



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

LE
215

**TEORIA Y DISEÑO DE SEDIMENTADORES
DE ALTA VELOCIDAD**

TESIS PROFESIONAL
Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL

Presenta
FERNANDO PABLO VELASCO ABUNDIS

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

1.	INTRODUCCION	1
2.	TEORIA DE SEDIMENTADORES DE ALTA CARGA SUPERFICIAL	3
3.	DISEÑO DE SEDIMENTADORES DE ALTA CARGA SUPERFICIAL	13
3.0	Influencia de la velocidad crítica	13
3.1	Influencia de la longitud relativa (L)	14
3.2	Influencia del ángulo de inclinación (θ)	16
3.3	Eficiencia en la remoción fraccional	17
3.4	Influencia del flujo laminar	20
3.5	Consideraciones de diseño	22
4.	CONCLUSIONES	24
5.	EJEMPLOS DE APLICACION	26
6.	BIBLIOGRAFIA	35

1. INTRODUCCION

La sedimentación se empleó como medio para mejorar la calidad del agua para uso doméstico desde hace muchos siglos. En el Egipto Antiguo, las aguas turbias de las avenidas del río Nilo, se desviaban hacia tanques de reposo y dejaban asentarse antes de distribuirse a la población. Se han encontrado en las ruinas de Cartago, restos de grandes tanques de asentamiento de aguas pluviales que se contruyeron para mejorar la calidad del agua que se empleaba para el abastecimiento público. En Roma ya existían los sedimentadores antes de la era cristiana.

Los sedimentadores se han empleado en muchas de las instalaciones de filtración lenta y en todas las de filtración rápida con arena, desde que se adoptó el sistema de filtración para el tratamiento del agua.

En el sentido amplio del término, la sedimentación constituye una operación unitaria en la que una suspensión es desdoblada en un fluido y en una suspensión más concentrada.

En Ingeniería Sanitaria, la sedimentación tiene un significado más limitado y se emplea para describir el asentamiento gravitatorio de partículas a través de un líquido, que para nuestro caso usualmente es el agua.

La sedimentación es la operación unitaria más empleada para la potabilización de agua cruda y para el tratamiento de aguas residuales, en sus diferentes versiones:

Cuando los materiales se separan de un fluido que los mantiene en suspensión sólo mediante la acción de las fuerzas naturales, la operación recibe el nombre de sedimentación simple.

Cuando a las aguas residuales se les agrega productos químicos para provocar o favorecer la agregación y asentamiento de la materia finamente dividida en forma coloidal, la operación se conoce

como coagulación.

Cuando los productos químicos se agregan para separar de la solución los materiales disueltos, la operación se denomina precipitación química.

Generalmente, un tanque sedimentador es una estructura a través de la cual fluye el agua con una cierta velocidad que permite el asentamiento del material suspendido, el cual se deposita en el fondo, obteniéndose un agua relativamente clara.

Hasta hace algunos años, los criterios para diseñar sedimentadores - utilizaban velocidades de asentamiento o "cargas superficiales" comprendidas entre 15 y 60 $m^3 / m^2 \times día$, con lo cual se garantizaba una remoción adecuada de sólidos. Como se explica más adelante, la práctica actual emplea cargas superficiales mayores sin afectar la eficiencia de remoción, mediante el uso del concepto de módulos tubulares o placas paralelas, con lo que el área necesaria para una buena sedimentación se reduce considerablemente.

2. TEORIA DE SEDIMENTADORES DE ALTA CARGA SUPERFICIAL.

El término de sedimentación rápida, se refiere al uso de sedimentadores gravitacionales, poco profundos con períodos de detención de no más de 15 minutos, para llevar a cabo una mejor sedimentación y más eficiente que las obtenidas mediante los sedimentadores convencionales con períodos de detención de más de dos horas. Los sedimentadores pueden ser rectangulares, circulares o de cualquier otra forma convencional. Una ventaja obvia, es el ahorro significativo en el costo de construcción y terreno. Los períodos de detención cortos requeridos, hacen extremadamente atractivos a los sedimentadores de alta velocidad en el tratamiento de agua y aguas residuales. Las principales características de estos sedimentadores son: su poca profundidad y su alta carga superficial.

Los sedimentadores de alta velocidad (alta carga superficial), consisten esencialmente en una serie de tubos circulares, cuadrados o hexagonales (ver fig. 2.0) o láminas planas paralelas colocadas con un ángulo θ de inclinación, de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar y se colecte en la parte superior del extremo opuesto del tanque. Esto permite cargas superficiales entre 120 y 300 $\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$, que son de cuatro a diez veces mayores que las usadas en los sedimentadores convencionales. Los períodos de retención son usualmente menores de 10 minutos.

Suponiendo que el flujo que se presenta en un sedimentador de alta carga superficial es laminar y unidimensional, y además que las partículas suspendidas son discretas (no forman agregados), la ecuación de movimiento de una de estas partículas simple suspendida es la siguiente:

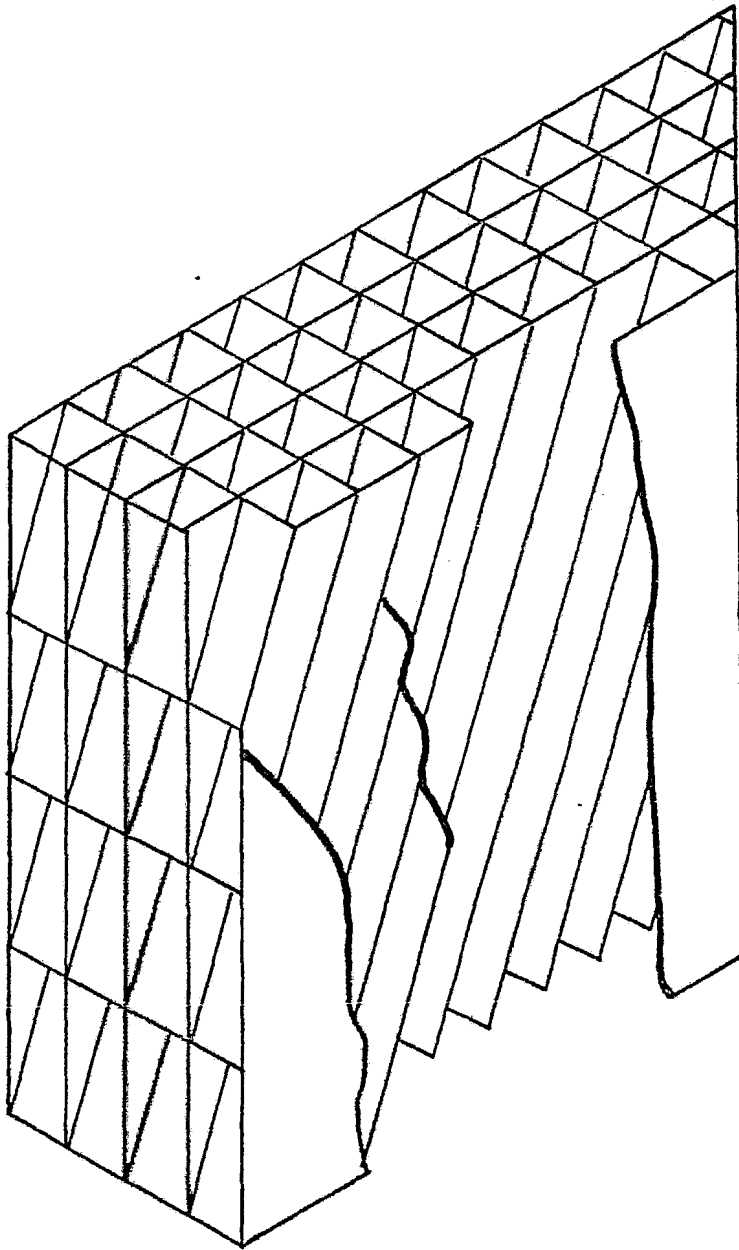


Fig. 2.0 Módulos elásticos de conductos cuadrados de 5.1 x 5.1 cm. de sección e inclinados a 60°.

$$m \frac{dv_p}{dt} = (\rho_p - \rho) Vg - F_r \quad \dots(1)$$

Donde:

m , es la masa de la partícula

v_p , es la velocidad de la partícula

t , es el tiempo

ρ_p , es la densidad de la partícula

ρ , es la densidad del fluido

V , es el volúmen de la partícula

g , es la aceleración gravitacional

F_r , es la fuerza de resistencia del fluido

En flujo laminar, la ley de Stokes puede ser usada para determinar la fuerza de resistencia, como:

$$F_r = 3 \pi \mu d_p (v_p - u) \quad \dots(2)$$

Donde:

μ , es la viscosidad dinámica del fluido

d_p , es el diámetro de la partícula

u , es la velocidad del fluido

Despreciando el efecto de inercia ($m \frac{dv_p}{dt} = 0$) y sustituyendo la -

ecuación (2) en la ecuación (1), se tiene:

$$v_p - u = \frac{(\rho_p - \rho) v_g}{3 \pi \mu d_p} = v_s \quad \dots(3)$$

Donde:

v_s , es la velocidad de caída de la partícula y está en una dirección vertical y hacia abajo (Ver Fig. 2.1)

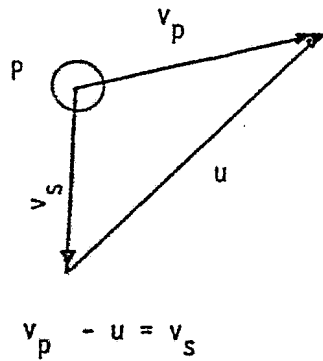


Fig. 2.1 Representación gráfica de la ecuación 3.

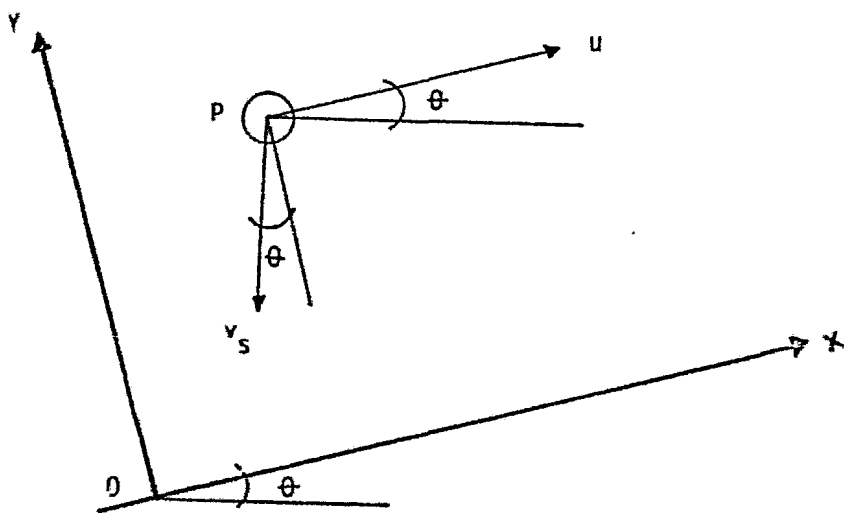


Fig. 2.2 Sistema de coordenadas

La Figura 2.2, muestra el sistema de coordenadas usadas para el presente estudio, el eje X, es paralelo a la dirección del flujo y el eje Y, es perpendicular a la dirección del flujo. El término θ , es el ángulo entre el eje X y una línea horizontal o el ángulo de inclinación y u , es la velocidad puntual del fluido en la dirección X.

La ecuación (3) puede escribirse en dos ecuaciones no vectoriales como:

$$v_{px} = u - v_s \sin \theta \quad \dots(4)$$

$$v_{py} = -v_s \cos \theta \quad \dots(5)$$

Donde, v_{px} y v_{py} son las componentes de velocidad de v_p en las direcciones x e y respectivamente. Por definición,

$$v_{px} = \frac{dx}{dt} \quad \text{y} \quad v_{py} = \frac{dy}{dt} \quad \dots(6)$$

Donde, x e y son las coordenadas en las direcciones X e Y, respectivamente. Combinando las ecuaciones (4), (5) y (6), tenemos:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-v_s \cos \theta}{u - v_s \sin \theta} \quad \dots(7)$$

Esta última ecuación, es la ecuación diferencial para la trayectoria de la partícula que resulta de los efectos combinados de los obstáculos del fluido y la sedimentación gravitacional.

Integrando la ecuación (7), se tiene:

$$\int u \, dy - v_s y \sin \theta + v_s x \cos \theta = C_0 \quad \dots(8)$$

Donde, C_0 es la constante de integración.

Dividiendo la ecuación (8) entre v_0 la velocidad promedio del flujo y "d", la profundidad del líquido, medido normalmente (perpendicularmente) a la dirección del flujo, se tiene:

$$\int \frac{u}{v_0} dY - \frac{v_s}{v_0} Y \sin \theta + \frac{v_s}{v_0} X \cos \theta = C_1 \quad \dots(9)$$

Donde, C_1 es la constante de integración para $Y = y/d$ y $X = x/d$.

La ecuación (9) es la ecuación general de la trayectoria de la partícula. C_1 y $\int \frac{u}{v_0} dY$ pueden evaluarse para la trayectoria de una partícula en un sistema de sedimentación rápida.

En la Figura 2.3, se presenta un sistema de sedimentación rápida, usando módulos tubulares de sección circular. El eje X coincide con la parte inferior del tubo y los términos (d) y (l), son el diámetro y la longitud del tubo respectivamente. El plano seccional mostrado contiene el eje del tubo.

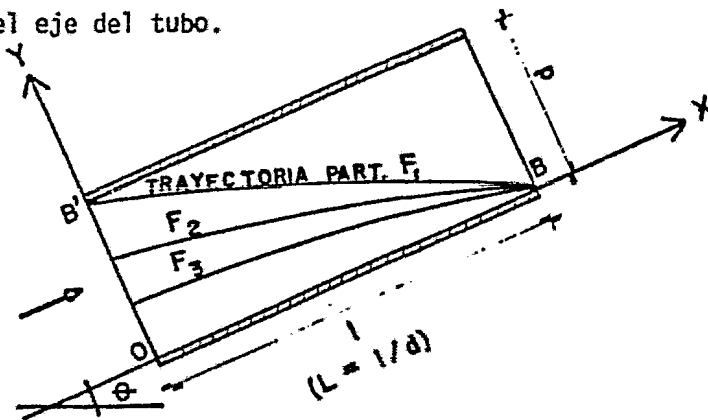


Fig. 2.3

Para flujo laminar en un tubo circular, tenemos:

$$\frac{u}{v_0} = 8 (Y - Y^2) \quad \dots(10)$$

Substituyendo la ecuación (10) en la ecuación (9) y llevando a cabo la

integración, se tiene:

$$8 \left(\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3} \right) - \frac{v_s}{v_0} Y \sin \theta + \frac{v_s}{v_0} X \cos \theta = C_1 \quad \dots(11)$$

Esta ecuación (11), es la ecuación general para las trayectorias de partículas suspendidas con flujo laminar a través de un tubo circular. La constante C_1 puede ser evaluada si las coordenadas de cualquier punto en una trayectoria dada se conocen. Considerando una familia de trayectorias tales que F_1 , F_2 y F_3 pasen a través del punto B, que es el punto inferior de salida del tubo (figura 2.3) las coordenadas para este punto expresadas adimensionalmente son:

$$X = \frac{x}{d} \quad y \quad Y = \frac{y}{d}$$

Y como $x = l$ y $y = 0$

$$X = \frac{l}{d} \quad y \quad Y = \frac{0}{d}$$

Por lo tanto:

$$X = L \quad y \quad Y = 0 \quad \dots(12)$$

Donde: L es la longitud relativa del sedimentador, es decir:

$L = l/d$. De donde:

$$C_1 = \frac{v_s}{v_0} L \cos \theta \quad \dots(13)$$

Substituyendo la ecuación (13) en (11) e igualando a cero, se tiene:

$$8 \left(\frac{Y^2}{2} - \frac{Y^3}{3} \right) - \frac{v_s}{v_0} Y \sin \theta + \frac{v_s}{v_0} (X - L) \cos \theta = 0 \quad \dots(14)$$

La ecuación (14) es la ecuación para la familia de trayectorias an -

tes mencionadas. La trayectoria de una partícula suspendida depende de la magnitud de v_s / v_o para la partícula. Entre esta familia de trayectorias, existe una trayectoria limitante que empieza en el punto B', por lo que si se substituyen sus coordenadas en la ecuación (14)

Como $x = 0$; $y = d$

$$X = \frac{0}{d} \quad y \quad Y = \frac{d}{d}$$

Por lo tanto:

$$X = 0 \quad y \quad Y = 1 \quad \dots(15)$$

Se obtiene:

$$\frac{v_{sc}}{v_o} (\sin \theta + L \cos \theta) = \frac{4}{3} \quad \dots(16)$$

La ecuación (16) indica que la eficiencia de un sistema de sedimentación acelerada se puede caracterizar por un parámetro S igual a:

$$S = \frac{v_s}{v_o} (\sin \theta + L \cos \theta) \quad \dots(17)$$

El valor crítico (S_c) del parámetro S, para el tubo circular vale 4/3. Cualquier partícula suspendida en tal sistema con su valor S mayor o igual a 4/3 sería completamente removido teóricamente, del flujo sin la necesidad de conocer la velocidad de caída crítica del sistema.

Siguiendo un procedimiento similar como para el caso de los tubos circulares, los resultados correspondientes obtenidos para otros tipos de sedimentadores se presentan a continuación. Al igual que en el caso -

anterior se hace la consideración del flujo ideal uniforme para propósitos de comparación.

Para sedimentadores de placas paralelas, la ecuación (10) se modifica de la siguiente forma:

$$\frac{u}{v_0} = 6 (Y - Y^2) \quad \dots(18)$$

Y haciendo un procedimiento similar al del caso de tubos circulares - se obtiene la siguiente ecuación:

$$S_c = \frac{v_{sc}}{v_0} (\text{sen } \theta + L \text{ cos } \theta) = 1 \quad \dots(19)$$

Para sedimentadores con tubos de sección cuadrada, se tiene:

$$S_c = \frac{v_{sc}}{v_0} (\text{sen } \theta + L \text{ cos } \theta) = \frac{11}{8} \quad \dots(20)$$

Es importante señalar que valores idénticos de S_c no necesariamente representan un comportamiento idéntico de los sistemas (como el caso de placas paralelas y charolas de poca profundidad), esto se indica en la Figura 2.4, en la que se muestran las trayectorias límites para varios tipos de sedimentadores, suponiendo que $\theta = 0$ por simplicidad. Las gráficas de las trayectorias límite son bastante diferentes para las bandejas de poca profundidad y las placas paralelas en la zona de flujo uniforme. Por otro lado, el modelo para tubos circulares es idéntico al de las placas paralelas, aunque los valores de S_c para los dos tipos de sedimentadores no es el mismo.

Para el caso de las partículas coalescentes o floculentas puede plantearse el mismo desarrollo matemático anterior con la salvedad de que dichas partículas van cambiando su tamaño, forma y densidad.

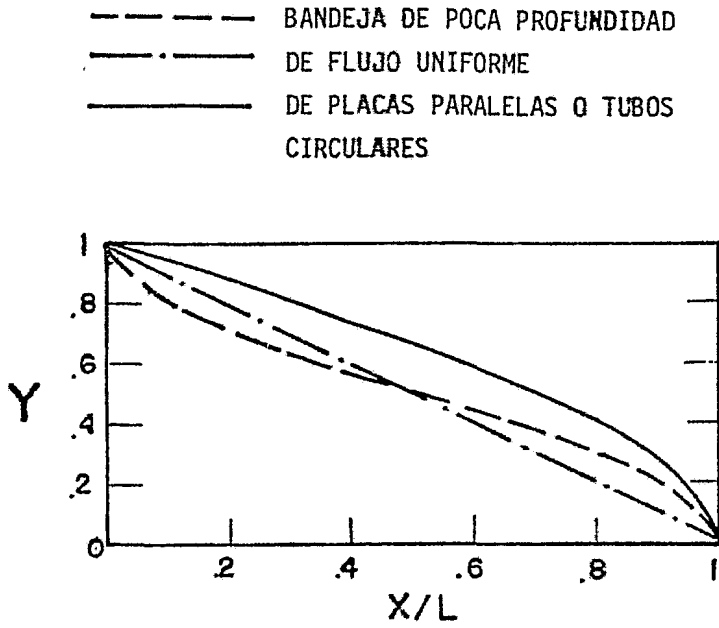


FIG. 2.4 TRAYECTORIAS LIMITES EN DIFERENTES TIPOS DE SEDIMENTADORES.

3. DISEÑO DE SEDIMENTADORES DE ALTA CARGA SUPERFICIAL

3.0 Influencia de la velocidad crítica.

El diseño de tanques sedimentadores para el tratamiento de aguas crudas y de aguas residuales, generalmente se basa en el parámetro de la carga superficial, expresado como gasto por unidad de área horizontal del tanque. El concepto fue originado del hecho de que para un flujo uniforme en un tanque sedimentador "ideal" de tipo horizontal, la carga superficial representa la velocidad crítica de caída de la partícula. Teóricamente, cualquier partícula suspendida que tiene una velocidad de caída mayor o igual a su valor crítico, sería removida completamente en el tanque. Ese mismo concepto es adaptable a los sedimentadores modernos, ya que la velocidad de caída crítica (v_{sc}) puede estimarse fácilmente de S_c , el valor crítico de S . La ecuación adecuada para este propósito sería:

$$v_{sc} = (\text{carga superficial}) = K \frac{v_0}{L} \quad \dots(21)$$

Donde:

$$K = S_c \frac{L}{\text{sen } \theta + L \cos \theta}$$

Los valores de los parámetros involucrados deberán expresarse en unidades compatibles.

Con la ecuación (21), un sistema de sedimentación rápida puede diseñarse como cualquier tanque de sedimentación convencional, seleccionando una carga superficial apropiada. La ecuación (21), también permite comparar el funcionamiento de diferentes sistemas de sedimentación, ya que teóricamente los sedimentadores con la misma carga super

ficial deben tener una eficiencia similar.

3.1 Influencia de la longitud relativa (L).

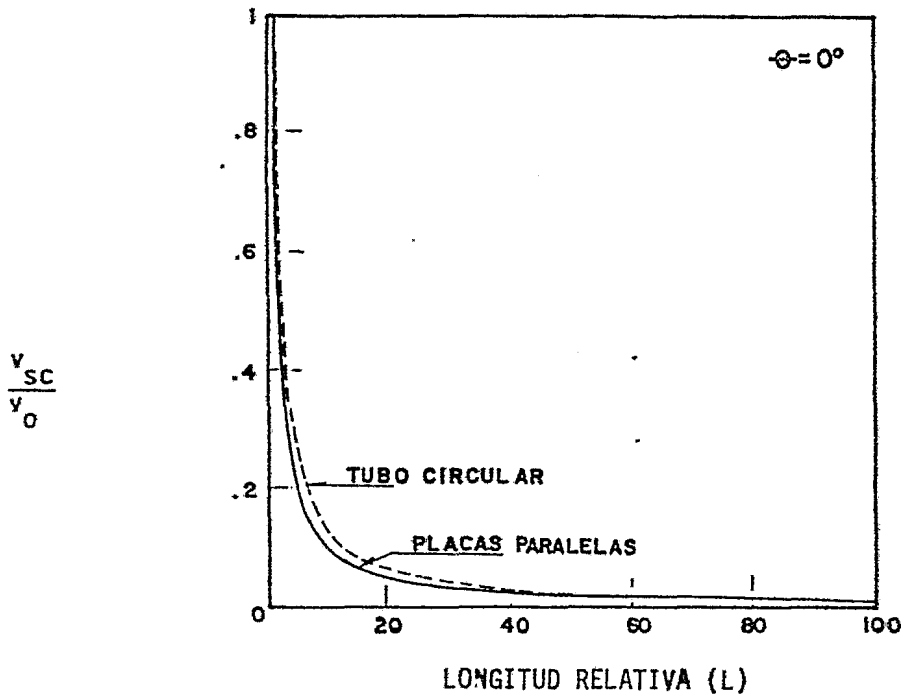
La velocidad crítica de caída (v_{sc}) de la partícula para un sistema de sedimentación rápida puede expresarse como:

$$\frac{v_{sc}}{v_0} = \frac{S_c}{\text{sen } \theta + L \cos \theta} \quad \dots(22)$$

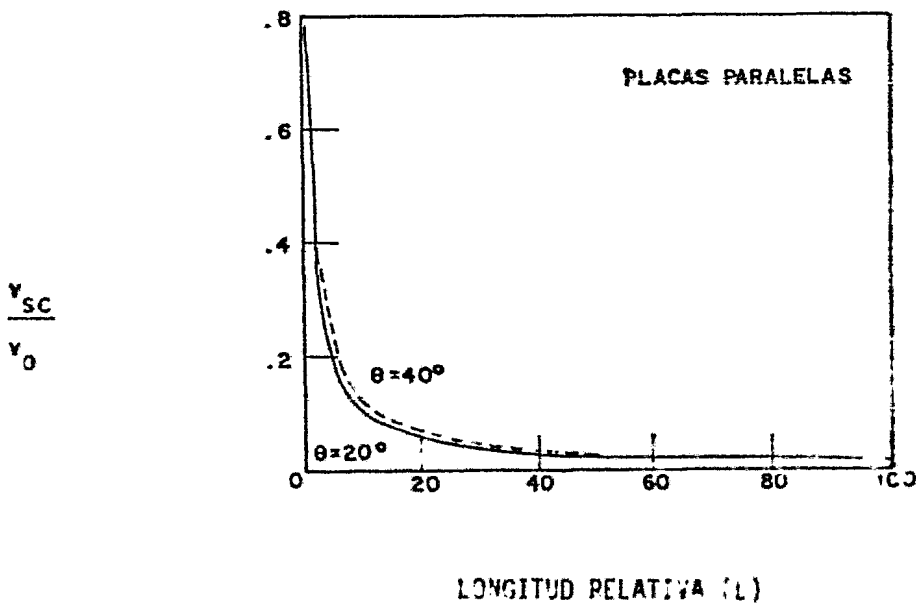
En la Figura 3.1 se muestra la gráfica obtenida a través de la ecuación (22), suponiendo que $\theta = 0^\circ$, para sistemas con tubos circulares y placas paralelas. Para v_0 constante, v_{sc} disminuye rápidamente con respecto a la longitud relativa (L) del sedimentador, cuando L aumenta. Esto indica que las partículas suspendidas con velocidades de caída más pequeña, son removidas completamente, conforme L va aumentando. La velocidad v_{sc} con que caen las partículas alcanza un valor muy pequeño cuando $L = 20$ y el decremento se vuelve insignificante cuando la longitud relativa es mayor de 40.

Por tanto, L deberá ser menor que 40 y preferentemente alrededor de 20.

En la Figura 3.2 se presenta la gráfica de la ecuación (22), para placas paralelas cuando $\theta = 20$ y 40° . El modelo general es casi el mismo que cuando $\theta = 0^\circ$.



LONGITUD RELATIVA (L)
FIGURA 3.1 EFECTO DE LA LONGITUD RELATIVA
EN LA SEDIMENTACION RAPIDA.



LONGITUD RELATIVA (L)
FIGURA 3.2 EFECTO DE LA LONGITUD RELATIVA
EN LA SEDIMENTACION RAPIDA.

3.2 Influencia del ángulo de inclinación (θ).

Diferenciando la ecuación (22) con respecto a θ e igualando a cero, se obtiene la siguiente relación:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{1}{L} \quad \dots(23)$$

La segunda derivada de la ecuación (22) con respecto a θ es:

$$\frac{d^2\left(\frac{v_{sc}}{v_o}\right)}{d\theta^2} = \frac{2S_c (\cos \theta - L \operatorname{sen} \theta)^2}{(\operatorname{sen} \theta + L \cos \theta)^3} + \frac{S_c}{\operatorname{sen} \theta + L \cos \theta} \quad \dots(24)$$

Ya que el ángulo de inclinación θ debe ser menor de 90° , el lado derecho de la ecuación (24) siempre es positivo. De ahí que la relación expresada en la ecuación (23) da el mínimo v_{sc} . Por ejemplo, para $L = 20$, $\theta = 2^\circ 54'$ sería el valor óptimo teóricamente, si todos los demás parámetros fueran constantes.

La Figura 3.3, muestra la variación en la eficiencia del sedimentador con relación al ángulo de inclinación θ , con tres valores diferentes de L .

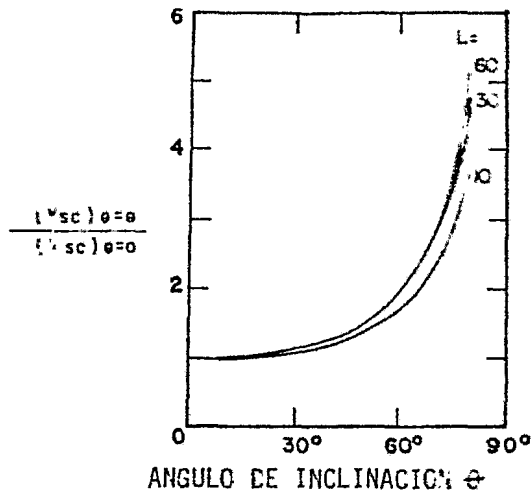


FIGURA 3.3 EFECTO DEL ANGULO DE INCLINACION EN LA SEDIMENTACION RAPIDA.

La ordenada se expresa como la relación v_{sc} cuando $\theta = \theta$ y v_{sc} cuando $\theta = 0^\circ$, suponiendo que v_0 es constante. En esta misma figura se ve que la eficiencia del sedimentador decrece rápidamente después de que θ alcanza el valor de 40° . Esto se nota por el rápido incremento en v_{sc} . La Figura 3.3, también muestra que hay poco cambio, cuando L aumenta de 30 a 60, y los sistemas que tienen las L más grandes, tienden a ser más sensibles a cambios en θ .

3.3. Eficiencia en la Remoción Fraccional.

Para partículas suspendidas con valores de S inferiores al valor crítico S_c de un determinado sistema de sedimentación rápida, sólo una fracción se sedimenta en el tanque, la cual recibe el nombre de remoción fraccional. En esta discusión se incluyen sólo los sistemas con placas paralelas y tubos circulares. En la Figura 3.4 se muestra un sistema de sedimentación rápida, usando placas paralelas horizontales. Se presupone que todas las partículas suspendidas tienen la misma velocidad de caída y su correspondiente valor S que es menor al S_c del sistema.

Considere la trayectoria de la partícula (J) la cual se inicia en E_0 a la entrada y que termina en E_2 , el cual es el punto inferior del sedimentador en la salida lateral, q_1 es la porción del flujo total -

"Q" que entra al sedimentador en E_0 y E_1 y q_2 es la porción remanente que entra sobre E_0 (Figura 3.4). Las partículas suspendidas q_1 se sedimentarán completamente en el sedimentador, ya que sus trayectorias deben finalizar entre E_1 y E_2 , por otro lado, las partículas suspendidas en q_2 permanecerán en el flujo. Por lo tanto, la eficiencia en la remoción fraccional (E_{ff}), valdrá:

$$E_{ff} = \frac{\int_0^y u \, dy}{v_0 d} = \int_0^Y \frac{u}{v_0} \, dY \quad \dots(25)$$

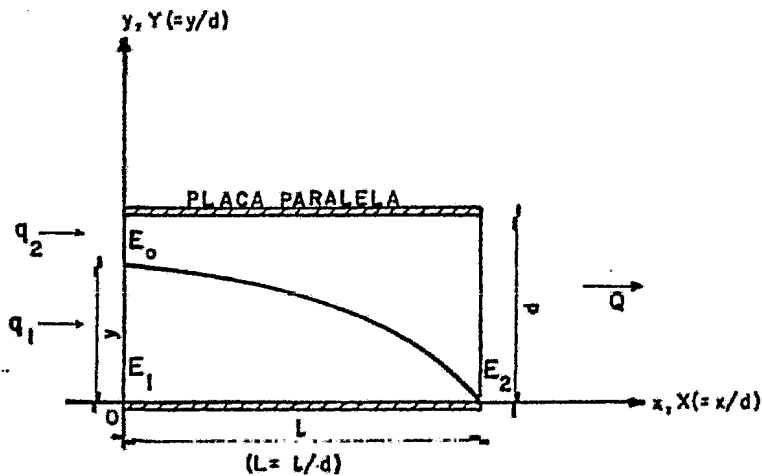


FIGURA 3.4 TRAYECTORIA DE LA PARTICULA "J"

Substituyendo la ecuación (18) en ésta última e integrado, se tiene:

$$E_{ff} = 3Y^2 - 2Y^3 \quad \dots(26)$$

Substituyendo las siguientes condiciones de límite para la trayectoria de la partícula (J) en la ecuación (9):

$$\text{Para } x=0 \Rightarrow X=0 \quad \text{y para } Y=y \Rightarrow Y=Y \quad \dots(27)$$

$$\text{Para } x=L \Rightarrow X=L \quad \text{y para } y=0 \Rightarrow Y=0 \quad \dots(28)$$

Se obtiene el siguiente resultado:

$$3Y^2 - 2Y^3 = \frac{v_s}{v_o} L \quad \dots(29)$$

Por lo tanto, para placas paralelas horizontales, la eficiencia vale:

$$E_{ff} = \frac{v_s}{v_o} L = S \quad \dots(30)$$

Mientras que para tubos circulares se obtiene la siguiente expresión:

$$E_{ff} = 1 + \frac{2}{\pi} (2\alpha^3\beta - \alpha\beta - \sin^{-1}\beta) \quad \dots(31)$$

Donde:

$$\alpha = \left(\frac{3}{4} S\right)^{1/3}$$

$$\beta = \sqrt{1 - \alpha^2}$$

$$S = \frac{v_s}{v_0} L \quad (\text{ya que } \theta = 0)$$

La ecuación (31) indica que la eficiencia de la remoción fraccional es solamente función de S. Esto muestra la utilidad del valor S para caracterizar el funcionamiento de los sistemas de sedimentación rápida.

La Figura 3.5 muestra las gráficas de las ecuaciones (30) y (31).

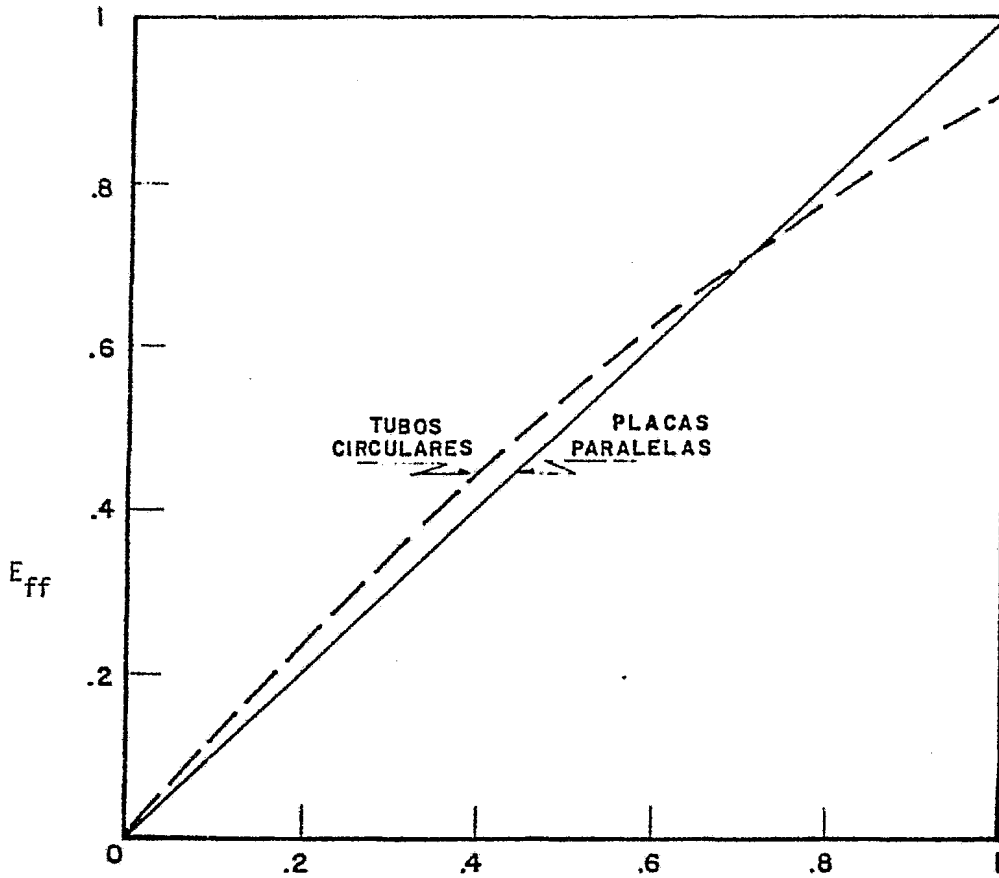
Nótese que la eficiencia de la remoción fraccional es menor que la unidad para $S = 1$, en el caso de sedimentadores de tubos circulares, ya que $S_c = 4/3$ para estos sistemas. Además estos sedimentadores de tubos tienden a tener mejores eficiencias fraccionales que las placas paralelas para partículas suspendidas más ligeras y más pequeñas.

3.4 Influencia del flujo laminar.

En el análisis teórico de sedimentadores de alta carga superficial se supuso flujo laminar. En las instalaciones prácticas, generalmente los sedimentadores tienen una zona de entrada con una sección grande. Entonces, en la entrada del sedimentador existe una región de transición, en la cual el flujo uniforme cambia gradualmente a flujo laminar debido a la influencia de la capa límite. La longitud relativa L' para esta región de transición para el caso del tubo circular puede estimarse de la siguiente forma:

$$L' = 0.058 \frac{v_0 d}{\nu}$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del fluido. Como una aproximación, la ecuación se presupone que es aplicable a otros tipos de sedimentadores. El significado e influencia de L' se discute en la



$$\frac{v_s}{v_o} L = S; \quad \text{o sea } \frac{v_s l}{v_o d} = S$$

FIGURA 3.5 EFICIENCIA FRACCIONAL DE SEDIMENTACION
($\theta = 0^\circ$)

siguiente sección.

3.5 Consideraciones de diseño.

Ya que el funcionamiento de un sistema de sedimentación rápida varía con la configuración del sedimentador, es interesante saber las ventajas relativas de los varios tipos de sedimentadores. Para simplificar, sólo se considerarán los sedimentadores de flujo horizontal.

Para valores dados de la carga superficial (v_{sc}) " v_0 " y " d " y suponiendo que $\theta = 0^\circ$, la ecuación (21) se puede escribir como:

$$\frac{S_c}{\lambda} = \text{Constante}$$

La ecuación indica que mientras mayor es el valor de S_c , mayor será la longitud requerida del sedimentador para lograr la misma eficiencia teórica. Usando este criterio, el orden de preferencia debiera ser: placas paralelas y conductos cuadrados. Los pasajes amplios y estrechos formados por placas paralelas, serían una mejor selección, sin embargo, el flujo tiende a ser inestable en un canal amplio, y también existen dificultades en mantener un influente de distribución uniforme.

Una posible solución es usar una relación ancho profundidad entre dos y cinco. Los tubos circulares son ligeramente más económicos que los conductos cuadrados. Esto puede compensarse fácilmente por el hecho de que las secciones cuadradas utilizan el espacio mucho más eficientemente que las circulares.

La existencia de una región de transición a la entrada de un sedimentador complica la situación. Probablemente, el flujo en la región de transición debiera ser una mezcla de flujo laminar y de flujo uniforme. Ya que como lo indican los valores de S_c , la eficiencia de un sistema de sedimentación rápida con flujo uniforme es comparable o me

Por que el de un sistema similar con flujo laminar, la existencia de la región de transición no debería afectar significativamente la eficiencia de la remoción del sistema.

Para propósitos prácticos, se sugiere que L' se sume o agregue a L , - la longitud relativa de diseño basada en flujo laminar totalmente establecido. Esto proporcionará un factor de seguridad en el diseño. - Sin embargo, se sugiere que en los casos donde L' sea mayor L se utilice una longitud relativa total de $2L$ en lugar de la suma de L' más L .

No obstante se requiere mayor investigación experimental para comprobar la solidez de estas sugerencias.

El problema más difícil de un sistema de sedimentación rápida consiste en la remoción de los lodos sedimentados en el sedimentador. Un método ya usado es instalar los módulos o placas con un cierto ángulo, de tal manera que los lodos puedan resbalar hacia abajo por su propio peso. Esto podría significar cierto sacrificio en la eficiencia del sistema. Se requiere de mucha investigación en esta área para - desarrollar métodos eficaces de eliminación de lodos.

La práctica común en México y otros países es utilizar ángulos de inclinación de 60° , para permitir a las partículas deslizarse hasta el fondo del tanque.

4. CONCLUSIONES.

Como resultado del material presentado en este trabajo es conveniente hacer resaltar a manera de conclusiones, las principales ventajas que en general poseen los sedimentadores de alta velocidad (alta carga superficial) o modernos antes descritos en relación con los sedimentadores convencionales.

Los sedimentadores de alta velocidad, al admitir cargas superficiales mucho mayores (de 120 a 300 m³ / m² día) que en los sedimentadores convencionales (de 15 a 60 m³ / m² día), permiten reducir notablemente el tamaño de los sedimentadores, o sea, la obra civil y por consiguiente el costo de los mismos. Esto representa una ventaja muy grande en el caso de las plantas de tratamiento nuevas, pero también en el caso de las plantas existentes, pues al modificar un sedimentador convencional para convertirlo en un sedimentador de alta velocidad, puede incrementarse notablemente la capacidad del mismo con un pequeño aumento en el costo de la obra.

En cuanto a la calidad del agua por sedimentar, los sedimentadores de alta carga superficial permiten una mayor flexibilidad en la operación, debido a sus propias características, en contraste con los sedimentadores convencionales que requieren un mayor cuidado en su operación, si se quieren obtener eficiencias comparables en su funcionamiento.

Por lo que se refiere al manejo de lodos, los sedimentadores de alta carga superficial, también presentan la ventaja de que en ellos se obtienen los lodos más concentrados y además de que la zona de asentamiento y acumulación de lodos está bastante bien definida, lo que permite efectuar su extracción con mayor facilidad que en el caso de los sedimentadores convencionales, ya que en estos últimos, los lodos se dispersan en toda el área del fondo del sedimentador, lo cual dificulta su acumulación y extracción.

Con relación al funcionamiento hidráulico, también puede mencionarse que en el caso de los sedimentadores de alta carga superficial por su mismo diseño, se evitan o reducen los problemas que muchas veces tienen los sedimentadores convencionales, debido a los cortos circuitos y a las corrientes de convección.

Independientemente de que se obtiene una mejor eficiencia en los sedimentadores de alta carga superficial, todavía tienen la ventaja adicional de que se puede tener cierta flexibilidad en la eficiencia de su operación, ajustando tanto la separación como la inclinación de las celdas o placas, para adecuarlos lo mas convenientemente posible a cada caso particular de acuerdo a la calidad del agua por sedimentar.

5. EJEMPLOS DE APLICACION.

Se presentan dos casos, el primero consiste en diseñar un sedimentador en base a los datos del proyecto y un valor seleccionado de v_0 . - El segundo consiste en rehabilitar un tanque existente cuya capacidad resulta insuficiente.

CASO A

DATOS DE PROYECTO:

Q máx. diario = $1 \text{ m}^3/\text{seg.}$

Temp. agua = 10° C

Placas de asbesto cemento de $2.40 \times 1.20 \text{ m.}$

1) DETERMINACION DE LA VELOCIDAD ENTRE PLACAS

$$v_n = \frac{v_s (\sin \theta + L \cos \theta)}{s_c} \quad \dots(1)$$

Donde: v_0 = Velocidad entre placas

v_s = Carga superficial equivalente

θ = Angulo de inclinación entre placas

s_c = Factor de forma

L = Longitud relativa

Para este caso los valores de cada término serán:

$$v_s = 30 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día (el cual se selecciona)}$$

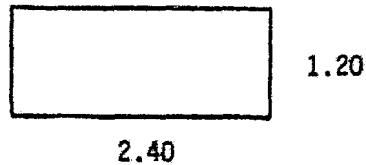
$$\theta = 60^\circ \text{ que es el ángulo más empleado}$$

$$S_c = 1, \text{ valor del factor para el caso de placas}$$

Para determinar la longitud relativa (L), se tiene:

$$L = \frac{\lambda}{d}$$

Donde: λ = longitud de la placa



d = espaciamiento entre placas

Por lo tanto, considerando $\lambda = 1.0 \text{ m}$ y $d = 5 \text{ cm}$.

$$L = \frac{1.0}{0.05} \Rightarrow L = 20$$

Empleando la ecuación (1), se tiene:

$$v_o = \frac{30 (\text{sen } 60^\circ + 20 \text{ cos } 60^\circ)}{1} \Rightarrow v_o = 325.98 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ X día}$$

2) Revisión del Número de Reynolds (R)

Para que el flujo sea laminar se debe cumplir $R \leq 250$, por lo tanto:

$$R = \frac{v_o d}{\nu}$$

Donde: $v_o = 325.98 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día} = 0.38 \text{ cm/seg.}$

$$d = 5 \text{ cm.}$$

$$\nu = 1.31 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{seg.}$$

Por lo tanto, sustituyendo valores, se tiene:

$$R = \frac{0.38 \times 5}{1.31 \times 10}$$

$$R = 145 < 250$$

3) Revisión de la longitud adicional.

$$L' = 0.058 \left(\frac{v_o d}{\nu} \right) = 0.058 R$$

$$L' = 0.058 (145)$$

$$L' = 8.41$$

Por lo tanto, la longitud relativa total, valdrá:

$$L_T = L + L'$$

$$L_T = 20 + 8.41 = 28.41$$

Y a la vez $L_T = \frac{\lambda}{d}$ de donde:

$$\lambda = L_T (d) = 28.41 (0.05)$$

$$\lambda = 1.42 \text{ m} > 1.20 \text{ m}$$

Por lo tanto es necesario rediseñar el tanque, por lo que habrá que repetir los pasos 1, 2 y 3.

1) Ahora supondremos una $\lambda = 0.80 \text{ m}$

$$\text{Por lo tanto } L = \frac{0.8}{0.05}$$

$$L = 16$$

Empleando la ecuación (1):

$$v_o = \frac{30 (\text{sen } 60^\circ + 16 \text{ cos } 60^\circ)}{1}$$

$$v_o = 265.98 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$$

2) Revisión del Número de Reynolds

$$R = \frac{0.31 \times 5}{1.31 \times 10}$$

$$R = 117.5 < 250$$

3) Revisión de la longitud adicional

$$L' = 0.058 (117.50)$$

$$L' = 6.81$$

Por lo que la longitud relativa total, vale:

$$L_T = 16 + 6.81 = 22.81$$

Finalmente:

$$l = 22.81 (0.05)$$

$$l = 1.14 < 1.20 \text{ m}$$

Aceptable

4) Determinación de la carga superficial de diseño.

$$C_s = v_o \text{ sen } \theta = 265.98 (\text{sen } 60^\circ)$$

$$C_s = 230.35 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}$$

5) Cálculo del área horizontal:

Sabiendo que:

$$A = \frac{Q}{C_s}$$

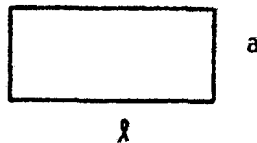
$$A = \frac{86400 \text{ m}^3/\text{día}}{230.35 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ día}}$$

$$A = 375 \text{ m}^2$$

6) Dimensionamiento

La relación entre largo y ancho de estos tanques varía de 1:1 hasta 4:1

Si empleamos una relación de 2:1, tenemos:



$$A = l \times a$$

$$A = 2a^2$$

$$a = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

$$a = \sqrt{\frac{375}{2}}$$

\Rightarrow

$$a = 13.70 \text{ m}$$

Finalmente:

$$l = 2(13.70) \Rightarrow l = 27.40 \text{ m}$$

Por lo tanto, el tanque será de:

$$a = 14 \text{ m}$$

$$l = 28 \text{ m}$$

CASO B

Para este caso se tiene una planta de tratamiento con sedimentadores horizontales convencionales trabajando con 220 lt/seg (19000 m³/día) y se requiere duplicar su capacidad de sedimentación, conservando la misma carga superficial. La planta tiene tres sedimentadores de 8 m de ancho por 20 m de largo y 4 m de profundidad.

1) Determinación de la carga superficial actual:

$$C_s = \frac{19000}{20 \times 8 \times 3} = 39.6 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$$

2) Determinación del área de sedimentación acelerada:

En este punto se considerará $\theta = 60^\circ$ y $S_c = 1$

$$l = 1.20 \text{ m} \quad (\text{longitud de la placa})$$

$$L_T = \frac{Q}{d} = \frac{1.20}{0.06} = 20$$

$$A = \frac{Q}{C_s (\sin \theta + L \cos \theta)}$$

$$A = \frac{38000}{39.6 (0.866 + 20 \times 0.5)} = 88.3 \text{ m}^2$$

Como el ancho del tanque es de 8 m, habría de cubrir con placas de asbesto cemento una longitud de:

$$\frac{88.3}{8} = 11.03 \text{ m}$$

Número de placas: $\frac{11}{0.06} \Rightarrow l = 184$ (por fila de 2.44 m)

Como en cada sedimentador caben tres filas, el número total de placas será de $184 (3) (3) = 1656$. Las placas se extenderían hasta $11 + 1.84 = 12.84$ m, para un espesor de 1 cm de placa, como muestra la figura 5.1 y podrán ser soportadas por vigas de concreto longitudinales, apoyadas en columnas y vigas transversales.

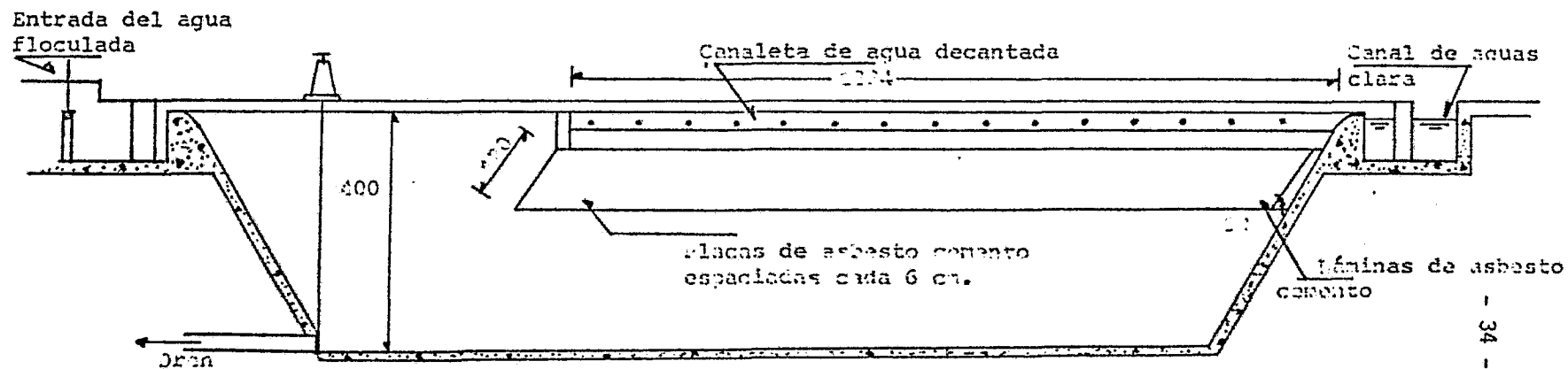


Figura 5.1 Sedimentador convencional con placas de asbesto cemento para sedimentación acelerada.

NOTA: Acotaciones en cm.

BIBLIOGRAFIA

JOURNAL WATER POLLUTION C. F.
Art. High-Rate Sedimentation
Por. K.M. Yao
Febrero, 1970.

Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
(CEPIS) 1973

"Agua su Calidad y Tratamiento"
American Water Works Association
UTEHA Primera edición en español
Barcelona, 1968

"Control de Calidad y Tratamiento del Agua"
American Water Works Association
Mc. Graw-Hill Book Company, Edición en español
1975

"Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales"
Fair Geyer y Okun
Edit. Limusa
Méx. 1979.