

2.4. SEDIMENTACION

2.4.1. Definición. Se entiende por sedimentación a la remoción, por efecto gravitacional, de las partículas en suspensión en un fluido y que tengan peso específico mayor que el del fluido. No todas las partículas en suspensión sedimentan en un intervalo dado de tiempo. Las que lo hacen en el intervalo elegido son los llamados "sólidos sedimentables".

La sedimentación como tal es un fenómeno netamente físico que se relaciona exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua.

2.4.2. Tipos de sedimentación. En términos generales puede decirse que hay dos tipos de sedimentación: de partículas discretas y la floculenta o de partículas aglomerables. Un estudio más profundo del fenómeno permite identificar otros tipos de sedimentación como son: zonal o retardada y por compresión.

2.4.2.1. Sedimentación de partículas discretas. Se entiende por sedimentación simple o de partículas discretas al proceso en el cual una partícula o conjunto de partículas que se encuentran en suspensión en un fluido, se depositan manteniendo su forma durante el recorrido. Este es el caso que ocurre en los desarenadores.

2.4.2.2. Sedimentación de partículas aglomerables. En el tratamiento de aguas, la sedimentación se usa después de un proceso de coagulación y floculación. En este caso las partículas pueden flocular durante la sedimentación de manera que forman aglomerados de diferentes tamaños, formas y pesos. Al contrario de lo que ocurre en la sedimentación discreta, la trayectoria de las partículas no es recta sino curva, pues las partículas pasan a ganar mayor velocidad a medida que aumentan de tamaño y peso. De esta forma, todo el proceso depende de las características de floculación y sedimentación de las partículas.

No existe un modelo matemático teórico capaz de representar el fenómeno, por lo cual se debe recurrir a la determinación experimental, mediante ensayos de laboratorio o plantas piloto, con el propósito de predecir las eficiencias teóricas remocionales en función de cargas superficiales o velocidades de asentamiento preseleccionadas; para ello debe prevenirse que la muestra de la suspensión sea representativa y que se mantenga a temperatura constante. El ensayo puede realizarse en columnas de sedimentación o basándose en la prueba de jarras.

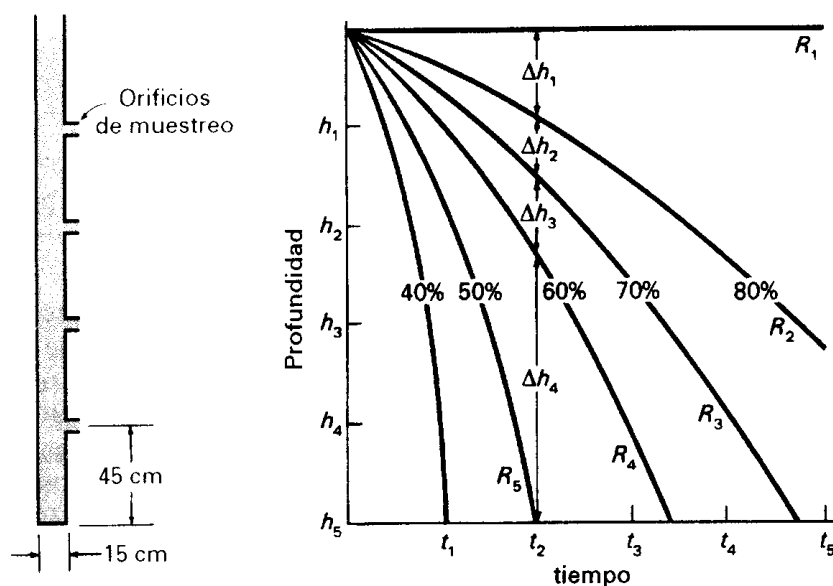


Figura S-1. Columna de sedimentación y curvas de igual eliminación porcentual para partículas floculentas

2.4.3. Tanque Sedimentador Ideal. Para comprender lo que sucede en la sedimentación tipo I, se desarrolló, con base en los estudios de Hazen (1904) y Camp (1946), la teoría de la sedimentación ideal, que se desarrolla con base en las siguientes consideraciones:

- La dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos de la zona de sedimentación.
- La concentración de partículas de cada tamaño es la misma en todos los puntos de la sección vertical, al comienzo de la zona de entrada.
- Una partícula queda removida cuando llega al fondo.

Para propósitos teóricos, se acostumbra dividir el tanque de sedimentación en 4 zonas: (Fig. S-2)

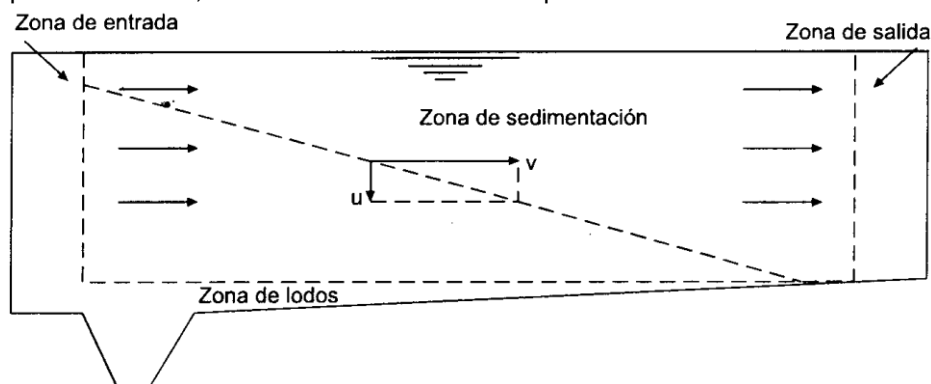


Figura S-2. Zonas hipotéticas en un tanque de sedimentación rectangular

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

2.4.3.1. Zona de entrada. Tiene como objetivos fundamentales:

- Distribuir el agua tan uniformemente como sea posible en toda el área transversal del decantador.
- Evitar chorros de agua que provoquen alteraciones en la zona de sedimentación.
- Disipar la energía que trae el agua.
- Evitar las altas velocidades que pueden perturbar los sedimentos del fondo.

Dependiendo del tipo de sedimentación, hay varias formas de estructuras de entrada: plataformas horizontales perforadas con orificios, paredes o tabiques perforados, etc. El número y forma de los orificios también es muy variado.

2.4.3.2. Zona de sedimentación. Es aquella en la cual se eliminan propiamente los sólidos indeseables. Sus características de diseño varían según el tipo de sedimentación y la clase de agua a tratar.

2.4.3.3. Zona de lodos. Tiene como objetivo servir de depósito de las partículas eliminadas. Su forma o diseño depende de la cantidad de lodos, su distribución, el tiempo de permanencia, su forma de remoción, etc.

2.4.3.4. Zona de salida. Una salida adecuada debe garantizar el no arrastre de las partículas ya depositadas. Hay gran variedad de zonas de salida, empleándose por ejemplo vertedores de rebose, canaletas de rebose, orificios, etc.

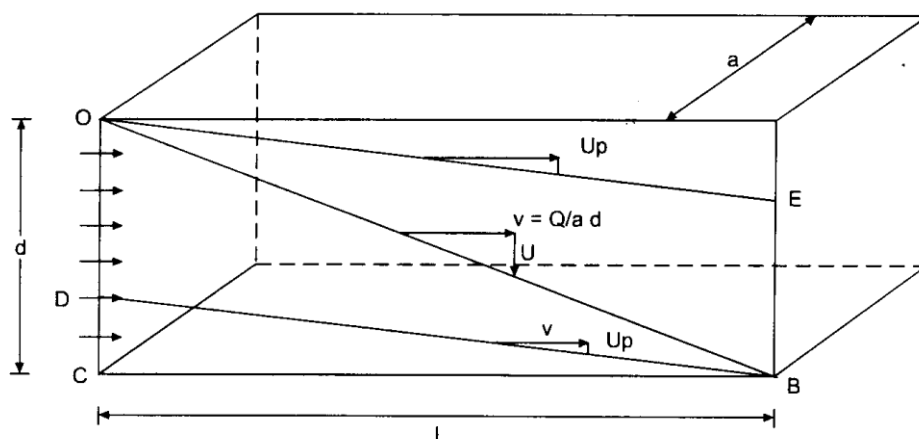


Figura S-3. Sedimentación de Partículas discretas

Una partícula con velocidad de asentamiento U y transportada horizontalmente con velocidad v , seguiría una trayectoria rectilínea inclinada como resultado de la suma del vector de velocidad de flujo y del vector de velocidad de asentamiento, indicada por la recta OB .

Por triángulos semejantes, como se deduce de la figura S-3:

$$\frac{U}{v} = \frac{d}{L}$$

Por lo tanto, en función del caudal, Q , y del área superficial, A ,

$$U = \frac{vd}{L} = \frac{Qd}{aL} = \frac{Q}{aL} = \frac{Q}{A} = \text{carga superficial}$$

La relación Q/A , carga superficial, tiene las dimensiones de velocidad, generalmente m/d , e indica que, teóricamente, la sedimentación es función del área superficial del tanque e independiente de la profundidad.

Todas las partículas discretas con velocidad de asentamiento igual o mayor que U serán completamente removidas, es decir que el 100% de remoción ocurriría cuando todas las partículas en la suspensión tuviesen velocidades de asentamiento por lo menos iguales a U .

Por el contrario, si consideramos una partícula con velocidad de asentamiento U_p menor que U , solamente una fracción de ellas será removida. En efecto, como se observa en la figura, solamente las partículas con velocidad $U_p < U$ que alcancen el tanque dentro de la altura DC serán removidas.

Además, si el área del triángulo con catetos OC y L representa el 100% de remoción de partículas, entonces la relación de remoción R , fracción removida de partículas con velocidad de asentamiento U_p , será:

$$R = \frac{DC}{OC} = \frac{U_p}{U} = \frac{AU_p}{Q} = \frac{aLU_p}{Q}$$

La ecuación anterior fue descubierta por Hazen en 1904 y demuestra que para cualquier caudal Q , la remoción de material suspendido es función del área superficial del tanque de sedimentación e independiente de la profundidad.

En otras palabras, que la remoción y, por consiguiente, el diseño de sedimentadores depende sólo de la carga superficial.

2.4.4. Sedimentación Floculenta

En este tipo de sedimentación es necesario tener en cuenta las propiedades floculentas de la suspensión, además de las características de sedimentación de las partículas.

Dos partículas que se aglomeran durante su asentamiento pierden su velocidad individual de sedimentación y, por consiguiente, se sedimentan con otra velocidad característica de la nueva partícula formada, generalmente mayor que las velocidades originales. Este tipo de sedimentación, conocido como sedimentación floculenta, es el tipo de sedimentación más común en purificación y tratamiento de aguas.

En aguas turbias de ríos, el material suspendido consiste principalmente en partículas finas de sílice, arcilla y limo; la densidad relativa de dichas partículas varía entre 2,6 para granos finos de arena hasta 1,03 para partículas de lodo floculado con 95% de agua. Las partículas vegetales suspendidas tienen, según su contenido de agua, densidades relativas entre 1,0 y 1,5. El floc de alumbre y de hierro varía en densidad según el contenido de agua y el tipo de sólido atrapado en él, con densidades relativas para el floc de alumbre entre 1,002 y 1,18 y de 1,002 a 1,34 para el floc de hierro.

Por conveniencia, en muchos casos, se supone que la sedimentación de una suspensión es del tipo de partículas discretas, con el objeto de predecir más sencillamente las velocidades de asentamiento y la remoción de material suspendido; sin embargo, para suspensiones de partículas floculentas es necesario el análisis de sedimentación para tener en cuenta dicho efecto sobre el proceso de asentamiento.

En la sedimentación floculenta, tanto la densidad como el volumen de las partículas cambia a medida que ellas se adhieren unas a otras mediante el mecanismo de la floculación y la precipitación química. Consecuentemente el peso de la partícula en el agua, W , y la fuerza de arrastre, F , cambian y el equilibrio de fuerzas verticales se rompe. Como resultado, las velocidades de asentamiento de las partículas cambian con el tiempo y la profundidad, es decir que la remoción es función no sólo de la carga superficial sino también de la profundidad y el tiempo de retención. Hasta el presente, no existe formulación matemática que evalúe exactamente todas las variables que afectan la sedimentación de partículas floculentas y por ello es necesario efectuar los análisis con columnas de sedimentación (Figura S-1).

2.4.5. Sedimentadores reales. Los sedimentadores reales distan en su comportamiento de aquello que la teoría de la sedimentación ideal establece. Así que se hace necesario establecer con claridad las diferencias que se presentan.

- **En cuanto al flujo.** En la sedimentación ideal se considera que el flujo es estable y uniforme, pero en la realidad lo único que se puede hacer es minimizar los efectos que sobre la estabilidad y uniformidad del flujo ejercen los siguientes fenómenos:
 - **Corrientes de densidad.** Producidas en la masa de agua por cambios de temperatura y/o de la concentración de sólidos.
 - **Corrientes debidas al viento.** Que afectan preferencialmente las capas superiores.
 - **Corrientes cinéticas.** Ocasionadas por deficiencias en la zona de entrada y/o de salida y/o por obstrucciones en la zona de sedimentación.
- **En cuanto a la remoción de partículas.** Según la sedimentación ideal las partículas que llegan al fondo quedan removidas y no se resuspenden. En la realidad se ha encontrado que si bien es cierto que la mayoría de las partículas que llegan a la zona de lodos quedan retenidas y no se vuelven a suspender, es evidente que algún porcentaje del total a remover puede resuspenderse y salir en el efluente del sedimentador. Esta resuspensión puede presentarse por alguna de las siguientes causas:
 - Corrientes de densidad y cinéticas, explicadas anteriormente.
 - Operación del sistema de deslodo. Durante el recorrido del "barrelodos" se pueden

suspender algunas de las partículas ya sedimentadas.

En cuanto a la eficiencia de la sedimentación. El desarrollo teórico concluye, que para partículas discretas la eficiencia de la sedimentación de las partículas, es independiente de la profundidad y del tiempo de retención del tanque. En la realidad, para el diseño de los tanques se debe tener en cuenta el efecto que producirá la velocidad de flujo horizontal sobre las partículas sedimentadas. Si esta velocidad es mayor que la de arrastre de las partículas ya sedimentadas, éstas podrán resuspenderse.

2.4.6. Sedimentación de alta velocidad. De acuerdo con la teoría presentada anteriormente, si se coloca en el sedimentador una bandeja horizontal a una altura h , suficientemente menor que d se podrían recoger partículas que por su velocidad no alcanzan a ser removidas en el sedimentador convencional, como la indicada por la trayectoria OE (Figura S-3).

Decía al respecto Hazen en 1904: "Como la acción del tanque sedimentador depende de su área y no de su profundidad, una subdivisión horizontal produciría una superficie doble para recibir sedimentos, en lugar de una sencilla, y duplicaría la cantidad de trabajo. Tres de aquellas subdivisiones la triplicarían y así sucesivamente. Si el tanque pudiera ser cortado por una serie de bandejas horizontales, en un gran número de celdas de poca profundidad, el incremento de eficiencia sería muy grande". Y luego continuaba: "El problema práctico más difícil de resolver es el método de limpieza. Todo el aparato debe poderse limpiar en forma fácil y barata. Esta operación deber hacerse con más frecuencia, por cuanto con la profundidad reducida a un pequeño valor, la cantidad de agua que pasa por un espacio dado en un tiempo dado, será proporcionalmente mayor, y con ella la cantidad de lodos depositados".

Esta idea fue ensayada repetidas veces durante los siguientes 60 años. En 1915 se estableció una patente sobre tanques que tenían varios compartimentos horizontales, los cuales eran barridos continuamente por un colector de lodos que concentraba el fango en un tubo central. En 1946, Camp presentó el diseño de un sedimentador con bandejas espaciadas a 15 cm entre sí con un sistema de recolección mecánica de lodos. Algunas plantas de tratamiento, como las de Washington, Estocolmo, Tokio y París, adoptaron tanques sedimentadores de dos o tres pisos, formados por fondos horizontales. En 1955 se publicó un estudio en el cual se concluía que las fallas de los sedimentadores de celdas se debían principalmente al estudio deficiente de las características hidráulicas del flujo, y se sugería que se conservara el Número de Reynolds (N_R) en los sedimentadores de este tipo por debajo de 500 (régimen laminar). La mayoría de los sedimentadores trabajaban con N_R entre 20.000 y 200.000

No obstante el éxito obtenido en algunos casos en la aplicación de estas teorías, el mayor problema enfrentado en el diseño del sedimentador de bandejas, era la dificultad en la remoción de los lodos recolectados en ellas, tal como lo previó Hazen. La solución a este problema, presentada por Culp y sus colaboradores en 1967 y 1968, volvió a despertar interés sobre el tema.

2.4.6.1. Descripción del sistema. Los sedimentadores de alta velocidad consisten esencialmente en una serie de tubos (circulares, cuadrados o hexagonales) o láminas planas paralelas colocadas en un tanque apropiado con un ángulo θ de inclinación, de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar. Esto permite cargas superficiales entre 4 y 10 veces mayores que las usadas en sedimentadores horizontales, o sea, entre 120 y 300 $m^3/m^2/día$, cuando los sedimentadores ordinarios trabajan con 20-60 $m^3/m^2/día$. Los periodos de sedimentación son usualmente menores de 10 minutos. La ventaja de trabajar con velocidades de asentamiento de 0,14-0,42 cm/seg está en que se obtiene un flujo mucho más estable que el que existe en los sedimentadores ordinarios, en los que la velocidad de asentamiento rara vez excede de 0,07 cm/seg y generalmente es menor.

Las tres diferencias básicas entre los sedimentadores convencionales y los de flujo laminar o de alta rata son:

- El fondo del decantador no es horizontal sino inclinado
- La profundidad del decantador es muy baja (unos pocos centímetros) de manera que se deben

construir un considerable número de celdas superpuestas para poder tratar los volúmenes de agua requeridos.

- El flujo del decantador es laminar con $N_R < 500$.

Teóricamente existe una diferencia básica entre un decantador que trabaja con flujo laminar con N_R entre 100 y 500 (como es el de placas) y otro que trabaja con flujo turbulento como es el convencional con N_R entre 10.000 y 250.000. Esta diferencia teórica fundamental debe reflejarse en la forma como se diseñan unos y otros, pues no se puede considerar que un decantador de alta rata es solamente uno de flujo horizontal con placas dentro.

Lo más importante en las unidades convencionales es conseguir que el agua se desplace con flujo de pistón en forma homogénea (sin corrientes de densidad) y con el mínimo de turbulencias posibles. La mayor dificultad de ellos es poder mantener sus condiciones hidráulicas estables debido a la muy baja velocidad de avance de las masas de agua. Para ello se han dado ciertas especificaciones sobre relación ancho-largo-profundidad que obviamente no se aplican para decantadores de placas.

En estos últimos lo más importante es conseguir una distribución uniforme en todo el fondo del decantador y una recolección también muy uniforme del efluente encima de las placas, a fin de obtener una repartición lo más equilibrada posible del flujo en toda el área. Cada espacio entre placas debe considerarse un pequeño decantador que tiene que recibir la misma cantidad de agua que los otros. Por tanto las especificaciones dadas para decantadores convencionales no deben tenerse en cuenta en los de alta rata.

Cargas Superficiales

En América Latina los decantadores de placas se han venido calculando con cargas entre 120 y 185 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ con eficiencia de remoción por encima del 90%.

Esto no implica que no puedan utilizarse cargas más altas en donde se hayan hecho experiencias piloto y se haya demostrado que tal cosa es factible sin deterioro notable del efluente.

A falta de experiencias piloto Yao (1972) sugiere el uso de las columnas sedimentación de Camp, o las pruebas de jarras utilizando para ambos casos un factor de correlación de 2, como medida de seguridad, esto es, dividiendo por 2 la carga superficial que se obtenga en las pruebas.

Materiales de Construcción y Forma

Dado el gran número de elementos planos que hay que introducir en los decantadores de alta rata, el problema básico para resolver es conseguir materiales de muy bajo costo unitario y que resistan largo tiempo bajo el agua. Esto es un problema más económico que técnico.

Los elementos que se han ensayado con éxito son: El asbesto-cemento, la madera y el plástico.

1. Asbesto-Cemento

Las placas de asbesto-cemento, cuyo tamaño normal es de 1.20 m de ancho 2.40 m de largo, fueron, sin lugar a dudas, el material más comúnmente utilizado durante mucho tiempo por su bajo costo, su resistencia a la corrosión y su disponibilidad en todos los países. Se han utilizado con éxito láminas de 10 mm de espesor pero después se vio que eran también adecuadas las de 6 mm a 8 mm siempre y cuando hayan sido fabricadas con fibra de asbesto largo.

Una de las objeciones que han sido presentadas contra las láminas de asbesto-cemento es su posible deterioro en aguas ácidas. Se puede decir que las placas de A.C. se corroen en todos los casos en que el cemento Portland es atacado y que en términos generales es cuando:

- a. El pH es inferior a 7
- b. El contenido de CO_2 libre es mayor de 3.5 mg/l.
- c. El contenido de sulfatos, como SO_4 , es mayor de 1500 mg/l.

A pesar de las ventajas mencionadas, en los últimos años ha disminuido mucho el uso de los productos de asbesto-cemento que estén en contacto con el agua. Una alternativa que se ha desarrollado consiste en utilizar otro tipo de material en lugar del asbesto, por lo cual en la actualidad se está trabajando también con láminas planas de fibro-cemento.

2. Madera

La madera puede durar mucho tiempo bajo el agua siempre y cuando permanezca húmeda y no sufra periodos alternativos de hidratación y desecación. Se les puede dar diferentes tipos de tratamiento para garantizar una mayor durabilidad. Sin embargo su uso puede resultar más costoso que otras soluciones.

3. Plástico.

El plástico es un material ideal para hacer sedimentadores de alta rata, por su bajo peso y su manejabilidad. Sin embargo su costo es relativamente alto. Comercialmente se consiguen módulos de varias dimensiones, muy rápidamente adaptables a los distintos casos que se puedan presentar.

Sistema de Entrada

La entrada del flujo bajo las placas resultó ser mucho más importante de lo que consideró en un principio. Inicialmente se dejó una cámara previa de sedimentación horizontal relativamente grande antes de que el flujo llegara a la zona de decantación acelerada propiamente dicha. Pero se ha visto, que esto es innecesario y no da ningún margen de seguridad. El agua floculada debe entrar directamente debajo de las placas. Sin embargo, la velocidad con que ella entre, determina la forma como el flujo se distribuya en las diferentes celdas.

Sistema de Salida

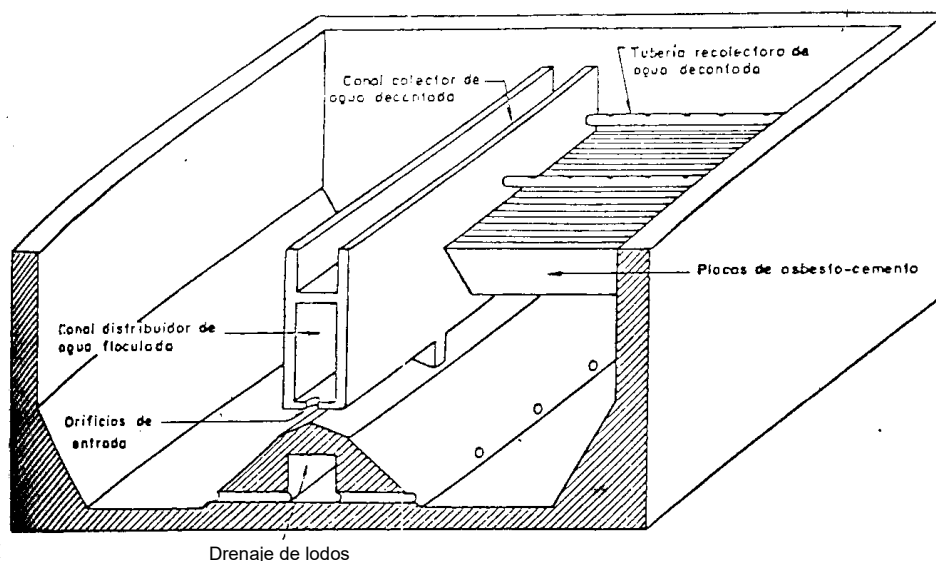
La uniformidad con la cual las masas de agua ascienden por entre las placas, depende tanto del sistema de salida como del de entrada. Por eso debe ponerse gran cuidado en el proyecto de esta parte del sedimentador de alta rata.

Se ha observado que cuando se construyen vertederos de salida solamente al final del tanque, al estilo del sistema tradicional, la eficiencia del decantador de placas disminuye considerablemente, debido a que no trabaja toda el área cubierta por ellas sino solo la que se aproxima a los vertederos y el resto actúa como zona muerta.

Para conseguir una extracción uniforme del flujo puede hacerse un canal central recolector y canales laterales o un canal central recolector y tuberías perforadas laterales. Ambos sistemas funcionan correctamente siempre y cuando estén bien diseñados.

Cuando se usan canales laterales, el espaciamiento "x" entre los bordes de ellos debe ser igual como máximo al doble de la altura "y" de la lámina de agua sobre las placas. O sea que $x = 2y$. Empero, produce resultados más confiables hacer $x = 1.5y$. Debe evitarse el hacer vertederos de bordes lisos porque cualquier desigualdad en la nivelación de ellos (aunque sea de pocos milímetros) produce desigualdades apreciables en la cantidad de agua extraída. Por eso cuando se usan vertederos de concreto hay que adosarles a los bordes láminas de acero apernadas con vertedero en V, que trabajen con tirantes de agua entre 5 y 10 cm u orificios laterales en los flancos de ellas con tirantes similares.

Los tubos perforados en la parte superior (como los que se observan en la figura) dan excelentes resultados, cuando cada orificio es del mismo diámetro, tiene una carga de agua de 5 a 10 cms sobre él y descarga libremente dentro del tubo, el cual no puede trabajar a sección llena. Esta última condición es básica para obtener que cada orificio extraiga la misma cantidad de agua. Los orificios, sin embargo, tienden a obstruirse cuando hay un gran crecimiento de algas y deben estarse limpiando.



El nivel máximo de agua en el canal central de recolección del efluente no debe ser mayor que el del centro de los tubos, a fin de asegurar la descarga libre de todos ellos. En el caso que se empleen canaletas laterales, su descarga en el canal central también debe ser libre.

El diámetro " d " de los orificios en tubos de asbesto-cemento se puede obtener, considerando un coeficiente (determinado experimentalmente) de $c = 0.9$.

2.4.6.2. Aplicaciones prácticas de los sedimentadores de alta velocidad. Los sedimentadores de alta velocidad pueden usarse para:

- Aumentar el flujo en sedimentadores sobrecargados sin perder eficiencia,
- Disminuir el área de sedimentación y, por tanto, la inversión de capital en nuevos diseños.

Dentro de los sedimentadores de alta velocidad existen muchas marcas comerciales, originarias de distintas partes del mundo, cada una de ellas con sus propias características en cuanto a materiales, sección, tamaño, etc., que permiten escoger precios y marcas según la mejor conveniencia del comprador.

No se debe olvidar la opción de tener este tipo de sedimentadores, mediante la construcción in situ de un sistema no patentado, que puede estar compuesto por placas lisas u onduladas, tubos de sección cuadrada, circular o de otra forma, siempre que cumplan con unos requisitos mínimos: deben ser durables en agua con pH ácido y no deben corroerse en presencia de iones $Al(III)$ y $Fe(III)$; deben tener superficies lisas que permitan un flujo laminar; no deben ser excesivamente quebradizos o demasiado elásticos.

Los materiales que cumplen en mayor o menor proporción estos requisitos son láminas planas u onduladas de asbesto-cemento, las láminas de triplex pintadas con barniz marino, láminas de plástico rectas u onduladas, etc.

Material adaptado de: Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Jorge Arboleda Valencia. Acodal, 1995
 Purificación del Agua. Jairo Alberto Romero Rojas, Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000
 Manual de Purificación del Agua. Jorge Arturo Pérez Parra. U. Nacional. Medellín. 2002