

Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina. Parte II: Flotación

Cinda Beltrán Ortiz
Napoleón Jacinto Eulate

Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Universidad Técnica de Oruro
Cebeltran2003@hotmail.com

Resumen

Los resultados del presente trabajo de investigación, muestran como una alternativa eficiente la aplicación de microburbujas para una remoción efectiva por flotación, de los lodos de tratamiento químico del DAM-EMH.

La aplicación de esta técnica comprende el desarrollo conceptual, diseño, dimensionamiento y construcción del equipo de laboratorio; además, de la instrumentación para la adquisición de datos.

La flotación de lodo floculado (flóculos de tamaño $\sim 1,400 \mu\text{m}$) se lleva a cabo aplicando microburbujas $< 50 \mu\text{m}$, que son generadas por la disolución de aire en agua a 4 bar de presión de saturación y liberación a través de un constrictor de placa de orificio de 1 mm, de diámetro.

Los lodos de flotación tienen una concentración $>7\%$ sólidos, y una eficiencia de remoción $>98\%$, para un tiempo de flotación de 150 s. La velocidad de remoción de sólidos con una carga hidráulica de $18 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, es 5 veces mayor a la velocidad de sedimentación.

Los lodos tienen un pH de 9.0, son estables y pueden ser dispuestos con seguridad en el ambiente.

El agua tratada tiene un pH < 9 , contiene $< 30 \text{ mg/L}$ de sólidos en suspensión y es apta para uso industrial o descarga al medio ambiente.

Palabras clave: Microburbujas, Flotación, Drenaje ácido de mina.

Application of microbubbles in the flotation of sludge from mine water treatment. Part II: Flotation

Abstract

The results of this research show how an efficient application of microbubbles of size $< 100 \mu\text{m}$, for effective removal by flotation of sludge from chemical treatment of AMD-EMH.

The application of this technique contains the theoretical development, design, sizing and construction of the laboratory equipment; further, the instrumentation for data acquisition.

The flotation of the flocculated sludge (floc size $\sim 1,400 \mu\text{m}$) is carried out applying microbubbles of size $< 50 \mu\text{m}$, which are generated by air dissolution in water at saturation pressure of 4 bar and released through a plate orifice of 1 mm diameter.

The sludge of flotation has a concentration $>7\%$ solids and a removal efficiency $>98\%$, for a flotation time of 150 s. The solids removal velocity with a hydraulic charge of $18 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, is 5 fold greater than the sedimentation velocity.

The sludge has a pH of 9, is stable and can be disposed in the environment safely.

The treated water has a pH <9, contains <30 mg/L of suspended solids and is apt for industrial use or discharged to the environment.

Keywords: Microbubbles, Flotation, Mine acid drainage.

Aplicação de microbolhas no tratamento de flotação de lodo de água ácida de mina. Parte II: Flotação

Resumo

Os resultados desta pesquisa mostram como uma alternativa eficiente à aplicação de microbolhas para uma remoção eficaz por flotação das lamas produzidas no tratamento químico de AMD-EMH.

A aplicação desta técnica incluem o desenvolvimento de conceito, projeto, dimensionamento e construção de equipamentos de laboratório, bem como a instrumentação para aquisição de dados.

A flotação da lama "floculada" (flocos de tamanho 1,400 µm) é feita usando microbolhas <50 µm, que são geradas através da dissolução de ar na água a 4 bar de pressão de saturação e liberação através dum constritor de placa de orifício de 1 mm de diâmetro.

As lamas de flotação têm uma concentração de >7% sólidos, e uma eficiência de remoção de >98% para um tempo de flotação de 150 segundos. A taxa de remoção de sólidos, com uma carga hidráulica de 18 m³/m²hr é de 5 vezes maior que a taxa de sedimentação.

As lamas têm um pH de 9.0, são estáveis e podem ser dispostos de forma segura para o ambiente.

A água tratada tem um pH <9, contendo <30 mg/l de sólidos em suspensão, e é adequado para a utilização industrial ou descarga para o meio ambiente.

Palavras chave: microbolhas, flotação, água ácida de mina.

Introducción

La calidad del lodo producido por la técnica activa de tratamiento con cal [1], se ve afectada por la composición química del DAM, reactivos de floculación y finalmente por el diseño del proceso de neutralización. Tiene una densidad entre 1.07 a 1.37 mg/ml y un pH entre 8.5 á 10.0, es una masa amorfa, tiene un potencial de neutralización de 100 á 900 t de CaCO₃ equivalente y está compuesto por: hidróxidos de metales (Fe, Zn, Cu, Cd, etc.) yeso y carbonatos, el tamaño de las partículas se encuentra entre 2 á 30 µm y para la separación sólido líquido pasa a la etapa de sedimentación con la adición de floculante.

Una de las mayores desventajas de este proceso, es la etapa de sedimentación que presenta dificultades debido fundamentalmente a que los flóculos producidos tienen baja densidad, y tienden a sedimentar muy lentamente o permanecer en suspensión, lo que influye en la cinética de separación; llegando a producir efluentes no muy limpios, lodos altamente hidratados porque se encuentran sumergidos en medios acuosos, de manera que la disposición de un pequeño contenido de sólidos requiere el manejo de un gran volumen de lodos.

En el presente estudio, se busca mejorar esta etapa, aplicando la flotación asistida por microburbujas. La aplicación de esta técnica debido a las características particulares de las microburbujas; y la presencia de fenómenos de superficie como la colisión y adhesión, incluyendo fenómenos como el

aprimamiento de las microburbujas en el interior de los flóculos y el arrastre mecánico de partículas en suspensión por parte de un lecho de microburbujas en ascensión, permitirían obtener una fase líquida clara y lodos con un mayor porcentaje de sólidos; además, de mejorar la cinética de remoción de sólidos.

En los últimos años la tecnología de las microburbujas [2, 3], debido a su tamaño extremadamente pequeño y sus características físicas, están ganando cada vez mayor atención en varios campos de la ciencia y tecnología, tales como la ingeniería biomédica, crianza de peces, medicina, tratamiento y purificación de aguas, etc.

Estas microburbujas por ser de tamaño muy pequeño, se caracterizan por tener cargas eléctricas en soluciones acuosas, que atraen las partículas suspendidas para formar agregados partícula - microburbuja y flotar de manera muy eficaz. La mayor aplicación de las microburbujas en el tratamiento de aguas residuales [4], es en la clarificación de aguas por flotación. La flotación es usada como una alternativa a la sedimentación para la remoción de partículas de aguas de baja turbidez, aguas altamente coloreadas a baja temperatura o remoción de algas.

Características de las microburbujas

La microburbuja está definida como una burbuja extremadamente pequeña y está en un rango de tamaño generalmente entre 1 á 100 µm. Las microburbujas pueden

ascender uniformemente en un líquido. En los últimos años [5, 6] se ha investigado bastante sobre las microburbujas. Las microburbujas, que en su mayoría contienen oxígeno o aire, pueden permanecer suspendidas en el agua durante un período prolongado. Poco a poco, el gas que está dentro de las microburbujas se disuelve en el agua y éstas desaparecen.

Las características más importantes de una microburbuja son su superficie específica alta y una presión interna alta.

a) Superficie específica

Las microburbujas [5, 6] tienen una superficie específica alta por unidad de volumen de dispersión, a (L^{-1}). Para microburbujas esféricas viene expresada por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{6\varepsilon_G}{d_{b,32}} \quad (1)$$

Donde:

- ε_G Fracción de aire disperso en el líquido
- d_{bi} Diámetro de la microburbuja.
- n Número de microburbujas.
- $d_{b,32}$ Diámetro promedio de las burbujas.

Para una cantidad determinada de aire disperso, la disminución del tamaño de burbuja resulta en el aumento de la superficie específica.

La presencia de contaminantes, por la inclusión de tensoactivos ayuda en la formación y mantenimiento de la membrana de la microburbuja formando una capa en la interfase, de este modo la superficie de la microburbuja se hace inmóvil, que se traduce en la velocidad de crecimiento más lento. La velocidad ascensional de V_{abr} , es proporcional al cuadrado del diámetro de la burbuja d_b^2 . Una microburbuja con un diámetro de 20 μm asciende lentamente, una velocidad lenta conduce a un mayor tiempo de residencia y por tanto una mayor cantidad de gas disperso que está asociado con una mayor área interfacial. Las burbujas más grandes tienen mayores velocidades de ascensión y pueden existir como elipsoides (1 á 10 mm) o casquetes esféricos (> 10 mm).

b) Presión interna alta

La presión que produce la tensión superficial de la película de líquido que rodea a una microburbuja de gas, es inversamente proporcional al radio de la microburbuja, de manera que cuanto más pequeña la microburbuja, mayor es el efecto de la tensión superficial. Esta presión actúa en el sentido de colapsar a la microburbuja, por lo que su presión interna para que ésta no colapse, ha de ser igual a la tensión superficial más la presión ambiental, tal como se puede ver en la figura 1.

La estabilidad de la microburbuja en la fase acuosa es inversamente proporcional a la presión, que a su vez es directamente proporcional a la tensión superficial de la microburbuja. Es decir, la disminución de la tensión superficial que actúa sobre la microburbuja aumenta el tiempo de persistencia de la microburbuja.

En el equilibrio, la magnitud de la diferencia de presión ΔP , puede ser expresada de acuerdo a la ecuación (2) de Young-Laplace [7].

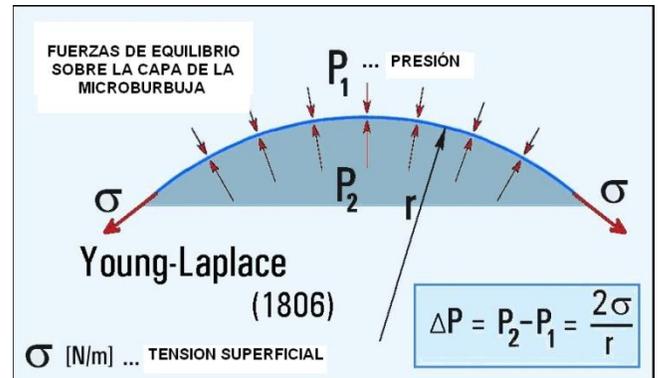


Figura 1. Tensión superficial ley de Young-Laplace [7]: ΔP en la interface aire/agua.

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{4\sigma}{d_b} \quad (2)$$

Cuanto más pequeña la microburbuja, mayor será la presión interna.

$$r = \frac{2(\sigma_s - \sigma)}{P_1 - P_2} \quad (3)$$

Donde:

- σ Tensión superficial del líquido, N/m
- σ_s Tensión superficial del surfactante, N/m
- P_1 Presión ambiente, Pa
- P_2 Presión interna, Pa
- r Radio de la microburbuja

La diferencia entre la presión al interior y exterior de la microburbuja es muy grande. La presión interna es mucho mayor que la externa, debido a la tensión superficial.

Generación de microburbujas tipo presurización

Este proceso tiene como objetivo disolver aire en agua a presión elevada. La disolución de aire en agua depende de la temperatura y presión, se encuentra determinada por la ley de Henry. La cinética de disolución dependerá de las características de diseño del sistema de saturación.

Existen varias formas para contactar el aire con el agua, entre los más utilizados están los difusores de tipo placa porosa sumergida en el líquido para contactar íntimamente con el aire.

Las microburbujas se generan disolviendo aire en el agua a presiones elevadas e inyectando la mezcla en la celda de flotación por medio de constrictores de presión [4].

En sistemas reales, como regla heurística, los tanques a presión suelen alcanzar entre 85 a 90% de saturación; representada por la ecuación (4):

$$A = Sa(fP - 1) \quad (4)$$

Donde:

- A Cantidad de aire despresurizado, ml/L
- P Presión, atm
- Sa Solubilidad del aire en agua, ml/atm
- f Fracción de saturación obtenida en el tanque a presión (varía entre 0.85 y 0.90).

Donde A, depende de las condiciones de turbulencia en el punto de reducción de presión (diseño del constrictor) y del grado de saturación obtenido en el sistema a presión, ver figura 2.

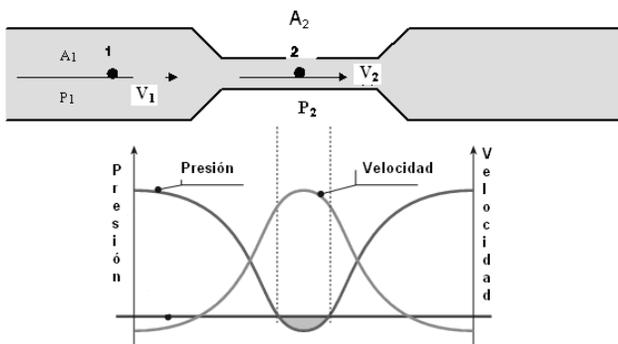


Figura 2. Aplicación del teorema de Bernoulli: “Las microburbujas se generan donde el fluido tiene una velocidad muy elevada con la correspondiente disminución de la presión”.

La energía transferida en el proceso de expansión y generación de microburbujas, depende de la tensión superficial líquido - aire y de la diferencia de presión entre el saturador y el constrictor [8].

Aplicación de las microburbujas en la remoción de lodos

Muchos investigadores [9, 10] de esta área, han coincidido en los siguientes aspectos relacionados a las condiciones hidrodinámicas que deben imperar en la zona de contacto:

1. Se debe proveer suficiente mezcla del agua floculada y el aire despresurizado, pero no demasiada alta como para romper los flóculos o agregados microburbuja-flóculo.
2. Se debe proveer algún grado de mezcla para proveer suficientes oportunidades de colisión entre microburbujas y flóculos para su correspondiente adhesión.
3. Se debe proveer suficiente tiempo de contacto para aumentar las oportunidades de colisión entre microburbujas y flóculo.

El mecanismo de interacción [11] microburbuja-flóculo en la zona de contacto, es altamente dependiente de las condiciones hidrodinámicas dentro de la zona de contacto, la cual es gobernada por las condiciones de flujo y geometría de la celda de flotación. Por esta razón, es importante un análisis fundamental de la hidrodinámica de la zona de contacto para optimizar las interacciones microburbuja-flóculo.

Mecanismos de interacción microburbuja - flóculo

Debido a que los flóculos son agregados de partículas con un mínimo de cohesión entre ellas [10], la interacción con las microburbuja, puede generarse mediante los mecanismos que se muestran en la figura 3.

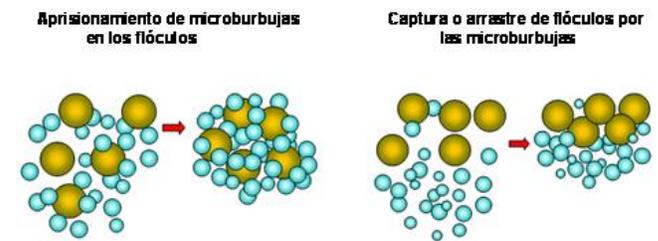


Figura 3. Fenómenos de superficie [10]: aprisionamiento y captura o arrastre de flóculos por microburbujas.

La separación o clarificación ocurre en la celda de flotación que recibe la suspensión proveniente de la zona de contacto y tiene por objetivo separar la fase flotada y el afluente tratado.

Esta zona es similar a la sedimentación en las que se usan expresiones del tipo de la ley de Stokes. Para el flujo de transición ($1 < Re < 50$) y considerando el agregado microburbuja-flóculo con esfericidad de 0.80, la velocidad ascensional modificada de Stokes [11, 12] está expresada por la ecuación (5).

$$v_{bf} = \frac{16.7 g^{0.8} (\rho_w - \rho_{bf}) d_{bf}^{1.4}}{\rho_w^{0.8} \mu^{0.6}} \quad (5)$$

Donde:

- ρ_{bf} Densidad del agregado microburbuja-flóculo (Kg/m^3)
- d_{bf} Diámetro esférico equivalente del agregado microburbuja-flóculo.

Materiales y metodología de investigación

La ejecución del trabajo experimental comprende el desarrollo conceptual, diseño, dimensionamiento y construcción del equipo de laboratorio; además, de la instrumentación para la adquisición de datos.

Equipo de laboratorio

El tanque saturador consiste en un recipiente construido de acero inoxidable Schedule 40, ST de espesor 0.301 pulgadas

para 100 psi que opera en discontinuo con alimentación de aire y agua.

Para la generación de microburbujas se ha seleccionado el uso de un constrictor del tipo placa de orificio. Se trata de una placa delgada, circular y perforada; esta placa está situada entre el tanque de saturación y la celda de flotación.



Fotografía 1. Equipo de laboratorio (generador de microburbujas).

Generación de microburbujas

Una vez concluido el diseño, dimensionamiento y construcción del equipo de laboratorio, se empezaron a correr pruebas experimentales siguiendo el ciclo operativo del mismo, para hallar las condiciones óptimas de generación de microburbujas para la flotación.

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales, se ha podido observar que las microburbujas ingresan a la celda de flotación y empiezan a ascender en forma de una nube blanca; una vez que llegan a la superficie del líquido (borde de la celda), forman un colchón estable, ver figura 4.

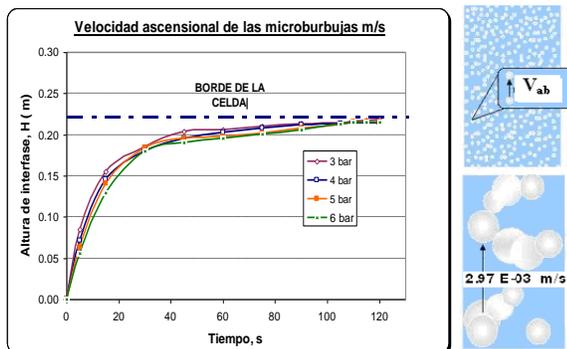


Figura 4. Velocidad ascensional de las microburbujas en función de la presión de trabajo del saturador.

La figura 4 y los resultados de la tabla 1, muestran que las microburbujas, una vez que ingresan a la celda adquieren una velocidad ascensional, que depende del tamaño de la

microburbuja. Para una presión de saturación de 6 bar, la velocidad de ascensión es ~ 1.6 veces más lenta que para 3 bar de presión de saturación. Por tanto, la velocidad ascensional es directamente proporcional al diámetro de las microburbujas e inversamente proporcional a la presión.

Tabla 1. Velocidad ascensional de las microburbujas.

Prueba N°	Presión, bar	Flotación V_{ab} , m/s
FVAB-01	3	1.25 E-3
FBAB-02	4	9.91 E-4
FVAB-03	5	8.48 E-4
FVAB-04	6	7.73 E-4

Los resultados que presenta la tabla 2, corroboran esta apreciación. Para microburbujas de diámetro 51.14 μm , la velocidad ascensional es 1.25×10^{-3} m/s, una velocidad mayor que para microburbujas de 40.22 μm , cuya velocidad ascensional es igual a 7.73×10^{-4} m/s.

Tabla 2. Diámetro aproximado de las microburbujas.

Presión, bar	3	4	5	6
V_{ab} , m/s	1.25 E-3	9.91 E-4	8.48 E-4	7.73 E-4
db, μm	51.14	45.54	42.12	40.22

Para las pruebas de flotación es importante verificar si la cantidad de aire suministrado a la celda de flotación es la adecuada. Para una presión de saturación por ejemplo de 4 bar, la cantidad efectiva de aire que forman las microburbujas y que se inyecta a la celda de flotación es de 28.12 mg/L, y a medida que la presión de trabajo aumenta la cantidad de aire efectiva para la flotación también aumenta.

Aplicación de las microburbujas en la remoción de lodos

El lodo floculado se condujo a la celda de flotación por un conducto de 1" de diámetro con la finalidad de generar la menor turbulencia posible para no romper los floculos formados. El conducto tiene un dispositivo que permite controlar el flujo en la conducción del lodo floculado a la celda de flotación.

Durante las pruebas experimentales se pudo observar la fijación de microburbujas de aire sobre los floculos que como racimos forman agregados microburbuja-floculo, cuya velocidad ascensional es más rápida, permitiendo también una eliminación más rápida de los sólidos.

La figura 5, muestra el comportamiento de los agregados microburbuja-floculo, si se considera que el tamaño de las microburbujas se mantiene constante, el tamaño de los floculos para $G_f = 20$ y 25 s^{-1} son 1,365 y 1,142 μm , respectivamente; de

manera que la velocidad ascensional de los agregados microburbuja-floculo es mayor a medida que el diámetro de los floculos se hace menor, tal cual se puede observar en la tabla 3.



Fotografía 2. Equipo de laboratorio: Saturador -Celda de flotación

burbuja-floculo $V_{bf} = 3.72 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ y $4.05 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, situación que asegura que todos los agregados flotan a la superficie antes que el agua llegue hasta la descarga en el extremo superior de la celda.

Una de las ventajas de la flotación con relación a la sedimentación es la cinética del proceso.

Tabla 3. Velocidad ascensional agregado microburbuja - floculo en función de G_f .

Prueba N°	G_f, s^{-1}	Flotación $V_{bf}, \text{m/s}$
FDAMH-01	20	3.72 E-3
FDAMH-02	25	4.05 E-3

La figura 6 y tabla 4 muestran las diferencias en las velocidades de separación de las respectivas fases. La velocidad ascensional del agregado microburbuja-floculo ($5.16 \times 10^{-3} \text{ m/s}$), es mayor a la velocidad de sedimentación de los floculos ($9.98 \times 10^{-4} \text{ m/s}$), de manera que la velocidad de flotación a 4 bar es 5 veces mayor a la velocidad de sedimentación.

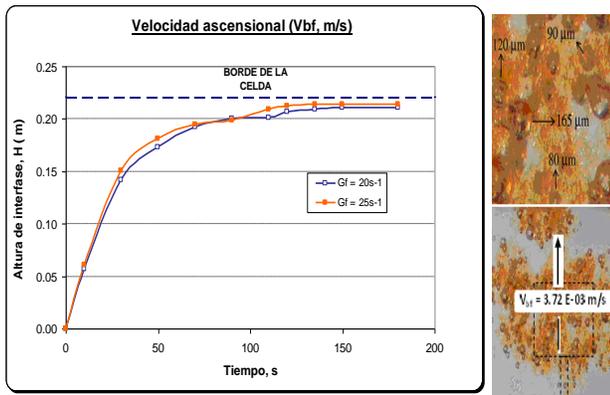


Figura 5. Velocidad ascensional agregado microburbuja-floculo en función de G_f .

Para fines de diseño de la celda de flotación, el cálculo de la razón de carga hidráulica fue $V_H = 2.758 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, la cual es equivalente a la velocidad de flujo ascendente $7.58 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, está velocidad es menor a la velocidad ascensional micro-

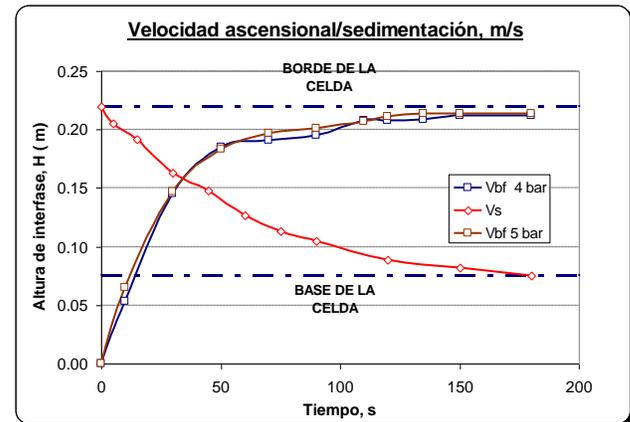


Figura 6. Velocidad de separación S/L: flotación con microburbujas versus sedimentación.

Tabla 4. Relación entre las velocidades: ascensional de los agregados microburbuja - floculo ($V_{bf}, \text{m/s}$) y de sedimentación de los floculos ($V_s, \text{m/s}$).

Prueba N°	Presión, bar	% Sólidos lodo final, (180 s)	Sólidos en suspensión mg	Velocidad de flotación $V_{bf}, \text{m/s}$	Velocidad de sedimentación $V_s, \text{m/s}$	Relación V_{bf}/V_s
FDAMH-03	4	7.01	45	5.16 E-3		5.166
FDAMH-04	5	7.01	43	5.08 E-3		
SDAMH-01		< 1.0			9.98 E-4	

Los agregados microburbuja-floculo ascienden a la superficie del líquido formando un lodo, sobre el cual actúa la fuerza del

aire liberado del seno del fluido provocando un efecto de sustentación que permite una continua deshidratación antes de

ser descargado lo que permite alcanzar una concentración >7.0% sólidos; a diferencia de los lodos decantados los cuales están sumergidos permanentemente en un medio líquido, por lo que su concentración tiene un límite muy bajo <1.0% de sólidos.

El tiempo de sedimentación fue de 180 segundos y el proceso se realizó usando la celda de flotación.

Eficiencia del proceso

Tabla 5. Eficiencia de la aplicación de las microburbujas en el tratamiento del DAM-EMH.

Prueba N°	Tiempo de flotación, s	Metal	C _{inicial} , mg/l	C _{final} , mg/l	Agua Clase B	Agua Clase C	% Eficiencia separación S/L	Eficiencia de remoción, (%)
FDAMH-13	140	Cadmio	4.20	< 0.02	0.005	0.01	98.09	99.19
		Hierro	491.39	0.02	0.3	1.00		99.99
		Zinc	118.65	0.04	0.2	5.00		99.94
FDAMH-14	147	Cadmio	4.20	< 0.02	0.005	0.01	98.59	99.19
		Hierro	491.39	0.05	0.3	1.00		99.98
		Zinc	118.65	0.04	0.2	5.00		99.94
FDAMH-15	154	Cadmio	4.20	< 0.02	0.005	0.01	98.63	99.19
		Hierro	491.39	0.03	0.3	1.00		99.99
		Zinc	118.65	0.03	0.2	5.00		99.96
FDAMH-16	160	Cadmio	4.20	< 0.02	0.005	0.01	98.62	99.19
		Hierro	491.39	0.03	0.3	1.00		99.99
		Zinc	118.65	0.05	0.2	5.00		99.93

La remoción de sólidos en suspensión por flotación es mayor al 98%. Los lodos alimentados a la celda de flotación son relativamente diluidos y flotan muy bien, pero producen lodos de concentración ligeramente bajas >7% con una densidad de alrededor de 1.09 á 1.12 g/ml y un pH de 8.97. Por todas estas consideraciones se concluye que los lodos de flotación son ambientalmente estables y pueden ser dispuestos en pozas o como relleno en la mina.

Conclusiones

Las microburbujas han sido generadas por saturación de aire en agua a presiones altas y liberación de aire a través de un constrictor de placa de orificio de 1 mm de diámetro, generando de esta manera microburbujas < 50 µm.

A una velocidad de alimentación de aire $V_a = 6.0 \times 10^{-4}$ m/s, la cantidad de aire que se suministra al proceso es proporcional a la presión de saturación. Para 4 bar, la cantidad efectiva de aire inyectada a la celda de flotación es de 28.12 mg/l y a medida que la presión de trabajo aumenta la cantidad de aire efectiva para la flotación es mayor.

La velocidad ascensional de los agregados microburbuja – flóculo es mayor a medida que el diámetro de los flóculos se hace menor. Así, para microburbujas $db = 45 \mu\text{m}$, formando agregados con flóculos de diámetros 1,142 µm y 1,365 µm, tienen velocidades ascensionales $v_{bf} = 4.05 \times 10^{-3}$ m/s y 3.72×10^{-3} m/s, respectiva-mente.

En la tabla 5, se muestra los resultados de remoción de metales pesados en el efluente tratado comparado con los límites permisibles de las clases de agua B y C.

La eficiencia de remoción estimada de metales, fue mayor al 99% para todos los metales en estudio. Las concentraciones finales de los metales en solución están por debajo del límite establecido por la RMCH en Bolivia, el pH del agua tratada se encuentra alrededor de 8.92, por tanto no es necesario ajustar el pH para la descarga final (pH<9,0).

³ m/s, respectiva-mente.

Las microburbujas formadas a una presión de saturación de 4 bar, permiten un tiempo de contacto adecuado microburbuja – flóculo en la zona de mezcla, estos agregados ascienden con una velocidad $V_{ab} = 9.91 \times 10^{-4}$ m/s, ($db \approx 45 \mu\text{m}$).

Una de las ventajas de la flotación con relación a la sedimentación es la cinética del proceso. La velocidad de remoción de sólidos por flotación es $V_{bf} = 5.16 \times 10^{-3}$ m/s, por sedimentación $V_s = 9.98 \times 10^{-4}$ m/s, de manera que la velocidad de flotación es 5 veces mayor a la velocidad de sedimentación.

Sobre el lodo flotado actúa la fuerza del aire liberado del seno del fluido provocando un efecto de sustentación que permite una continua deshidratación, alcanzando en un tiempo de 150 segundos una concentración de descarga > 7.0% sólidos; en tanto que el lodo decantado está sumergido permanentemente en el medio líquido, por lo que su concentración tiene un límite muy bajo < 1.0% sólidos.

La concentración del lodos a flotar es relativamente baja ~3,600 mg/l (S), por tanto se considera que la cantidad de microburbujas (A) no es una limitante, existen más microburbujas de las requeridas para flotar los sólidos en suspensión

La eficiencia de remoción de sólidos depende de la relación A/S. Para $V_a = 6.82 \times 10^{-4}$ m/s y 4 bar la relación A/S óptima es de 0.015. Bajo estas condiciones se obtiene un lodo con una

concentración > 7.0% sólidos y agua tratada con una baja concentración de sólidos en suspensión < 30 mg/l, logrando de esta manera una eficiencia de separación > 98%.

La eficiencia de remoción de metales, fue mayor al 99% para todos los metales en estudio. Las concentraciones finales de los metales en solución están por debajo del límite establecido por la reglamentación ambiental vigente en Bolivia, el pH del agua tratada se encuentra alrededor de 8.92, por tanto no es necesario ajustar el pH para la descarga final (pH < 9.0).

El lodo flotado tiene una densidad ≈ 1.12 g/ml, que se considera una densidad de lodo manejable, la misma tiene relación directa con la química del afluente (DAM-EMH) y la dosis del floculante.

De acuerdo al criterio federal de clasificación de residuos peligrosos de Estados Unidos, se establece que los lodos pueden ser almacenados con seguridad.

Referencias

1. CHEREMISINOFF P., Sludge Management and Disposal. Water Management and Supply, Ed. Prentice-Hall. Water and Wastewater Treatment Guidebooks. pp. 204, 1994.
2. PALUCH M., Electrical properties of free surface of water and aqueous Solutions, Advances in Colloid and Interface Science 84 (1-3), 27-45, 2000.
3. OLIVERA C., RUBIO J., Zeta Potential of Single and Polymer-Coated Microbubbles Using an Adapted Microelectrophoresis Technique, International Journal of Mineral Processing 98 (118-123), Elsevier, 2011.
4. EDZWALD J., BUNKER D., "Dissolved Air Flotation: Pretreatment and Comparisons to Sedimentation", Chemical Water and Wastewater Treatment III, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994, pp 3-18.
5. MORUZZI R., REALI M., Characterization of Microbubble Size Distribution and Flow Configuration in DAF Contact Zone by a Non Invasive Image Analysis System and Tracer Test, Water Science & Technology – WST, pp 253-262, 2010.
6. NALINI K., PRAJAKTA N., Microbubbles: A Novel Delivery System, JPRHC, volumen 2, ISSUE 3, India, pp 229-234, 2009.
7. BURNS S., YIACOUMI S., TSOURIS C., "Microbubble generation for environmental and industrial separations" Separation and Purification Technology, 11: 221-232, 1997.
8. TAKAHASHI T., MIYAHARA T., and MOCHIZUKI H., "Fundamental Study of Bubble Formation in Dissolved Air Pressure Flotation." Journal of Chemical Engineering, Japan, 12, 275-280, 1979.
9. HAARHOFF J., VAN VUUREN L., Design Parameters For Dissolved Air Flotation in South Africa, Water Science Technology, 31(3-4) pp 203-213, 1995.
10. KITCHNER J., GOCHIN R., The mechanism of Dissolved Air Flotation for Potable Water: Basic Analysis and a Proposal, Water Research, 15: 585-590, 1981.
11. AYMAN R., SMITH D., Hydrodynamic Characterization in Dissolved air Flotation Contact Zone, Water Science Technology, volume 38, Nº 6, pp 245-252, 1998.
12. TAMBO N., MATSUI Y., E Kinetic study of dissolved air flotation, World Congress of Chem.Engr., Tokyo, pp 200-203, 1986,.