

CAPÍTULO 3
FLOCULADORES

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del floculador es proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta aplicando velocidades decrecientes, para promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que la suspensión de agua y flóculos salga de la unidad. La energía que produce la agitación del agua puede ser de origen hidráulico o mecánico. En este capítulo trataremos sobre el diseño de unidades de agitación hidráulica.

Entre los floculadores más conocidos se pueden citar, en primer lugar, las unidades de pantallas de flujo horizontal y vertical, las de medios porosos, la de tipo Alabama y Cox, y los floculadores de mallas.

2. PARÁMETROS Y RECOMENDACIONES GENERALES DE DISEÑO

Los gradientes de velocidad que optimizan el proceso normalmente varían entre 70 y 20 s^{-1} . En todo caso, en el primer tramo de la unidad el gradiente no debe ser mayor que el que se está produciendo en la interconexión entre el mezclador y el floculador (1).

- El gradiente de velocidad debe variar en forma uniformemente decreciente, desde que la masa de agua ingresa a la unidad hasta que sale (2).
- El tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos, dependiendo del tipo de unidad y de la temperatura del agua. En las zonas tropicales, donde las aguas presentan temperaturas por encima de los 20 °C, el tiempo de floculación necesario suele ser más breve, alrededor de 15 minutos. En cambio, en los lugares fríos, donde el agua tiene temperaturas de 10 a 15 °C, generalmente el proceso se optimiza con tiempos de retención iguales o superiores a 20 minutos (3).

- Para que el periodo de retención real de la unidad coincida con el de diseño, ella debe tener el mayor número posible de compartimientos o divisiones (4).
- El paso del mezclador al floculador debe ser instantáneo y deben evitarse los canales y las interconexiones largas.
- El tiempo de retención y el gradiente de velocidad varían con la calidad del agua (1,4). Por lo tanto, estos parámetros deben seleccionarse simulando el proceso en el laboratorio con una muestra del agua que se va a tratar (ver el procedimiento en *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo II, capítulo 11).
- Pueden operar indefinidamente sin riesgos de interrupción, debido a que solo dependen de la energía hidráulica. Por esta razón, son muy confiables en su operación.
- Por su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento, se considera a los floculadores como una tecnología apropiada para países en desarrollo.

3. UNIDADES DE PANTALLAS

Las unidades de pantallas son las más eficientes y económicas de todos los floculadores actualmente en uso. Debido a la gran cantidad de compartimientos que tienen, confinan casi perfectamente el tiempo de retención; el tiempo real es prácticamente igual al tiempo teórico (4) cuando la unidad ha sido bien proyectada. Debido a que no se requiere energía eléctrica para su funcionamiento, el costo de producción es muy bajo.

Debido a su mayor eficiencia y menor costo, en el Japón se han reemplazado los floculadores mecánicos por hidráulicos y actualmente solo se diseñan unidades de este tipo (5).

3.1 Unidades de flujo horizontal

3.1.1 Parámetros y recomendaciones de diseño

- Recomendables para caudales menores de 50 litros por segundo.

- Se proyectará un mínimo de dos unidades, salvo que la planta tenga alternativa para filtración directa, porque en ese caso, podrá darse mantenimiento al floculador durante los meses en que la planta opera con filtración directa.
- En este tipo de unidades predomina el flujo de pistón, por lo que se consigue un buen ajuste del tiempo de retención.
- Se pueden utilizar pantallas removibles de concreto prefabricadas, fibra de vidrio, madera, plástico, asbesto-cemento u otro material de bajo costo, disponible en el medio y que no constituya un riesgo de contaminación. De esta manera, se le da mayor flexibilidad a la unidad y se reduce el área construida, disminuyendo por consiguiente el costo de construcción (figura 3-1).

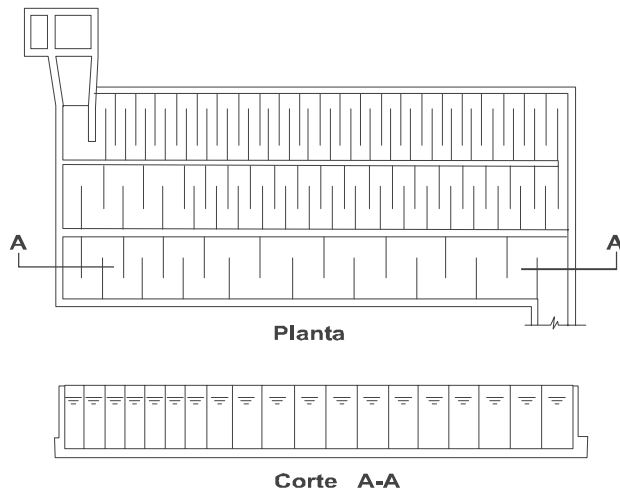


Figura 3-1. Floculador de pantallas de flujo horizontal (6)

- Entre los materiales indicados para las pantallas, los que ofrecen mayor confiabilidad

son la fibra de vidrio, el plástico, los tabiques de concreto prefabricados y la madera. En cada caso, la elección del material dependerá del tamaño de la planta, del costo del material y de los recursos disponibles. Si se empleara madera, se pueden disponer tabiques de madera machihembrada, tratada con barniz marino aplicado en varias capas, cada una en sentido opuesto a la anterior, de tal manera de formar una gruesa capa impermeabilizante. También puede emplearse madera revestida con una capa de fibra de vidrio. La unidad puede tener una profundidad de 1,00 a 2,00 metros, dependiendo del material utilizado en las pantallas.

- Se pueden utilizar también pantallas de asbesto-cemento, siempre y cuando no se tengan aguas ácidas o agresivas. Las aguas recomendables para utilizar este tipo de solución deben tener las siguientes características:

| | |
|---------------|---------------------------|
| I_a | ≤ 10 |
| CO_2 | $\leq 3,5 \text{ mg/L}$ |
| Sulfatos | $\leq 1.500 \text{ mg/L}$ |
| pH | ≥ 6 |

Donde:

I_a es el índice de agresividad, que es igual a:

$$I_a = pH + \log 10 (A \times D)$$

$A =$ alcalinidad total como CaCO_3 en mg/L y

$D =$ dureza como CaCO_3 en mg/L



Figura 3-2. Floculador de pantallas de flujo horizontal (7)

En zonas sísmicas no se recomienda el empleo de planchas de asbesto-cemento. Durante el terremoto que ocurrió en el sur del Perú en el 2001 se quebraron todas las pantallas de la unidad de flujo horizontal de la figura 3-2. En el primer plano de la figura 3-3 se pueden ver los tanques de floculación sin pantallas.

Figura 3-3. Floculador de pantallas después del sismo (7)

En la figura 3-4 se puede observar cómo quedaron las pantallas del floculador y del decantador laminar, que también



Figura 3-4. Pantallas de asbesto-cemento rotas (7)

eran de asbesto-cemento. Principalmente a partir de esta experiencia, de gran impacto económico, no recomendamos utilizar el asbesto-cemento para este fin en zonas de alto riesgo sísmico y de bajo nivel de operación, porque es un material muy quebradizo si no se manipula adecuadamente durante las labores de mantenimiento. Los operadores acostumbran caminar sobre las pantallas. En la figura

3-5 se pueden ver las maderas que colocan para caminar encima de ellas.

- Con pantallas de asbesto-cemento, se recomienda diseñar unidades de máximo un metro de profundidad útil, colocando las pantallas con la dimensión de 1,20 metros en el sentido vertical.
- Si se usan pantallas de asbesto-cemento onduladas, se consigue disminuir un poco la diferencia de gradientes de velocidad entre los canales y las vueltas (figura 3-6). En este caso, se considera un coeficiente de fricción (n) de 0,03 para calcular la pérdida de carga en los canales. Cuando se utilicen placas de asbesto-cemento planas o de madera, los coeficientes deben ser 0,013 y 0,012, respectivamente.
- El coeficiente (K) de pérdida de carga en las vueltas varía entre 1,5 y 3,0. Se recomienda usar un coeficiente de 2 para este fin (8).



Figura 3-5. Floculador con pantallas de asbesto-cemento planas (7)



Figura 3-6. Floculador con pantallas de asbesto-cemento onduladas (7)

- El espaciamiento entre el extremo de la pantalla y la pared del tanque —es decir, el paso de un canal a otro— se deberá hacer igual a 1,5 veces el espaciamiento entre pantallas (9).
- Dependiendo del tamaño de la unidad, deberá considerarse un punto de desagüe por unidad o uno por cada tramo.

3.1.2 Criterios para el dimensionamiento

- En las unidades hidráulicas el gradiente de velocidad es una función de la pérdida de carga:

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} \cdot \sqrt{hf/T} \quad (1)$$

Donde:

- $\sqrt{\gamma/\mu}$ = relación que depende de la temperatura del agua
 hf = pérdida de carga total en m
 T = tiempo de retención en s

- La pérdida de carga se produce a lo largo de los canales (h_1) y principalmente en las vueltas (h_2), por lo que la pérdida de carga total en el tramo $h_f = h_1 + h_2$.

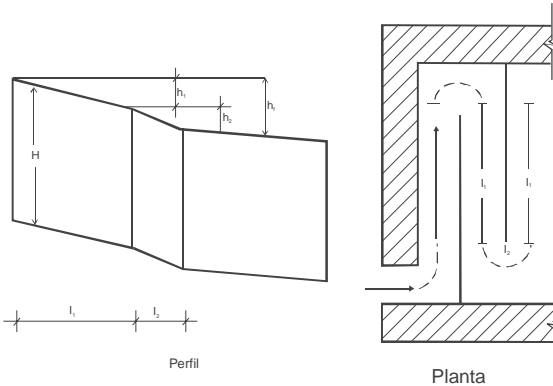
$$h_1 = [n v / r^{2/3}]^2 \cdot l \quad (2)$$

- n = coeficiente de pérdida de carga de Manning. Con planchas corrugadas ($n = 0,03$),
 v = velocidad en los canales
 g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
 r = radio hidráulico del canal
 l = longitud total en el tramo (m)

$$h_2 = K (v^2 / 2g) \cdot N \tag{3}$$

K = 2, coeficiente de pérdida de carga en las curvas.

N = número de vueltas o pasos entre canales.



3.1.3 Aplicación

Se requiere proyectar un floculador de pantallas para un caudal de 30 L/g y se ha seleccionado la unidad de flujo horizontal por tratarse de un caudal pequeño. Se simuló el proceso en el laboratorio para determinar los gradientes de velocidad y tiempos de retención óptimos y se obtuvieron los resultados que se indican en el gráfico de la figura 3-8.

Figura 3-7. Comportamiento de la pérdida de carga

Los resultados del estudio indican que se obtendría la mayor eficiencia con los gradientes de velocidad y los tiempos indicados en el cuadro 3-1.

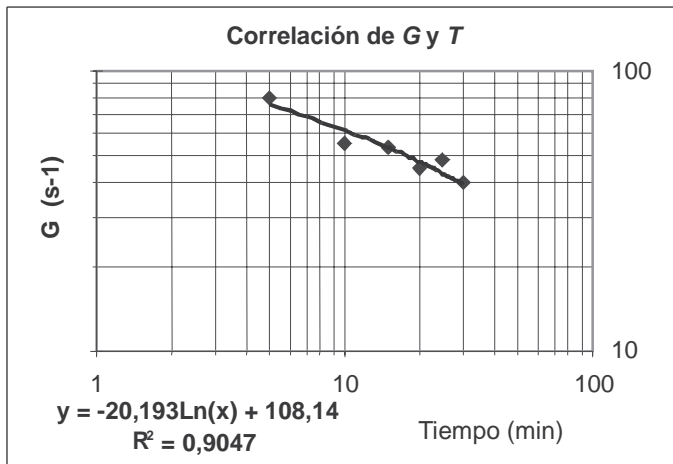


Figura 3-8. Correlación de G y T

Cuadro 3-1. Parámetros óptimos de floculación (10)

| Tramos | Gradientes de velocidad (s ⁻¹) | Tiempos de retención (min.) |
|--------|--|-----------------------------|
| 1 | 80 | 5 |
| 2 | 60 | 10 |
| 3 | 50 | 15 |
| 4 | 45 | 20 |

En el cuadro 3-2 se muestra un ejemplo de cálculo para un tramo del floculador de pantallas de flujo horizontal con pantallas de asbesto-cemento onduladas. El proceso se repite para los tramos siguientes.

En el ejemplo se eligió un gradiente bajo para el último tramo (25 s⁻¹) para optimizar la formación del flóculo.

Se eligió el último tramo de la unidad para desarrollar el ejemplo de cálculo, a fin de indicar también cómo se chequea que las pantallas se crucen en toda la unidad por lo menos 1/3 del ancho. De acuerdo con el cálculo efectuado, el ancho de las vueltas en este tramo es de 0,54 metros y el ancho total del tanque, de 3 metros. Teniendo en cuenta dos anchos de vuelta correspondientes a cada extremo del canal, las pantallas traslaparían en una longitud de $3 - (0,54 \times 2) = 1,92$ m. Por lo tanto, el dimensionamiento es correcto.

También se puede apreciar que se han modificado los tiempos de retención en cada tramo, de tal modo que las longitudes de todos los tramos sean iguales a 4,30 metros. Esto permitirá construir cuatro tanques iguales de 4,30 metros de largo, 3 metros de ancho y un metro de profundidad total.

Cuadro 3-2. Dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal (10)

| Paso | Datos | Unidad | Criterios | Cálculos | Resultados | Unidad |
|------|---|---------|----------------------------------|----------------------------|--|----------|
| 1 | Caudal $Q = 0,030$ | m^3/s | $L_d = V_d \times T_d \times 60$ | $L_d = (0,12) (4,97) (60)$ | Longitud de canales del primer tramo $L_d = 35,8$ | m |
| | Tiempo de retención tramo 4 $T_d = 4,97$ | min | | | | |
| | Velocidad en el tramo 4 $V_d = 0,12$ | m/s | | | | |
| 2 | | | $A = Q / V_d$ | $A = 0,030 / 0,12$ | Sección de canales del tramo 4 $A_d = 0,25$ | m^2 |
| 3 | Altura de agua en la unidad $H = 0,70$ | m | $a_d = A_d / H$ | $a_d = 0,25 / 0,70$ | Ancho de canales del tramo 4 $a_d = 0,36$ | m |
| 4 | | | $D_d = 1,5 a_d$ | $D_d = 1,5 \times 0,36$ | Ancho de vueltas del tramo 4 $D_d = 0,54$ | m |
| 5 | Ancho útil de la lámina de asbesto-cemento corrugada $b = 0,825$ | m | $B = 3b + d_d$ | $B = 3 (0,825) + 0,54$ | Ancho del floculador $B = 3,0$ | m |
| 6 | | | $N_d = l_1 / B$ | $N_d = 35,8 / 3,0$ | Número de canales en el tramo 4 $N_d = 12$ | unidades |
| 7 | Espesor de las láminas de asbesto-cemento corrugadas $e = 0,006$ | m | $L_d = N_d a_d + (N_d - 1) e$ | $L_d = 12 (0,36 + 0,006)$ | Longitud del primer tramo $L_d = 4,30$ | m |

Cuadro 3-2. Dimensionamiento de un floculador hidráulico de flujo horizontal (continuación)

| Paso | Datos | Unidad | Criterios | Cálculos | Resultados | Unidad |
|------|--|------------------|---|---|---|-----------------|
| 8 | Coefficiente de pérdida de carga en las vueltas $K = 2$ | unidades | $h_1 = KV_f^2 (N-1) / 2g$ | $h_1 = (2) (0,12)^2 (12-1) / 19,6$ | Pérdida de carga en las vueltas del cuarto tramo $h_1 = 0,017$ | m |
| 9 | Acceleración de la gravedad $g = 9,8$ | m/s ² | | | | |
| 10 | | | $P_1 = 2H + a_1$ | $P_1 = 2 (0,70) + 0,36$ | Perímetro mojado de las secciones del tramo 4 $P_1 = 1,757$ | m |
| 11 | Coefficiente de rugosidad $n = 0,03$ | unidades | $h_2 = [NV_1^2 / r2\beta^3] L_1$ | $h_2 = [0,03 (0,12)^2 / (0,142)^{2\beta}] (35,8)$ | Pérdida de carga en los canales del tramo 4 $h_2 = 0,0012$ | m |
| 12 | | | $hf_1 = h_1 + h_2$ | $hf_1 = 0,017 + 0,0012$ | Pérdida de carga total en el cuarto tramo $hf_1 = 0,019$ | m |
| 13 | $T = 20^\circ\text{C}$ $(h_f/T)^{0,5} = 3,115$ | | $G = (\bar{a} / i)^{0,5} (h_f/T)^{0,5}$ | $G_1 = 3,115 (0,019 / (4,95 \times 60))^{0,5}$ | Gradiente de velocidad en el tramo 1 $G_1 = 25$ | s ⁻¹ |

3.1.4 Recomendaciones para el proyecto y problemas de diseño más comunes

A continuación presentaremos algunas condiciones de diseño muy importantes para el correcto funcionamiento de una unidad de flujo horizontal y algunos de los errores de diseño más comúnmente identificados:

- Considerar, en el fondo de la unidad, una pendiente igual a la pérdida de carga obtenida en el cálculo, de tal modo que la altura de agua permanezca constante y, por lo tanto, el gradiente de velocidad en todo el tramo también se mantenga así.

La unidad de la figura 3-9 fue diseñada con el fondo plano. La sección inicial es mucho mayor que la final y, como el caudal es constante, la velocidad es menor al inicio y mayor al final. Al evaluar esta unidad, se encontró que los gradientes de velocidad estaban al revés, empezaban bajos y terminaban altos.

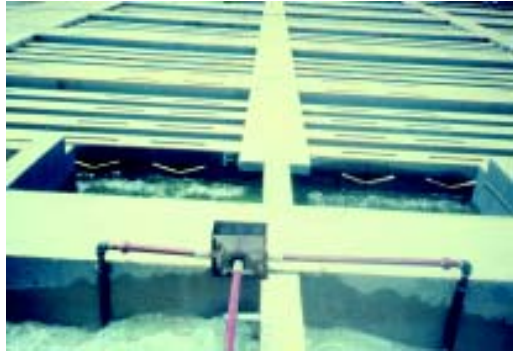


Figura 3-9. Floculador de pantallas de flujo horizontal (7)

Para mejorar el comportamiento de la unidad, se requeriría darle pendiente en el fondo, para lo cual sería necesario retirar todas las vigas que sujetan las pantallas y los tabiques de concreto prefabricados.

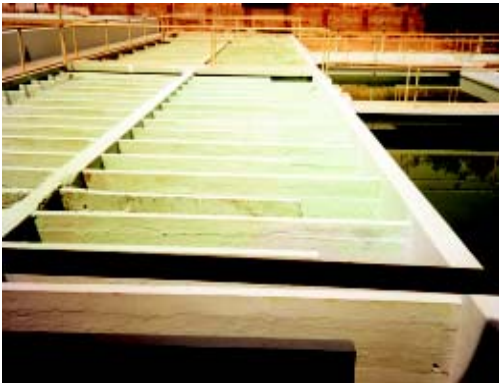


Figura 3-10. Floculador de pantallas de flujo horizontal (7)

La unidad de la figura 3-10 tiene una profundidad inicial de 1,70 metros y una final de 2,40 metros. Fue diseñada con gradientes de velocidad variables entre 27 y $2,5 \text{ s}^{-1}$ y un tiempo de retención total de 39 minutos. Si calculamos la pérdida de carga correspondiente a la velocidad en las secciones entre las

pantallas, esta sería apenas de 3,9 centímetros. Como el desnivel del fondo de la unidad es de 0,70 metros, el caudal se escurre totalmente hacia el final. La estructura de esta unidad es toda de concreto con pantallas rígidas; para mejorar su comportamiento, será necesario demolerla.

- Al elegir el ancho de la unidad, debe tenerse en cuenta el ancho de la vuelta en el último tramo, de tal modo que las pantallas se crucen por lo menos en un tercio de su longitud. En la unidad de la figura 3-11 no se tuvo en cuenta este criterio y el flujo pasa totalmente por la parte media y forma un rápido cortocircuito, mientras que entre las pantallas se producen vórtices y zonas muertas.



Figura 3-11. Floculador de pantallas de flujo horizontal (7)

- El sistema que se adopte para la sujeción de las pantallas, sobre todo cuando se trata de pantallas de asbesto-cemento onduladas, es muy importante para el buen funcionamiento de la unidad. El sistema de la figura 3-12 no es recomendable. Como se puede apreciar, no se logra mantener el paralelismo de las pantallas y el agua termina pasando de un canal a otro.



Figura 3-12. Floculador de pantallas de flujo horizontal (7)

El sistema de sujeción para pantallas onduladas de la figura 3-13 es la solución más conveniente desde el punto de vista técnico y económico. Consiste en colocar un listón de madera en el borde superior de cada pantalla, tomando también la longitud de la vuelta para sujetarlo en las paredes laterales del tanque. Esta acción mantiene las pantallas estables y alineadas. Estos primeros

listones se sujetan con otros perpendiculares a ellos mediante pernos, y así se mantiene el ancho constante de los canales.

En la parte inferior las pantallas se sujetan mediante un listón de madera con ranuras, que debe instalarse semiempotrado en el fondo de la unidad.



Figura 3-13. Floculador de pantallas de flujo horizontal (7)

3.2 Unidades de flujo vertical

En este tipo de unidades el flujo sube y baja a través de canales verticales formados por las pantallas. Es una solución ideal para plantas de medianas a grandes, porque debido a la mayor profundidad que requieren estas unidades, ocupan áreas más reducidas que los canales de flujo horizontal. Otra ventaja importante es que el área de la unidad guarda proporción con respecto a los decantadores y filtros, con lo que resultan sistemas más compactos y mejor proporcionados. Cuando se emplean floculadores de flujo horizontal en plantas grandes, el área de los floculadores es mucho mayor que el área de todas las demás unidades juntas.

3.2.1 Parámetros y recomendaciones de diseño

- Las unidades de flujo vertical son una solución recomendable para plantas de capacidad mayor de 50 litros por segundo.
- Se proyectan para profundidades de 3 a 4 metros, por lo que ocupan un área menor que las unidades de flujo horizontal.
- Los tabiques pueden ser de fibra de vidrio, prefabricados de concreto, de madera o de asbesto-cemento. En la figura 3-14 se puede ver una unidad con pantallas de *dry wall*; en la figura 3-15, con madera; y en la 3-16, de asbesto-cemento gruesas.
- Las restricciones para el uso de pantallas de asbesto-cemento son las mismas que se indicaron anteriormente.



Figura 3-14. Floculador de flujo vertical con tabiques de *dry wall* (7)



Figura 3-15. Floculador de flujo vertical con tabiques de madera (7)

Con este tipo de tabiques, se recomienda usar una altura máxima de agua de 2 a 3 metros. Pueden proyectarse alturas mayores, traslapando pantallas y empernándolas. Se debe tener especial cuidado durante el llenado de este tipo de unidades, para evitar roturas.

- La sección de cada paso se calculará para una velocidad igual a los $2/3$ de la velocidad en los canales.
- El gradiente de velocidad en los canales no deberá ser menor de 20 s^{-1} . En plantas grandes se pueden colocar mallas diseñadas con el gradiente de velocidad apropiado en los orificios de paso.
- Para evitar la acumulación de lodos en el fondo y facilitar el vaciado del tanque, se dejará una abertura equivalente al 5% del área horizontal de cada compartimiento en la base de cada tabique que llega hasta el fondo.
- Estructuralmente, son más confiables los tabiques de concreto prefabricados y fibra de madera machihembrada de 1,5" a 2" de espesor; pueden



Figura 3-16. Floculador de flujo vertical con pantallas de asbesto-cemento (7)

adoptarse, en este caso, alturas de agua de 4 a 5 metros. Con este tipo de solución se reduce apreciablemente el área de la unidad, lo cual es especialmente ventajoso en plantas grandes.

- Al igual que en las unidades de flujo horizontal, debe tenerse especial cuidado en la adopción del ancho de la unidad para que en el diseño de los tramos con bajos gradientes de velocidad, las pantallas se entrecrucen por lo menos en 1/3 de la altura útil. Así se evitará la formación de espacios muertos y cortocircuitos.

3.2.2 Criterios para el dimensionamiento

- La selección del número aproximado (m) de compartimentos por tramo o canales de gradiente constante se puede determinar utilizando el criterio de Richter (5).

$$m = 0,045 \sqrt[3]{(bLG/Q)^2 \cdot t} \quad (4)$$

- b = ancho del tramo o canal
 L = longitud del tramo
 t = tiempo de retención del tramo

- La pérdida de carga en las vueltas (h_2) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h_2 = [(m + 1)V_1^2 + mV_2^2] / 2g \quad (5)$$

- V_1 = velocidad en los canales
 V_2 = velocidad en los pasajes u orificios de paso de un compartimiento a otro

- La velocidad en los pasajes (V_2):

$$V_2 = 2/3 V_1 \quad (6)$$

- El gradiente de velocidad en los canales (G_1) se comprueba mediante la siguiente expresión:

Cuadro 3-3. Parámetros óptimos de floculación (10)

| Tramos | Gradientes de velocidad (s ⁻¹) | Tiempos de retención (min.) |
|--------|---|--------------------------------|
| 1 | 90 | 2,34 |
| 2 | 80 | 4,90 |
| 3 | 70 | 7,80 |
| 4 | 65 | 11,10 |
| 5 | 55 | 15,03 |
| 6 | 50 | 20,10 |

Como los gradientes de velocidad en los últimos tramos (5 y 6) son muy similares y la formación del flóculo optimiza con un gradiente de velocidad bajo al final, se tomó para el sexto tramo un valor de 28 s⁻¹.

Aplicando el procedimiento del cuadro 3-4, se calculó una unidad de seis tramos o canales con gradientes de velocidad decrecientes entre 87 y 28 s⁻¹, y se obtuvieron los resultados del cuadro 3-5. El cálculo del cuadro 3-4 corresponde al dimensionamiento y comprobación de un solo tramo, el último de la unidad. Este proceso debe aplicarse reiteradamente para cada tramo, empleando los parámetros correspondientes (cuadro 3-3).

Una vez calculado el último tramo, debemos comprobar si los pasos se cruzan. Cada paso tiene una altura de 0,92 metros y la profundidad de la unidad es de 4,50 metros. La longitud de traslape es de $4,50 - (0,92 * 2) = 2,66$ m.

Si tuviéramos, en cambio, un cálculo del último tramo en que los pasos tienen 1,50 metros de alto y la profundidad total de la unidad es de 2,50 metros, las pantallas no llegarían a cruzarse. La superior estaría a 1,50 del fondo y la inferior a 1,50 metros de la superficie del agua, con lo que quedaría un espacio libre de 0,50 metros por el que debería pasar todo el caudal formando un cortocircuito. Los espacios entre las pantallas se constituirían en espacios muertos en los que la masa de agua quedaría retenida.

Cuadro 3-4. Dimensionamiento de un floculador de pantallas de flujo vertical (10)

| Paso | Datos | Símbolo | Unidad | Criterios | Cálculos | Resultados | Unidad |
|------|---|--------------------------|--------------|---|---|---|--------|
| 1 | Caudal | $Q = 0,25$ | m^3/s | $V = 60 Q \cdot T$ | $V = 60 (0,25) 20$ $V = 300$ | Volumen total de la unidad | m^3 |
| | Tiempo total de floculación | $T = 20$ | min | | | | |
| 2 | Longitud de la unidad | $L = 6,5$ | m | $B = V / H \cdot L$ | $B = 300/6,5(4,5)$ $B = 10,30$ | Ancho total de la unidad | m |
| | Profundidad del floculador | $H = 4,5$ | m | $t = H b L / Q \cdot 60$ | $t = [4,5(2,60)(6,5)] / [0,250(60)]$ $t = 5,07$ | Tiempo de retención del primer canal | min |
| 3 | Ancho del sexto canal | $b_1 = 2,60$ | m | | | | |
| 4 | Gradiente de velocidad en el último tramo | $G = 25$ | s^{-1} | $m = 0,045 [(b \cdot L \cdot G / Q)^2 \cdot t]^{1/3}$ | $m = (0,045) \{ [(2,60)(6,5)(25) / 0,25]^2 \cdot 5,07 \}^{1/3}$ $m \approx 10$ | Número de compartimientos entre pantallas | N.º |
| 5 | Espesor de las pantallas | $e = 0,038$ $e = 1,5$ | m pulgada | $a = [L - e(m-1)] / m$ | $a = [6,5 - (9)(0,038)] / 10$ $a = 0,62$ | Espaciamiento entre pantallas | m |
| 6 | | | | $V_1 = Q / (a \times b)$ | $V_1 = 0,25 / (0,62 \times 2,60)$ $V_1 = 0,16$ | Velocidad en los canales verticales | m/s |
| 7 | | | | $V_2 = 2/3 V_1$ | $V_2 = 2/3 (0,16)$ $V_2 = 0,104$ | Velocidad en los pasos | m/s |
| 8 | | | | $P_2 = (Q/V_2) / b_2$ | $P_2 = (0,25 / 0,104) / 2,60 = 0,92$ | Altura del paso | m |
| 9 | | | | $l = 60 V_1 t$ | $l = 60 (0,16) (5,07)$ $l = 47,50$ | Extensión total de canales del último tramo | m |

Cuadro 3-4. Dimensionamiento de un floculador de pantallas de flujo vertical (10) (continuación)

| Paso | Datos | Símbolo | Unidad | Criterios | Cálculos | Resultados | Unidad |
|------|--|-------------|-----------|--|---|--|-----------------|
| 10 | | | | $R_H = a \cdot b / 2 (a + b)$ | $R_H = (0,62) (2,60) / 2 (0,62 + 2,60)$ $R_H = 0,25$ | Radio hidráulico del compartimiento entre pantallas | m |
| 11 | Coefficiente de la fórmula de Manning | $n = 0,013$ | constante | $h_1 = [nV_1 / R_H^{2/3}]^2 \times l$ | $h_1 = [0,013 (0,16)] / [0,25]^{2/3}]^2 \times 47,5$ $h_1 = 0,00128$ | Pérdida de carga continua en los canales | m |
| 12 | | | | $h_2 = [(m+1)V_1^2 + mV_2^2] / 2g$ | $h_2 = [11 (0,16)^2 + 10 (0,104)^2] / 19,6$ $h_2 = 0,0198$ | Pérdida de carga en las vueltas | m |
| 13 | | | | $hf = h_1 + h_2$ | $hf = 0,00128 + 0,0198$ $hf = 0,021$ | Pérdida de carga total en el último tramo | m |
| 14 | | | | $V = HbL - e (m-1)$ $b (H - P_2)$ | $V = (4,50) (2,60) (6,50) - 0,038 (10 - 1) \times 2,60 (4,5 - 0,92)$ $V = 72,87$ | Volumen del tramo | m ³ |
| 15 | $\sqrt{\gamma\mu} = 3,267$ $T = 25^\circ C$ | | | $G_1 = \sqrt{\gamma\mu} \cdot \sqrt{hf\bar{Q}}$ | $G_1 = 3267 \cdot [0,25 \times 0,021 / 72,87]^{0,5}$ $G_1 = 28$ | Comprobación del gradiente de velocidad total en el primer canal o tramo | s ⁻¹ |
| 16 | | | | $G_2 = n \sqrt{\gamma\mu}$ $R_H^{-0,7} V^{1,5}$ | | Comprobación del gradiente de velocidad en el canal vertical | s ⁻¹ |

Cuadro 3-5. Dimensionamiento de un floculador de flujo vertical de 250 L/s de capacidad (10)

| Tramo | Ancho de tramo (m) | Separación de pantallas (m) | N.º de compartimientos | Altura de pasos (m) | G (s ⁻¹) | T (min) | Pérdidas de carga (m) |
|-------|--------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|---------|-----------------------|
| 1 | 1,20 | 0,62 | 10 | 0,92 | 87 | 2,34 | 0,10 |
| 2 | 1,30 | 0,62 | 10 | 0,92 | 77 | 2,54 | 0,08 |
| 3 | 1,50 | 0,62 | 10 | 0,92 | 62 | 2,93 | 0,06 |
| 4 | 1,70 | 0,62 | 10 | 0,92 | 51 | 3,32 | 0,05 |
| 5 | 2,00 | 0,62 | 10 | 0,92 | 41 | 3,90 | 0,04 |
| 6 | 2,60 | 0,62 | 10 | 0,92 | 28 | 5,07 | 0,02 |
| | | | | | Total | 20,10 | 0,35 |

Analizando los resultados del cuadro 3-5, se puede observar que todos los tramos tienen el mismo número de compartimientos. Esto se ha conseguido variando el ancho de los tramos. La gran ventaja de este diseño es que facilita la construcción, debido a que todos los espaciamientos entre pantallas y alturas de los pasos, en todos los tramos, serán iguales, lo que también permitirá evitar errores.

3.2.4 Recomendaciones de diseño y defectos más comunes

- Si se están proyectando dos unidades, será necesario colocar un partidor para asegurar que cada unidad reciba la mitad del caudal. Si son más de dos, se proyectará un canal de distribución uniforme.
- Las pantallas deben tener un grosor adecuado de acuerdo con la profundidad de la unidad. Para unidades de 4 a 5 metros de profundidad, serán necesarias pantallas de 1,5 a 2 pulgadas de espesor.
- Las pantallas deben estar sujetas a las paredes laterales mediante ranuras,



Figura 3-19. Floculador de flujo vertical con pantallas de un centímetro de espesor (7)

perfiles, etcétera, de tal manera que el flujo de agua no pase a través de las uniones entre las pantallas y las paredes, porque estarían contribuyendo a la formación de cortocircuitos (figura 3-20).



Figura 3-20. Floculador de flujo vertical (7)

- Las ranuras para pasar las pantallas solo deben comprender el trecho en el que estas se colocarán. El espacio que corresponde al paso del agua por debajo de las pantallas no debe tener ranura, para evitar que con el tiempo las pantallas se desplacen y la altura de los pasos varíe, lo que incrementaría la pérdida de carga en el tramo y, por consiguiente, el gradiente de velocidad.
- Los efectos de este problema se pueden llegar a apreciar a simple vista, porque con el tiempo el agua empieza a pasar por encima de las placas debido al incremento de la pérdida de carga.



Figura 3-21. Floculadores de pantallas de flujo vertical (7)

- Este fenómeno se puede visualizar en los floculadores de la figura 3-21. Ello ocurre en los tramos que fueron modificados, porque las placas no se cruzaban. Al efectuarse las nuevas ranuras, se hicieron en toda la altura de la unidad, lo que dio lugar a que con el tiempo, las placas, con su propio peso, vencieran los soportes que habían sido colocados y se desplazaran. Ello disminuyó la altura de los pasos.

3.2.5 Ventajas y desventajas de las unidades de pantallas

Se pueden señalar las siguientes ventajas:

- De acuerdo con evaluaciones realizadas en varias plantas de América Latina, los cortocircuitos y espacios muertos que se producen son mínimos, de tal modo que el tiempo de retención teórico es similar al tiempo real obtenido en la unidad.
- Carecen de elementos móviles o mecánicos, de tal modo que la operación y el mantenimiento son muy simples y poco costosos; se reducen básicamente a limpieza y pintura.
- Son muy confiables, garantizan un funcionamiento continuo.
- Se economiza energía eléctrica.
- Se autorregulan cuando se producen variaciones de caudal, y el número de Camp (N_c) se mantiene más o menos constante. Al bajar el caudal, disminuye el gradiente de velocidad y se incrementa el tiempo de retención; cuando sube el caudal, el efecto es el inverso. Dependiendo de cuánto se incremente el caudal de operación, podemos estar generando gradientes de velocidad tan altos que rompan el flóculo.
- Si se selecciona apropiadamente el rango de gradiente de velocidad, se puede explotar esta propiedad en el diseño de plantas en las que se pueden esperar pequeñas variaciones diarias de caudal, teniendo en cuenta que variaciones de 50% producen variaciones de gradientes de velocidad de aproximadamente 20%.

Entre las desventajas se pueden indicar las siguientes:

- La pérdida de carga es mayor en las vueltas que en los canales y el gradiente de velocidad varía en forma similar. Esta desventaja se atenúa con las pantallas onduladas.
- Producen pérdidas de carga más o menos altas.

- Es común escuchar a los operadores argumentar que la limpieza de estas unidades es difícil, pero esto sucede cuando no se han previsto en el diseño las facilidades para esta operación, colocando aberturas en la base de las pantallas (unidades de flujo vertical) y compuertas o válvulas de fondo convenientemente ubicadas para desaguar la unidad.

4. FLOCULADORES DEL TIPO ALABAMA O COX

En estas unidades el agua hace un movimiento ascendente-descendente dentro de cada compartimiento, por lo que es muy importante mantener la velocidad del agua constante, para que este comportamiento se dé. La velocidad ascensional será constante mientras el caudal sea constante; por esta razón, estas unidades son muy vulnerables a las variaciones de caudal. Si el caudal de operación baja, el agua ya no hace su recorrido ascensional y solamente pasará por el fondo de la unidad de una boquilla a la otra, lo que generará un cortocircuito en esta zona y un gran espacio muerto en toda la parte superior.

El gradiente de velocidad se produce casi exclusivamente en los puntos de paso (niples, codos, boquillas, etcétera), los cuales están localizados en el fondo de la unidad y distribuidos alternadamente en uno y otro extremo (figura 3-22).

a) Parámetros y recomendaciones de diseño

- La profundidad total de la unidad debe ser de 3 a 3,50 metros, para que la altura del agua sobre los orificios sea por lo menos del orden de 2,40 metros.
- La relación ancho/largo de cada compartimiento debe ser de 1 a 1,33.
- La sección de cada compartimiento se diseñará con una tasa de 0,45 m² por cada 1.000 m³/d.
- Los criterios para diseñar los puntos de paso entre los compartimientos son los siguientes:
 - a) La relación de la longitud del niple con respecto a su diámetro debe ser de 1 a 5.
 - b) Velocidad en las boquillas variable entre 0,25 y 0,75 m/s.
 - c) Tasa de diseño para determinar la sección de las boquillas de 0,025 m² por cada 1.000 m³/d.

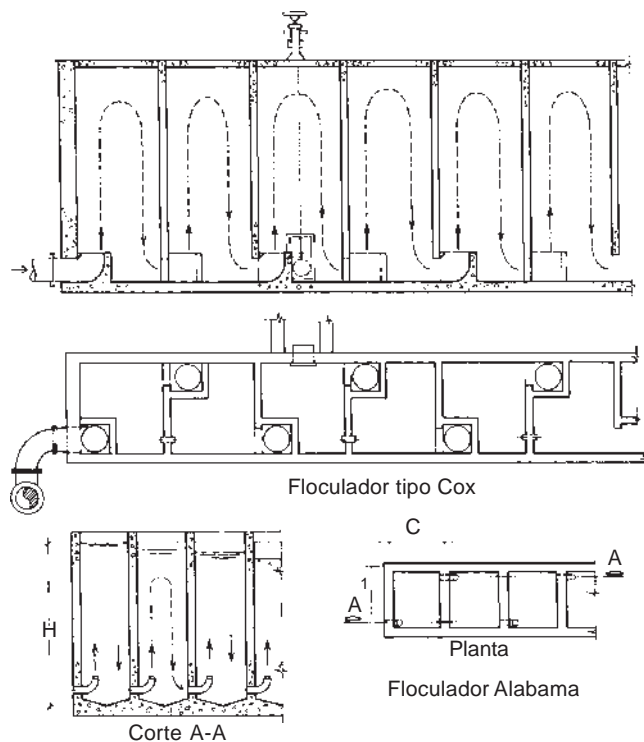


Figura 3-22. Flocladores del tipo Cox y Alabama (11, 12)

- El diseño de estas unidades debe efectuarse muy cuidadosamente para evitar la formación de cortocircuitos y espacios muertos.
- El nivel de recursos humanos disponible para la operación es un criterio importante en la selección de estas unidades, porque, como se indicó anteriormente, es necesario que la unidad se opere a caudal constante. Las disminuciones de caudal anulan el funcionamiento de estas unidades al decrecer la velocidad. En esta situación, el flujo tiende a pasar directamente entre los puntos de paso y prácticamente todo el volumen del floclador se convierte en un enorme espacio muerto.
- Los criterios expuestos no tienen una base experimental conocida, por lo que se recomendaría investigar en forma preliminar la velocidad óptima de diseño antes de proyectar este tipo de unidad.

5. FLOCULADORES DE MEDIOS POROSOS

En esta unidad el agua flocula al pasar a través de los espacios o poros de un material granulado, los cuales desempeñan la función de pequeños compartimientos.

5.1 Parámetros y recomendaciones de diseño

- Es una unidad hidráulica con un número casi infinito de cámaras o compartimientos, lo cual explica su gran eficiencia, de acuerdo con la teoría de Harris y Kaufman (12).
- Como material granular, pueden utilizarse piedras, bolitas de plástico, residuos de las fábricas de plástico, segmentos de tubos o cualquier otro tipo de material similar no putrescible ni contaminante.
- Las investigaciones realizadas hasta el momento solo permiten diseñar estos floculadores con piedra de 1/2" a 3/4" (diámetro

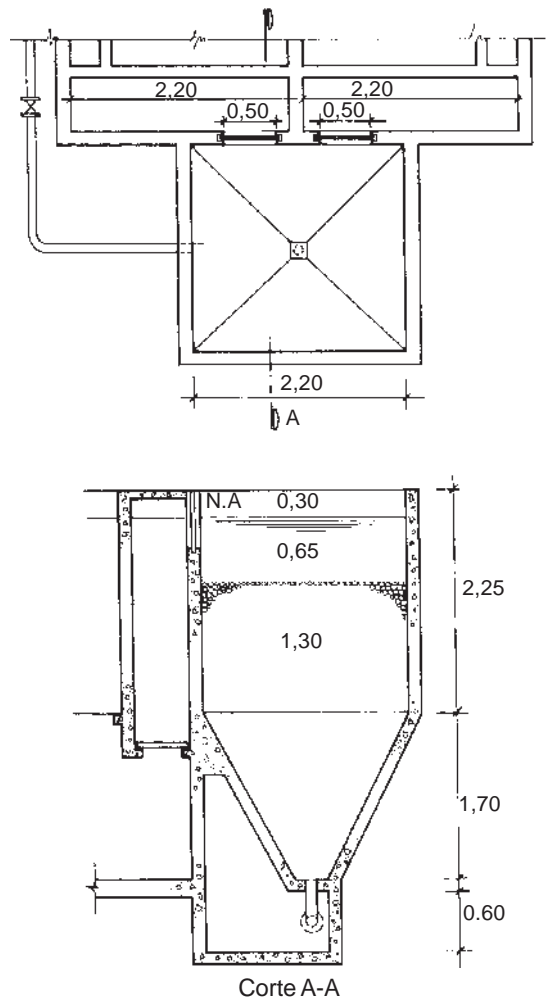


Figura 3-23. Floculador de medio poroso (16)

medio = 15,9 mm). Investigaciones asesoradas por el CEPIS/OPS con piedras de tamaño mayor indican que no se puede lograr todo el rango de gradientes de velocidad para floculación variando el diámetro equivalente de las piedras u otro material similar.

- A partir del estado actual del conocimiento, se recomienda diseñar esta unidad con flujo ascendente y forma tronco-cónica (5), a fin de escalonar los gradientes de velocidad, manteniendo el tamaño del material constante para facilitar la limpieza.
- En este tipo de unidades, el tiempo de retención total es de apenas 5 a 10 min (efecto del infinito número de compartimientos de la unidad).
- La información disponible sobre floculadores de piedras (5, 8, 9, 10) solo permite diseñar unidades para caudales de hasta 10 a 15 L/s (figura 3-23).

5.2 Criterios de dimensionamiento

- Habiendo determinado el tiempo de floculación adecuado (T_f) mediante un estudio de prueba de jarras (*Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo II, capítulo 11), el tiempo de retención para proyectar la unidad se selecciona mediante la expresión siguiente:

$$T = T_f \left[\ln (T_o / T_f) \right] / [T_o / T_f - 1] \quad (8)$$

Donde:

- T = tiempo de retención en una unidad de floculación de medio poroso
 T_o = turbiedad del agua cruda
 T_f = turbiedad después de flocular y sedimentar

- El gradiente de velocidad en un floculador de medio granular se calcula por la siguiente expresión:

$$G = [\gamma \cdot V \cdot J / \mu \cdot \varepsilon]^{1/2} \quad (9)$$

Donde:

- V = velocidad de aproximación = Q/A
 J = pérdida de carga unitaria en el medio poroso
 ε = porosidad del material

- La pérdida de carga para valores de Número de Reynolds elevados se calcula mediante la ecuación de Forchheimer:

$$J = aV + bV^2 \quad (10)$$

- Los coeficientes a y b se pueden estimar en función de las características granulométricas del medio.

$$\alpha = [0,162 (1 - \varepsilon)^2] / (\varphi^2 D^2 \varepsilon^3) \quad (11)$$

Donde:

φ = factor de forma de material
 D = diámetro representativo del material

$$b = [0,018 (1 - \varepsilon)] / \varphi D \varepsilon^3 \quad (12)$$

- Los valores del factor de forma en función de la porosidad del material se pueden obtener del cuadro 3-6.

El cuadro 3-7 da un ejemplo de aplicación:

Cuadro 3-6. Factores de forma y porosidad de materiales granulares típicos (16)

| Descripción | Factor de forma φ | Porosidad ε |
|-------------|------------------------------|----------------------------|
| Esférico | 1,00 | 0,38 |
| Redondeado | 0,98 | 0,38 |
| Desgastado | 0,94 | 0,39 |
| Agudo | 0,81 | 0,40 |
| Angular | 0,78 | 0,43 |
| Triturado | 0,70 | 0,48 |

Cuadro 3-7. Proceso de cálculo de un floculador de medio poroso (16)

| Paso | Datos | Cantidad | Unidad | Criterios | Cálculos | Resultados | Unidad |
|------|---|---------------------|---------|--|---|--|------------------------|
| 1 | Caudal | $Q = 0,012$ | m^3/s | $V = 60 Q T/\varepsilon$ | $V = 60 (0,012) (5) / (0,40)$ $V = 9,0$ | Volumen total del floculador de piedras | m^3 |
| 2 | Tiempo de floculación | $T = 5$ | min | | | | |
| | Porosidad | $\varepsilon = 0,4$ | — | | | | |
| 3 | Dimensiones de la pirámide: altura lado | $H = 1,7$ | m | $h = (V - 1/3 B^2 H)/B_1^2$ | $h = [9 - 1/3 (1,6)^2 1,7] / (1,6)^2$ $h \approx 2,95$ | Altura de la sección prismática complementaria ocupada por las piedras | m |
| | | $B = 1,6$ | m | | | | |
| 4 | Lado de la sección de entrada del tronco de la pirámide | $b_1 = 0,40$ | m | $V_1 = 100 Q / b_1^2$ | $V_1 = 100 (0,012) / (0,4)^2$ $V_1 = 7,5$ | Velocidad en la sección de entrada | cm/s |
| 5 | Lado de la sección media | $b_2 = 0,8$ | m | $V_2 = 100 Q / (b_2)^2$ | $V_2 = 100 (0,012) / (0,80)^2$ $V_2 = 1,875$ | Velocidad en la sección media | cm/s |
| | | $B = 1,6$ | m | $V_3 = 100 Q / B^2$ | $V_3 = 100 (0,012) / (1,6)^2$ $V_3 = 0,469$ | Velocidad en la sección máxima | cm/s |
| 7 | Tamaño medio del material granular | $D = 15,9$ | mm | $a = [0,162(1 - \varepsilon)^2] / (\varphi^2 D^2 \varepsilon^3)$ | $a = [0,162 (1 - 0,4)^2] / [(0,81)^2 (15,9)^2 (0,4)^3]$ $a = 0,0055$ | Coeficientes de la fórmula de Forchheimer | s/cm s^2/cm^2 |
| | | | | $b = [0,018 (1 - \varepsilon)] / [\varphi D \varepsilon^3]$ | $b = [0,018 (1 - 0,4)] / [0,81 (15,9) (0,4)^3]$ $b = 0,013$ | | |
| 8 | Factor de forma | $\varphi = 0,81$ | | $J_1 = a V_1 + b V_1^2$ | $J_1 = 0,0055 (7,5) + 0,013 (7,5)^2$ $J_1 = 0,773$ | Pérdida de carga unitaria en la sección de entrada | m |

Cuadro 3-7. Proceso de cálculo de un floculador de medio poroso (continuación)

| Paso | Datos | Cantidad | Unidad | Criterios | Cálculos | Resultados | Unidad |
|------|---|----------|--------|--|---|---|-----------------|
| 9 | $\sqrt{\gamma\mu} = 2.920$ $T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ | | | $G_1 = \sqrt{\gamma\mu} \sqrt{V_1 J_1} / \epsilon$ | $G_1 = 2.920 \sqrt{7.5 (10)^{-2} \times 0.773 / 0.40}$ $G_1 = 1.112$ | Gradiente en la sección de entrada | s ⁻¹ |
| 10 | | | | $J_2 = a V_2 + b V_2^2$ | $J_2 = 0.0055 (1.875) + 0.013 (1.875)^2$ $J_2 = 0.056$ | Pérdida de carga unitaria en la sección media | |
| 11 | | | | | $G_2 = 2.920 \sqrt{[1.875 (10)^{-2} (0.056) / (0.40)]}$ $G_2 = 150$ | Gradiente de velocidad en la sección media | s ⁻¹ |
| 12 | | | | $J_3 = a V_3 + b V_3^2$ | $J_3 = 0.0055 (0.469) + 0.013 (0.469)^2$ $J_3 = 0.00545$ | Pérdida de carga en la sección máxima | |
| 13 | | | | | $G_3 = 2.920 \sqrt{[0.469 (10)^{-2} (0.0054) / (0.40)]}$ $G_3 = 23$ | Gradiente en la sección máxima | s ⁻¹ |

6. FLOCULADORES DE MALLAS O TELAS

Las telas intercaladas en un canal oponen una resistencia localizada al flujo y tienden a uniformarlo, reducen la incidencia de cortocircuitos y actúan como elementos de compartimentalización. Sus posibilidades de empleo están principalmente orientadas a la ampliación y optimización de unidades de mezcla rápida y floculación en plantas existentes.

6.1 Parámetros de diseño

- El proceso se consigue colocando en una unidad mallas de hilo de *nylon*, las que son atravesadas por el flujo y se produce el gradiente de velocidad deseado como función de la pérdida de carga. En este caso, la floculación depende de las características de las mallas y de la velocidad del flujo.
- La velocidad óptima en cm/s es igual al doble del espaciamiento (e) entre los hilos de *nylon* ($V = 2e$).
- El espaciamiento entre hilos (e) recomendado es de 5 a 15 cm.
- El grosor de hilos (d) más adecuado es de 1,5 a 4 mm.
- Hilos más delgados ($d \leq 1 \text{ mm}$) tienden a romper el flóculo rápidamente.
- Se recomiendan velocidades del flujo del orden de 2 a 5 cm/s para evitar la sedimentación excesiva de los flóculos.
- Cuando las mallas se emplean en canales de mezcla rápida, los parámetros de diseño recomendados son los siguientes:
 1. Velocidades de flujo (V) de 1,0 a 1,5 m/s
 2. Diámetro de los hilos (d) de 1 a 3 mm
 3. Espaciamiento entre hilos (e) de 1 a 3 cm.

6.2 Criterios de dimensionamiento

- El criterio para determinar el gradiente de velocidad en mallas está dado por la siguiente expresión:

$$G = \sqrt{\gamma Q h / \mu v} \quad (13)$$

donde la pérdida de carga (h) está dada por la expresión:

$$h = K V^2 / 2g \quad (14)$$

donde V es la velocidad media de aproximación (Q/A) y K el coeficiente de pérdida de carga, una función de la porosidad (ε) de la malla:

$$K = 0,55 [1 - \varepsilon^2] / \varepsilon^2 \quad (15)$$

Esta expresión es válida para altos valores de (ε) y $Re \leq 500$.

- La porosidad (ε) de la malla en función de sus características está dada por:

$$\varepsilon = (1 - n \cdot d)^2 \quad (16)$$

Donde:

d = diámetro de los hilos

n = número de hilos por cada metro de ancho de canal.

- El volumen (v) en el que se da el proceso se considera como:

$$v = 4 A e \quad (17)$$

Donde:

A = área de la malla atravesada por el flujo

Por lo que la expresión específica para calcular el gradiente de velocidad en función de las características de las mallas es la siguiente:

$$G = \sqrt{1/6v} \sqrt{K/e} v^{1,5} \quad \text{o} \quad G = \sqrt{1/8\mu g} \cdot \sqrt{k/e} V^{1,5} \quad (18)$$

Para temperaturas de 20 °C la ecuación 18 se transforma en:

$$G = 350 (K/e)^{0,5} \cdot V^{1,5} \quad (19)$$

en unidades del sistema métrico

6.3 Aplicación y recomendaciones

- Las telas pueden ser utilizadas en cualquier elemento de la planta de tratamiento para producir un determinado gradiente de velocidad. Si son intercaladas en el canal o en la tubería de llegada del agua cruda, producirán la turbulencia necesaria para la mezcla de los productos químicos. Pueden sustituir las paletas de un floculador mecánico, donde, además de optimizar la floculación, pasan a operar con menor velocidad, lo que prolonga la vida útil de la unidad.
- Si las telas son instaladas en tramos rectos de canales de floculación hidráulica —donde el gradiente de velocidad normalmente es muy bajo—, generarán gradientes más adecuados, lo que mejorará la floculación y permitirá un menor tiempo de residencia, bien sea por una tasa más elevada de colisiones entre las partículas —debido al aumento de la superficie de cizallamiento (efecto de la viscosidad)— o por el efecto de la división en compartimientos.
- Las experiencias realizadas sugieren que el diámetro del hilo de la malla tiende a limitar el tamaño del flóculo, como si lo cortase, aun a gradientes bajos. Este efecto negativo deja de ser sensible en hilos con un diámetro que sea 3 a 4 veces el máximo diámetro del flóculo; es decir, 3 ó 4 mm.
- El uso de mallas e hilos de diámetro pequeño debe, por lo tanto, quedar restringido a la mezcla rápida o al inicio de la floculación, cuando el flóculo aún no ha alcanzado tamaños significativos. Después de eso, se debe dar preferencia a mallas e hilos de mayor diámetro, que produzcan los gradientes deseados sin provocar la ruptura de los flóculos.
- Está demostrado que las telas son dispositivos económicos y eficientes de floculación, con innumerables y promisorias posibilidades de empleo en nuevos diseños y, principalmente, en la ampliación y optimización de plantas existentes.
- Se ha demostrado también que el gradiente de velocidad en una tela es función de la velocidad del flujo y de sus características geométricas (espaciamiento y diámetro de los hilos de la malla). Jugando con los elementos geométricos de la tela, se podrán obtener valores adecuados de gradiente

de velocidad para una velocidad dada en el canal. Se podrán adoptar velocidades más elevadas, como de 10 a 30 cm/s, por ejemplo, a fin de prevenir una sedimentación excesiva en el floculador.

- Los estudios ya realizados permiten indicar que es posible reducir considerablemente el tiempo de floculación. Se podrá obtener una sustancial economía en la realización de obras de ampliación o de nuevas instalaciones. Por otro lado, en unidades deficientes se podrá mejorar de manera sensible la calidad del agua tratada.
- Desde el punto de vista práctico, es fácil instalar telas en cualquier elemento de un canal o tanque de floculación, bien sea como dispositivo de floculación hidráulico o mecánico.
- Los trabajos hasta ahora realizados no permiten llegar a conclusiones definitivas sobre el empleo de las telas en las plantas de tratamiento; no obstante, son lo suficientemente consistentes como para permitir la aplicación práctica de estos dispositivos con relativa seguridad en cuanto a los resultados esperados. La continuación de los estudios en marcha y la recolección de información en las instalaciones donde fueron instalados tales dispositivos permitirán en breve tiempo consolidar y generalizar su uso, con excelentes ventajas económicas y operacionales.
- En la aplicación del cuadro 3-8 se ha dimensionado una malla para levantar el gradiente de velocidad en los pasos de un floculador vertical y en el cuadro 3-9, una malla para ajustar el gradiente de velocidad en un mezclador hidráulico.

Cuadro 3-8. Dimensionamiento de una malla para floculación (12)

| Paso | Datos | Cantidad | Unidad | Criterios | Resultados | Unidad |
|------|---------------------------|----------|-------------|--|--|-----------|
| 1 | Espaciamiento entre hilos | $e = 4$ | cm | $n = 100/4 \quad n = 25$ | Número de hilos por metro de ancho de canal | hilos/m |
| 2 | Grosor de los hilos | $d = 3$ | mm | $\varepsilon = (1 - nd)^2$ $\varepsilon = [1 - (2.5)(3)(10)^{-3}]^2$ $\varepsilon = 0.85$ | Porosidad de la malla | constante |
| 3 | | | | $K = 0.55 (1 - \varepsilon^2) / \varepsilon^2$ $K = [0.55 (1 - 0.85^2)] / 0.85^2$ $K = 0.21$ | Coefficiente de pérdida de carga | constante |
| 4 | Velocidad en el canal | $V = 10$ | cm/s | $G_{20}^0 = 350 (K / \nu)^{0.5} \cdot V^{1.5}$ $G = 350 [0.21 / 0.04]^{0.5} \cdot (10)^{1.5}$ $G = 25$ | Gradiente de velocidad del paso del flujo por la malla | s^{-1} |
| 5 | Temperatura del agua | $T = 20$ | $^{\circ}C$ | | | |
| 6 | | | | $h = K V^2 / 2g$ $h = [0.21 (0.10)^2] / 19.6$ $h = 1 (10)^{-4}$ | Pérdida de carga producida por la malla | m |

Cuadro 3-9. Dimensionamiento de una malla para un canal de mezcla rápida

| Paso | Datos | Símbolo | Unidad | Criterios | Resultados | Unidad |
|------|-------------------------------|---------|--------|--|---|-----------|
| 1 | Espaciamiento entre hilos = 2 | e | cm | $n = 100 / 2;$ $n = 50$ | Número de hilos por metro de ancho de canal | hilos/m |
| 2 | Grosor de los hilos = 1,5 | d | mm | $\varepsilon = (1 - nd)^2$; $\varepsilon = [1 - 50(1,5) (10)^{-3}]^2$ $\varepsilon = 0,85$ | Porosidad de la malla | |
| 3 | | | | $K = 0,55 (1 - \varepsilon) / \varepsilon^2$ $K = 0,55 (1 - 0,85^2) / 0,85^2$; $K = 0,21$ | Coefficiente de pérdida de carga | constante |
| 4 | Velocidad en el canal = 1,2 | V | m/s | $G_{30}^0 = 350 (K / e)^{0,5} V^{1,5}$ $G^z = 350 (0,21 / 0,02)^{0,5} (1,2)^{1,5}$ $G = 1.490$ | Gradiente de velocidad producido por el paso del flujo a través de la malla | s^{-1} |
| | Temperatura del agua = 20 | T | °C | | | |
| 5 | | | | $h = K V^2 / 2g$ $h = 0,21 (1,2)^2 / 19,6$ $h = 0,015$ | Pérdida de carga producida por la malla | m |

REFERENCIAS

- (1) Villegas, R. A. y R. D. Letterman. "Optimizing Flocculator Power Input", *Journal of the Environmental Division*, abril, 1976.
- (2) TeKippe, R. J y R. K. Ham. "Velocity Gradient Paths in Coagulation", *Journal of the American Water Works Association*, julio, 1971.
- (3) Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-EPA. *Optimización de la producción de plantas de tratamiento de agua mediante el Programa de Corrección Compuesto*. Washington, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. EPA/625/6-91/027, 1998.
- (4) Argaman, Y. y W. J. Kaufman. "Turbulence and flocculation", *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE, 1970.
- (5) Kawamura, Susumu y R. Rhodes Trussell. "Main Features of Large Water Treatment Plants in Japan", *Journal of the American Water Works Association*, junio, 1991.
- (6) Canepa de Vargas, Lidia. Estudio de la PFR de Barranca. Lima, CEPIS, 1977. Documento inédito.
- (7) Canepa de Vargas, Lidia. Fotos de archivo. Lima, CEPIS.
- (8) Bhargava, D. S. y C. S. P. Ojha. "Models for Design of Flocculating Baffled Channels", *Water Research*, vol. 27, 3, 1993.
- (9) Canepa de Vargas, Lidia. "Estudio sobre investigación en floculadores de pantallas de flujo horizontal". Documento inédito. Lima, 1977.
- (10) Canepa de Vargas, Lidia. Estudio de caso.
- (11) Richter, Carlos. *Projetos de estações de tratamento de água. Módulo 4.4. Projetos de unidades de floculação*. Lima, CEPIS, 1981.
- (12) Programa CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual V. Criterios de Diseño*. Serie Filtración Rapida. Lima, CEPIS, 1992.

-
- (13) Harris, H. S.; W. J. Kaufman y R. B. Krone. "Orthokinetic Flocculation in Water Purification". *Journal of Sanitary Engineering Division*, ASCE, diciembre.
 - (14) CEPIS/OPS (1973). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. Serie Técnica 13. Lima, CEPIS/OPS, 1966.
 - (15) CEPIS/OPS. *Criterios de diseño de plantas de tratamiento de agua*. Lima, CEPIS/OPS, s. f.
 - (16) Richter, Carlos y R. B. Moreira. *Floculadores de piedras. Experiencias en filtros pilotos*. Curitiba, Sanepar, 1980.
 - (17) Richter, Carlos. *Estación de tratamiento para pequeñas comunidades*. Curitiba, Sanepar, 1980.
 - (18) Richter, Carlos. *Sistemas de floculación acelerada*. Curitiba, Sanepar, s. f.
 - (19) Snel, H. y Jorge Arboleda. *Influencia de la escala de turbulencia en el proceso de floculación del agua*. Cali, ACODAL, 1982.
 - (20) Richter, Carlos. *Sistemas simplificados de floculación*. Seminario Internacional sobre Tecnología Apropriada para Potabilización del Agua. Cali, ACODAL, Seccional Valle del Cauca, 1987.
 - (21) Canepa de Vargas, Lidia. *Programa de evaluación de plantas en República Dominicana*. Informe Técnico 356. Lima, CEPIS, 1986.
 - (22) Mhaisalkar, V. A., R. Paramasivam y A. G. Bhole. "Optimizing Physical Parameters of Rapid Mix Design for Flocculation of Turbid Waters". *Water Research*, vol. 25, 1, 1991, pp. 43-52.
 - (23) Dharmappa, H. B., J. Verink, O. Fujiwara y S. Vigneswaran. "Optimal Design of a Flocculator". *Water Research*, vol. 27, 3, 1993, pp. 513-519.

Anexo A Viscosidad del agua

| Temperatura (°C) | Sistema métrico | | | | Inglés | |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|---|---|--|---|
| | Viscosidad dinámica (poises) | Viscosidad cinemática (Stokes) | Viscosidad dinámica (N·s/m ²) | Viscosidad cinemática (m ² /s) | Viscosidad dinámica (lb = s/pie ²) | Viscosidad cinemática (pie ² /s) |
| 0 | 1,787·10 ⁻² | 1,787·10 ⁻² | 1,787·10 ⁻³ | 1,787·10 ⁻⁶ | 3,73·10 ⁻⁵ | 1,92·10 ⁻⁵ |
| 1 | 1,728·10 ⁻² | 1,728·10 ⁻² | 1,728·10 ⁻³ | 1,728·10 ⁻⁶ | 3,61·10 ⁻⁵ | 1,86·10 ⁻⁵ |
| 2 | 1,671·10 ⁻² | 1,671·10 ⁻² | 1,671·10 ⁻³ | 1,671·10 ⁻⁶ | 3,49·10 ⁻⁵ | 1,80·10 ⁻⁵ |
| 3 | 1,618·10 ⁻² | 1,618·10 ⁻² | 1,618·10 ⁻³ | 1,618·10 ⁻⁶ | 3,38·10 ⁻⁵ | 1,74·10 ⁻⁵ |
| 4 | 1,567·10 ⁻² | 1,567·10 ⁻² | 1,567·10 ⁻³ | 1,567·10 ⁻⁶ | 3,27·10 ⁻⁵ | 1,69·10 ⁻⁵ |
| 5 | 1,519·10 ⁻² | 1,519·10 ⁻² | 1,519·10 ⁻³ | 1,519·10 ⁻⁶ | 3,17·10 ⁻⁵ | 1,63·10 ⁻⁵ |
| 6 | 1,472·10 ⁻² | 1,472·10 ⁻² | 1,472·10 ⁻³ | 1,472·10 ⁻⁶ | 3,08·10 ⁻⁵ | 1,58·10 ⁻⁵ |
| 7 | 1,428·10 ⁻² | 1,428·10 ⁻² | 1,428·10 ⁻³ | 1,428·10 ⁻⁶ | 2,98·10 ⁻⁵ | 1,54·10 ⁻⁵ |
| 8 | 1,386·10 ⁻² | 1,386·10 ⁻² | 1,386·10 ⁻³ | 1,386·10 ⁻⁶ | 2,90·10 ⁻⁵ | 1,49·10 ⁻⁵ |
| 9 | 1,346·10 ⁻² | 1,346·10 ⁻² | 1,346·10 ⁻³ | 1,346·10 ⁻⁶ | 2,81·10 ⁻⁵ | 1,45·10 ⁻⁵ |
| 10 | 1,307·10 ⁻² | 1,307·10 ⁻² | 1,307·10 ⁻³ | 1,307·10 ⁻⁶ | 2,73·10 ⁻⁵ | 1,41·10 ⁻⁵ |
| 11 | 1,271·10 ⁻² | 1,271·10 ⁻² | 1,271·10 ⁻³ | 1,271·10 ⁻⁶ | 2,66·10 ⁻⁵ | 1,37·10 ⁻⁵ |
| 12 | 1,235·10 ⁻² | 1,235·10 ⁻² | 1,235·10 ⁻³ | 1,235·10 ⁻⁶ | 2,58·10 ⁻⁵ | 1,33·10 ⁻⁵ |
| 13 | 1,202·10 ⁻² | 1,203·10 ⁻² | 1,202·10 ⁻³ | 1,203·10 ⁻⁶ | 2,51·10 ⁻⁵ | 1,29·10 ⁻⁵ |
| 14 | 1,169·10 ⁻² | 1,170·10 ⁻² | 1,169·10 ⁻³ | 1,170·10 ⁻⁶ | 2,44·10 ⁻⁵ | 1,26·10 ⁻⁵ |
| 15 | 1,139·10 ⁻² | 1,140·10 ⁻² | 1,139·10 ⁻³ | 1,140·10 ⁻⁶ | 2,38·10 ⁻⁵ | 1,23·10 ⁻⁵ |
| 16 | 1,109·10 ⁻² | 1,110·10 ⁻² | 1,109·10 ⁻³ | 1,110·10 ⁻⁶ | 2,32·10 ⁻⁵ | 1,19·10 ⁻⁵ |
| 17 | 1,081·10 ⁻² | 1,082·10 ⁻² | 1,081·10 ⁻³ | 1,082·10 ⁻⁶ | 2,26·10 ⁻⁵ | 1,16·10 ⁻⁵ |
| 18 | 1,053·10 ⁻² | 1,054·10 ⁻² | 1,053·10 ⁻³ | 1,054·10 ⁻⁶ | 2,20·10 ⁻⁵ | 1,13·10 ⁻⁵ |
| 19 | 1,027·10 ⁻² | 1,029·10 ⁻² | 1,027·10 ⁻³ | 1,029·10 ⁻⁶ | 2,14·10 ⁻⁵ | 1,11·10 ⁻⁵ |
| 20 | 1,002·10 ⁻² | 1,004·10 ⁻² | 1,002·10 ⁻³ | 1,004·10 ⁻⁶ | 2,09·10 ⁻⁵ | 1,08·10 ⁻⁵ |
| 21 | 0,9779·10 ⁻² | 0,9799·10 ⁻² | 0,978·10 ⁻³ | 0,980·10 ⁻⁶ | 2,04·10 ⁻⁵ | 1,05·10 ⁻⁵ |
| 22 | 0,9548·10 ⁻² | 0,9569·10 ⁻² | 0,954·10 ⁻³ | 0,957·10 ⁻⁶ | 1,99·10 ⁻⁵ | 1,03·10 ⁻⁵ |
| 23 | 0,9325·10 ⁻² | 0,9348·10 ⁻² | 0,932·10 ⁻³ | 0,935·10 ⁻⁶ | 1,95·10 ⁻⁵ | 1,01·10 ⁻⁵ |
| 24 | 0,9111·10 ⁻² | 0,9136·10 ⁻² | 0,911·10 ⁻³ | 0,914·10 ⁻⁶ | 1,90·10 ⁻⁵ | 0,98·10 ⁻⁵ |
| 25 | 0,8904·10 ⁻² | 0,8930·10 ⁻² | 0,890·10 ⁻³ | 0,893·10 ⁻⁶ | 1,86·10 ⁻⁵ | 0,96·10 ⁻⁵ |
| 26 | 0,8705·10 ⁻² | 0,8733·10 ⁻² | 0,870·10 ⁻³ | 0,873·10 ⁻⁶ | 1,82·10 ⁻⁵ | 0,94·10 ⁻⁵ |
| 27 | 0,8513·10 ⁻² | 0,8543·10 ⁻² | 0,851·10 ⁻³ | 0,854·10 ⁻⁶ | 1,78·10 ⁻⁵ | 0,92·10 ⁻⁵ |
| 28 | 0,8327·10 ⁻² | 0,8359·10 ⁻² | 0,833·10 ⁻³ | 0,836·10 ⁻⁶ | 1,74·10 ⁻⁵ | 0,90·10 ⁻⁵ |
| 29 | 0,8148·10 ⁻² | 0,8181·10 ⁻² | 0,815·10 ⁻³ | 0,818·10 ⁻⁶ | 1,70·10 ⁻⁵ | 0,88·10 ⁻⁵ |

Viscosidad del agua (continuación)

| Temperatura (°C) | Sistema métrico | | | | Inglés | |
|------------------|------------------------------|--------------------------------|---|---|---|--|
| | Viscosidad dinámica (poises) | Viscosidad cinemática (Stokes) | Viscosidad dinámica (N-s/m ²) | Viscosidad cinemática (m ² /s) | Viscosidad dinámica (lb = s/pe ²) | Viscosidad cinemática (pe ² /s) |
| 30 | 0,7975·10 ⁻² | 0,8010·10 ⁻² | 0,798·10 ⁻³ | 0,801·10 ⁻⁶ | 1,66·10 ⁻⁵ | 0,86·10 ⁻⁵ |
| 31 | 0,7808·10 ⁻² | 0,7844·10 ⁻² | 0,781·10 ⁻³ | 0,784·10 ⁻⁶ | 1,63·10 ⁻⁵ | 0,84·10 ⁻⁵ |
| 32 | 0,7647·10 ⁻² | 0,7685·10 ⁻² | 0,765·10 ⁻³ | 0,768·10 ⁻⁶ | 1,60·10 ⁻⁵ | 0,83·10 ⁻⁵ |
| 33 | 0,7491·10 ⁻² | 0,7531·10 ⁻² | 0,749·10 ⁻³ | 0,753·10 ⁻⁶ | 1,56·10 ⁻⁵ | 0,81·10 ⁻⁵ |
| 34 | 0,7340·10 ⁻² | 0,7381·10 ⁻² | 0,734·10 ⁻³ | 0,738·10 ⁻⁶ | 1,53·10 ⁻⁵ | 0,79·10 ⁻⁵ |
| 35 | 0,7194·10 ⁻² | 0,7237·10 ⁻² | 0,719·10 ⁻³ | 0,724·10 ⁻⁶ | 1,50·10 ⁻⁵ | 0,78·10 ⁻⁵ |
| 36 | 0,7052·10 ⁻² | 0,7097·10 ⁻² | 0,705·10 ⁻³ | 0,710·10 ⁻⁶ | 1,47·10 ⁻⁵ | 0,76·10 ⁻⁵ |
| 37 | 0,6915·10 ⁻² | 0,6961·10 ⁻² | 0,692·10 ⁻³ | 0,696·10 ⁻⁶ | 1,44·10 ⁻⁵ | 0,75·10 ⁻⁵ |
| 38 | 0,6783·10 ⁻² | 0,6831·10 ⁻² | 0,678·10 ⁻³ | 0,683·10 ⁻⁶ | 1,42·10 ⁻⁵ | 0,74·10 ⁻⁵ |
| 39 | 0,6654·10 ⁻² | 0,6703·10 ⁻² | 0,665·10 ⁻³ | 0,670·10 ⁻⁶ | 1,39·10 ⁻⁵ | 0,72·10 ⁻⁵ |
| 40 | 0,6529·10 ⁻² | 0,6580·10 ⁻² | 0,653·10 ⁻³ | 0,658·10 ⁻⁶ | 1,36·10 ⁻⁵ | 0,71·10 ⁻⁵ |
| 41 | 0,6408·10 ⁻² | 0,6461·10 ⁻² | 0,641·10 ⁻³ | 0,646·10 ⁻⁶ | 1,34·10 ⁻⁵ | 0,70·10 ⁻⁵ |
| 42 | 0,6291·10 ⁻² | 0,6345·10 ⁻² | 0,629·10 ⁻³ | 0,636·10 ⁻⁶ | 1,31·10 ⁻⁵ | 0,68·10 ⁻⁵ |
| 43 | 0,6178·10 ⁻² | 0,6234·10 ⁻² | 0,618·10 ⁻³ | 0,623·10 ⁻⁶ | 1,29·10 ⁻⁵ | 0,67·10 ⁻⁵ |
| 44 | 0,6067·10 ⁻² | 0,6124·10 ⁻² | 0,607·10 ⁻³ | 0,612·10 ⁻⁶ | 1,27·10 ⁻⁵ | 0,66·10 ⁻⁵ |
| 45 | 0,5960·10 ⁻² | 0,6019·10 ⁻² | 0,596·10 ⁻³ | 0,602·10 ⁻⁶ | 1,24·10 ⁻⁵ | 0,65·10 ⁻⁵ |
| 46 | 0,5856·10 ⁻² | 0,5916·10 ⁻² | 0,586·10 ⁻³ | 0,592·10 ⁻⁶ | 1,22·10 ⁻⁵ | 0,64·10 ⁻⁵ |
| 47 | 0,5755·10 ⁻² | 0,5817·10 ⁻² | 0,576·10 ⁻³ | 0,582·10 ⁻⁶ | 1,20·10 ⁻⁵ | 0,62·10 ⁻⁵ |
| 48 | 0,5656·10 ⁻² | 0,5819·10 ⁻² | 0,566·10 ⁻³ | 0,572·10 ⁻⁶ | 1,18·10 ⁻⁵ | 0,61·10 ⁻⁵ |
| 49 | 0,5561·10 ⁻² | 0,5626·10 ⁻² | 0,556·10 ⁻³ | 0,563·10 ⁻⁶ | 1,16·10 ⁻⁵ | 0,60·10 ⁻⁵ |
| 50 | 0,5468·10 ⁻² | 0,5534·10 ⁻² | 0,547·10 ⁻³ | 0,553·10 ⁻⁶ | 1,14·10 ⁻⁵ | 0,59·10 ⁻⁵ |

La viscosidad cinemática (ν) es calculada como:

$$\nu = \mu/\rho$$

Donde:

$$\begin{aligned}\nu &= \text{viscosidad cinemática (cm}^2/\text{s)} \\ \mu &= \text{viscosidad dinámica (g.s}^{-1}/\text{cm)} \\ \rho &= \text{densidad del agua (g/cm}^3\text{)}\end{aligned}$$

Para convertir la viscosidad dinámica en poises a unidades del Sistema Internacional:

$$\mu(\text{g/cm.s}) = (\text{g/cm.s}).(\text{kg}/1.000 \text{ g}).(100 \text{ cm/m}) = \frac{\text{N.s}^2/\text{m}}{\text{kg}}$$

$$\mu(\text{g/cm.s}) = 0,1 (\text{N.s/m}^2)$$

Para convertir la viscosidad cinemática en Stokes al Sistema Internacional:

$$\nu(\text{cm}^2/\text{s}) = (\text{cm}^2/\text{s}). (\text{m}^2/10 \text{ cm}^2) = 10^{-4}.\text{m}^2/\text{s}$$

