

CAPÍTULO 8

FLOTACIÓN

Ing. Lidia de Vargas

La flotación es un proceso de clarificación primaria particularmente efectivo para tratar aguas con baja turbiedad, altamente coloreadas y con gran contenido de algas.

Consiste en la separación de las partículas naturales presentes en el agua cruda, coaguladas o floculadas, mediante el uso de sales de aluminio o de hierro y de polímeros.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

En la flotación interviene la diferencia entre la masa volumétrica de los sólidos o flóculos y la del líquido en que se encuentran en suspensión. Sin embargo, contrariamente a lo que ocurre en la decantación, este proceso de separación sólido-líquido únicamente se aplica a partículas que tienen una masa volumétrica real (flotación natural) o aparente (flotación provocada) inferior a la del líquido que la contiene.

En la flotación provocada, se aprovecha la capacidad que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a burbujas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula-gas menos densos que el líquido que constituye la fase dispersa.

La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula-gas que se concentran en la superficie libre del líquido.

Para que sea factible la flotación de partículas sólidas o líquidas más densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido. Este contacto entre un sólido y un líquido se determina mediante la medida del ángulo formado por la superficie del sólido y la burbuja de gas (figura 8-1).

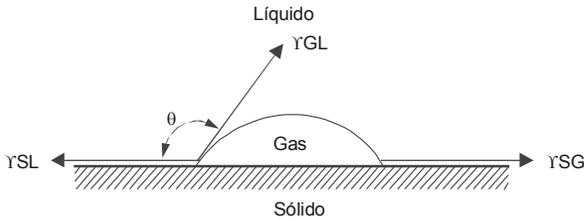


Figura 8-1. Ángulo entre la superficie del sólido y la burbuja de gas (θ)

ningún líquido da un ángulo θ mayor de 110° (caso del mercurio).

Entre estos dos valores, la adherencia partícula–gas aumenta con el valor del ángulo θ . Puede considerarse este tipo de flotación de una partícula en el caso de partículas sólidas o líquidas (aceites) que tienen una forma relativamente simple y una naturaleza conocida. En el caso de partículas floculadas, a los fenómenos de superficie se suman las adherencias mecánicas ligadas a la estructura de los flóculos, especialmente inclusiones de gas en los flóculos.

El ángulo θ se puede aumentar mediante el uso de sustancias tensoactivas que forman una película hidrófoba alrededor de las partículas. Tales sustancias poseen en sus moléculas una parte no polar (hidrófoba) que es atraída por las burbujas de aire en ascensión y otra polar (hidrófila), que es atraída por la fase dispersa. El empleo de sustancias espumantes también ha sido recomendado para formar una mezcla más estable de burbujas y partículas: tales sustancias tienen, además, la propiedad de reducir el tamaño de las bolas de aire, aumentando la superficie específica de las mismas, para proporcionar mayor capacidad de absorción y tiempo de contacto, ya que bolas de aire pequeñas poseen menores velocidades ascensionales.

Los mecanismos de contacto entre las bolas de aire y las partículas pueden resultar de las siguientes acciones:

- a) Colisión entre la bola y la partícula, debido a turbulencia o a atracción entre ambas.

Si $\theta = 0$, el contacto entre el sólido y el líquido se realiza de forma perfecta; es imposible la adherencia sólido-gas.

Si $\theta = 180^\circ$, el contacto entre el sólido y el líquido es nulo; es óptimo el contacto sólido-gas. Se trata de un caso límite que nunca se da en la práctica, puesto que

- b) Aprisionamiento de las bolas contra los flóculos o contacto entre los flóculos que están sedimentando y las bolas de aire en ascensión.
- c) Crecimiento de las bolas de aire entre los flóculos. Cuando se tienen partículas hidrofílicas, los mecanismos *b* y *c* parecen ser los responsables de la eficiencia de la flotación, en tanto que el mecanismo *a* parece predominar en la obtención de una ligazón más estable entre las bolas de aire y las partículas, las cuales requieren un cierto grado de hidrofobia.

2. ECUACIONES DE LA VELOCIDAD ASCENSIONAL

El conjunto partícula–burbuja de gas adquiere rápidamente una velocidad ascensional cuyo valor permanece constante: se trata de la velocidad límite de ascensión, que se calcula, al igual que las partículas sometidas a sedimentación, por medio de la formula general de Newton:

$$V^{2-n} = \frac{4d^{1+n} g (\rho_s - \rho)}{3C_e} \quad (1)$$

En la que para el caso de la flotación:

- d* es el diámetro del conjunto partícula–burbuja de gas y
- ρ_s es la masa volumétrica del conjunto partícula–burbuja de gas.

Los cálculos siguen siendo los mismos: por lo tanto, en función del número de Reynolds, pueden definirse regímenes de flujo para los cuales la velocidad límite ascensional viene dada por las formulas particulares de Stokes (laminar), de Allen (intermedio) y de Newton (turbulento).

La ecuación de Stokes $V = \frac{(\rho_e - \rho_s) g d^2}{18 \mu}$ (2)

resuelta para burbujas de aire solamente, en agua a 20 °C, muestra que el régimen laminar se respeta para diámetros de burbujas inferiores a 120 micrómetros. Su velocidad límite es, entonces, de 30 m/h. Se trata de un caso extremo, puesto que la diferencia ($\rho_e - \rho_s$) es máxima.

Mediante esta ecuación, se aprecia la influencia de los diferentes factores: la velocidad (*V*) varía como (*d*²), como ($\rho_e - \rho_s$) y en el mismo sentido que la

temperatura del líquido, la cual, a su vez, varía en sentido inverso a la viscosidad. En efecto, es preciso que intervenga el factor de forma o de esfericidad del conjunto partícula-burbuja de gas, que, en las anteriores ecuaciones de Stokes y de Newton, se asimila a una esfera.

La influencia favorable del diámetro o del tamaño del conjunto partícula-burbuja de gas no debe hacer olvidar que, en el caso de la flotación de partículas más pesadas que el líquido, la superficie específica —es decir, la relación superficie/volumen o superficie/masa— disminuye cuando aumenta el diámetro. Se obtiene, así, para una misma cantidad de aire fijado por unidad de superficie una reducción del factor $(\rho_e - \rho_s)$; intervienen, por lo tanto, los dos parámetros.

El tamaño de las bolas de aire o burbujas es muy importante en la flotación, pues bolas pequeñas, además de presentar mayor superficie para una misma cantidad de aire, necesitan desplazar menor cantidad de agua de la superficie de la partícula donde se van a adherir. La relación entre el tiempo de contacto entre las bolas y las partículas en una cámara de flotación depende de la velocidad ascensional de las bolas, que, a su vez, es proporcional al cuadrado del diámetro de las mismas.

$$\frac{Tas_1}{Tas_2} = \frac{Vas_1}{Vas_2} = \frac{(db_2)^2}{db_1^2} \quad (3)$$

Donde:

Tas_1, Tas_2 : tiempo de ascensión de las bolas 1 y 2, respectivamente (s).

Vas_1, Vas_2 : velocidad ascensional de las bolas 1 y 2, respectivamente (m/s).

db_1, db_2 : diámetro de las bolas 1 y 2, respectivamente (m).

Para una bola de aire con $db_1 = 0,1$, db_2 resulta, en la cámara de flotación,

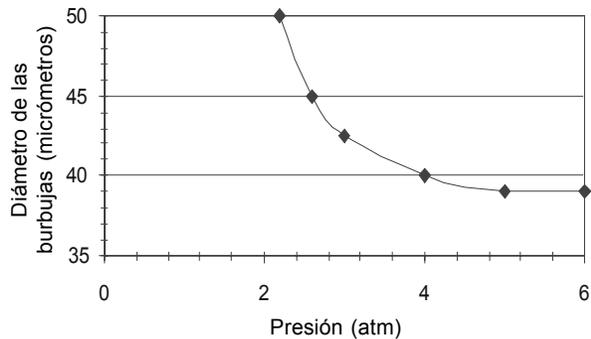


Figura 8-2. Influencia de la presión en el diámetro de las bolas de aire

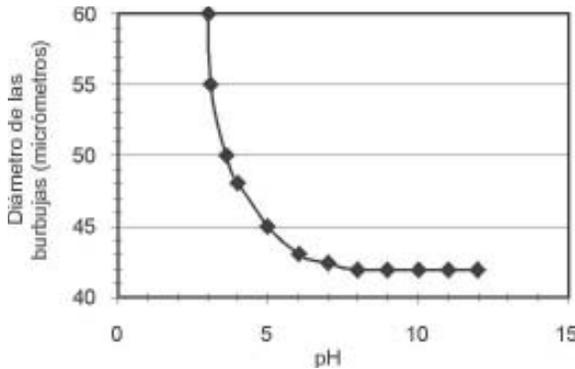


Figura 8-3. Influencia del pH en el tamaño de las burbujas

un tiempo cien veces mayor. El tamaño de las bolas depende, principalmente, de la presión de disolución del aire en el agua y del pH, como se muestra en la figura 8-2.

El pH también puede influir en el tamaño de las bolas formadas en el interior de la cámara de disolución, como se muestra en la figura 8-3.

Volumen mínimo de gas necesario para la flotación. El volumen mínimo de gas V_g , de masa volumétrica ρ_g , necesario para conseguir la flotación de una partícula de masa S y de masa volumétrica ρ_p , en un líquido de masa volumétrica ρ_l viene dado por la siguiente relación:

$$V_g / S = (\rho_p - \rho_l) / (\rho_l - \rho_g) (1/\rho_g) \quad (4)$$

3. SISTEMAS DE FLOTACIÓN

Cualquier sistema de flotación debe presentar las siguientes características:

- Generación de bolas de tamaño apropiado en relación con las partículas que se desea remover.
- Adherencia eficiente entre las bolas de aire y las partículas en suspensión.
- Separación adecuada del material flotante.

La flotación puede ser realizada por aire disperso, por bolas generadas a través del proceso electrolítico y por aire disuelto, cuyas características principales son presentadas a continuación.

3.1 Flotación por aire disperso

En estos sistemas usualmente se emplean rotores que promueven, simultáneamente, dispersión, aereación y agitación de la suspensión, con producción de bolas de aire que tienen cerca de un μm de diámetro. Es posible, también, el uso de un medio poroso para difundir el aire, aunque las bolas resultan con un diámetro mayor ($\sim 50 \mu\text{m}$). La flotación por aire disperso comúnmente es utilizada en la industria minera.

3.2 Flotación electrolítica

La oxidación anódica del ion cloruro de una suspensión con pH alrededor de 7,5 con producción de ion hipoclorito y oxígeno ha sido investigada como unidad de generación de las bolas en la flotación de suspensiones en las que fueron usados cloruro férrico como coagulante primario y polímero orgánico como auxiliar de floculación. Este sistema requiere investigaciones futuras que tengan en cuenta, principalmente, la calidad del agua por tratar.

3.3 Flotación por aire disuelto

La flotación por aire disuelto ha sido uno de los procesos más estudiados en el tratamiento de las aguas residuales. Actualmente, también ha sido muy investigado en el tratamiento de aguas de abastecimiento.

Hay tres tipos básicos de sistemas de flotación:

- a) con presurización parcial del afluente (figura 8-4);
- b) con presurización total del afluente (figura 8-5);
- c) con presurización de la recirculación (figura 8-6).

Entre los tipos de flotación mostrados en las figuras 8-4 a la 8-6, aquella con presurización de la recirculación es la más aconsejable en el tratamiento de las aguas, pues los flóculos podrían romperse en la bomba.

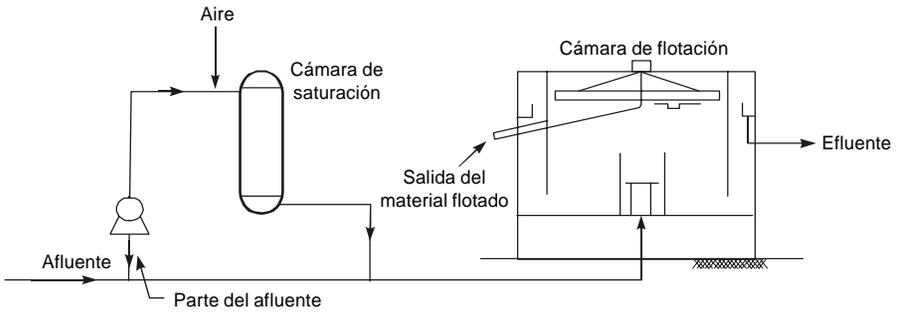


Figura 8-4. Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización parcial del efluente

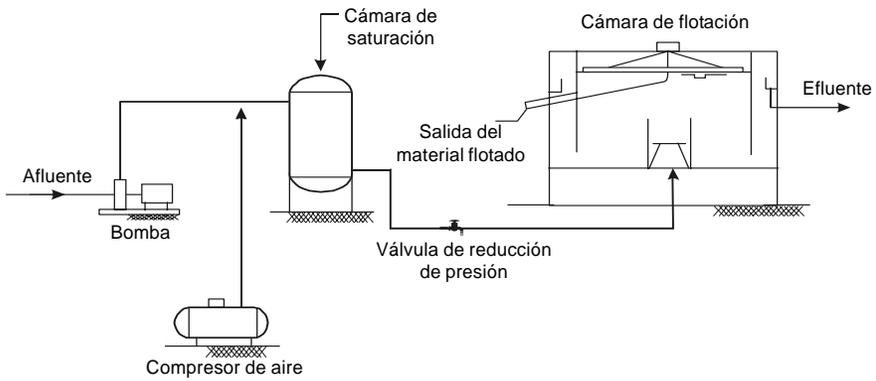


Figura 8-5. Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización total del efluente

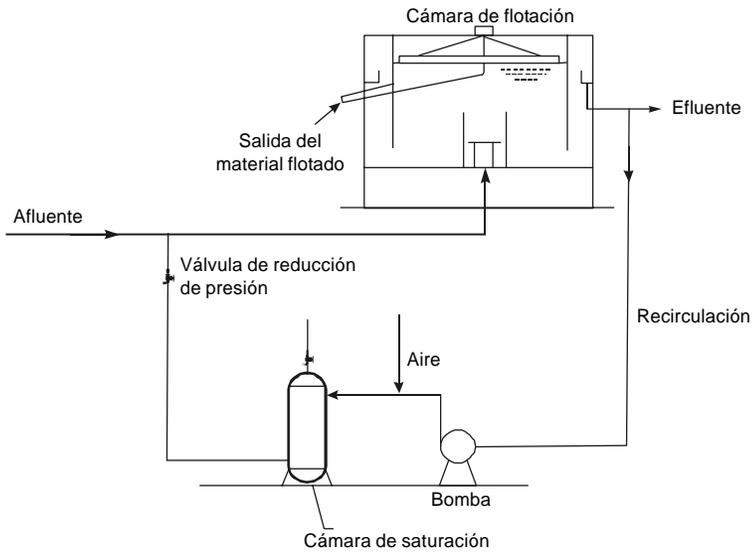


Figura 8-6. Sistemas de flotación por aire disuelto. Presurización de la recirculación

4. PARÁMETROS DE PROYECTOS

Los proyectos de sistemas de flotación por aire disuelto dependen de la concentración de partículas suspendidas, cantidad de aire, unidad de saturación, velocidad ascensional de las partículas, tasa de aplicación y tratamiento químico. Es posible que otras características —como el tamaño y la distribución de tamaños de las partículas— puedan influir en la eficiencia de la flotación, pero ello todavía necesita ser investigado.

4.1 Relación aire-sólidos

La relación aire-sólidos en un sistema de flotación por aire disuelto con presurización de la recirculación está dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{Aar}{Sso} = \frac{1.3 Sar (f.P - 1) FREC}{Sa \cdot Qaf} \quad (5)$$

Donde:

Aar/Sso: cantidad de aire/cantidad de sólidos (mg/mg).

Sar: solubilidad del aire en el agua, en función de la temperatura, la altitud y la presión atmosférica (mL/L).

F: fracción de aire disuelto a la presión *P*.

P: presión atmosférica (atm).

Sa: concentración de sólidos suspendidos (mg/L).

Frec: caudal de recirculación (m³/s).

Qaf: caudal afluente (m³/s).

La ecuación 5 fue propuesta para espesamiento de lodos en sistemas de tratamiento de aguas residuales, en que la concentración de sólidos suspendidos, en general, era superior a 1.000 mg/L. En el tratamiento de aguas de abastecimiento, en que la flotación puede ser empleada con éxito, cuando el color verdadero es elevado en relación con la turbiedad, o cuando la densidad de algas fuera alta, la relación *Aar/Sso* será, probablemente, mayor, llegando a valores próximos a la unidad, pues la concentración de flóculos es relativamente baja (raramente excede de 500 mg/L), lo que exige mayor cantidad de aire para obtener un elevado número de choques entre las partículas y las bolas de aire. Según las investigaciones realizadas por Zabel, la cantidad de aire es independiente de la concentra-

concentración de sólidos y sí depende del volumen de agua a ser clarificado, cuando S_{50} es inferior a 1,000 mg/L.

En la figura 8-7 se muestran los resultados obtenidos con diferentes dispositivos para distribución del agua presurizada en la cámara de flotación. Puede notarse que, para una relación A_{ar}/V_{ag} de 7 a 10 ar/m³ de agua flotada, la eficiencia de remoción de turbiedad prácticamente no se altera.

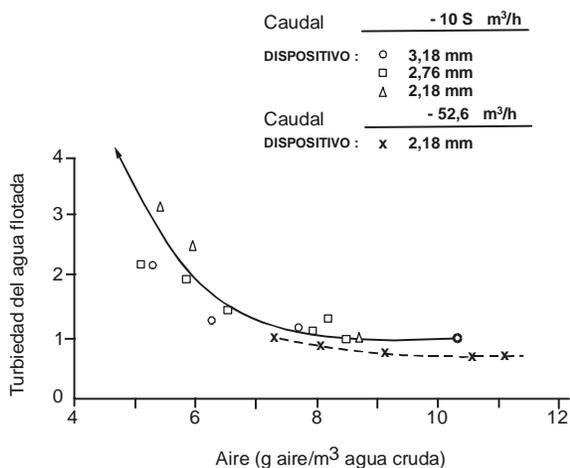


Figura 8-7. Influencia de la relación V_{ar}/V_{ag} en la eficiencia de la flotación

4.2 Cámara de presurización y recirculación de agua clarificada

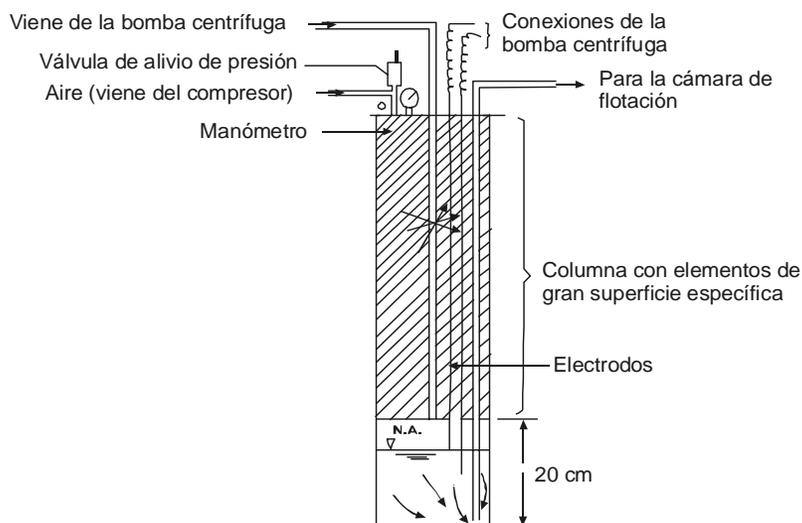


Figura 8-8. Cámara de presurización con elementos de gran superficie específica

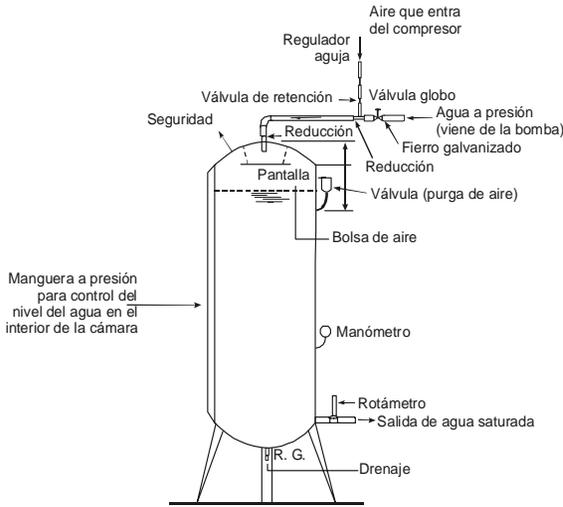


Figura 8-9. Cámara de presurización sin elementos de relleno

La cámara de saturación de aire depende de la presión y del uso de elementos de gran superficie específica en su interior. La presión es usualmente mantenida entre 250 y 500 KPa, la tasa de escurrimiento superficial varía de 1.000 a 2.000 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ y el tiempo de retención es inferior a 5 minutos. En las figuras 8-8 y 8-9 se muestran dos tipos básicos de cámaras de presurización.

El dispositivo de distribución de agua presurizada en el agua que va a ser flotada es muy importante, pues en la salida de este el agua presurizada es reducida a la presión atmosférica. Se requiere el uso de difusores para que el aire disuelto forme microbolas con tamaños de entre 20 y 80 μm . Entre las cámaras de presurización y de flotación, es recomendable la instalación de una válvula reductora de presión, que permita ajustar el caudal de recirculación y la presión que va a ser mantenida en la cámara de presurización. Se debe evitar que se produzca una turbulencia excesiva en la mezcla de las dos aguas, pues los flocúlos del agua floculada podrían romperse.

El caudal de recirculación recomendado varía de 5 a 15% del caudal de agua que va a ser clarificado. En función del caudal de recirculación y de la presión en el interior de la cámara de presurización, la cantidad de aire

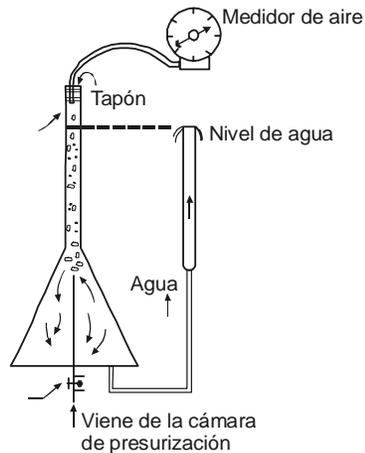


Figura 8-10. Dispositivo para la medición de la cantidad de aire liberado (35)

necesaria podría ser optimizada a través de una derivación de la tubería de salida de esa cámara y de la instalación de un dispositivo para la medición de la cantidad de aire y de agua, como se muestra esquemáticamente en la figura 8-10.

4.3 Cámara de flotación

La cámara de flotación puede ser de sección rectangular o circular. En el caso de cámaras rectangulares es recomendable la instalación de una pantalla con un ángulo de inclinación de 60° con la horizontal y con 30 a 50 cm de largo, conforme se muestra en la figura 8-11. El ancho de la cámara depende del tipo de equipo usado para el raspado del material flotante y rara vez excede de 8 metros.

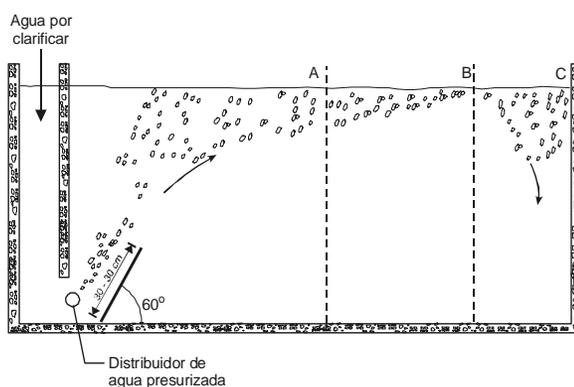


Figura 8-11. Cámara de flotación rectangular

El largo puede variar entre 4 y 12 metros siempre que no ocurran las situaciones A o C (véase la figura 8-11). En el primer caso, el largo es insuficiente, y en el segundo, hay deposición de material flotante. La profundidad varía entre 1 y 3 metros, dependiendo del tipo de dispositivo para la distribución de agua presurizada en el interior de la cámara de flotación.

En la figura 8-12 se muestra el esquema de una cámara de flotación circular. La mezcla de agua presurizada con el agua por clarificar se hace en un punto próximo a la entrada de la cámara de flotación, que en el centro posee un ducto también circular, para conducir el agua a la parte superior y evitar cortocircuitos. El material flotante es continuamente raspado hacia una o más canaletas de colección. Mientras el agua hace un movimiento descendente, pasa por la parte inferior del cilindro intermedio y es colectada en la canaleta localizada en la periferia del cilindro externo.

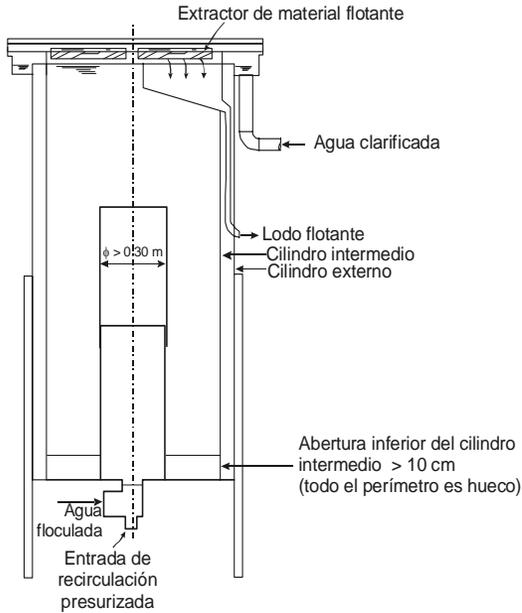


Figura 8-12. Cámara de flotación circular

La cámara de flotación, independientemente de la forma que tenga, es proyectada para un tiempo medio de retención comprendido entre 10 y 20 minutos y una tasa de escurrimiento superficial de 100 a 300 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. La calidad del agua cruda y las condiciones de pretratamiento influyen tanto en el tiempo de retención como en la tasa de escurrimiento superficial, razón por la cual es fundamental realizar una investigación antes de elaborar el proyecto definitivo.

4.4 Pretratamiento

La eficiencia de la flotación depende del pretratamiento realizado y este, a su vez, está relacionado con la calidad del agua cruda. La realización de investigaciones piloto, aunque no sean de escurrimiento continuo, pueden proporcionar información fundamental en cuanto al tipo de coagulante primario, la dosis y el pH de coagulación, el tipo y la dosis de polímero. Además de la mezcla rápida, un tiempo de floculación comprendido entre 5 y 20 minutos puede ser necesario para que los flóculos alcancen un tamaño de 0,5 y 1 mm, considerado ideal para la flotación.

En la figura 8-13 se muestran los resultados de unos trabajos realizados en Inglaterra (2) en que la eficiencia de remoción de color verdadero y de algas fue superior a 85%.

En la figura 8-14 se muestran los resultados obtenidos en ensayos de coagulación–floculación–sedimentación en una instalación piloto de flotación para un agua cruda con turbiedad del orden de 22–24 UNT (2).

En el cuadro 8-1 se muestra la eficiencia de remoción de algas de los decantadores comparativamente con la eficiencia de la flotación, usando sulfato ferroso clorado como coagulante (3). La planta de flotación fue operada a una tasa ascensional de 12 m/h, mientras que el decantador de manto de lodos no pudo ser operado con más de un m/h, aun con la adición de polielectrolitos.

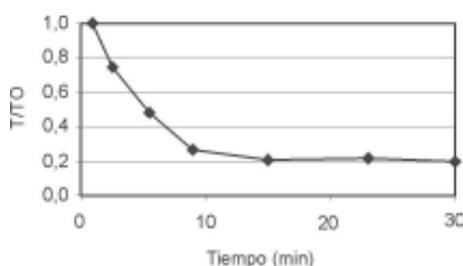


Figura 8-12. Remoción de turbiedad

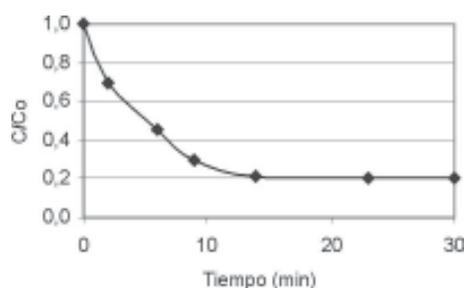


Figura 8-13. Remoción del color

Cuadro 8-1. Comparación de la eficiencia de remoción de algas en decantación y flotación usando sulfato ferroso clorado (3)

Tipo de alga	Agua cruda (células/mL)	Tratamiento por sedimentación (células/mL)	Tratamiento por flotación (células/mL)
<i>Aphanizomenon</i>	179.000	23.000	2.800
<i>Microcystis</i> *	102.000	24.000	2.000
<i>Stephanodiscus</i>	53.000	21.900	9.100
<i>Chlorella</i>	23.000	3.600	2.200

*Se usó sulfato de aluminio como coagulante.

En el cuadro 8-2 se presentan resultados de evaluaciones realizadas en algunos sistemas de flotación por aire disuelto utilizados en el abastecimiento de agua en diferentes comunidades en Inglaterra (3).

Cuadro 8-2. Resultados de la operación de sistemas de flotación en plantas de tratamiento de agua (3)

Sistema	Agua cruda		Agua flotada	
	Color verdadero (μH)	Turbiedad UNT	Color verdadero (μH)	Turbiedad UNT
A	—	—	—	—
B	6 – 44	1 – 7	—	—
C	6 – 22	0,5 – 6,4	0,5 – 8,0	0,2 – 3,0
D	12 – 27	1 – 9,5	0 – 3,0	0,6 – 4,0
E	2 – 60	0,6 – 3,6	4 (med)	0,6 (med)
F	22 – 240	0,5 – 29	4,5 – 35,0	0,5 – 8,5

A veces el uso de un polímero resulta benéfico, especialmente para evitar la desagregación del material flotado. Véase la figura 8-10 (2).

La remoción del material flotado, a través de raspadores con funcionamiento continuo o intermitente, es común en las instalaciones de flotación por aire disuelto.

Parece existir un tiempo máximo entre raspados sucesivos en la operación intermitente (del orden de 2 horas), que permite el espesamiento del material flotado hasta una concentración de 3%. En cámaras de flotación circulares, la rotación del equipo de raspado recomendada es inferior a 0,5 rpm mientras que en los rectangulares, la velocidad de desplazamiento no debe ser mayor de 0,5 m/min.

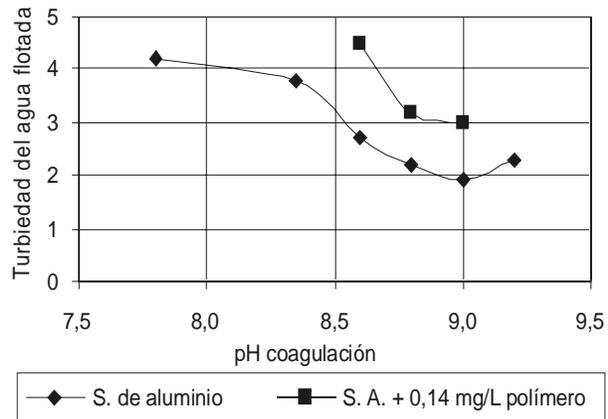


Figura 8-15. Efecto del polímero en la calidad del efluente flotado

Se efectuaron evaluaciones de filtración direc-

ta con y sin preozonización y flotación con aire disuelto y filtración para la clarificación del almacenamiento de aguas de alta calidad en Greenville, Carolina del Sur, en 1995 (4).

Las metas del estudio incluyeron la producción de agua filtrada de baja turbiedad, control de algas, hierro, manganeso y subproductos de la desinfección.

El tren de flotación con aire disuelto dio carreras de filtración más largas que la filtración directa. Se alcanzó en ambos casos la meta de 0,10 UNT de calidad de agua filtrada.

El empleo de preozonización fue beneficioso para la filtración directa. La remoción de carbón orgánico total, de productos de la desinfección y de hierro y manganeso fue similar en ambos. El uso de cloruro férrico no presentó ventajas sobre el sulfato de aluminio como coagulante primario. Como se utilizaron dosis similares, el empleo de sulfato de aluminio sería más económico en las plantas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Degrémont. *Manual técnico del agua*. Cuarta edición. Bilbao, 1979.
- (2) Di Bernardo, Luiz. *Métodos y técnicas de tratamiento de agua*. Volumen 1. Rio de Janeiro, 1993.
- (3) Zabel, Thomas. The advantages of dissolved-air flotation for water treatment. *Journal AWWA*, mayo, 1985.
- (4) Ferguson, C.; Logsdon, G. S. y Curley, D. Comparison of dissolved air flotation and direct filtration. *Water Scientific Technology*, vol. 31, 3-4, 1995, pp.113-124.

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

- Edzwald, J. Principles and applications of dissolved air flotation. *Water Scientific Technology*, vol. 31, 3-4, 1995, pp. 1-23.
- Fukushi, K.; Tambo, N. y Matsui, Y. A kinetic model for dissolved air in water and wastewater treatment. *Water Science Technology*, vol. 31, 3-4, 1995, pp. 37-47.
- Reali, M. A. y Marchetto, M. Clarificación de agua cruda con color moderadamente elevado. ABES, 1997.
- Richter, C. y Cristar, F. Clarificación de agua por flotación con aire disuelto. Aplicaciones realizadas en Uruguay y Brasil. S. d.
- Sartori, L. y Reali M. A. Disminución de la dosis de coagulante primario a través de la aplicación de polímetros sintéticos en la flotación de aguas para abastecimiento. ABES, 1997.
- Van Puffelen, J.; Buijs, P.; Nuhn, P. y Hijnen W. Dissolved air flotation in potable water treatment: the Dutch experience. *Water Science Technology*, vol. 31, 3-4, 1995, pp. 149-157.