interferida* o *zonal*.

Klinch establece las hipótesis fundamentales para la decantación interferida, en la cual la velocidad de caída de una partícula depende principalmente de la concentración de las partículas.

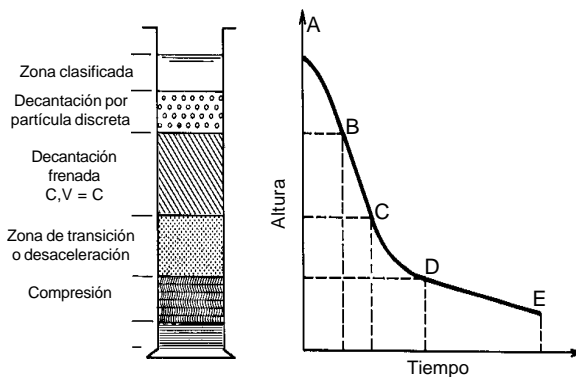


Figura 7-7. Decantación por caída interferida (I)

y se obtiene una curva tal como la que aparece en la figura 7-7, que tiene los siguientes rasgos:

Zona A-B. La superficie de separación es muy definida. Esta es una fase de coalescencia de los flóculos seguida de una zona muy pequeña de decantación libre (en la mayoría de casos, esta primera zona no se produce).

Zona B-C. Tiene una pendiente rectilínea. Corresponde a una velocidad de caída constante definida únicamente por el tipo de floculación y la concentración de las partículas. Al incrementarse la concentración inicial de las partículas disminuye la velocidad. A esta zona se la denomina *decantación frenada*.

Zona C-D. En esta zona se produce la disminución progresiva de la velocidad de caída. Se denomina *zona de desaceleración o transición*.

Zona D-E. En esta zona los flocúlos se tocan y ejercen presión sobre las capas inferiores, puesto que están soportados por estas. Se le llama *zona de compresión*.

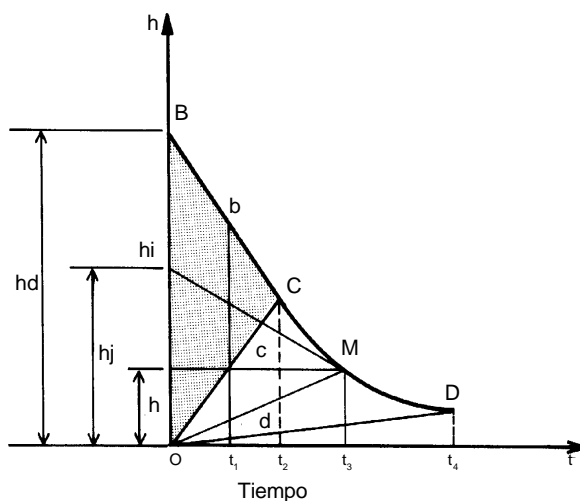


Figura 7-8. Análisis de la curva de decantación interferida (I)

Si consideramos, por simplicidad, que al decantarse una suspensión concentrada no se produce la primera zona, se obtienen las alturas de separación de interfase como se indica en la figura 7-8.

En el triángulo BOC , la concentración y la velocidad de caída son constantes e iguales, respectivamente, a los valores iniciales en B .

En el triángulo COD , las curvas de equiconcentración son rectas que pasan por el origen, lo que significa que, desde los primeros momentos de la sedimentación, las capas más próximas al fondo se tocan y pasan por todas las concentraciones comprendidas entre la concentración inicial y la concentración al punto D , principio de la compresión.

Para calcular la concentración en un punto M de la parte CD , se traza la tangente en M , que corta al eje de ordenadas en h_i .

La altura h_i permite calcular la concentración C_i correspondiente al punto M :

$$C_i = C_o \frac{h_o}{h_i} \quad (20)$$

A la cual corresponde una velocidad de caída $V_i = dh/dt$ (pendiente de Mh_i).

La concentración media del fango en toda la altura h será:

$$C = C_o \frac{h_o}{h} \quad (21)$$

1.5 Factores que influyen en el proceso

Los siguientes factores influyen en el proceso de sedimentación o decantación:

1.5.1 Calidad de agua

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas floculentas).

Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades.

Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura 7-9(a).

En cambio, con agua más caliente, se produce el fenómeno inverso, que aparece indicado en la figura 7-9(b).

En el caso de variar la concentración, se producen corrientes de densidad por diferencias en las distintas masas de agua, que suelen crear fuerzas más importantes que las térmicas. En la figura 7-10 se indican las densidades del flóculo producido con distintas concentraciones de suspensión de caolín. Haciendo la misma consideración anterior, un volumen de agua de 100.000 m³ con 20 mg/L de caolín pesaría 100.560 t y con 80 mg/L, 102.250 t, lo que da una diferencia de 960 t ó 6,9 kg/m³.

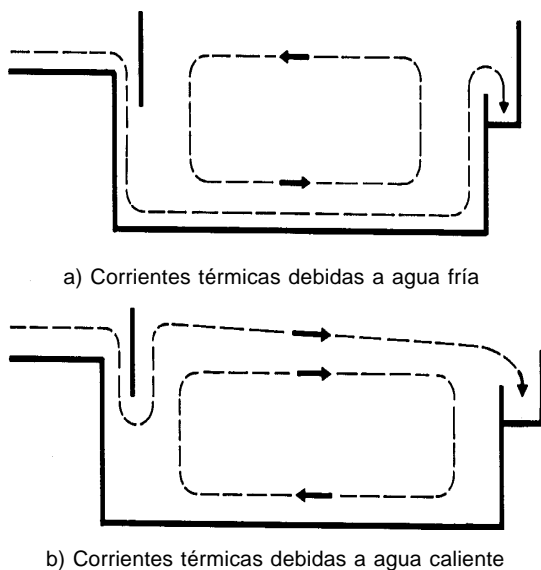


Figura 7-9. Corrientes térmicas (*I*)

Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad de las paletas del floculador, etcétera, puede alterar el equilibrio y producir un flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente del teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados (véase la figura 7-10).

1.5.2 Condiciones hidráulicas

Los criterios y parámetros hidráulicos de diseño tienen gran influencia en la eficiencia de los sedimentadores o decantadores. A continuación se detallan los principales:

a) En la zona de sedimentación

En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Froude más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria.

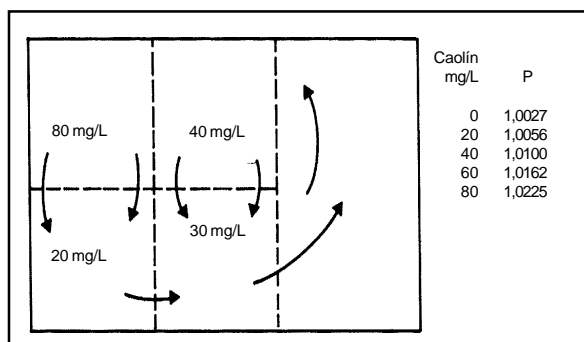


Figura 7-10. Corrientes de densidad (*I*)

Adicionalmente, la presencia de flujo de pistón mejora el proceso y el flujo mezclado no lo favorece.

b) En la zona de entrada

La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad.

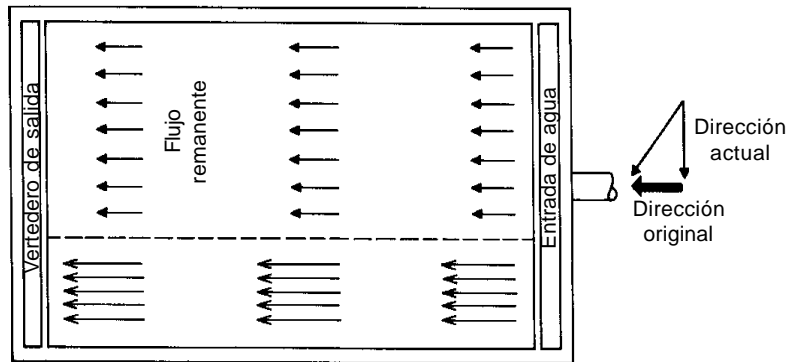
Las alteraciones del flujo en la zona de entrada deben evitarse y su presencia puede deberse a una velocidad excesiva del flujo en la entrada del sedimentador, o a que los orificios de ingreso sean muy grandes y el movimiento de las paletas del floculador sea tal que comunica demasiada energía al flujo. Al no haber disipación de esta energía en el tabique divisorio (caso de unidades convencionales de flujo horizontal), las masas de agua entran con diferente gradiente de velocidad, creando turbulencias que pueden extenderse dentro de la zona de sedimentación.

Similarmente, puede mencionarse como causa de corrientes cinéticas la distribución desigual del flujo en la entrada del sedimentador (orificios de distintos diámetros o algunos parcialmente obstruidos), la existencia de tabiques que dejan pasar el agua solamente por el fondo, vertederos, etcétera, lo que produce corrientes como las indicadas en la figura 7-11 y que adicionalmente modifican el tiempo de retención.

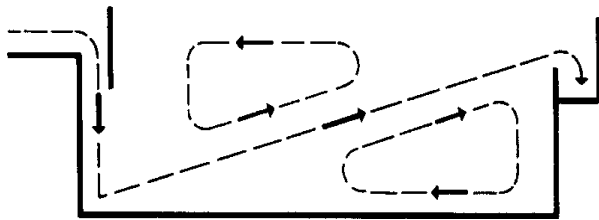
c) En la zona de salida

Esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua sedimentada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente. Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropriamente diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.

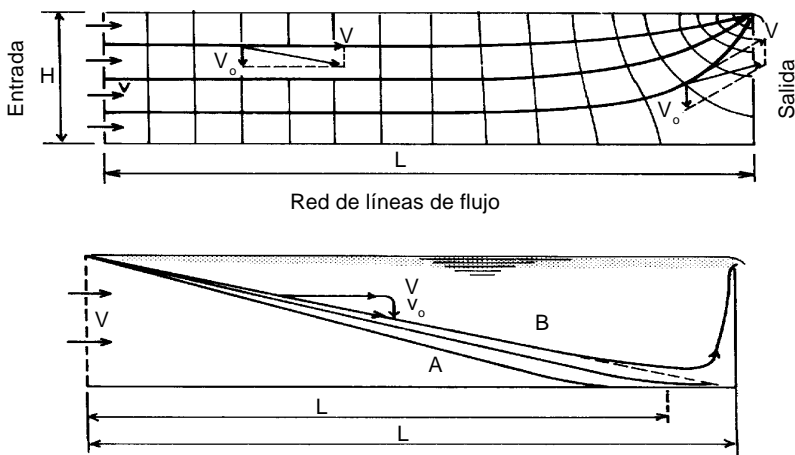
En la figura 7-12 se esquematizan las modificaciones normales de las líneas de flujo debido a las estructuras de la zona de salida.



a) Planta - Cortocircuito



b) Corte longitudinal - Cortocircuito y espacios muertos

Figura 7-11. Corrientes cinéticas (I)**Figura 7-12.** Efecto de la zona de salida en las líneas de flujo (I)

1.5.3 Factores externos

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación —acondicionamiento previo (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales— son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador.

Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores. Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como sobre los programas de mantenimiento existentes. A la vez, el viento, al soplar sobre la superficie de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua.

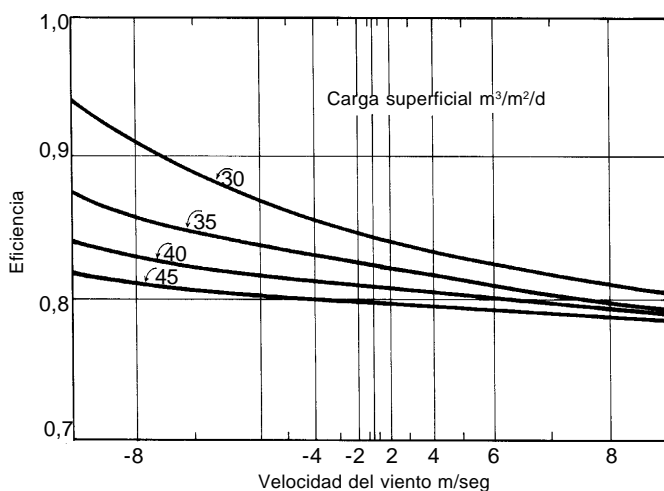


Figura 7-13. Influencia del viento en la eficiencia de los sedimentadores (1)

En unidades grandes el viento puede crear oleajes de cierta magnitud, lo que interfiere el proceso o desequilibra la distribución del flujo en las canaletas de salida.

En la figura 7-13 se indica la influencia de la velocidad del viento en la eficiencia de un sedimentador.

2. CLASIFICACIÓN DE UNIDADES

La sedimentación o la decantación se realizan en reactores denominados *sedimentadores* o *decantadores*, de acuerdo con el tipo de partícula que se remueve en cada unidad. La clasificación más recomendable es la siguiente:

- Sedimentadores o decantadores estáticos
- Decantadores dinámicos
- Decantadores laminares.

A continuación se analizarán las diversas unidades.

2.1 Sedimentadores y decantadores estáticos

2.1.1 Criterios generales

En este tipo de unidades puede producirse sedimentación o decantación, normalmente con caída libre, en régimen laminar turbulento o de transición.

En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad V_H constante. Cualquier partícula que se encuentre

en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido (V_H) y su propia velocidad de sedimentación (V_s). Véase la figura 7-14.

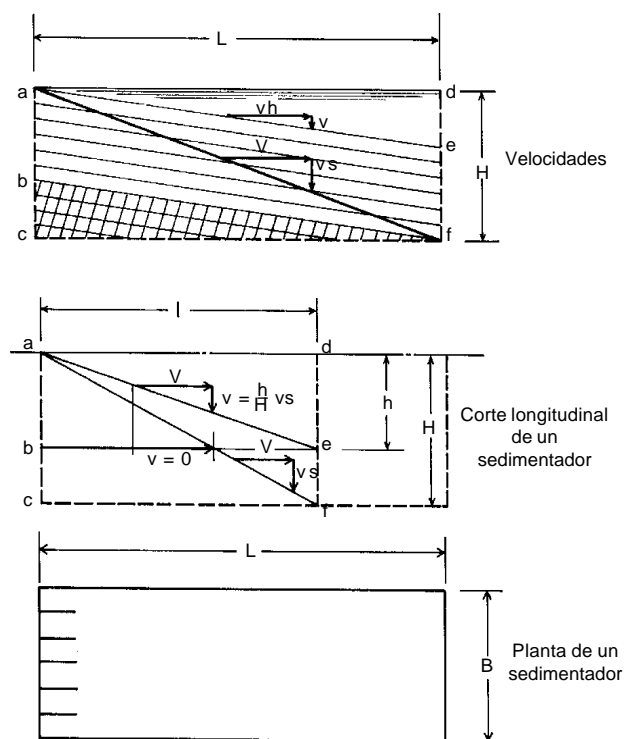


Figura 7-14. Trayectoria ideal de partículas discretas (I)

En un sedimentador ideal de forma rectangular y con flujo horizontal, la resultante será una línea recta. Asimismo, otras partículas discretas se moverán en lugares geométricos paralelos. Estableciendo semejanzas entre los triángulos formados por las velocidades y las dimensiones del decantador, donde (L) es la longitud y (H) la altura, se obtiene:

$$\frac{V_H}{V_S} = \frac{L}{H} \quad (22)$$

Como la partícula tiene movimiento uniforme:

$$V_S = \frac{H}{T_o} \quad (23)$$

Si T_o es el tiempo de retención:

$$T_o = \frac{V}{Q} \quad (24)$$

Donde V = volumen de la unidad

Se obtendrá:

$$V_S = \frac{H}{V/Q} = \frac{Q}{V/H} \quad (25)$$

Pero como $\frac{V}{H} = A_s$, por lo tanto:

$$V_S = \frac{Q}{A_s} \quad (26)$$

Este criterio sirve exclusivamente para explicar la teoría básica de la clarificación y es útil para diseñar ciertos tipos de sedimentadores y desarenadores.

2.1.2 Componentes de una unidad

Una unidad de sedimentación consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas:

- Zona de entrada y distribución de agua
- Zona de sedimentación propiamente dicha
- Zona de salida o recolección de agua
- Zona de depósito de lodos.

En la figura 7-15 se esquematizan las diferentes zonas de un sedimentador o decantador.

2.1.3 Tipos de unidades

Desarenadores. Los desarenadores tienen por objeto remover del agua cruda la arena y las partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente y la interferencia en los procesos de coagulación-floculación.

El desarenado se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0,2 milímetros. Una granulometría inferior corresponde a los procesos de presedimentación o sedimentación.

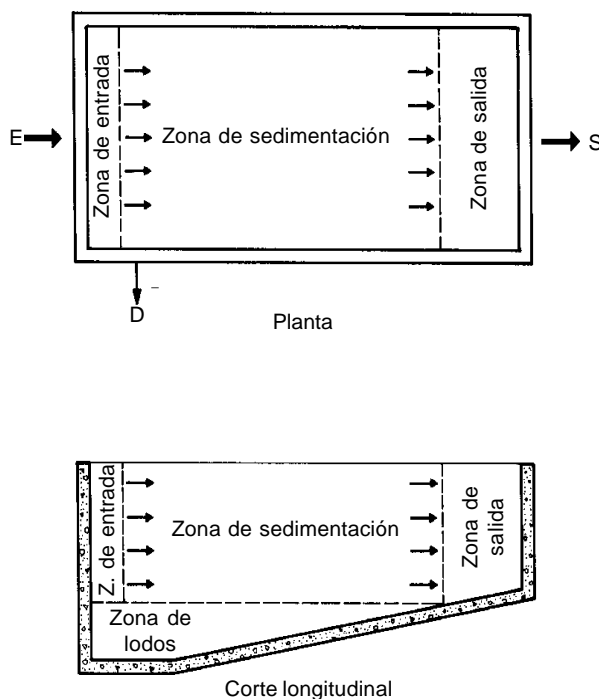


Figura 7-15. Zonificación de un sedimentador (1)

El estudio teórico del desarenado está relacionado con el de los fenómenos de sedimentación en caída libre.

Al estudiar la ubicación de una captación, debe evitarse al máximo el arrastre de arena, diseñando este tipo de unidades cuando la calidad de agua así lo exige.

En el caso particular de que se incluya en la instalación un presedimentador, se podrán eliminar en el desarenador solamente partículas de dimensiones supe-

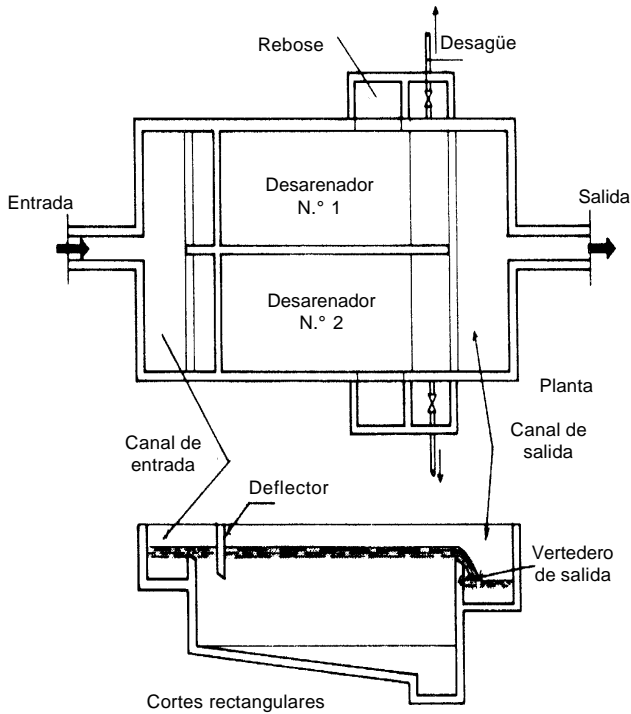


Figura 7-16. Desarenador rectangular (1)

Los decantadores o sedimentadores rectangulares tienen la forma y características detalladas en la figura 7-17, con la ventaja de que permiten una implantación más compacta, aunque su costo es más elevado. Normalmente, tienen una relación longitud/ancho comprendida entre 3 y 6 y una profundidad de 2,50 a 4,00 metros.

Los sedimentadores o decantadores de forma circular o cuadrada (figura 7-18) disponen normalmente de una zona de entrada ubicada en el centro de la unidad. Están provistos generalmente de una pantalla deflectora que desvía el agua hacia el fondo de la unidad. El flujo en la zona de sedimentación es horizontal. Están provistos de canaletas (periféricas y/o radiales) para la recolección de agua sedimentada. El fondo es inclinado hacia el centro de la unidad, donde se ubica un sumidero para la recolección de lodos. La profundidad normal de estas unidades está comprendida entre 2,00 y 3,50 metros.

riores a 0,3 milímetros de diámetro. Si la instalación incluye tamizado o microcernido (con mallas de 1 a 2 milímetros, por ejemplo), deberá efectuarse un desarenado previo para evitar problemas en los tamices.

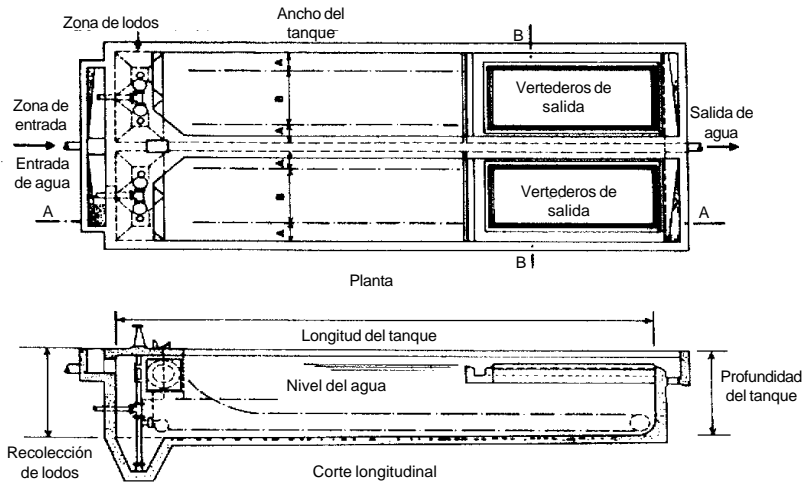
Generalmente, los desarenadores tienen forma rectangular, como se muestra en la figura 7-16.

Unidades de flujo horizontal. Estos sedimentadores se clasifican, de acuerdo con la forma de su planta, en rectangulares, circulares y cuadrados.

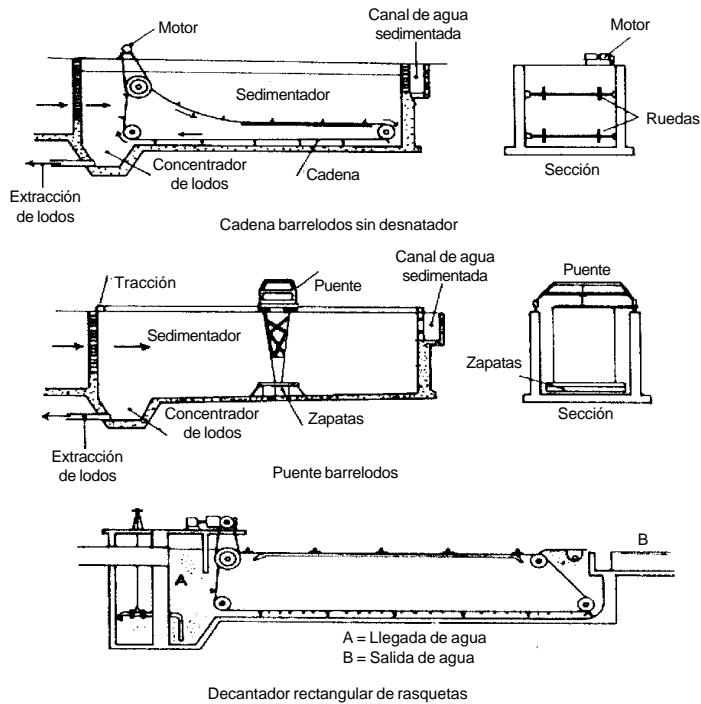
En los diferentes tipos de unidades de flujo horizontal, la remoción de los lodos o sedimentos puede hacerse en forma intermitente o continua.

Se usa el sistema de remoción intermitente de lodos en pequeñas instalaciones o cuando se trata un agua relativamente clara. Es necesario vaciar el tanque cada cierto tiempo y extraer los lodos manualmente, con la ayuda de mangueras de agua a presión. Usualmente, los sedimentos se compactan y transforman en una masa pastosa que resbala muy difícilmente; se requieren pendientes de 45° a 60° en el fondo de los tanques. El tamaño de la zona de lodos dependerá del periodo de funcionamiento del sedimentador y de la cantidad de lodos producidos.

Para la remoción continua de lodos, se utilizan sistemas mecánicos denominados *barrelodos*. En la figura 7-17 se detallan los tipos más usuales de sistemas de barrido de lodos de sedimentadores rectangulares: cadenas con paletas (con y sin desnatador) y puente con sistema de palas o de succión. En la figura 7-18 se indican los sistemas de barrido de lodos utilizados en sedimentadores o decantadores circulares o cuadrados.



a) Sedimentadores horizontales de forma rectangular



b) Sistemas de remoción de lodos en sedimentadores rectangulares

Figura 7-17. Sedimentadores o decantadores estáticos rectangulares (1)

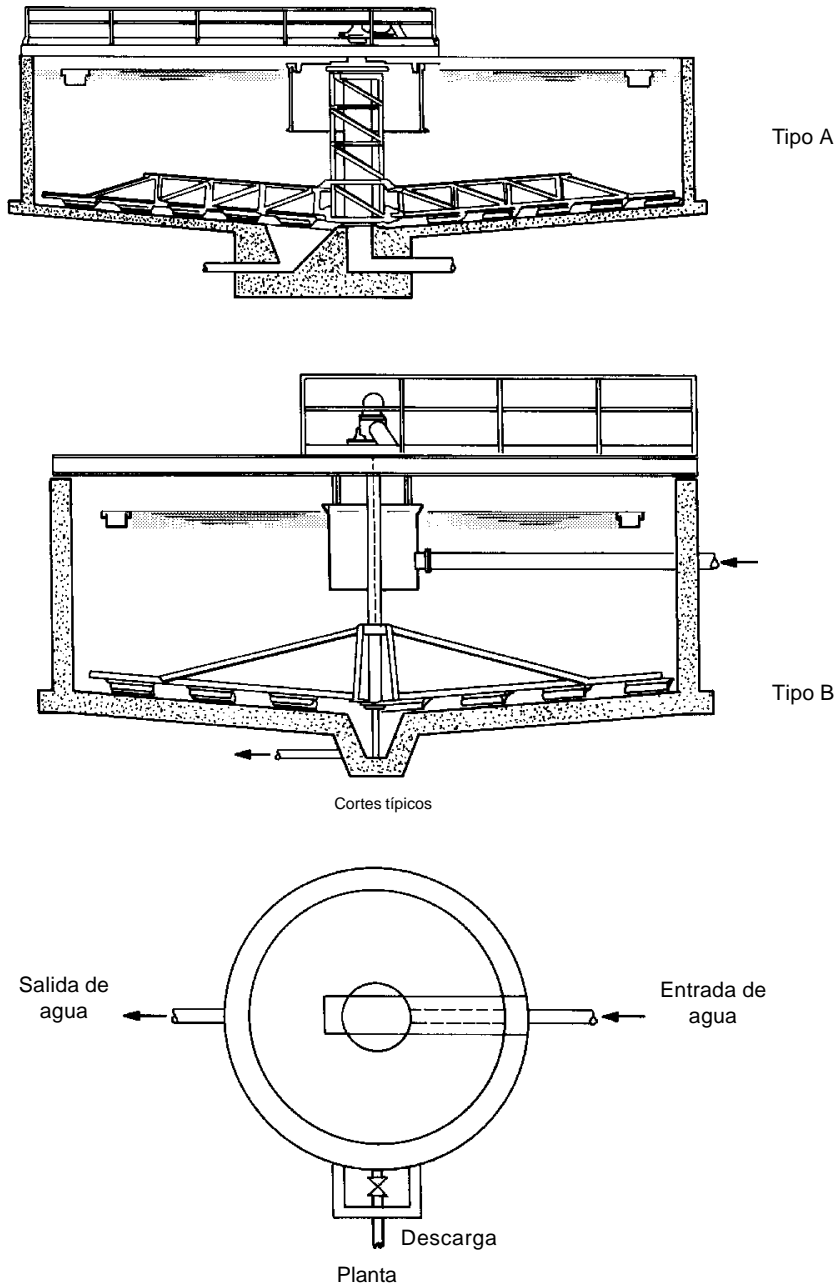


Figura 7-18. Sedimentadores o decantadores estáticos circulares (1)

Unidades de flujo vertical. Estas unidades tienen forma cilíndrica (figura 7-19). La entrada del agua cruda se realiza por el centro de la unidad en forma descendente. En la parte inferior está ubicada la zona de lodos, que tiene forma cónica con pendiente de 45° a 60° , según la naturaleza del agua y el tratamiento aplicado. La recolección del agua sedimentada se realiza en la parte periférica superior de la unidad.

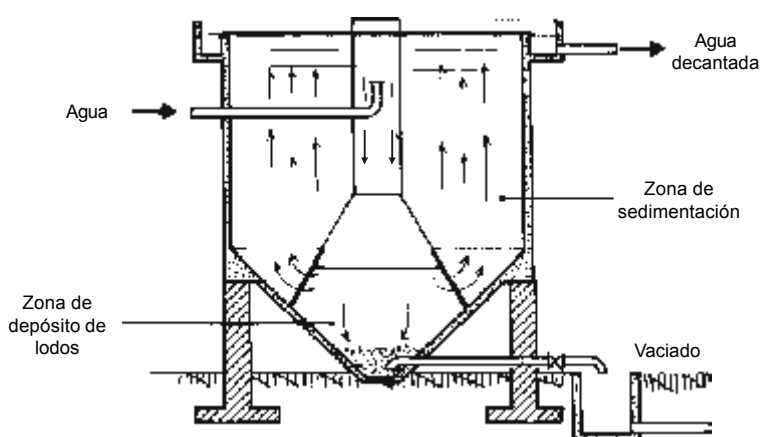


Figura 7-19. Sedimentador estático de flujo vertical (1)

Unidades de flujo helicoidal. Para tratar aguas con alto contenido de materiales en suspensión o flóculos con alta velocidad de sedimentación, se recurre al uso de sedimentadores de flujo helicoidal.

Estas unidades tienen forma circular (figura 7-20). El flujo tangencial se logra mediante la combinación de una tubería y canales periféricos con orificios de entrada de agua. Los orificios son dimensionales y se disponen espaciados para permitir una distribución uniforme del agua en el sedimentador. El canal recolector de agua sedimentada está ubicado en el centro del sedimentador o en la periferia. Generalmente, una pantalla vertical contribuye a lograr una mejor distribución y a evitar cortocircuitos.

Es muy importante tener en cuenta que se trata de unidades poco conocidas y, por ende, existe una carencia de datos operacionales fidedignos.

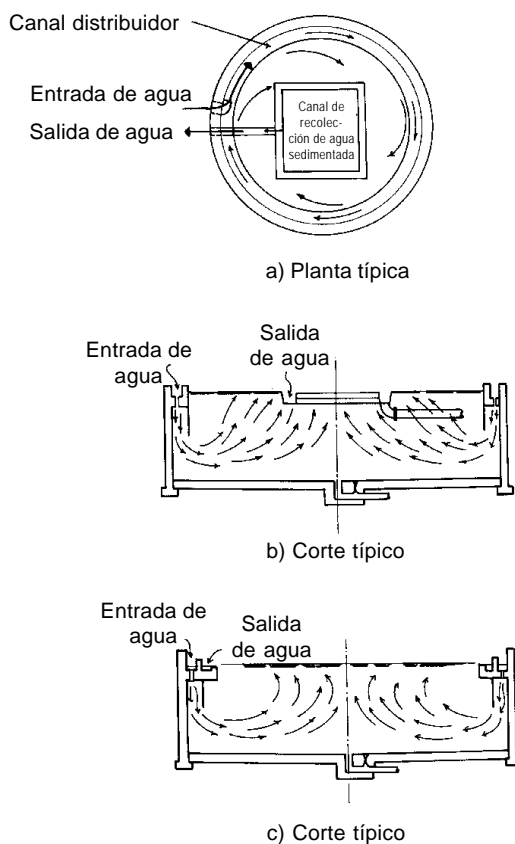


Figura 7-20. Sedimentador estático de flujo helicoidal (1)

2.2 Decantadores dinámicos

2.2.1 Criterios generales

La teoría de la decantación interferida se aplica a este tipo de unidades. Se requiere una alta concentración de partículas para incrementar las posibilidades de contacto en un manto de lodos que tiene una concentración de partículas de 10 a 20% en volumen.

En el proceso, el flóculo no conserva su peso específico, su tamaño ni su forma constante. Las partículas pequeñas que entran por el fondo son arrastradas

por el flujo. Al chocar estas con otras, incrementan su tamaño de acuerdo con la ecuación de Von Smoluchowski. Se entiende que en la zona del manto de lodos se promueve la floculación y en la parte superior a ella ocurre la decantación.

La eficiencia de los decantadores de manto de lodos depende del tipo y la dosis de coagulante, del uso de polímeros, de la calidad del agua cruda, del tamaño de las unidades (la eficiencia es inversamente proporcional al tamaño), de la profundidad y concentración del manto de lodos y, principalmente, de la carga superficial.

2.2.2 Componentes de una unidad

Una unidad de manto de lodos consta básicamente de los siguientes componentes (figura 7-21):

- 1) Sistema de entrada de agua
- 2) Zona de formación del manto de lodos
- 3) Zona de clarificación
- 4) Sistema de recolección de agua clarificada
- 5) Zona de concentración de lodos.

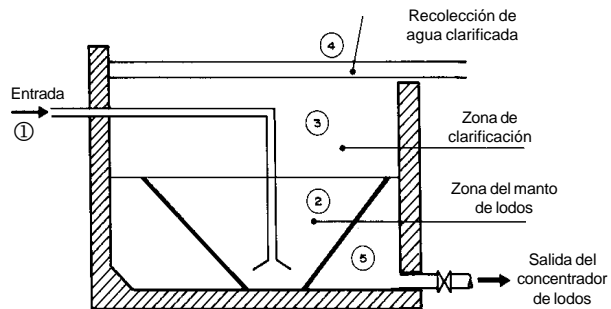


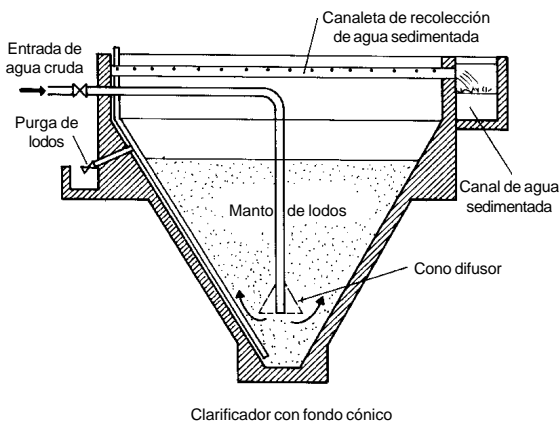
Figura 7-21. Componentes de un decantador de manto de lodos (1)

2.2.3 Tipos de unidades dinámicas

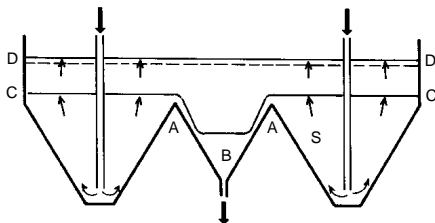
Los decantadores de manto de lodos se pueden clasificar de acuerdo con las condiciones y características de la zona de formación de lodos, que se resumen en el cuadro 7.2:

Cuadro 7-2. Características de decantadores de manto de lodos (1)

| Tipo de suspensión | Mezcla de lodos | Control de la altura del manto de lodos | Tipo de flujo |
|--------------------|-------------------|---|-----------------------------------|
| Hidráulica | Sin recirculación | Con vertedero Sin vertedero | Constante Pulsante |
| Mecánica | Sin recirculación | Con vertedero | Constante con separación dinámica |
| | Con recirculación | Sin vertedero | Constante con agitación |



Clarificador con fondo cónico



Sedimentador de Bacchus Marsh

A continuación se describen algunos de los tipos principales de unidades.

Unidades de manto de lodos con suspensión hidráulica. Estas unidades fueron las primeras que se construyeron. Consisten esencialmente en un tanque de fondo cónico o tronco piramidal, en cuya parte inferior se inyecta el agua cruda que asciende disminuyendo la velocidad a medida que el área aumenta y manteniendo así un manto de lodos hidráulicamente suspendido. Figura 7-22.

Los lodos se extraen periódicamente por un tubo que baja hasta el fondo. Esta extracción puede ser hecha en forma manual o automática.

Figura 7-22. Decantadores de manto de lodos con suspensión hidráulica (1)

La entrada del agua puede hacerse inyectando el flujo

directamente en el fondo para que se produzca turbulencia al chocar contra las paredes del fondo.

Para obtener un buen rendimiento, debe prestarse especial atención a la forma de entrada del agua. Excesiva turbulencia puede producir perturbaciones que afectan todo el manto de lodos.

La ventaja de estas unidades es que no son patentadas; no tienen, por lo general, ninguna pieza movable dentro del tanque ni requieren energía eléctrica para su funcionamiento.

Algunos proyectistas prefieren utilizar vertederos en la parte superior para el control de la altura del manto de lodos, de modo que se viertan en un concentrador lateral.

Unidades de manto de lodos con suspensión mecánica. Las unidades que usan sistemas mecánicos para mantener el manto de lodos en suspensión pueden ser, en general, de tres clases:

- a) De agitación
 - b) De separación
 - c) Pulsante o de vacío.
- Unidades de manto de lodos con agitación simple

Las unidades de agitación simple consisten en tanques por lo general circulares, en los cuales al agua es inyectada por abajo, de tal forma que se distribuya en el fondo.

Un agitador mecánico que gira lentamente en el fondo, movido por un motor o por agua a presión, mantiene las partículas en suspensión y recolecta los lodos en un concentrador, de donde son removidos periódicamente (figura 7-23). El agua tiene que ascender hasta las canaletas periféricas superiores y se filtra a través del manto de lodos. En estas unidades no existe recirculación de lodos.

- Unidades de manto de lodos con separación dinámica

Las unidades que emplean separación dinámica utilizan una turbina que gira a alta velocidad, colocada en el centro del tanque, la cual impulsa el flujo

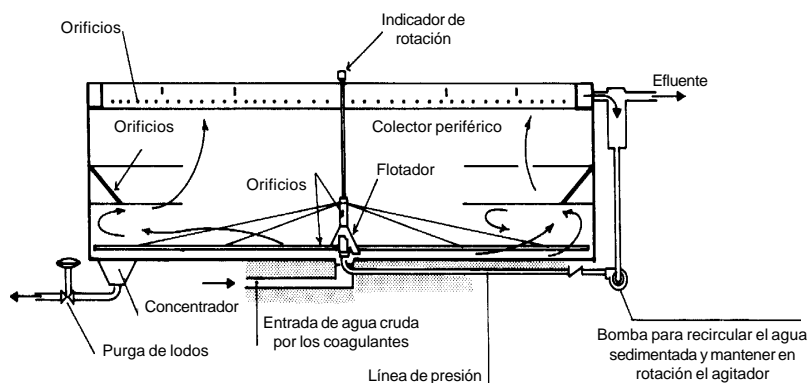


Figura 7-23. Unidad de manto de lodos con agitación simple (1)

hacia abajo a través del orificio periférico, de forma tal que las partículas que descienden empujadas por la energía mecánica de la turbina choquen con las que ascienden con el flujo del tanque.

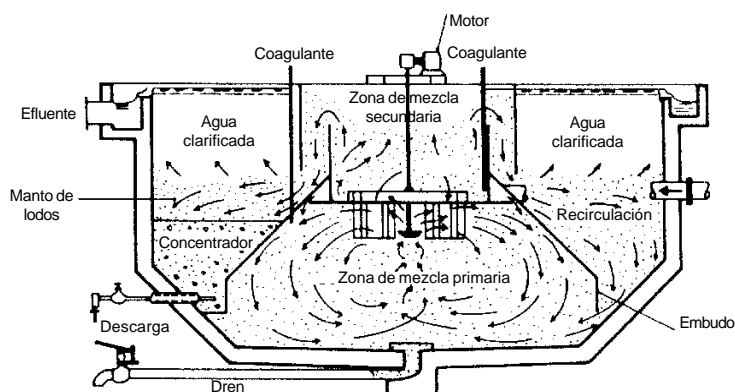


Figura 7-24. Unidades de separación dinámica
Accelerator-Infilco, Inc. (1)

En estos tanques se pueden considerar cuatro zonas: una primera zona de mezcla y reacción en la parte interior, donde se inyectan los coagulantes; una segunda zona de mezcla lenta o floculación; una tercera zona donde se establece el manto de lodos y, por último, una cuarta zona en la que se produce la decantación y el agua clarificada sube hasta las canaletas de salida.

Los lodos son recogidos en el concentrador en un sector del tanque y extraídos automáticamente cada cierto tiempo según la turbiedad del agua cruda (figuras 7-24 a 7-26).

En el decantador de Brno (Checoslovaquia) el manto de lodos queda suspendido hidráulicamente en las secciones tronco-piramidales laterales, si bien dicho decantador tiene un sistema de floculación separado del de sedimentación; además, tiene una serie de vertederos sumergidos para controlar la altura del manto. El lodo que cae es recogido en los concentradores inferiores y extraído periódicamente.

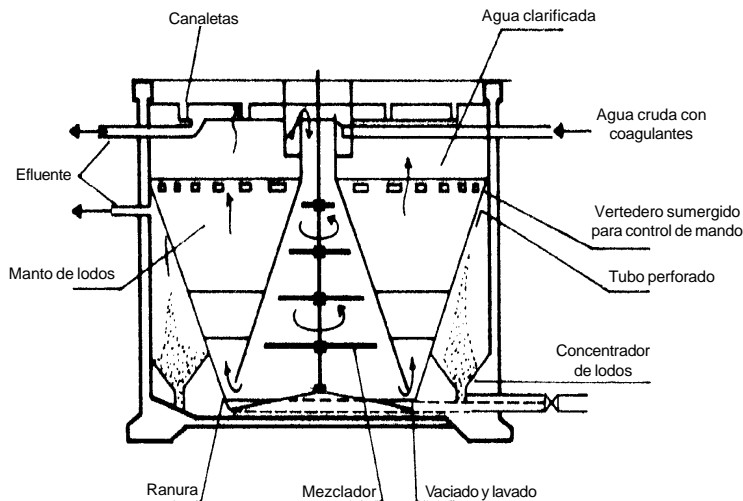


Figura 7-25. Unidades de separación dinámica
Decantador de Brno (Checoslovaquia) (1)

Similar solución se utiliza en el decantador con circulación de lodos Aquazur B de Degremont, que dispone de una zona central de floculación rodeada por una zona de decantación. Ambas zonas se comunican por arriba y por abajo. El agua cruda llega por un canal circular situado alrededor de la columna central de mezcla.

Una turbina situada en la parte superior de la zona de floculación hace que el agua floculada pase a la zona de decantación.

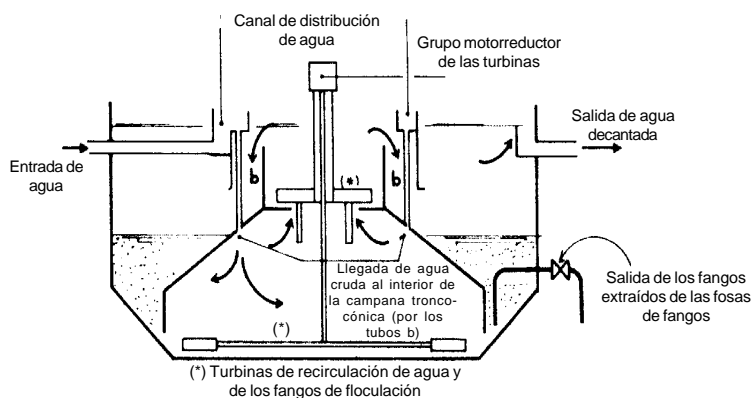


Figura 7-26. Unidades de separación dinámica
Decantador Aquazur-B (1)

Los lodos que sedimentan en esta última vuelven, por gravedad, a la zona central. Se produce así un enriquecimiento del lodo, con el que se consigue una floculación rápida y la formación de un precipitado denso.

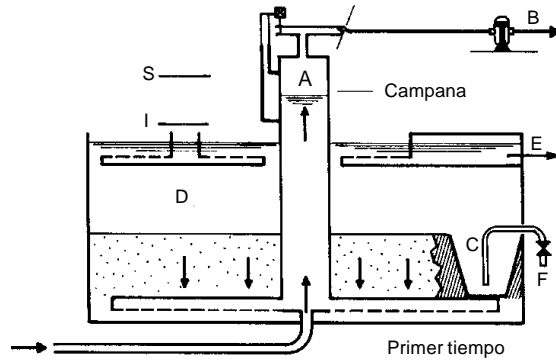
Eventualmente, un agitador de fondo evita la acumulación de sedimentos pesados, que podrían atascar el aparato.

Por medio de una o varias tolvas, puede extraerse el exceso de lodos en la forma más concentrada posible.

- Unidad de manto de lodos pulsante o de vacío

Este tipo de unidades consiste esencialmente en un tanque cuadrado o circular, en cuyo centro se coloca una campana o cápsula de vacío, en la cual periódicamente se disminuye la presión interna con una bomba especial, de modo que el agua ascienda por la campana hasta un cierto nivel y luego se descargue en el tanque y se produzca la expansión de los lodos y se bote el exceso de estos a los concentradores. Esta periódica expansión y contracción del manto se usa para homogeneizarlo. Se evitan las grietas o canales que permiten el paso directo de la turbiedad y la sedimentación de las partículas más pesadas en el fondo de la unidad.

El sistema requiere, por lo tanto, dos tiempos (figura 7-27). En el primero, la válvula de aire V se encuentra cerrada. El flujo asciende por la campana A , mientras que el agua en el decantador D permanece en reposo, de manera que puede decantar.



En el segundo tiempo, al alcanzar el agua el nivel S en la campana, la válvula de aire V se abre y el agua de la campana penetra en el decantador D . Entonces, los lodos se elevan con el flujo y el exceso penetra en el concentrador C . El agua decantada se recoge en E . Cuando el flujo alcanza el nivel I en la campana A , se cierra la válvula V . Los fangos depositados en el concentrador se extraen automáticamente por medio de válvulas F .

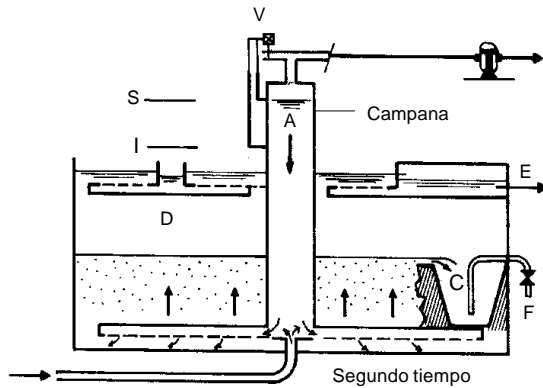


Figura 7-27. Decantadores de manto de lodos del tipo pulsante (I)

2.3 Decantadores laminares

2.3.1 Teoría de la sedimentación laminar

Como se analizó anteriormente, la eficiencia de los decantadores clásicos de flujo horizontal depende, principalmente, del área. De este modo, si se introduce un piso intermedio a una altura (h) a partir de la superficie, las partículas con una velocidad de sedimentación $V_{sb} < V_{sc}$ serían removidas, como lo demuestra la figura 7-28, cosa que antes no ocurría.

Se podría admitir que la capacidad de clarificación del decantador aumentaría con la duplicación del área horizontal (figura 7-29). Hace más de 45 años se propuso inclusive un decantador con varios pisos horizontales, con un espaciamiento de 15 centímetros entre ellos y con remoción mecanizada de lodo.

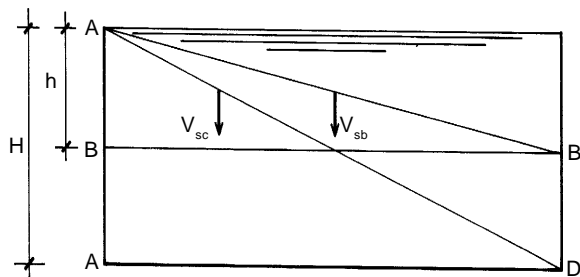


Figura 7-28. Efecto de introducción de superficies intermedias de sedimentación en los decantadores convencionales (1)

Se considera que tres son los efectos que favorecen la remoción de las partículas en este tipo de unidades: (i) aumento del área de sedimentación, (ii) disminución de la altura de caída de la partícula y (iii) régimen de flujo laminar.

Debido a las dificultades de mantenimiento, este tipo de unidades permaneció olvidado por mucho tiempo hasta que, a mediados de la década de 1960, se empezó a investigar la sedimentación en tubos inclinados, donde el lodo depositado escurre hacia la parte inferior, sin interferir con las características de la instalación.

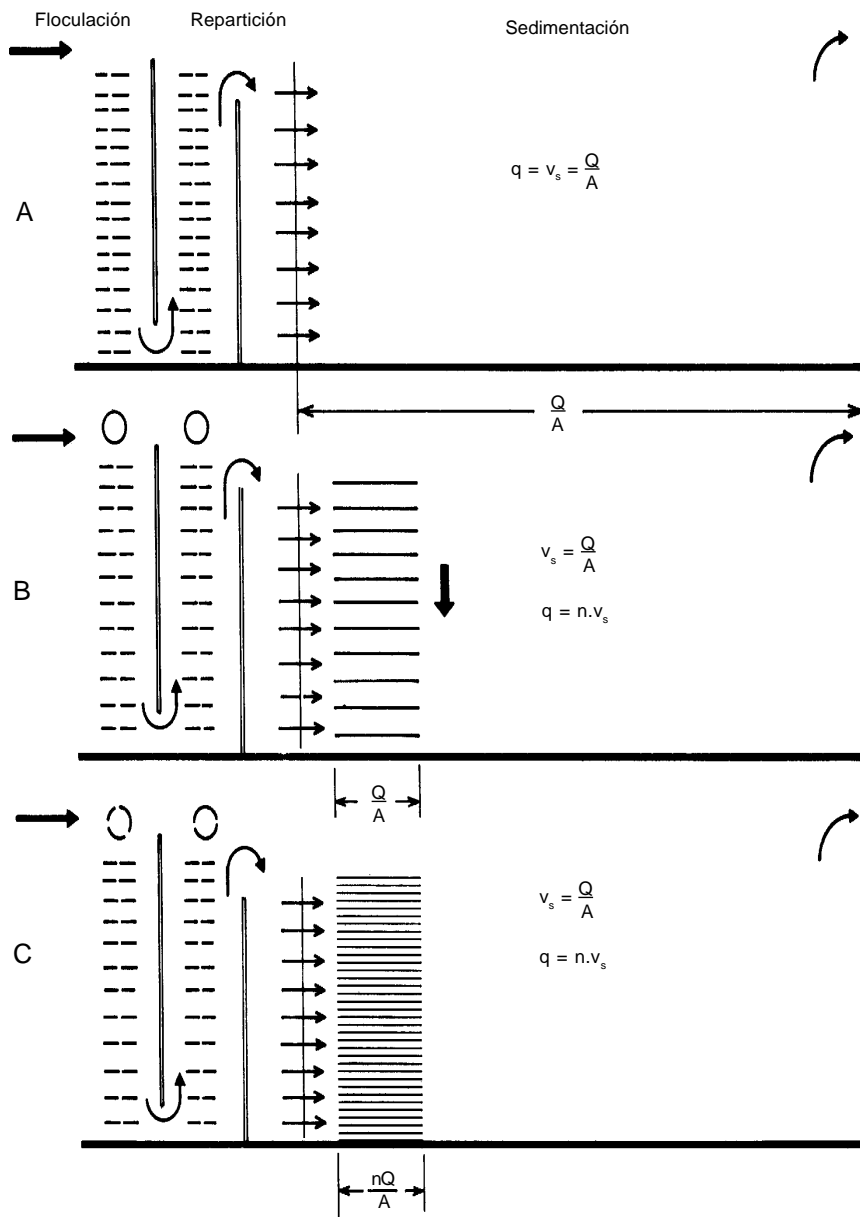


Figura 7-29. Incremento de la capacidad de sedimentación al aumentar el área superficial (*I*)

2.3.2 Trayectoria de una partícula en placas paralelas

Cuando una partícula asciende con una velocidad media V_θ , arrastrada por el flujo entre dos placas paralelas que forman un ángulo θ con la horizontal, la velocidad resultante que determina la trayectoria de la partícula puede descomponerse en dos componentes: V_x y V_y .

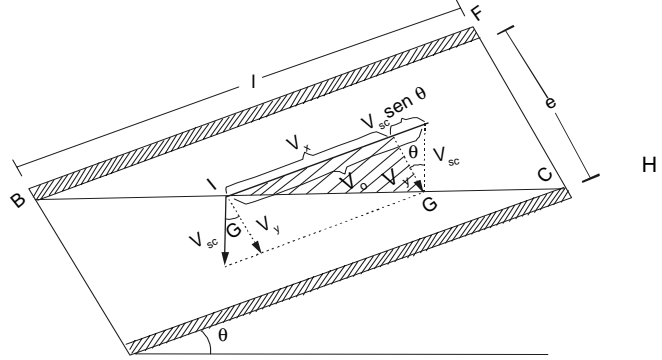


Figura 7-30. Trayectoria de una partícula en placas paralelas inclinadas (2)

Consideremos los triángulos FBC y HIG :

$$\frac{e}{V_y} = \frac{l}{V_x} \quad (27)$$

De donde:

$$V_x = \frac{l}{e} V_y \quad (28)$$

Considerando la longitud relativa:

$$L = \frac{l}{e} \quad (29)$$

y sustituyendo en (28), se obtiene:

$$L V_y = V_x \quad (30)$$

Las velocidades componentes de V_{sc} según los ejes X e Y son:

$$V_y = V_{sc} \cos \theta \quad (31)$$

$$V_x = V_o - V_{s_c} \text{ Sen } \theta \quad (32)$$

Reemplazando los valores V_x y V_y en la ecuación (30), se obtiene:

$$L (V_{s_c} \text{ Cos } \theta) = V_o - V_{s_c} \text{ Sen } \theta \quad (33)$$

Despejando (V_{s_c}), se obtiene:

$$V_{s_c} = \frac{V_o}{\text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta} \quad (34)$$

Yao (4) establece:

$$S = \frac{V_{s_c}}{V_o} (\text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta) \quad (35)$$

$$V_{s_c} = \frac{SV_o}{\text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta} \quad (36)$$

Cuadro 7-3. Valores de S según el tipo de módulo (2)

| Tipo de módulo | S |
|----------------------------|-------------|
| Placas planas paralelas | 1 |
| Tubos circulares | 4/3 |
| Tubos cuadrados | 11/8 |
| Placas onduladas paralelas | 1,30 |
| Otras formas tubulares | 1,33 – 1,42 |

El parámetro S caracteriza la eficiencia del sedimentador y su valor crítico S_c para el caso de placas planas paralelas es 1. Cualquier partícula suspendida con $S > 1$ será teóricamente removida.

El valor de V_{s_c} en las expresiones anteriores representa la velocidad de caída de la partícula crítica, equivalente a la que habría en un sedimentador convencional de flujo horizontal teóricamente de igual eficiencia.

Esto significa que si en un decantador convencional la carga superficial es $Vs_c = Q/A$, en uno de flujo inclinado, para obtener la misma eficiencia teórica, la relación sería igual a:

$$Vs_c = \frac{Q}{A_o f} = \frac{Q}{A} \quad (37)$$

donde:

- $f = \text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta$, factor de área
 $A_o =$ Área superficial perpendicular a las placas
 $A =$ Área superficial horizontal del decantador convencional.

2.3.3 Factores que influyen en el proceso

Influencia de L y θ en la eficiencia del decantador. La ecuación (35), reescrita para la trayectoria crítica, es:

$$\frac{Vs_c}{V_o} = \frac{Sc}{\text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta} \quad (38)$$

La figura 7-31 muestra la variación de (Vs_c/V_o) en función de (L) , con $(\theta = 0)$ y un valor fijo de (V_o) , para ductos de sección circular y placas paralelas. Para los dos tipos de sedimentadores, el valor de (Vs_c) disminuye rápidamente con el aumento de (L) , con lo que se obtiene un aumento significativo de la eficiencia hasta $(L = 20)$. A partir de este valor, el valor de Vs_c tiene poca variación.

El comportamiento es similar en el decantador de placas paralelas y se cumple también para otros ángulos, como lo muestra la figura 7-32.

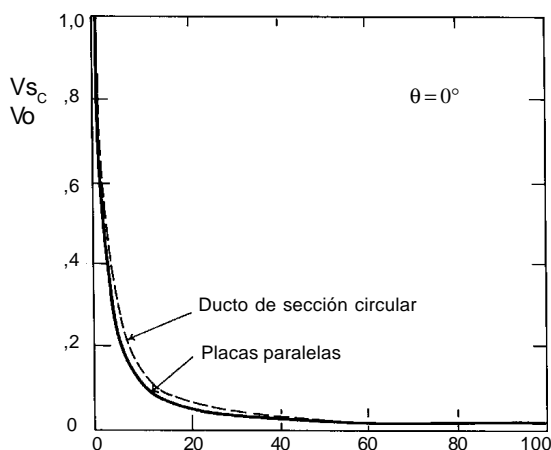


Figura 7-31. Variación de Vs_c en función de (L) (2)

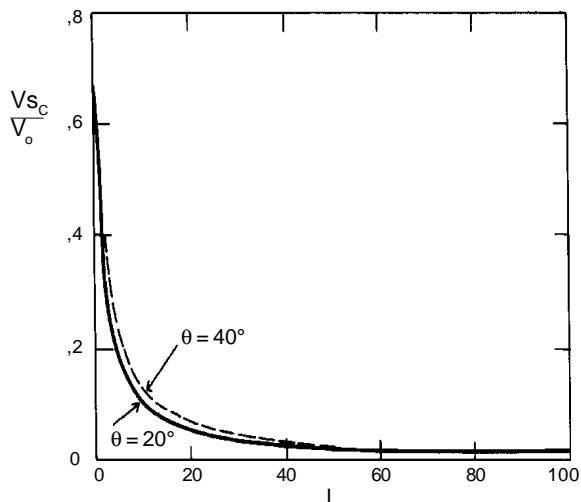


Figura 7-32. Eficiencia del decantador de placas en función de la longitud relativa (2)

Para facilitar el deslizamiento del lodo depositado sobre las placas, el valor de θ que se adopta para diseños es de 60° .

Establecimiento del régimen laminar. El desarrollo de las ecuaciones anteriores fue hecho para régimen laminar. Sin embargo, en la práctica existe una región de transición hasta que todo el escurrimiento se vuelva laminar, conforme lo muestra la figura 7-33. De este modo, a la longitud de sedimentación debería agregarse una longitud L' , correspondiente a la región de transición.

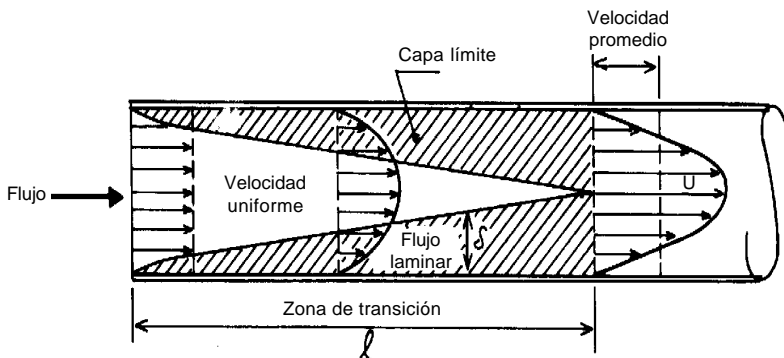


Figura 7-33. Desarrollo de la capa límite caracterizando la zona de transición (2)

La longitud relativa L' para la región de transición en un ducto circular puede ser estimada mediante la expresión:

$$L' = 0,058 \text{ Re} \quad (39)$$

donde:

Re = Número de Reynolds

Aunque la ecuación anterior haya sido desarrollada para ductos circulares, también es aplicada para el caso de placas paralelas. En la figura 7-33 la región de transición se caracteriza por una combinación de régimen uniforme con el laminar. Se demuestra que el rendimiento del sedimentador con escurrimiento uniforme es semejante al del sedimentador con régimen laminar y, por lo tanto, la región de transición no debe afectar significativamente la eficiencia de remoción. Sin embargo, para efectos de diseño, ha sido común adoptar una longitud relativa L_p igual a la suma de $(L + L_r)$, con lo cual resulta un coeficiente de seguridad.

Velocidad del flujo o velocidad de escurrimiento. El análisis de la ecuación (35) revela que cuanto mayor es V_o , mayor deberá ser V_s para que resulte el mismo valor de S , siendo L y θ fijos.

Por otro lado, la velocidad V_o debe ser tal que no acarree el arrastre de los flóculos depositados. La velocidad V_o no debe superar la velocidad de escurrimiento máxima (V'_o) definida por la ecuación:

$$V'_o = V_{s_c} \sqrt{\frac{Re}{8}} \quad (40)$$

$V'_o = V_o$ para el punto crítico

Número de Reynolds. De acuerdo con la literatura y las evaluaciones de plantas, se han conseguido mejores resultados con los decantadores de ductos o placas con números de Reynolds inferiores a 500.

El número de Reynolds es calculado por la siguiente expresión:

$$Re = \frac{4 \cdot Rh \cdot V_o}{\mu} \quad (41)$$

donde:

Rh = Radio hidráulico, cm

V_o = Velocidad media del flujo de agua, cm/s

μ = Viscosidad, cm²/s

$$Rh = \frac{b \cdot d}{2(b + d)} \quad (42)$$

donde:

- b = Ancho del módulo de sedimentación, cm
 d = Espaciamiento entre placas, cm

Otros factores que influyen en el proceso. Los resultados obtenidos en la evaluación de plantas de tratamiento de América Latina, diseñadas con nueva tecnología, realizada por el CEPIS/OPS con el auspicio de la Universidad de Oklahoma, la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos (USAID) y el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), demuestran la elevada eficiencia de los decantadores laminares.

En la figura 7-34 se presentan las eficiencias de diversos proyectos de sedimentación. Se puede apreciar comparativamente la elevada eficiencia de los sedimentadores laminares estudiados. Asimismo, en la figura 7-35 se indica la eficiencia comparativa del sedimentador laminar de Prudentópolis, Brasil, eficiencia que supera ampliamente los resultados obtenidos en prueba de jarras de laboratorio.

La eficiencia de la sedimentación laminar depende de factores intrínsecos a la carga superficial adoptada, de las características propias del agua tratada y del diseño del sedimentador. A continuación se analizarán estos factores.

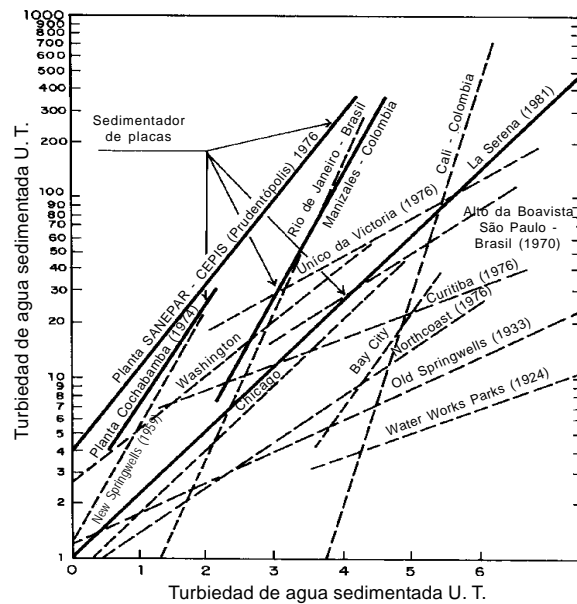


Figura 7-34. Eficiencia comparativa entre decantadores convencionales y unidades de placas paralelas (2)

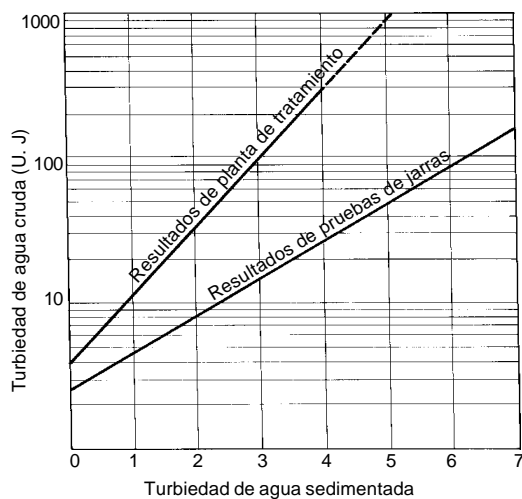


Figura 7-35. Correlación teórica y real de turbiedades de agua cruda y sedimentada (4)

Carga superficial o tasa de sedimentación. En el diseño de sedimentadores laminares se considera como parámetro de diseño la carga por unidad de superficie, la cual representa la velocidad crítica de sedimentación (V_{sc}) de una partícula típica.

Teóricamente, cualquier partícula con velocidad igual o mayor a la crítica será automáticamente removida.

Esta velocidad de sedimentación (V_{sc}) debe ser determinada sobre la base de ensayos de laboratorio, teniendo en cuenta el criterio de elegir una velocidad de sedimentación que permita conseguir un efluente de una calidad que no sobrecargue la unidad de filtración.

En la sedimentación laminar la eficiencia decrece a medida que aumenta la carga superficial en las celdas.

Usando la teoría de Hazen, Yao (4) compara las curvas de comportamiento obtenidas según dicha teoría en sedimentadores convencionales de flujo horizontal y las de los decantadores tubulares, conforme se presenta en la figura 7-36.

Se puede observar también que los decantadores laminares pueden soportar

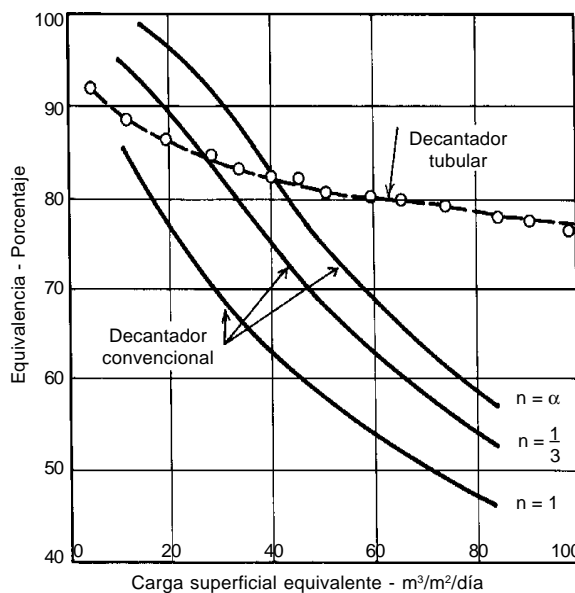


Figura 7-36. Comparación entre un decantador convencional y un decantador tubular (2)

mejor las sobrecargas, con menos pérdida de eficiencia que los convencionales. Las cargas normales fluctúan entre 60 y 240 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, con valores medios de 120 a 180 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Se sugiere el uso de sedimentadores piloto o por lo menos de ensayos de velocidad de sedimentación de partículas a nivel de laboratorio, para fijar las cargas superficiales de diseño de estas unidades.

La evaluación de los sedimentadores laminares de Cochabamba, Bolivia (figura 7-37), demuestra la variación de la eficiencia tanto teórica (prueba de jarras) como real (valores mínimos y máximos) al variar las cargas superficiales.

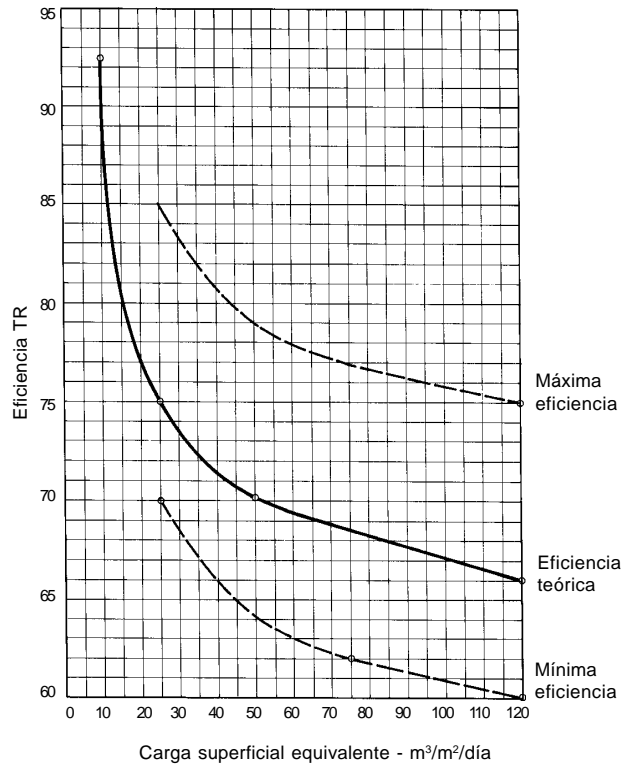


Figura 7-37. Datos comparativos de eficiencias teóricas y reales en sedimentación (2)

Características de las aguas. Entre las características de las aguas que más influencia tienen en la eficiencia de un sedimentador laminar cabe mencionar las siguientes:

- a) Calidad del agua (turbiedad y color)

Los resultados de la evaluación de la planta de tratamiento de agua de Cuenca, Ecuador, demuestran que la eficiencia de un sedimentador laminar es directamente proporcional a la turbiedad y el color del agua cruda. Conservando constante la carga superficial ($120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$), se obtuvieron eficiencias de 88,9% con turbiedades de agua cruda comprendidas entre 5 y 27 UNT; con turbiedades comprendidas entre 100 y 1.000 UNT, se obtuvieron eficiencias mayores de 99%

y, con una turbiedad máxima de 1.500 UNT, se alcanzó una eficiencia de 99,9%. La eficiencia remocional del color es menor. Se obtuvieron eficiencias de 67,7 y 78,7% para valores de color comprendidos entre 8 y 15 UC y 24 y 52 UC.

b) Temperatura del agua

La influencia de la temperatura del agua de acuerdo con la evaluación de la planta de agua de Cochabamba, Bolivia, parece ser mayor que la usualmente considerada (figura 7-38). Con cargas constantes ($120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$) y calidad de agua relativamente constante (turbiedad media de agua cruda de 9 UNT), se obtuvieron eficiencias de 91% para una temperatura de 4°C , que disminuyeron a 80% para una temperatura de 11°C .

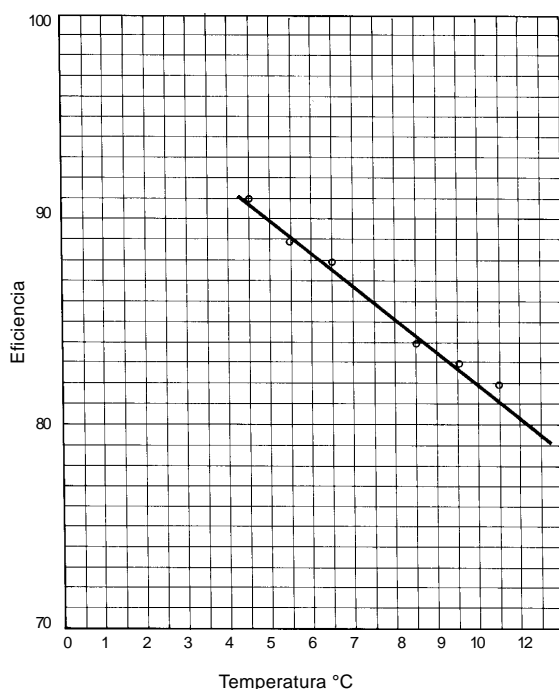


Figura 7-38. Influencia de la temperatura del agua en la eficiencia del decantador laminar (4)

Influencia de la coagulación. Sin lugar a dudas, el proceso de coagulación-floculación es el factor que mayor influencia tiene en el rendimiento y operación de los sedimentadores laminares, tanto en lo referente a la remoción de turbiedad como en la calidad misma del agua, puesto que puede regularse la concentración y el volumen del flóculo, variando los criterios de diseño y las prácticas de mezcla y coagulación, especialmente el valor de GT , para obtener diferentes tamaños de flóculos con diferentes concentraciones.

En general, se comprobó en la evaluación de la planta de tratamiento de agua de Cuenca, Ecuador, que un flóculo grande y esponjoso sedimenta con dificultad, lo que

disminuye el rendimiento del sedimentador en forma apreciable; en cambio, el flóculo pequeño y compacto, producto de altos valores de G en la floculación, sedimenta con mayor facilidad. Se logra un rendimiento mayor de los sedimentadores al usar polímeros, puesto que permiten incrementar el peso del flóculo.

En la figura 7-39 se representan los ensayos de remoción de turbiedad en función de la calidad del flóculo en decantadores de placas planas. Como se puede apreciar comparativamente con la influencia de los otros parámetros, ninguno tiene la importancia que revisten la coagulación y el proceso previo de acondicionamiento del agua.

Características del sedimentador. Cabe mencionar como las más importantes las siguientes:

a) Tiempo de operación del sedimentador

Contrariamente a lo que se esperaría, la eficiencia de un decantador laminar mejora con el periodo de funcionamiento. Los ensayos realizados en Prudentópolis, Brasil, demuestran que los decantadores presentaron eficiencias iniciales de 60% (turbiedades de 6 UNT), que se incrementaron en el lapso de tres meses hasta alcanzar valores de 95% (turbiedades de una UNT), en los que permanecían con un valor asintótico (figura 7-40).

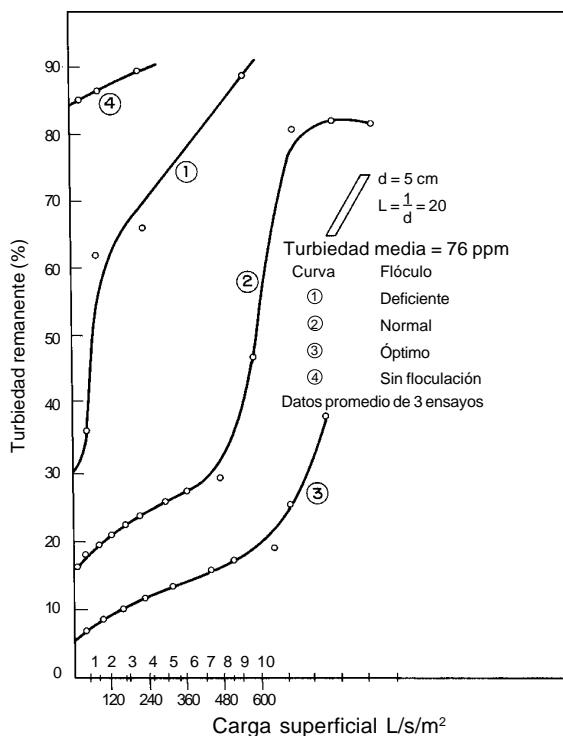


Figura 7-39. Eficiencia del decantador de placas en función de la calidad del flóculo (5)

b) Características de los módulos

b.1) Tipo de módulo

Como se ha indicado anteriormente, cada tipo de sedimentador presenta una velocidad crítica de sedimentación definida por el parámetro:

$$S = \frac{V_{sc} (\text{Sen } \theta + L \text{Cos } \theta)}{V_o} \quad (43)$$

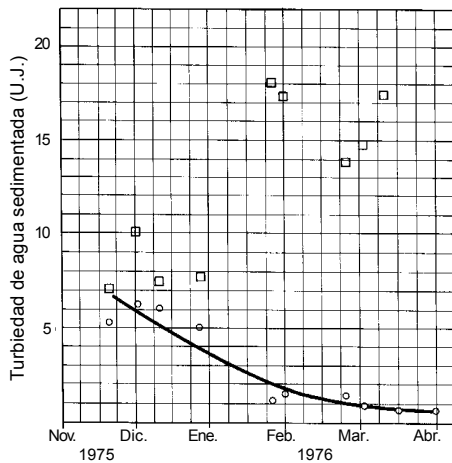


Figura 7-40. Variación de la eficiencia de decantación en placas con el tiempo de operación (4)

Experiencias realizadas por Hazen y Culp demuestran la influencia de la longitud relativa en la remoción de la turbiedad (figura 7-42). La investigación realizada en Cuenca, Ecuador, sobre este aspecto se representa en la figura 7-43.

En los módulos patentados se utilizan valores de L entre 10 y 12, pero para placas planas para-

según los valores que se han indicado anteriormente.

Ensayos realizados en Cuenca, Ecuador, en plantas piloto, produjeron los resultados que se indican en la figura 7-41, datos que pueden ser considerados como relativos y pueden ser usados exclusivamente para fines comparativos, pero que demuestran la validez de la teoría expuesta.

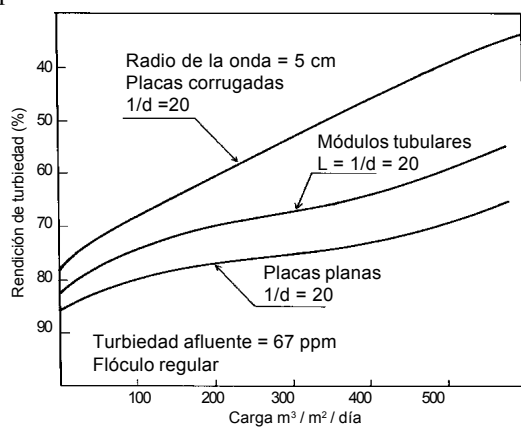


Figura 7-41. Estudio comparativo de módulos de decantación laminar (4)

lelas se recomienda utilizar un valor de $L = 20$, valor que comprende tanto la longitud de transición como la longitud de sedimentación.

b.2) *Inclinación del módulo*

La figura 7-44 demuestra los resultados de experiencias de rendimiento de sedimentadores de placas planas cuando se varía la inclinación. Se puede observar que se presenta una disminución lenta y paulatina del rendimiento, que decrece muy rápidamente sobre los 40° . Los sistemas con altos valores de L se muestran más sensitivos a las variaciones de la inclinación.

En un sedimentador laminar se debe seleccionar una inclinación tal que asegure una continua y eficiente remoción de lodos. Las evaluaciones han demostrado que la inclinación de 60° favorece mucho este efecto.

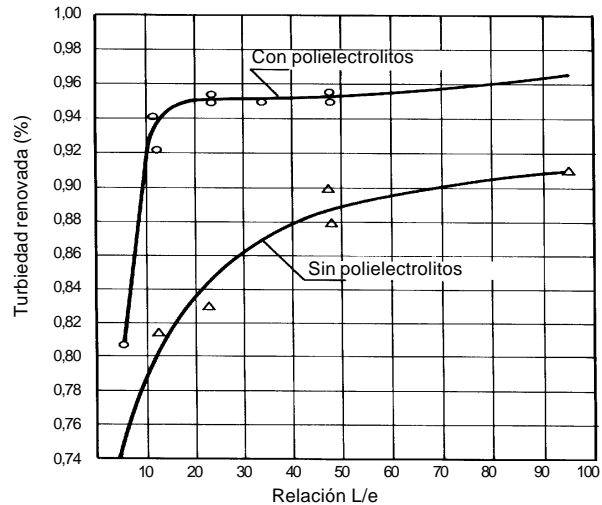
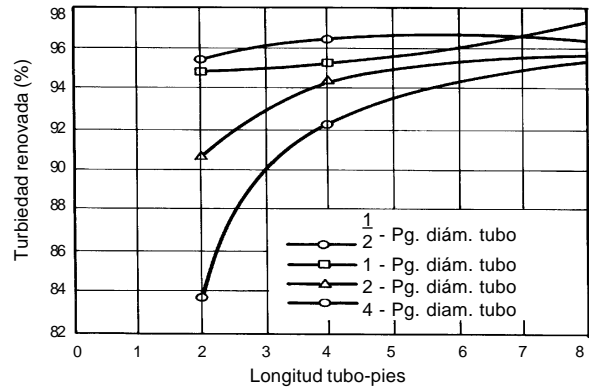


Figura 7-42. Eficiencia de los sedimentadores tubulares (2)

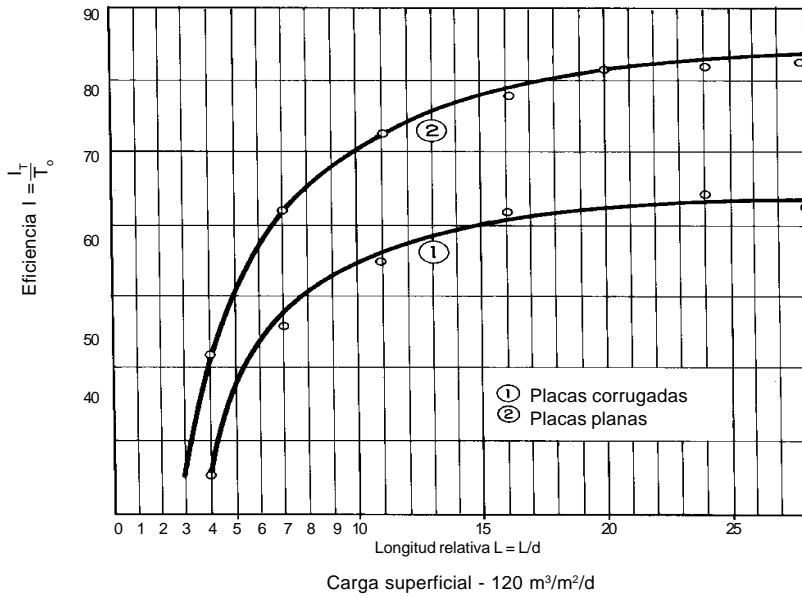


Figura 7-43. Variación de la eficiencia en función de la longitud relativa de las placas paralelas. Planta de Tratamiento de Agua de Cuenca, Ecuador (2)

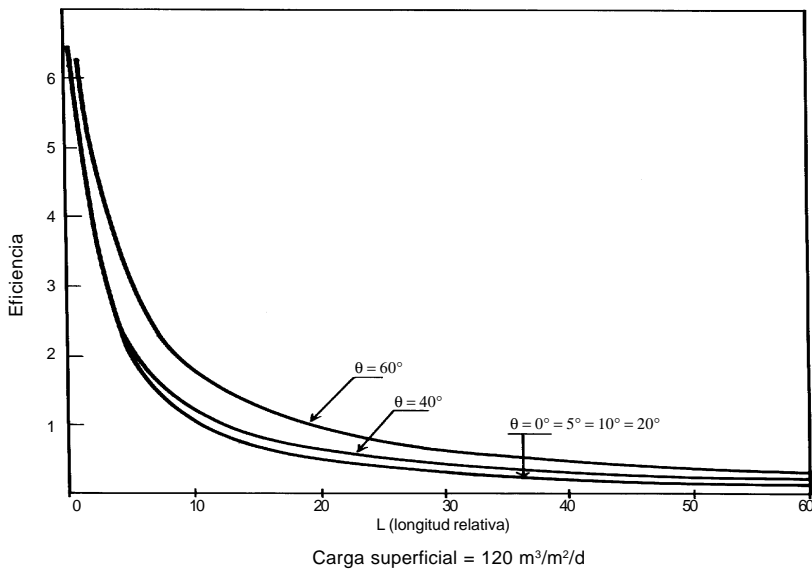
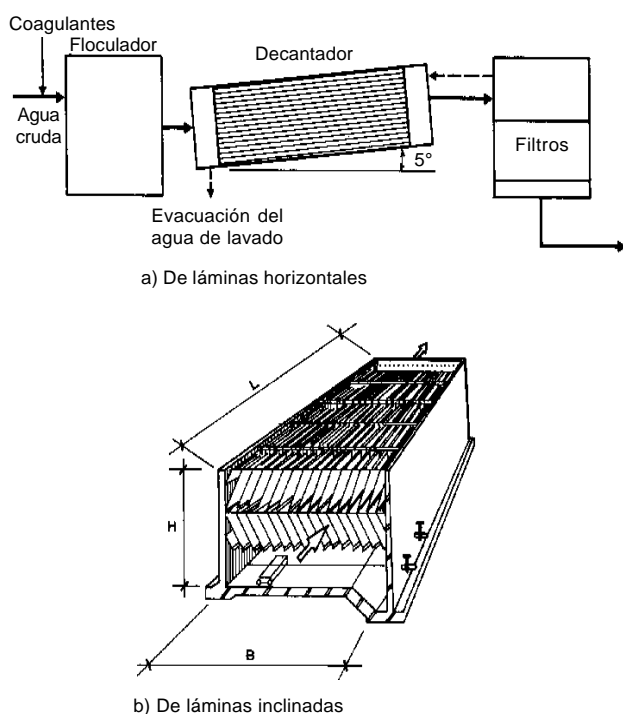


Figura 7-44. Variación de la eficiencia del decantador en función del ángulo de inclinación de las placas. Planta de Tratamiento de Agua de Cuenca, Ecuador (2)

2.3.4 Tipos de decantadores laminares



De acuerdo con la dirección del flujo, los decantadores laminares pueden clasificarse así:

a) De flujo horizontal

En estos el flujo del agua es o tiende a ser horizontal. La figura 7-45(a) representa un sedimentador laminar con láminas ligeramente inclinadas con un ángulo de 5° (ángulo de máxima eficiencia remocional). En esta solución, se requiere invertir el flujo para realizar la limpieza del sedimentador. Esta solución es muy utilizada en plantas comerciales o plantas de pequeña capacidad (inferior a 50 litros por segundo). Su uso se limita únicamente por razones económicas.

Figura 7-45. Decantadores laminares de flujo horizontal (6)

Para evitar el lavado y obtener al mismo tiempo máxima eficiencia y escurrimiento de lodos depositados en las láminas, se puede recurrir a las soluciones indicadas en la figura 7-45(b). Estos son sedimentadores laminares de flujo horizontal (máxima eficiencia), pero con láminas planas paralelas inclinadas para obtener la pendiente necesaria de escurrimiento de flóculos.

b) De flujo inclinado

Este tipo de decantadores es el más usado. Generalmente, en la parte inferior del decantador se presenta una zona de distribución de agua. En la parte media existen módulos inclinados con un ángulo de 60° . El agua decantada se recolecta lateralmente en la parte superior (figuras 7-46 y 7-47).

Se puede aplicar con éxito decantación laminar con ciertas condiciones de calidad de agua y material transportado, en nuevos diseños o en modificación de desarenadores o sedimentadores convencionales de flujo horizontal, ya sea para incrementar su eficiencia o su capacidad, o ambas cosas simultáneamente.

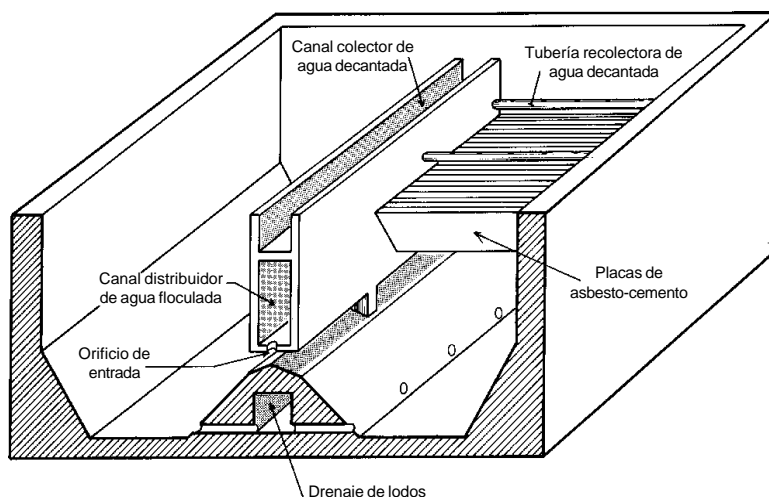
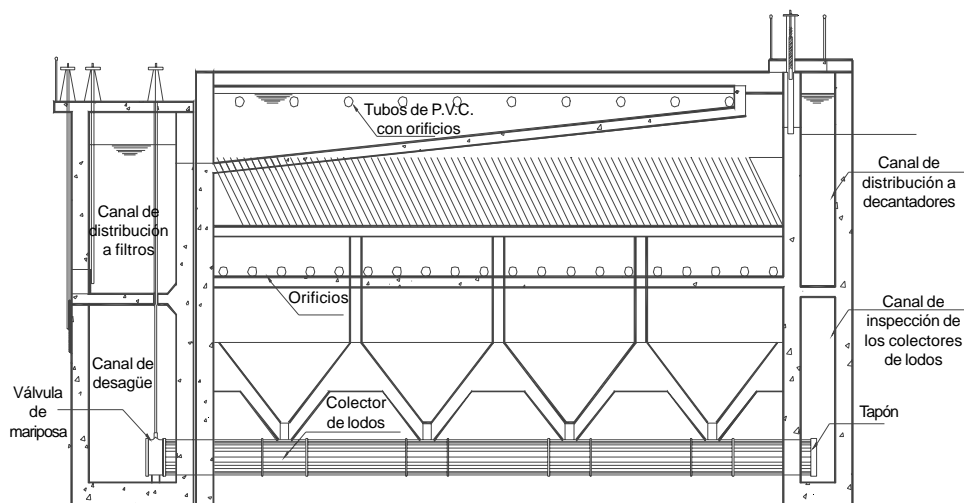
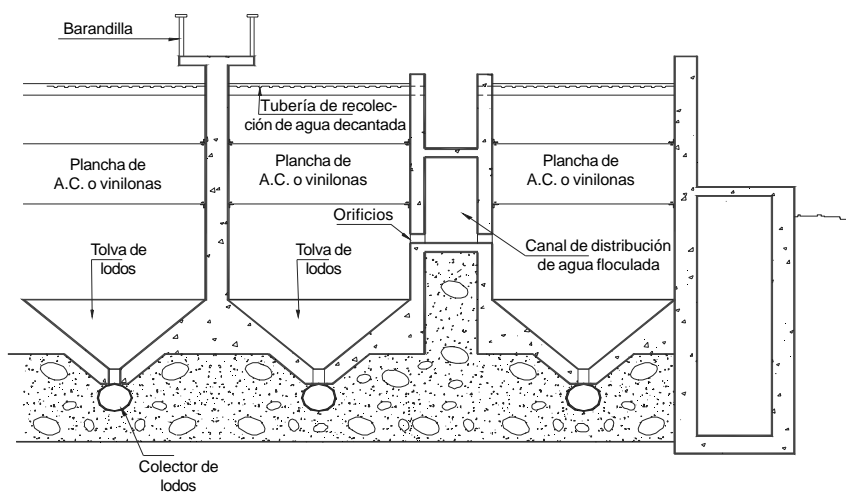


Figura 7-46. Decantador de placas con canaletas laterales de recolección de agua decantada, tolvas continuas para lodos y extracción mediante sifones (5)



Decantador laminar



Decantador laminar

Figura 7-47. Decantador de placas adecuado para plantas grandes: canal central de distribución, sistemas de recolección mediante tuberías y tolvas de lodos con colectores de extracción uniforme

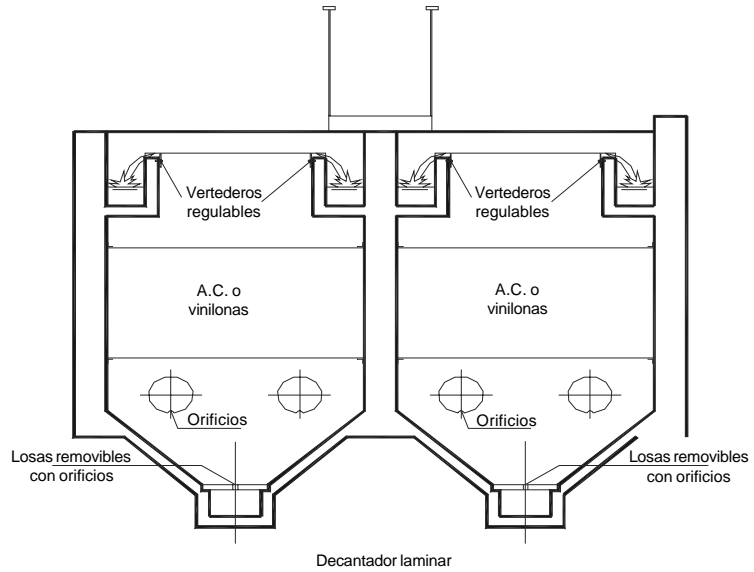
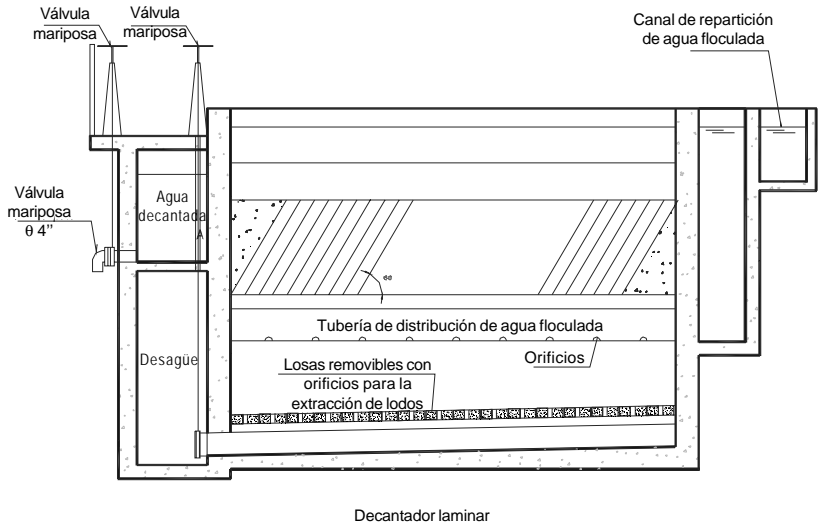


Figura 7-48. Decantador de placas adecuado para plantas pequeñas: tuberías de distribución uniforme, vertederos de recolección y canal de extracción uniforme de lodos

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CEPIS–Programa de Protección de la Salud Ambiental-HPE Evaluación de plantas de tratamiento de agua. Tomo I, Manual DTIAPA C-5, 1981.
- (2) Pérez, J. M. Submódulo 4.5.2. *Sedimentadores laminares*. Versión preliminar. Programa Regional OPS/HEP/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua, 1981.
- (3) Fair, G. M.; Geyer, J. C. y Okun, D. A. Water and wastewater engineering. Nueva York, John Wiley, 2 vols, 1968.
- (4) Yao, K. M. Theoretical study of high-rate sedimentation. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 42 (2, parte I), febrero, 1970. pp. 218-228.
- (5) Pérez, J. Evaluation of lower cost methods of water treatment in Latin America. Lima, CEPIS/OPS, 1977, pp. 290.
- (6) Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua. Manual III Teoría, tomo 11, *Sedimentación*. Serie Filtración Rápida, 1992.

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- Arboleda, J. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tercera Edición. Vol. 1. 2000.
- Arboleda, J. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Lima, CEPIS/OPS, Serie Técnica 13, 1973.
- AWWA, ASCE y CSSE. *Water treatment plant design*. AWWA, 1971.
- Balhowski. *Aplicação das técnicas modernas de tratamento de águas nas estações de tratamento de água existentes e nas novas instalações*. Curitiba, SANEPAR, 1975.

- Bond, A. W. Behaviour of suspension. *Journal ASCE*, mayo, 1960, pp. 57-80.
- Brown, J. y La Motta, E. Physical behaviour of flocculent suspension in upflow. *Journal ASCE*, abril, 1971, pp. 209-224.
- Camp, T. Sedimentation and the design of the settling tanks. *Journal ASCE*, Paper 2285, pp. 895-959.
- Committee on Final Clarifiers. Final clarifiers for activated sludge plants. *Journal of the Environmental Engineering Division*, octubre, 1979, pp. 803-817.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-CETESB. Técnica de abastecimiento y tratamiento de agua. Volumen 2. Tratamiento de agua. São Paulo, CETESB, 1977.
- Cordova, Hudgins y Silveston. Settling in continuous sedimentation tanks. *Journal of the Environmental Engineering Division*, diciembre, 1978, pp. 1263-1275.
- Culp, G. L. y Gulp, R. L. *New concepts in water purification*. Nueva York, Van Nostrand Reinhold, 1974.
- Culp, G. L.; Hansen, S. y Richardson, G. High-rate sedimentation in water treatment works. *Journal AWWA*, 60 (6), junio, 1968, pp. 681-698.
- Culp, G. L.; Hsiung, K. y Conley, W. R. Tube clarification process operating experiences. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 95(SA5), octubre, 1969, pp. 829-847.
- Degremont. *Manual técnico del agua*. Degremont, 1973.
- Di Bernardo, Luiz. Sedimentación convencional y laminar. Copias para el curso de Maestría de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI. Lima, 1988.
- Fisherstrom. Sedimentation in rectangular basins. Proceedings. American Society of Civil Engineers, 1955.

- Forsell, B. y Hedstrom, B. Lamella sedimentation: a compact separation technique. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 47(4), abril, 1975, pp. 834-845.
- Gomella, C. Clarification avant filtration; ses progres récents. Association Internationale des Distributions d'Éau. Dixième Congrès, agosto, 1974.
- Hazen, A. On Sedimentation. *Transactions ASCE*, 5, 1904, pp. 45-71.
- Hudson, M. E. Sedimentation. AWWA Seminar on Upgrading Existing Water Treatment Plants. Boston, 15-16 de junio de 1974. Denver, AWWA, 1974, pp. 67-78.
- Munch, W. Performance of circular final clarifiers at an activated sludge plant. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, febrero, 1976, pp. 265-276.
- Pérez, J. M. *Avances de sedimentación. Curso sobre tecnologías de tratamiento de agua para países en desarrollo*. CEPIS-CIFCA, 1978.
- Ritcher, C. *Estação de tratamento de água modulada para pequenas e médias comunidades*. Curitiba, 1973.
- Ritcher, C. y Arboleda Valencia, J. *Estações de tratamento de água modulada para pequenas e medias comunidades, SANEPAR-CEPIS*. Curitiba, Brasil, SANEPAR, 1974.
- Rocha, M. V. Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água. Segunda edición. 1992.
- Sáez Carrizo, C. E. Ensaio de decantação acelerada na estação de tratamento de água de Rio Grande. *DAE*, año XXXV, 102, 1975, pp. 26-33.
- Sanks, R. Water treatment plant design. Ann Arbor Science Pub., 1979.
- Schaafman, N. *Benzenking als Onderdeel van der Waterzuivering Ingenieur*. Vol. 62, 1950, pp. 61.

-
- Smethurst, G. *Basic water treatment for application worldwide*. Londres, T. Telford Ltd., 1979.
- Tebbutt, T. H. Primary sedimentation of wastewater. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 51(12), febrero, 1976, pp. 2858-2876.
- Weber. *Control de calidad de agua para consumo humano*. Nueva York, John Wiley & Sons, 1978.
- Yao, K. M. Theoretical study of high-rate sedimentation. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 42 (2, parte I), febrero, 1970, pp. 218-228.

