

Aplicación de microburbujas en la flotación de lodos de tratamiento de aguas ácidas de mina

Parte I: neutralización y floculación

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 de diámetro $<100 \mu\text{m}$, para una remoción efectiva por flotación de los lodos de tratamiento químico del DAM-EMH y la generación de agua tratada, para su posible incorporación en el uso industrial o simplemente descarga al medio ambiente.

En este artículo se presenta el estudio realizado para determinar las condiciones de operación óptimas para el tratamiento químico del DAM-EMH, y la obtención de los flóculos de características y tamaño adecuados para su aplicación en la flotación con microburbujas.

La acidez ha sido neutralizada a pH de 9.5, los metales y el SO_4^{2-} que forman el lodo pasaron luego a la etapa de floculación y separación sólido líquido por flotación con microburbujas.

Los flóculos de tamaño $\approx 1,365 \mu\text{m}$, adecuados para la flotación se forman con un $t_f = 20$ minutos, $G_m = 60 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ y una dosis de 4.0 mg/l de superfloc A-10.

Palabras clave: microburbujas, flotación, drenaje ácido de mina.

Application of microbubbles in the flotation of sludge from mine water treatment. Part I: neutralization and flocculation

Abstract

The results of this research show how an efficient application of microbubbles of diameter $<100 \mu\text{m}$, for effective removal by flotation of sludge from chemical treatment of AMD-EMH and generation of treated water, for possible industrial application or simply download to the environment.

This paper presents the study carried out to determine the optimum operating conditions for the chemical treatment of AMD-EMH, and obtaining the flocs of features and size suitable for the flotation with microbubbles.

The acidity has been neutralized to pH 9.5, the metals and SO_4^{2-} which form the sludge then passed to the flocculation step and solid-liquid separation by flotation with microbubbles.

Floc size $\approx 1,365$ microns, suitable for flotation are formed with a $t_f = 20$ minutes, $G_m = 60 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$ and a dose of 4.0 mg /l of Superfloc A-10.

Keywords: microbubbles, flotation, mine acid drainage.

Aplicação de microburbujas na flotação de lodos de tratamento de águas ácidas de mina. Primeira parte: Neutralização e floculação

Resumo

Os resultados da presente pesquisa mostram que a aplicação de microburbujas de diâmetro menor que 100 μm é uma alternativa eficiente, pra remoção efetiva dos lodos no tratamento químico do DAM – EMH e na geração de água tratada, com a possibilidade de incorporação na industria ou simplesmente o seu descarregamento ao meio ambiente.

O artigo apresenta a pesquisa feita, para a determinação das condições de operação ótimas para o tratamento químico do DAM – EMH e a obtenção dos floculos com características e tamanho apropriados para a sua aplicação na flotação com microburbujas.

A acidez foi neutralizada a pH de 9.5, os metais e o SO_4^{2-} do lodo, passaram para a flotação com microburbujas depois da etapa de floculação e separação sólido – líquido.

Os floculos de tamanho de aproximadamente 1,365 μm , apropriados para a flotação, são formados com um tg = 20 minutos, Gm = 60 s^{-1} , Gf = 20 s^{-1} e uma dose de 4.0 mg/l de superfície A-10

Palavras chave: Microburbujas, flotação, drenagem ácido de mina.

Introducción

El problema ambiental en la región occidental de Bolivia está relacionado a la minería. Los principales focos productores de drenaje ácido de mina (DAM), en las explotaciones mineras son las aguas ácidas de las minas subterráneas. Los impactos ambientales generados [1, 2], por esta actividad son la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, destrucción de hábitats, riesgos en la salud de los trabajadores y población del entorno; impactos que podrían tener un efecto negativo en el desarrollo de una región en el corto o largo plazo, aún cuando los beneficios económicos son inmediatos para los operadores mineros.

Las aguas ácidas de mina (DAM) [1, 3], se generan debido al cambio químico que produce acidez, acompañado de la disolución de metales pesados (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.) y sulfatos en solución, debido a la oxidación de sulfuros en presencia de oxígeno y agua, catalizadas a través de bacterias del género Thiobacillus Ferroxidans y también iones férricos. Debido al tiempo que perdura el fenómeno de generación de aguas ácidas, se ha ido agravando la situación, siendo necesario buscar una solución a este problema minimizando los efectos de su descarga en el ambiente, a través de tecnologías económicamente factibles.

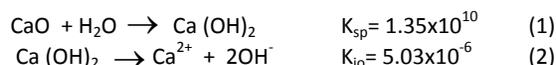
Debido a la carencia de agua en muchas regiones mineras, las aguas ácidas de mina desde el punto de vista ambiental y económico son la mejor fuente de abastecimiento de agua industrial; por tanto deben ser tratadas.

Una de las técnicas de mayor aceptación es la neutralización/precipitación con cal, y separación de los lodos precipitados por sedimentación. La sedimentación presenta dificultades debido a que los floculos producidos tienen baja densidad y tienden a sedimentar muy lentamente o a permanecer en suspensión y además son difíciles de deshidratar, lo que influye negativamente en la eficiencia del proceso activo.

En los últimos años, la tecnología de las microburbujas ha ido ganando mayor atención en varios campos de la ciencia y tecnología; las mismas presentan características particulares como una alta presión interna y gran superficie específica; por ser de tamaño muy pequeño, tienen cargas eléctricas que atraen las partículas suspendidas para formar un agregado partícula microburbuja y así flotar de manera muy eficaz.

Tratamiento activo con cal

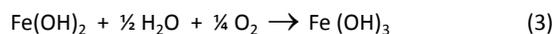
La disolución de la cal [2] es el primer paso del proceso de neutralización. Para el sistema de tratamiento de grandes caudales se utiliza cal viva. La cal debe ser hidratada y normalmente se alimenta al proceso como lechada. Las ecuaciones (1) y (2) ilustran estas reacciones.



El tratamiento activo [3, 4] de aguas ácidas de mina con cal, se realiza en tres etapas:

1. Oxidación (de Fe^{2+} a Fe^{3+})

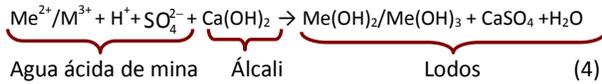
El hidróxido ferroso no es estable como el hidróxido férrico cuando el lodo está expuesto a las aguas ácidas o precipitaciones naturales; por esta razón, se aplica la aireación para oxidar el hierro a la forma más estable según la siguiente ecuación:



Los lodos férricos son mucho más estables en los depósitos, la separación sólido-líquido se facilita por una menor viscosidad del lodo y proporciona superficies de adsorción para metales.

2. Dosificación de álcalis ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

La cal como CaO ó $\text{Ca}(\text{OH})_2$ actúa de acuerdo a la siguiente reacción general:



3. Separación de lodos

Los hidróxidos de los metales [4], forman un material coloidal, formando una gran cantidad de lodos, que deben ser dispuestos adecuadamente; por tanto, los costos de eliminación de lodos pueden ser importantes. Los procesos más avanzados para minimizar el volumen de residuos son mediante la formación de lodos de mayor densidad. **La disposición de lodos y los costos de cal en el largo plazo suelen justificar una inversión de capital más importante, debido a los ahorros significativos en los costos de operación.**

Floculación

La floculación [5], consiste en la captación mecánica de las partículas neutralizadas, dando lugar a un entramado de sólidos de mayor volumen; de esta manera, se consigue un aumento considerable del tamaño incrementando por tanto la velocidad de sedimentación.

La formación de los flóculos [4, 5], depende de la permanencia y de la cantidad de energía aplicada (gradiente de velocidad). Al contrario de lo requerido para la sedimentación, en el proceso de flotación no es deseable la formación de flóculos voluminosos.

Los **coloides** que forman el lodo generalmente están cargados [5, 6], lo cual impide una mayor agregación de las partículas que lo constituyen. La floculación de estas suspensiones permite, en la mayoría de los casos, romper su estructura coloidal. Un factor importante que influye en la desestabilización de la carga de las partículas en el lodo es el potencial zeta, este es un parámetro importante de la doble capa eléctrica y representa una característica eléctrica de las interfaces sólido/líquido y líquido/gas, que es de gran importancia en los procesos de floculación y flotación.

Básicamente existen dos mecanismos por los que las partículas entran en contacto:

1. Por el propio movimiento de las partículas (difusión

browniana). Este caso se considera como una floculación pericinetica o convección natural, la cual es muy lenta.

2. Por el movimiento del fluido que contiene a las partículas, que induce a un movimiento de éstas. Esto se consigue mediante la agitación de la suspensión; a este mecanismo se denomina floculación ortocinetica o convección forzada, producida principalmente por los excesivos gradientes de velocidad (G) y tiempo (t) así como la concentración volumétrica de las partículas.

La eficiencia de los procesos de separación sólido/líquido puede ser mejorado en gran medida por la aplicación de floculantes. Los floculantes más utilizados son los polielectrólitos, éstos son polímeros de alto peso molecular, contienen unidades de bajo peso molecular combinadas químicamente para formar una molécula de tamaño coloidal, en las que cada una de ellas tiene una o más cargas o grupos ionizables.

La adsorción de los polímeros ha sido ampliamente investigada [6,7], debido a su importancia en la comprensión de los mecanismos de floculación. La floculación está condicionada por una serie de factores que determinan su eficacia en el proceso de separación sólido-líquido. Estos factores son: pH, dosis óptima del polímero, concentración de los sólidos, velocidad y tiempo de floculación, estabilidad, tamaño y densidad de los flóculos formados.

Efecto del pH

El pH afecta a la cantidad y tipo de cargas presentes en la superficie de los sólidos, y a la cantidad de carga libre que configure el polímero en disolución.

Al utilizar un polímero catiónico, este neutraliza las cargas negativas de los coloides y anula el potencial zeta, en tanto que los polímeros no iónicos o aniónicos no anulan las cargas; sin embargo, existe una adsorción de radicales activos de la cadena del polímero sobre las partículas, creándose una modificación en la superficie y el potencial zeta [7], produciéndose una aglomeración, estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de flóculos porosos, (ver figura 1).

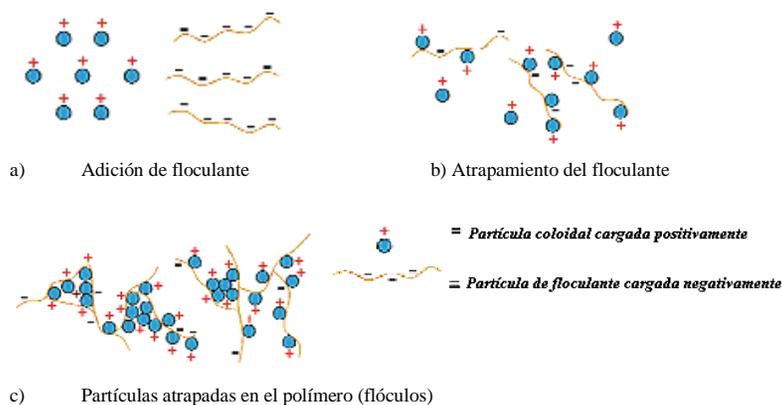


Figura 1. Etapas del proceso de floculación [6].

Velocidad de floculación

La velocidad de colisiones entre partículas en la floculación ortocinética [4], puede estar representada por la ecuación de Hudson:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\alpha \frac{CGt}{\pi}} \quad (5)$$

donde:

- N_0, N Número inicial y final de partículas por mililitro o sea, 10^{-6} m^3 .
- α Coeficiente de eficiencia de colisión entre partículas
- C Concentración de partículas por unidad de volumen
- G Gradiente de velocidad, s^{-1}
- t Tiempo en segundos

La conclusión más importante que se puede sacar al analizar esta ecuación es que la velocidad de floculación [7, 8], en igualdad de condiciones de gradiente de velocidad y tiempo de floculación, depende únicamente de la concentración en volumen de las partículas.

Tamaño y densidad del flóculo

El tamaño máximo de un flóculo [4, 6] en (mm) está dado por la ecuación (6).

$$d_{\text{máx}} = \frac{C}{G^n} \quad (6)$$

Esta expresión derivada por varios investigadores, ha sido deducida utilizando aproximaciones teóricas de las características del flóculo en flujo turbulento.

En la ecuación:

- $d_{\text{máx}}$ Tamaño máximo de un flóculo, mm.
- n Exponente que depende de la microescala de turbulencia, para flóculos de hidróxidos varía de 0.7 a 1.2.
- C Concentración de partículas por unidad de volumen, para flóculos de hidróxidos varía de 5 a 15.

Analizando la ecuación (6), se puede señalar que la concentración del afluente, contribuye a la floculación por una mayor probabilidad de colisión de partículas y aumento del gradiente de velocidad (G), que puede expresarse en términos de pérdida de carga a través de la suspensión.

Espesamiento de lodos

La concentración o espesamiento [7] es el primer paso en los procesos de evacuación de lodos. El objetivo básico es reducir el volumen del lodo que va a ser manipulado en procesos subsiguientes con vistas al destino final.

Generalmente se aplican dos métodos de flotación o sedimentación; en el primer caso, se propicia el desplazamiento ascendente de los sólidos que se concentran en la superficie libre del líquido y en el segundo caso se deja sedimentar las partículas en suspensión hasta el fondo. La reducción de volumen de lodos reduce los costos de bombeo y la disposición final.

Espesamiento de lodos por flotación

En los últimos años la tecnología de las microburbujas [8], debido a su tamaño extremadamente pequeño y sus características, 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.

El proceso de flotación crea suficiente diferencia de densidades en las dos fases para obtener el grado de separación requerido. **La flotación como proceso de descontaminación** se realiza con **microburbujas**, de diámetros del orden de **15 á 100 μm** .

Las microburbujas [9, 10], por ser de tamaño muy pequeño tienen características particulares como una alta presión interna que permite su estabilidad en tamaño y número, gran superficie específica y tienen cargas eléctricas en soluciones acuosas que atraen las partículas suspendidas para formar un agregado partícula-microburbuja y flotar de manera muy eficaz.

Materiales y metodología de experimentación

La metodología experimental, se describe en correspondencia al problema y objetivos del trabajo de investigación, como al estado de conocimientos de los procesos a ser evaluados.

La experimentación fue realizada en el Laboratorio de Concentración de Minerales de la Carrera de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Técnica de Oruro, y los análisis químicos en el Laboratorio de Spectrolab.

Las pruebas experimentales se dividieron en 4 etapas:

1. Tratamiento químico del agua ácida de la mina Huanuni (DAM-EMH).
2. Floculación de los lodos de neutralización.
3. Generación de microburbujas
4. Aplicación de las microburbujas en la remoción de lodos de neutralización.

El procedimiento experimental utilizado es el estudio de un parámetro a la vez, manteniendo los otros parámetros constantes.

Tratamiento químico del agua ácida de mina Huanuni (DAM-EMH)

La muestra de agua ácida de mina (DAM-EMH) se tomó a la entrada al ingenio Santa Elena, que recibe agua de mina en un caudal de 30 l/s.

La muestra de agua tomada tiene una coloración marrón verdosa y un olor metálico fétido, contiene partículas finas en suspensión. Por medición in situ se ha determinado un pH de 2.80, una conductividad eléctrica de 2,740 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una temperatura de 19 °C.

Los valores de Fe, Zn, Cd son muy altos en relación a los contenidos de As, Cu y Pb, pero de todas maneras el contenido de estos metales está por encima de los límites permitidos en el reglamento ambiental, al igual que los sólidos disueltos que tienen un valor de 3,326 mg/l, como se muestra en la tabla 1,

esta cantidad es casi tres veces mayor al límite permitido.

Las pruebas de tratamiento químico comprenden: una etapa de neutralización de la acidez mediante la adición de lechada de

cal; a continuación, el proceso de oxidación de iones ferrosos a férricos mediante oxigenación por inyección de aire; luego, la etapa de precipitación de los metales pesados en forma de compuestos estables.

Tabla 1. Análisis químico DAM- EMH y límites permisibles de descarga [4].

| Parámetro | Agua ácida de mina | Límite permisible | Clase B | Clase C |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| pH | 2.8 | 6 – 9 | 6 – 9 | 6 – 9 |
| Conductividad, $\mu\text{S/cm}$ | 2,740 | | | |
| Sólidos disueltos, mg/l | 3,326 | | | |
| Sólidos suspendidos, mg/l | | 60 | | |
| Potencial redox, mV | 420 | | | |
| Arsénico, mg/l | 0.76 | 1 | 0.05 | 0.05 |
| Cadmio, mg/l | 4.2 | 0.3 | 0.05 | 0.005 |
| Cobre, mg/l | 2.87 | 1 | 1 | 1 |
| Hierro, mg/l | 491.39 | 1 | 0.3 | 1 |
| Plomo, mg/l | 0.43 | 0.6 | 0.05 | 0.05 |
| Zinc, mg/l | 118.65 | 3 | 0.2 | 5 |
| Sulfatos, mg/l | 1,492.7 | | 400 | 400 |

Aplicando la ecuación (7), el DAM-EMH tiene una acidez neta

calculada $Ac_t = 1273.38 \text{ mg/l}$ como CaCO_3 equivalente.

$$Ac_t = 50 \left[\frac{2[\text{Fe}^{2+}]}{56} + \frac{3[\text{Fe}^{3+}]}{56} + \frac{2[\text{Zn}^{2+}]}{65} + \frac{2[\text{Pb}^{2+}]}{207} + \dots + 1000(10^{-\text{pH}}) \right] = 1273.38 \text{ mg/L} \quad (7)$$

Una vez concluida las pruebas de neutralización tal cual se observa en la figura 2, los lodos precipitados pasaron a la etapa de filtración, obteniéndose la información contenida en la tabla 2.

Tabla 2. Producto de neutralización DAM –EMH.

| Parámetros | Resultados |
|-------------------------------------|------------|
| pH final del lodo de neutralización | 10.5 |
| Volumen del filtrado, ml | 989 |
| Peso del queque húmedo, g | 11.75 |
| Peso del queque seco, g | 3,602 |
| Humedad del queque, % | 68.31 |
| Peso específico del queque, g/ml | 2.02 |

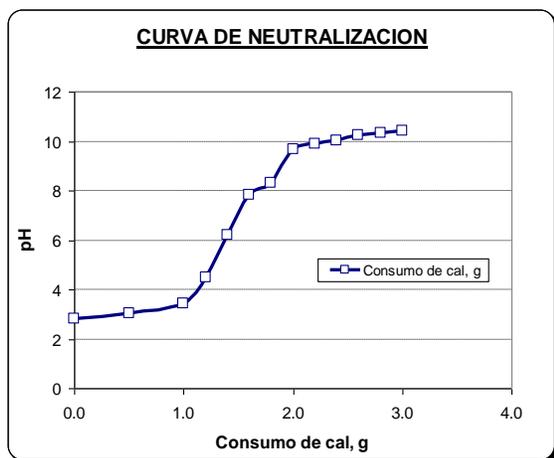


Figura 2. Curva de neutralización en función del consumo de lechada de cal. 1,000 rpm, y caudal de aire 600 ml/min.

La disminución de metales pesados en el efluente está de acuerdo con el perfil de pH observado y el consumo de cal y la producción de lodos dependen en gran parte de la concentración de sulfato. Los resultados del tratamiento químico del DAM-EMH y su comparación con valores máximos permisibles de parámetros en cuerpos receptores, se presentan en la tabla 3.

En la tabla 3, se puede observar que la disminución en la concentración de hierro, zinc y cadmio es pronunciada. Esto es debido al pH mínimo para la solubilidad de estos metales que siguen el orden: $\text{Fe}^{3+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Cd}^{2+}$.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de neutralización del DAM – EMH y eficiencia de la remoción de metales.

| pH | Metal | Concentración inicial, mg/l | Concentración final, mg/l | Agua clase B | Agua clase C | Consumo de cal, g | Consumo de cal/volumen de efluente, kg/m ³ | Eficiencia de precipitación % |
|-----|--------|-----------------------------|---------------------------|--------------|--------------|-------------------|---|-------------------------------|
| 8.5 | Cadmio | 4.20 | 3.34 | 0.005 | 0.01 | 1.50 | 1.58 | 20.48 |
| | Hierro | 491.39 | 40.11 | 0.3 | 1.00 | 1.50 | 1.58 | 91.84 |
| | Zinc | 118.65 | 97.93 | 0.2 | 5.00 | 1.50 | 1.58 | 17.46 |
| 9.0 | Cadmio | 4.20 | 0.15 | 0.005 | 0.01 | 1.85 | 1.95 | 96.43 |
| | Hierro | 491.39 | 0.08 | 0.3 | 1.00 | 1.85 | 1.95 | 99.98 |
| | Zinc | 118.65 | 0.29 | 0.2 | 5.00 | 1.85 | 1.95 | 99-76 |
| 9.5 | Cadmio | 4.20 | 0.03 | 0.005 | 0.01 | 2.20 | 2.32 | 99.29 |
| | Hierro | 491.39 | 0.08 | 0.3 | 1.00 | 2.20 | 2.32 | 99.98 |
| | Zinc | 118.65 | 0.02 | 0.2 | 5.00 | 2.20 | 2.32 | 99-98 |

Floculación de los lodos de neutralización

Las pruebas experimentales fueron realizadas con el objeto de seleccionar el tipo de floculante, determinar la dosificación óptima, velocidad y tiempo de agitación para la formación del tamaño de flóculo adecuado para la flotación con microburbujas.

Los ensayos de floculación se llevaron a cabo en vasos de precipitación de un litro de capacidad, instalados sobre agitadores de velocidad regulable.

Los resultados de las pruebas de sedimentación, utilizando Magnafloc, Superfloc A-10 y APAM y realizando los ensayos por duplicado para validar los resultados obtenidos se presentan en la figura 3, en los cuales se observa que la velocidad de sedimentación aumenta en el siguiente orden de Superfloc A-10 > APAM > Magnafloc. La influencia del tipo de floculante se muestra en la tabla 4.

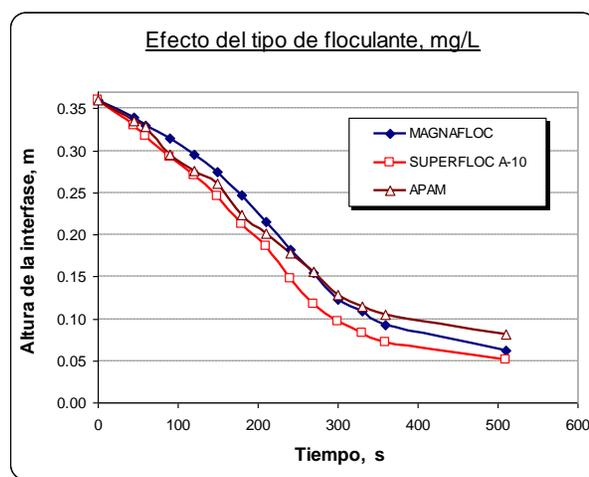


Figura 3. Influencia del tipo de reactivo floculante sobre la velocidad de sedimentación, pH 9.5, $G_m = 60 \text{ s}^{-1}$, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$, $t_f = 20$ minutos.

Tabla 4. Influencia del tipo de floculante en la velocidad de sedimentación.

| Prueba Nº | Floculante, 3 mg/l | Vs, m/s | % S descarga 510 s | Sólidos en el efluente final mg/l |
|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------------------------------|
| DAMH-01 | MAGNAFLOC | 7.92 E-04 | 2.73 | 114 |
| DAMH-02 | SUPERFLOC A-10 | 9.44 E-04 | 2.89 | 93 |
| DAMH-03 | APAM | 9.25 E-04 | 1.73 | 102 |

A pesar de que los flóculos formados con los diferentes reactivos en estudio muestran casi el mismo comportamiento durante la sedimentación, el volumen de lodo formado es menor con Superfloc A-10 y por tanto contiene menor grado de hidratación, lo cual es extremadamente importante para la disposición final de lodos. En la tabla 4, se observa que los sólidos en suspensión en el efluente final son de 93 mg/l, una concentración menor en relación a los resultados con los otros

dos floculantes y el contenido de sólidos en el lodo es de 2.89%.

Se observa que una dosis mayor de floculante 8.0 mg/L conlleva a obtener un volumen mayor de lodo y una menor velocidad de sedimentación tal cual muestra la tabla 5, por el contrario una dosis de 3.0 mg/L el volumen de lodo es menor con mayor % de sólidos y además mejora la cinética del proceso.

Tabla 5. Influencia del consumo de floculante sobre la velocidad de sedimentación.

| Prueba N° | Superfloc A-10 mg/l | Vs, m/s | % S descarga 510 s | % S descarga 2 h |
|-----------|---------------------|-----------|--------------------|------------------|
| DAMH-04 | 1.00 | 7.92 E-04 | 2.84 | 2.98 |
| DAMH-05 | 3.00 | 9.53 E-04 | 2.79 | 2.86 |
| DAMH-06 | 5.00 | 9.98 E-04 | 1.79 | 2.82 |
| DAMH-07 | 8.00 | 7.31 E-04 | 1.18 | 2.17 |

Por otra parte una mayor dosis de floculante provoca una floculación menos efectiva, presenta un menor grado de cohesión entre los coloides, formando flóculos de mayor volumen y menos pesados, que por su tamaño sedimentan a una velocidad mucho mayor, pero el producto final tiene un mayor grado de hidratación.

De acuerdo a los resultados que se muestran en la figura 4, se observa que el rango de dosis óptima de Superfloc A-10, está entre 3.20 a 4.20 mg/l. En este rango se puede observar que la densidad de lodo está en un rango de 1.052 a 1.056 g/ml, los sólidos que se quedan en suspensión luego de la etapa de sedimentación están dentro de un rango de 55 á 60 mg/l, y el % sólidos de los lodos se encuentran en un rango de 2.87 á 2.98%.

Durante las pruebas experimentales se ha podido observar que para un tiempo de floculación de 15 minutos la misma es incompleta, quedando en suspensión partículas coloidales, para 20 minutos la floculación es completa. A medida que aumenta el tiempo de floculación, los flóculos formados son más grandes y empiezan a fracturarse por presentar una estructura de poros más abierta y debido a las tensiones de cizallamiento hidrodinámico generada por el gradiente de velocidad de agitación, este fenómeno se observa mejor a un tiempo de 30 minutos.

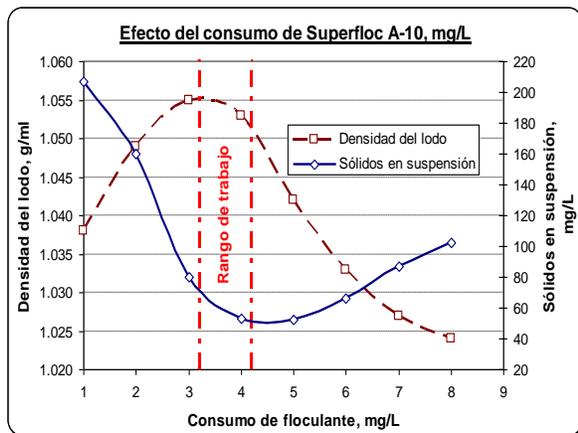


Figura 4. Efecto de la dosis de floculante sobre la densidad del lodo sedimentado. pH 9.5, Superfloc A-10, $t_f=20$ minutos, $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$.

Como se muestra en la tabla 6, para un tiempo de 20 minutos, la velocidad de sedimentación es de $9.35 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, los flóculos formados son más resistentes a las tensiones de cizallamiento hidrodinámico, y lo más importante es que el volumen de lodo descargado tiene un menor grado de hidratación con un

contenido de sólidos de 2.98% y 3.06%, para tiempos de sedimentación de 510 segundos y 2 horas respectivamente.

Tabla 6. Influencia del tiempo de floculación, en la formación de los flóculos.

| Prueba | Tiempo, min | Vs, m/s | Lodo, % S, 510 s | Lodo, % S, 2 h |
|---------|-------------|-----------|------------------|----------------|
| DAMH-08 | 15 | 7.60 E-04 | 2.35 | 2.93 |
| DAMH-09 | 20 | 9.35 E-04 | 2.98 | 3.06 |
| DAMH-10 | 25 | 1.01 E-03 | 2.97 | 3.01 |
| DAMH-11 | 30 | 7.81 E-04 | 2.66 | 2.86 |

Los resultados muestran las ventajas de una floculación escalonada, con gradientes de velocidad decrecientes entre el comienzo o gradiente de mezcla (G_m, s^{-1}) y finalización o gradiente de floculación (G_f, s^{-1}).

Para 10 s^{-1} , los flóculos formados son grandes con poca consistencia, al descargar el lodo floculado a la probeta de sedimentación, se observa roturas debido a su fragilidad y se observa material coloidal en suspensión, aunque la sedimentación del resto es buena.

Tabla 7. Efecto de $G_f(\text{s}^{-1})$, sobre la velocidad de sedimentación.

| Prueba | Mezcla G_m, s^{-1} | Floculación G_f, s^{-1} | Vs, m/s |
|---------|-----------------------------|----------------------------------|-----------|
| DAMH-13 | 60 | 10 | 9.79 E-04 |
| DAMH-14 | 60 | 15 | 9.97 E-04 |
| DAMH-15 | 60 | 20 | 9.43 E-04 |
| DAMH-16 | 60 | 25 | 8.53 E-04 |
| DAMH-17 | 60 | 30 | 7.21 E-04 |

A 15 s^{-1} , se observa que la floculación mejora, se observa material coloidal en suspensión y la velocidad de sedimentación tal como se presenta en la tabla 7, es mayor a la prueba a 10 s^{-1} , los flóculos formados tienen un aspecto poco compacto con una estructura de poros más abierta del flóculo, no están muy bien consolidados por tanto tienen un determinado grado de hidratación; es decir, mayor volumen y menor densidad.

A 20 s^{-1} y 25 s^{-1} , con velocidades de sedimentación de 9.43×10^{-4} y $8.53 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, respectivamente; las características de la floculación son buenas, se observa la presencia de partículas coloidales en el efluente, los flóculos formados tienen un aspecto de estar más consolidados y por tanto con un menor grado de hidratación y mayor densidad; a 25 s^{-1} , se puede observar además que los flóculos son de tipo aguja.

A 30 s^{-1} , se observa que los flóculos son mucho más delgados y se fracturan, existe una cantidad mayor de partículas coloidales en suspensión y la sedimentación del lodo es diferenciada, los flóculos sedimentan lentamente y el producto de la ruptura de flóculos formados se queda en suspensión

Por tanto, se observa que cuanto mayor es la gradiente de velocidad en la etapa de floculación, más rápida es la velocidad de agregación de las partículas coloidales, los flóculos disminuyen de tamaño hasta un límite máximo, por encima de 30 s^{-1} , las fuerzas de cizallamiento los rompen en partículas menores.

Aplicando la ecuación 6, se calcula el $d_{\text{máx}}$ aproximado de los flóculos que se formaron a los diferentes gradientes de velocidad de trabajo. Si n y C se mantienen constantes, el $d_{\text{máx}}$ de los flóculos formados es más pequeño cuando Gf es mayor. Para $Gf = 10 \text{ s}^{-1}$ se obtienen flóculos de $2,377 \mu\text{m}$ de diámetro y para $Gf = 30 \text{ s}^{-1}$ los flóculos son de $987 \mu\text{m}$.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran como una alternativa eficiente la aplicación de las microburbujas (tamaño $<100 \mu\text{m}$) para una remoción efectiva de los lodos de tratamiento químico del DAM-EMH, por flotación.

Para la aplicación de esta técnica se ha seleccionado agua ácida de la mina Huanuni (DAM-EMH), que se caracteriza por tener un pH de 2.80 y un alto contenido de metales pesados, su acidez neta calculada es $A_{\text{c}} = 1,273.38 \text{ mg/l}$ como CaCO_3 equivalente.

Aplicando el tratamiento activo con cal a pH 9.5 y una dosis de cal de 2.32 Kg/m^3 , el efluente cumple con los criterios ambientales con una eficiencia de remoción de metales pesados mayor al 99%.

De acuerdo a la teoría cinética de flotación y basado en un modelo ortocinético de floculación, el contacto microburbuja-flóculo, puede considerarse debido a fenómenos de superficie y condiciones hidrodinámicas de la zona de contacto y por tanto no se requieren flóculos grandes en relación a los requerimientos de sedimentación; cuya eficiencia está determinada por la densidad del flóculo la cual está relacionada con el tamaño y composición del mismo.

En tanto que para la separación por flotación con microburbujas, es importante producir flóculos relativamente pequeños y compactos para evitar la rotura del flóculo cuando se introduce aire despresurizado en la celda de flotación.

De acuerdo al, los flóculos adecuados para el proceso de flotación se obtienen bajo las siguientes condiciones de

operación: 4.0 mg/L de Superfloc A-10, tiempo de mezclado $t_m = 5$ minutos, tiempo de floculación $t_f = 20$ minutos, gradiente de velocidad de agitación de mezclado $G_m = 60 \text{ s}^{-1}$ y gradiente de velocidad de crecimiento y engorde de los flóculos $G_f = 20 \text{ s}^{-1}$.

Los flóculos formados bajo estas condiciones presentan una mayor fuerza de cohesión; por tanto, son más compactos con un menor grado de hidratación y mayor densidad, con un tamaño aproximado de $1,365 \mu\text{m}$.

Referencias

- AUBÉ B. *The Science of Treating Acid Mine Drainage and Smelter Effluents*. Aumais, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec, Canada, 2000.
- SÖHNEL O., GARSIDE J. *Precipitation; Basic Principles and Industrial Applications*. Oxford: Butterworth Heinemann Ltd, pp 391, 1992.
- PATTERSON K. "Traditional vs. State of the Art Methods of Treating Wastewaters Containing Heavy Metals, A Consultant's point of View". *AIChE Journal*. Volume 73, pp 384-390 384, 1977.
- TAMBO N. "Criteria for Flocculator Design". *Journal Water SRT-AQU*. Volume 40, 1991.
- CHEREMISINOFF, Paul. *Sludge Management and Disposal. Water Management and Supply*. Ed. Prentice-Hall. Water and Wastewater Treatment Guidebooks. pp. 204, 1994.
- RUIZ R., VILA Ma. J. "Solución a algunos problemas de floculación de fangos mediante el uso conjunto de floculantes aniónicos y catiónicos". *Tecnología del agua*. No.27, 1986.
- SANDOVAL L., MONTELLANO L., PIÑA M. "Potencial Zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer". *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. 2010.
- MORUZZI R., REALI M. "Characterization of Microbubble Size Distribution and Flow Configuration in DAF Contact Zone by a Non Intrusive Image Analysis System and Tracer Test". *Water Science & Technology – WST*. pp 253-262, 2010.
- OHNARI H., SAGA T. "High Functional Characteristics of Microbubbles and Water Purification". *Resources Processing*. 46, Japón: pp 238-244, 1999.
- BURNS S., YIACOUMI S., TSOURIS C, "Microbubble generation for environmental and industrial separations" *Separation and Purification Technology*. 11: 221-232, 1997.