

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



**EFFECTO DE LOS ESPUMANTES EN LA HIDRODINÁMICA DE CELDAS DE
FLOTACIÓN Y LA MEJORA DE LA PERFORMANCE METALÚRGICA**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

PRESENTADO POR:

ERNESTO ALEJANDRO REBAZA GRADOS

LIMA – PERU

2011

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mi Esposa
Allison y a mis 5 Hijos por el apoyo
constante y abnegado.

RESUMEN

En los últimos años se ha logrado importantes estudios sobre el efecto de los espumantes sobre las propiedades hidrodinámicas de las celdas y su performance. Varias son las funciones de los espumantes en la flotación, pero los principales son el control de tamaño de burbuja en la zona de pulpa y la estabilización de la zona de espuma.

Laskowski fue uno de los primeros en tratar de capturar ambos roles en la caracterización de los espumantes, con el fin de proporcionar una base para la selección de espumante para un determinado proceso. Así como para explorar la función entre el funcionamiento y su estructura química.

Este nuevo enfoque sobre la relación entre la química y la hidrodinámica tiene consecuencias importantes para los circuitos de flotación, como estos deben ser controlados y optimizados. La elección de un espumante es fundamental para el proceso de optimización, y nuestra investigación trata de darle la relevancia que debe tener el espumante en el proceso de flotación.

La acción de las burbujas y de la cama de espuma es estudiada ampliamente. Algunas características esenciales pueden presentarse juntas al decir que el arrastre de las partículas hidrofílicas decrece en una gruesa cama de espuma debido al drenaje del agua. Obviamente, las burbujas y el espumante son factores importantes al desarrollo de la flotación en el futuro.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	07
CAPITULO I: FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE FLOTACION	09
1.1. Transformación isoterma	13
1.2. Fuerzas sobre la burbuja	13
1.3. Ecuación del movimiento	14
CAPITULO II: BURBUJAS E INTERACCION ENTRE BURBUJAS	16
2.1. Comportamiento de las burbujas	17
2.2. Película formada en la superficie de las burbujas	17
2.3. Película o capa adherida a las burbujas en el agua	17
2.4. Extensión del área superficial en burbujas	18
2.5. Coalescencia	19
2.6. Dispersión de gas e hidrodinámica	19
2.7. Tamaño y distribución de las burbujas (D_b)	20
2.8. Medición de tamaño de burbujas	21
2.9. Velocidad superficial de gas (J_g)	24
2.10. Flujo de área superficial de burbujas (S_b)	26
2.11. Hold up de gas o contenido de gas (ϵ_g)	27
2.12. Efecto del tamaño de burbuja en la flotación	28
CAPITULO III: QUIMICA DE LOS ESPUMANTES	32
3.1. Espumantes	32
3.2. Clasificación de los espumantes	33

3.3. Espumantes ácidos	34
3.3.1. Fenoles	34
3.3.2. Sulfonatos alquil aril	36
3.4. Espumantes básicos	36
3.5. Espumantes neutros	37
3.5.1. Alcoholes alifáticos	37
3.5.2. Alcoholes cíclicos	39
3.5.3. Parafinas alcoxicas	40
3.5.4. Poliglicol ethers	41
3.5.5 Polipropilen glicol ethers	42
3.5.6. Poliglicol glicerol ethers	42
CAPITULO IV: HIDRODINAMICA DE CELDAS Y EL PAPEL DE LOS ESPUMANTES	44
4.1. Efecto de la estructura del espumante sobre el tamaño de partícula	46
CAPITULO V: LA HIDROFOBICIDAD Y EL PAPEL DE LOS COLECTORES	48
5.1. Angulo de Contacto	48
5.2. Interacción partícula – burbuja de Laskowski	49
5.3. Teoría de la interpenetración de Leja y Schulman	50
5.4. Complejo superficial espumante – colector de Crozier y Klimple	51
5.5. Mecanismo de espumación	52
5.6. Arrastre mecánico	54
CAPITULO VI: CINETICA DE FLOTACION	56
6.1. Perfiles de circuitos de flotación	57

6.1.1. Perfil cinético	57
6.1.2. Perfiles de aire en un banco	58
6.2. Diseños de espumantes	60
6.2.1. Caso de estudio 1	60
6.2.2. Caso de estudio 2	72
6.2.3. Caso de estudio 3	76
CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFIA	82
ANEXO	

INTRODUCCIÓN

Los espumantes son reactivos surfactantes que ayudan en la formación y estabilización de la espuma de flotación, cuando es inducido aire en una pulpa mineral agitada.

Cuando las superficies minerales se vuelven hidrofóbicas por la acción del colector, la estabilidad de adhesión a la burbuja, especialmente en la superficie de la pulpa, depende en gran parte, de la eficiencia del espumante. El comportamiento ideal de un espumante debería ocurrir totalmente en la fase líquida y no influir sobre la superficie del mineral. Sin embargo, en la práctica hay una interacción entre el espumante, el mineral y otros reactivos. Por lo anterior la selección del espumante apropiado para una mena en particular, se puede hacer solo después de un amplio trabajo experimental. En la flotación de minerales sulfurados es práctica común emplear más de un colector y también al menos dos espumantes. Los espumantes específicos se seleccionan para proporcionar las propiedades físicas adecuadas a la espuma. De esta manera podemos obtener combinaciones espumantes que puedan

tener una buena selectividad, buena cinética de reacción, adecuada persistencia y un poder de espumación tal que permita minimizar su dosificación.

Un buen espumante debe tener un poder colector despreciable y también debe producir una espuma que sea sólo lo suficientemente estable para facilitar la transferencia de mineral flotado desde la superficie de la celda hasta las canaletas colectoras.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE FLOTACION

El proceso de flotación es un método de concentración de minerales en húmedo, en la que se aprovechan las propiedades físico-químicas superficiales de las partículas para efectuar la selección. En otras palabras, se trata de un proceso de separación de materias de distinto origen que se efectúa desde pulpas acuosas por medio de burbujas de gas y a base de sus propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas.

La flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está representada por las materias a separar, la fase líquida es el agua y la fase gas es el aire. Los sólidos finos y liberados y el agua, antes de la aplicación del proceso, se preparan en forma de pulpa con porcentaje de sólidos variables pero normalmente no superior a 40% de sólidos. Una vez ingresada la pulpa al proceso, se inyecta el aire para poder formar las burbujas, que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas.

Para lograr una buena concentración se requiere que las especies que constituyen la mena estén separadas o liberadas. Esto se logra en las etapas previas de chancado y

molienda. Para la mayoría de los minerales, se logra un adecuado grado de liberación moliendo a tamaños cercanos a los 100 micrones (0,1 mm). Al aumentar el tamaño de la partícula, crecen las posibilidades de mala adherencia a la burbuja; en tanto que las partículas muy finas no tienen el suficiente impulso para producir un encuentro efectivo partícula burbuja.

Por su parte, la estabilidad de la burbuja dependerá del espumante agregado.

Para estudiar el mecanismo de la flotación es necesario conocer lo que sucede con la partícula de mineral y una burbuja de aire para que ellos formen una unión estable.

La Fig. N° 1.1 nos muestra al proceso de flotación como un sistema interactivo entre el mineral, los químicos y la máquina de flotación

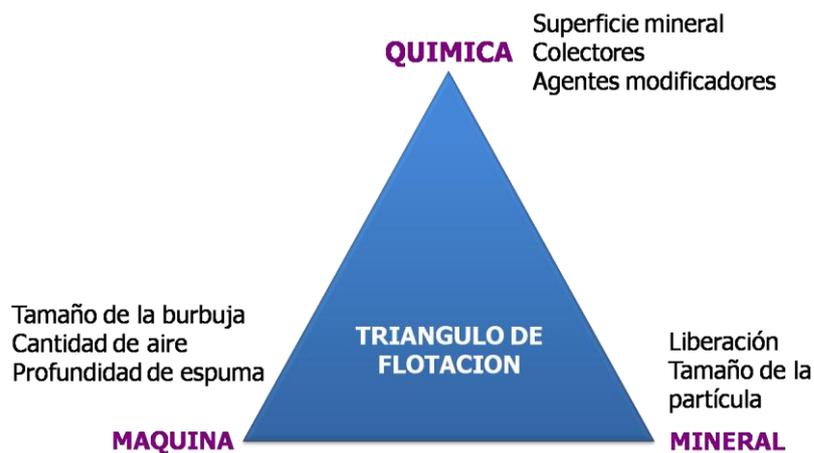


Figura N° 1.1: Proceso de flotación – sistema interactivo

El proceso de flotación está basado sobre las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los sólidos a separar. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de

comportamiento de sólidos frente al agua, o sea, de mojabilidad de los sólidos. Los metales nativos, sulfuros de metales o especies tales como grafito, carbón bituminoso, talco y otros, son poco mojables por el agua y se llaman minerales hidrofóbicos. Por otra parte, los minerales que son óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros son hidrofílicos, o sea, mojables por el agua.

Se puede observar además que los minerales hidrofóbicos son aerofílicos, es decir, tienen gran afinidad por las burbujas de aire, mientras que los minerales hidrofílicos son aerofóbicos, o sea, no se adhieren normalmente a ellas.

Por lo tanto, es necesario incrementar la propiedad hidrófoba en las partículas minerales de una pulpa para facilitar la flotabilidad. Esto se efectúa con los reactivos llamados colectores, que son generalmente compuestos orgánicos de carácter heteropolar, o sea, una parte de la molécula es un compuesto evidentemente apolar (hidrocarburo) y la otra es un grupo polar con las propiedades iónicas, es decir, con carga eléctrica definida.

La partícula queda cubierta por el colector que se adhiere a su superficie por medio de su parte polar, proporcionándole con la parte apolar propiedades hidrofóbicas.

La adición de espumantes, como se ha dicho, permite la formación de burbujas de tamaño y calidad adecuada para el proceso. Pues bien, el contacto entre las partículas y las burbujas requiere que las primeras estén en constante agitación, la cual la otorga

el rotor de la máquina de flotación, de modo que para realizar la unión con las burbujas son necesarios:

- a. Su encuentro; y
- b. Condiciones favorables para formar el agregado.

El contacto partícula-burbuja se acerca hasta el punto en que la película de agua que las separa es muy fina. En este momento para que la partícula pueda acercarse más a la burbuja tiene que superar lo que se considera una barrera energética. Para las partículas hidrofílicas, en que la asociación de la partícula con las moléculas de agua es muy firme, esta barrera nunca se supera y las partículas no flotan. Para las partículas hidrofóbicas, la barrera queda repentinamente rota por fuerzas no bien conocidas, permitiendo un contacto trifásico (sólido-líquido-gas).

Las columnas de burbujas se encuentran en una amplia gama de industrias, por ejemplo, química, petroquímica y biotecnológica. Sin embargo, si se desea optimizar su diseño para emplearlas en ingeniería de procesos se hace necesario entender los fundamentos de su comportamiento hidrodinámico, el cual viene determinado por el ascenso de las burbujas, interacciones entre burbujas y burbujas-líquido, tamaño de burbuja, su distribución de tamaños y su mecanismo de inyección. Además, el movimiento de tales burbujas en el seno fluido induce fluctuaciones de velocidad en el líquido debido a los esfuerzos cortantes producidos en la vecindad de las burbujas, fundamentalmente debido a su movimiento de oscilación.

1.1 Transformación isoterma

Consideremos una burbuja de forma esférica de radio r , que está a una profundidad x . La presión del aire en el interior de la burbuja es igual a la presión debida a la columna de fluido de altura x . La burbuja se expande isotérmicamente a medida que asciende. Si suponemos que el aire es un gas ideal tendremos:

$$\rho g x \frac{4}{3} \pi r^3 = \rho g x_0 \frac{4}{3} \pi R^3 \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{x_0}{x}} R$$

Siendo R el radio de la burbuja a la profundidad x_0 , cuando entra en el recipiente de vidrio.

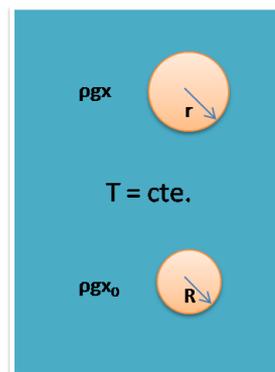


Figura N° 1.2: Expansión isotérmicamente de la burbuja

1.2. Fuerzas sobre la burbuja

Supondremos que la velocidad de ascenso de la burbuja es suficientemente lenta para que el flujo sea laminar. La burbuja experimenta una fuerza de rozamiento F_r que se opone a su velocidad v . De acuerdo con la ley de Stokes

$$F_r = 6\pi r \eta v$$

La segunda fuerza que actúa sobre la burbuja es la fuerza de empuje E . De acuerdo al principio de Arquímedes.

$$E = \rho g \frac{4}{3} \pi r^3$$

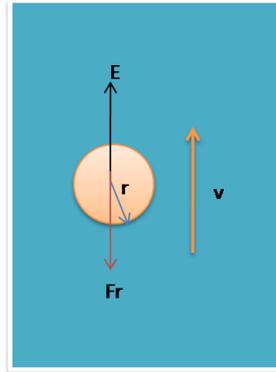


Figura N° 1.3: Fuerzas sobre la burbuja

1.3. Ecuación del movimiento

La masa m y el peso mg de la burbuja de aire son despreciables. La segunda ley de Newton se escribe:

$$E - Fr = ma \approx 0$$

$$\rho g \frac{4}{3} \pi r^3 + 6\pi r \eta \frac{dx}{dt} = 0$$

Cuando un cuerpo se mueve en el seno de un fluido viscoso en régimen laminar, al cabo de un cierto tiempo alcanza una velocidad límite constante, la resultante de las fuerzas que actúan sobre dicho cuerpo es cero.

Supondremos que la burbuja permanece en estado de equilibrio, el empuje y la fuerza de rozamiento son prácticamente iguales y de sentido contrario, la burbuja alcanza en cada momento la velocidad límite, aunque esta velocidad cambie con el tiempo.

Como el radio r de la burbuja es función de la profundidad x , la ecuación del movimiento se escribe en forma diferencial

$$\frac{dx}{dt} + \frac{2\rho g}{9\eta} \left(\frac{x_0}{x}\right)^{\frac{2}{3}} R^2 = 0$$

Separando variables e integrando, con la condición de que se empieza a contar el tiempo $t=0$ en el instante en el que la burbuja pasa por la marca situada a una profundidad x_1 .

$$\int_{x_1}^x x^{\frac{2}{3}} dx = -\frac{2\rho g x_0^{\frac{2}{3}} R^2}{9\eta} \int_0^t dt$$

$$x^{\frac{5}{3}} = x_1^{\frac{5}{3}} - \frac{10\rho g}{27\eta} (x_0)^{\frac{2}{3}} R^2 t = 0$$

CAPITULO II

BURBUJAS E INTERACCION ENTRE BURBUJAS

Las burbujas se forman al introducir aire en un medio líquido. La generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, o bien inducidas por rotores o agitadores. En las maquinas de flotación la generación de burbujas se lleva a cabo por impacto a alta velocidad del impulsor sobre la burbuja de aire generando el rompimiento de la burbuja grande para generación de burbujas pequeñas. La figura N° 2.1 muestra dispositivos generadores de burbujas.



Figura N° 2.1: Generadores de burbujas – material poroso y sistema de impulsor

2.1. Comportamiento de las burbujas

Las burbujas al contener aire son más livianas que el agua lo que las hace ascender, las burbujas grandes ascienden más rápido, tienen una velocidad más alta, estas ascienden en línea recta o en zig/zag, estas se expanden isotérmicamente a medida que asciende.

Una burbuja esférica sencilla asciende de acuerdo con la ley de Stokes, su velocidad depende del tamaño de la burbuja, entre más grande la burbuja más velocidad y de la viscosidad; entre más viscoso el líquido, menos velocidad y de la temperatura, entre más alta la temperatura, menos viscosidad, más velocidad.

2.2. Película formada en la superficie de las burbujas

En agua pura, una burbuja sube hasta el punto de interacción aire/agua, rompe en la superficie y revienta, las burbujas no forman película. En agua que contiene químicos o iones, las burbujas forman una película, esta crece con las burbujas, el espesor de la película ligada a la superficie del agua depende de los químicos y su concentración.

2.3. Película o capa adherida a las burbujas en el agua

El espesor de la capa adherida de agua afecta grandemente las propiedades de las burbujas. Una capa gruesa y más organizada parece retardar la velocidad de ascenso. Una vez en la superficie, se vuelve más estable. El espesor y la estabilidad de la capa adherida a la burbuja, depende de los químicos que el agua contenga.

La figura N° 2.2 nos muestra una interpretación física de la capa adherida basada en los resultados de I.R. de los estudios realizados por J.A. Finch.

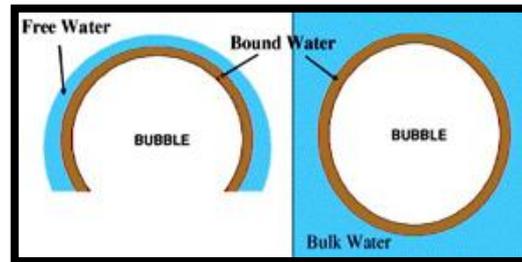


Figura N° 2.2: interpretación física de capa adherida (J.A Finch)

2.4. Extensión del área superficial en burbujas

Para hacer la burbuja más pequeña, para crear una superficie más amplia, se requiere agregar más energía, esta puede ser mecánica, mezclando o aplicando mayor presión a través de orificio más pequeño, ó química, agregando un agente activo a la superficie que retarde la tensión o un material que prevenga la coalescencia. El espumante creará una película de agua adherida a la burbuja. Burbujas pequeñas tiene mayor superficie como observamos en la figura N° 2.3, donde 1 burbuja de 4 cm^3 de volumen tiene un área superficial de 12.5 cm^2 y 9 burbujas más pequeñas con el mismo volumen tienen un área superficial de 26 cm^2 .

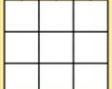
		
# of Bubbles	1	9
Volume	4 cm^3	4 cm^3
Surface Area	12.5 cm^2	26 cm^2
		

Figura N° 2.3: extensión de área superficial en burbujas pequeñas (Mc Gill)

2.5. Coalescencia

Las burbujas pueden ligarse o coalescer durante el ascenso, esto sucede por la ley de la energía, burbujas más grandes tienen menor energía por unidad de superficie. La coalescencia puede ser inhibida por medios físicos o químicos. En la Figura N° 2.4 podemos observar como las burbujas al ascender coalescen y se hacen más grandes.

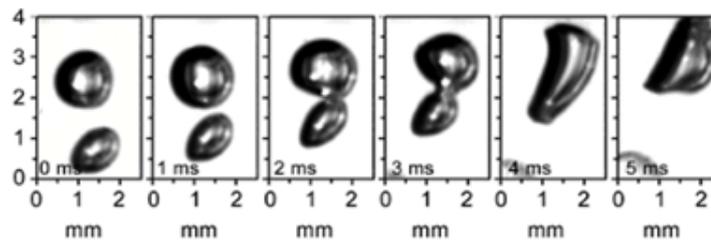


Figura N° 2.4: Fenómeno de coalescencia entre burbujas

2.6. Dispersión de gas e hidrodinámica

La flotación es un proceso de separación en el cual las partículas hidrofóbicas son selectivamente colectadas por las burbujas de aire y llevadas al concentrado. La fase de gas puede ser un colector ó un acarreador de partículas en la flotación. El rendimiento metalúrgico en equipos de flotación depende de las características de la dispersión de aire obtenida.

Los parámetros hidrodinámicos que nos permiten caracterizar la dispersión del aire son:

- Tamaño y distribución de burbuja (D_b)
- Velocidad superficial del gas (J_g)
- Flujo de área superficial de gas (S_b)
- Holdup o Contenido de gas (ϵ_g)

2.7. Tamaño y distribución de las burbujas (D_b)

En una celda de flotación se crean muchas burbujas, no todas tienen el mismo tamaño, poseen una distribución de tamaño, y esta distribución puede ser descrita en diferentes formas; las más usadas son el diámetro promedio (D_{10}) y el diámetro promedio Sauter (D_{32}), este último es un indicador representativo del tamaño de burbuja. Las burbujas en una celda de flotación o columna son denominadas como el enjambre de burbujas. La superficie de la burbuja es la que contiene las partículas de flotación.

Los diámetros promedio y Sauter se calculan como siguen:

$$D_{10} = \frac{\sum d_i}{n}$$

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d^3}{\sum_{i=1}^{i=n} d^2}$$

Donde:

d_i : diámetro equivalente esférico de la burbuja.

n : tamaño de muestra.

El diámetro de burbuja Sauter, así calculado incorpora información sobre el volumen y superficie de burbujas de la muestra tomada. Nasset, explica que el tamaño de burbuja observado en una celda de flotación de cualquier diseño, es el resultado de procesos primarios de generación, y aquellos secundarios relacionados con la coalescencia de burbujas. Las características de la pulpa (porcentaje de sólidos, viscosidad, etc.) pueden influenciar en la coalescencia de burbujas.

Destaca que es la dosis de espumante es uno de los parámetros más importantes para minimizar la coalescencia de burbujas, y a su vez controlar el tamaño de burbuja.

El rol del espumante es ilustrado en la Figura N° 2.5, donde se puede apreciar que el diámetro de Sauter (D_{32}) disminuye a un valor constante a medida que aumenta la dosis de espumante.

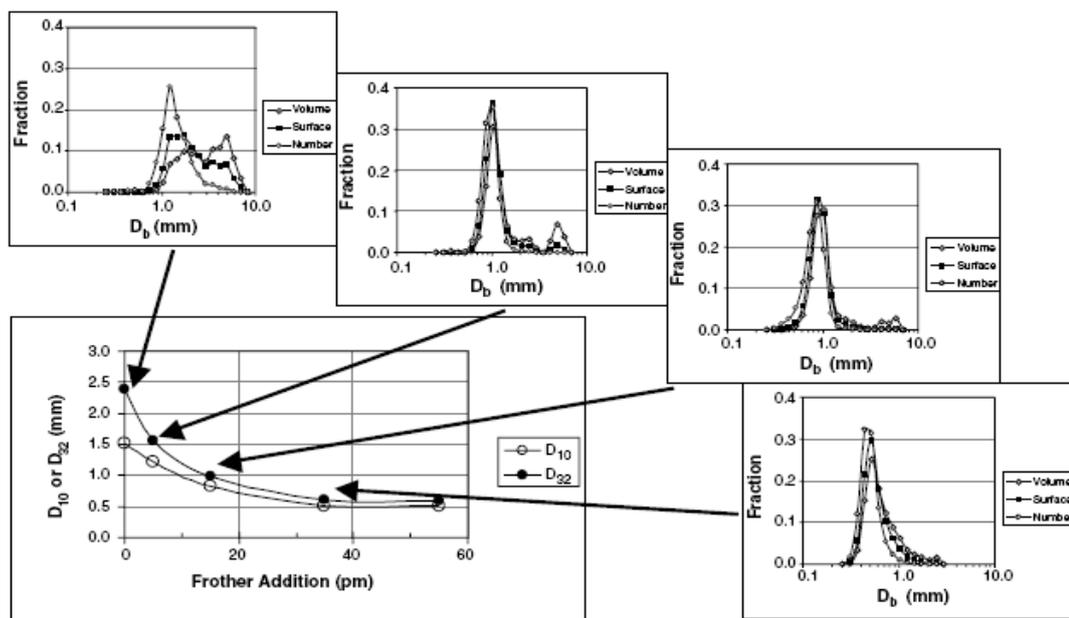


Figura N° 2.5: Efectos de la dosis de espumante en el tamaño de burbuja (D_{32} y D_{10}) y en la distribución de frecuencia (Nesbet)

2.8. Medición de tamaño de burbujas

Las investigaciones realizadas en la Universidad de Mc Gill, por Chem, lo llevo a presentar una técnica de medición de tamaño de burbujas. Las burbujas ascendentes se colectan en un tubo vertical lleno con agua, las burbujas son llevadas a una cámara de visualización plana ubicada en la parte superior. En esta cámara es posible tomar fotografías o videos de las burbujas para un análisis de imágenes fuera de línea. En la

cámara de visualización hay un alambre de dimensiones conocidas que se utiliza como referencia.

Gómez, presentan un medidor de burbujas basado en la técnica propuesta por Chen con algunas modificaciones. Utilizan una cámara de visualización inclinada en 15°, donde las burbujas se distribuyen en una mono capa a medida que ascienden. Los autores señalan que esta modificación elimina el efecto de traslape de burbujas y entrega un plano de enfoque definido.

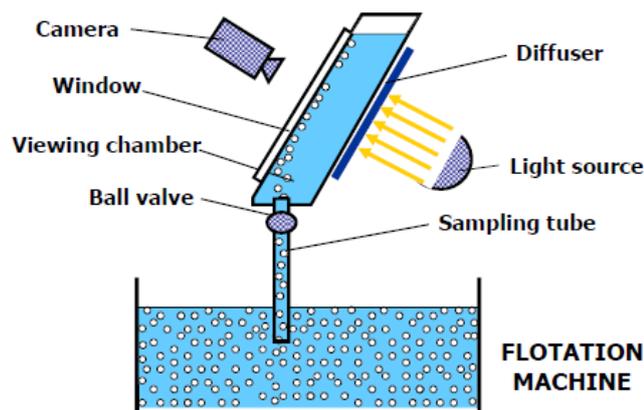


Figura N° 2.6: Visualizador de burbujas inclinado (Gomez - Mc Gill)

El Dr. Gómez, presentan distribuciones de tamaño de burbujas construidas a partir del número de burbujas perteneciente a cada clase y utilizan los diámetros estadísticos D_{10} y D_{32} para representar el tamaño de burbuja. Sin embargo, los mismos autores señalan que, representar la distribución de tamaño de burbujas por un tamaño medio puede ocultar información. Por este motivo sugieren que un enfoque

más adecuado sería calcular distribuciones de área, volumen o flujo de área superficial de burbujas en función del tamaño de burbuja.

En la figura N° 2.7 podemos observar un analizador de tamaño de burbuja desarrollado en la universidad de Mc Gill, y en la figura N° 2.8 mediciones del tamaño de burbuja de diversos espumantes manteniendo un holdup de gas o contenido de gas de 6%.



Figura N° 2.7: Analizador de tamaño de burbuja (Gomez - Mc Gill)

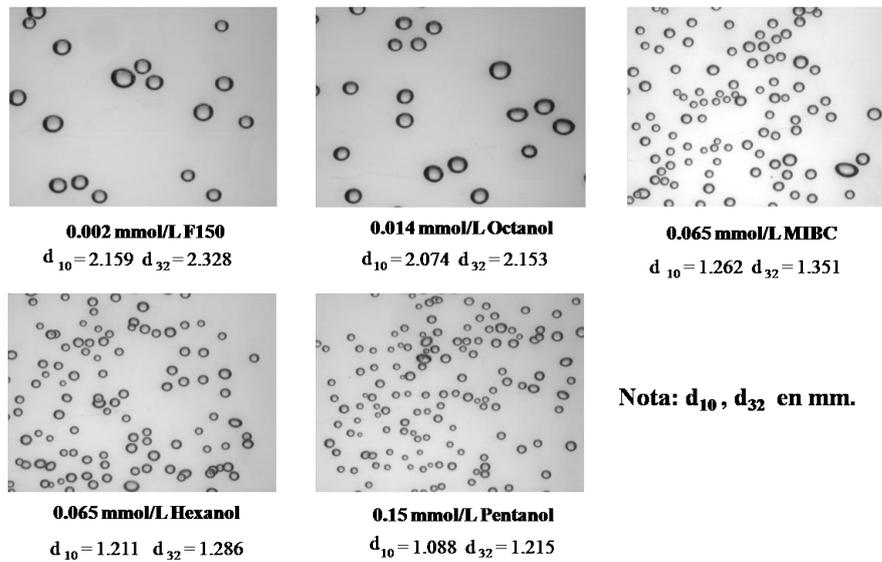


Figura N° 2.8: Medición de D_b utilizando diversos espumantes (Mc Gill)

2.9. Velocidad superficial de gas (J_g)

La velocidad superficial del gas representa la velocidad de ascenso de las burbujas de gas en la celda de flotación, definida como la cantidad de aire que pasa por unidad de área transversal de una celda de flotación por unidad de tiempo.

$$J_g = \frac{Q}{A}$$

Donde:

- J_g : Velocidad superficial de gas (cm/seg).
 Q : Flujo de gas de alimentación a la celda (cm³/seg).
 A : Área de la sección transversal efectiva de la celda (cm²).

Nesset, en la figura N° 2.10 resume la experiencia para cuatro tipos de máquinas de flotación en las cuales se cumple que la velocidad superficial de gas influye en el tamaño de burbuja.

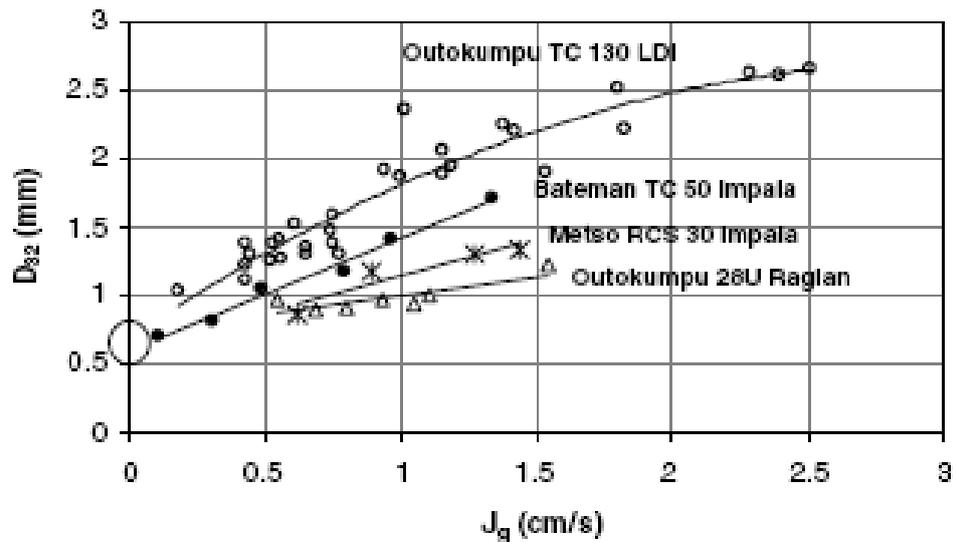


Figura N° 2.10: Variación del diámetro de Sauter en función del J_g . (Nesset)

Plantea que el aumento en la media de las burbujas, producto de aumento en la velocidad superficial del gas, responde a su influencia en los procesos primarios y/o secundarios (coalescencia), y que depende del tipo de celda ocupada.

En la figura N° 2.11 podemos ver los dos esquemas de las versiones de analizadores de la velocidad superficial de gas.

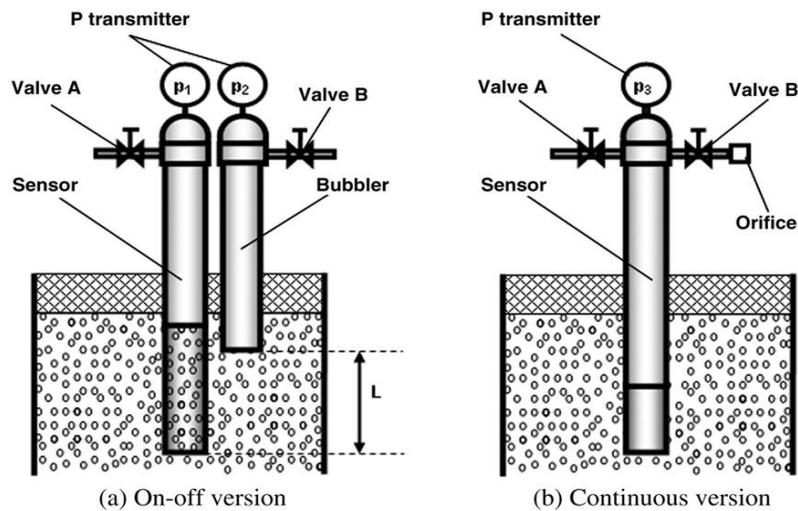


Figura N° 2.11: Esquemas de analizadores de J_g (Mc Gill)

2.10. Flujo de área superficial de burbujas (S_b)

Como la flotación está fuertemente determinada por la superficie de burbujas disponible para el ascenso de mineral a la fase espuma, es necesario definir una nueva variable que se denomina flujo de área superficial de burbujas (S_b), que es el área superficial de burbujas moviéndose hacia arriba de la celda por unidad de área de sección transversal por unidad de tiempo, que se define en la ecuación.

$$S_b = \frac{6J_g}{D_{32}}$$

$$S_b = 5,59\varepsilon_g$$

Donde:

J_g : Velocidad superficial de gas (cm /seg).

D_{32} : Diámetro de Sauter (cm)

S_b : Flujo de área superficial de burbujas (seg^{-1}).

ε_g : Holdup del gas (%)

El modelo para S_b es un modelo empírico, la exactitud depende de los datos. En la deducción de la ecuación de $S_b = 5,59\varepsilon_g$ se trabaja sobre el supuesto de burbujas esféricas. Además en la ecuación, el autor destaca que la constante 5,59 se deduce de experimentos asociados a celdas con agitación mecánica.

2.11. Holdup de gas o contenido de gas (ε_g)

Cuando se introduce gas a una celda, sea esta columnar o agitada mecánicamente, se produce un desplazamiento de pulpa. La fracción volumétrica desplazada se denomina “holdup de gas” o contenido de gas y se representa por ε_g . Es definido como la fracción volumétrica de la pulpa ocupada por las burbujas de gas.

$$\varepsilon_g = \frac{\text{volumen de las burbujas}}{\text{volumen total}} * 100(\%)$$

El contenido de gas afecta la densidad de pulpa, los sistemas de control en celdas y los circuitos de flotación, especialmente para niveles de pulpa o flujo en colas. Un incremento en ε_g incrementa la población de burbujas y el tiempo de residencia de las burbujas de aire en la pulpa.

El rango común del contenido de gas en la pulpa en las celdas convencionales varia en el rango de 5 – 15%, en pulpas de alta viscosidad se han reportado ε_g mayores a 40%.

De los modelos propuestos para el flujo de área superficial de burbujas (S_b), se puede encontrar una relación entre el holdup del gas (ε_g), el diámetro de Sauter (D_{32}) y la velocidad superficial del gas (J_g) expresada por la ecuación.

$$\varepsilon_g = \frac{6 \cdot J_g}{5,59 \cdot D_{32}}$$

2.12. Efecto del tamaño de burbuja en la flotación

Jameson, en su estudio acerca de la formación de agregados de burbujas indican que el tamaño medio de las burbujas formadoras de clusters fue generalmente mayor que el tamaño de las burbujas no agregadas, sugiriendo que la tasa de agregación aumenta con el diámetro de las burbujas.

Grau y Heiskanen, realizan experimentos en un sistema bifásico variando velocidad de agitación y flujo de aire para medir propiedades de dispersión del gas: velocidad superficial del gas (J_g), diámetro de burbuja (D_{32}), holdup de gas (ε_g), y flujo de área superficial de burbujas (S_b).

Estos autores señalan que la velocidad superficial del gas es una medida de la habilidad de aireación del equipo de flotación y es un parámetro importante debido a su influencia en el desempeño del proceso de flotación. En otras palabras, la medición de la velocidad superficial local del gas entrega una idea de cómo el aire que entra se dispersa en la celda de flotación.

Heiskanen, señala que la distribución axial del aire depende de la geometría de la celda. En celdas rectangulares existe una alta velocidad superficial de gas en las esquinas del estanque.

Grau y Heiskanen, indican que el flujo de área superficial de burbujas es un parámetro clave en la flotación, dado que describe la capacidad del equipo de flotación para transportar sólidos hasta la fase de espuma. Concluyen que el diámetro de burbuja Sauter (D_{32}) aumenta con el flujo de aire. La desviación estándar de la distribución de tamaño de burbujas también aumenta con el aumento del flujo de aire. El holdup de gas crece con un aumento en la velocidad de agitación. Obtienen valores de flujo de área superficial de burbujas entre 27 - 36 (s-1).

Finch, indican que el flujo de área superficial de burbujas se relaciona con el desempeño de la flotación y ha sido considerado como una variable clave del equipo de flotación. Proponen una relación entre S_b y el holdup de gas dada por la ecuación: $S_b = 5,59\epsilon_g$.

Además de lo anterior, estos autores señalan que el proceso de flotación es un sistema triangular interactivo que involucra factores químicos, físicos y del equipo. Estos últimos son: velocidad de agitación, flujo de aire y diseño de la celda.

Los factores relativos al equipo no afectan los resultados de flotación en forma aislada, sino que crean las condiciones hidrodinámicas – régimen de flujo, intensidad de mezclado, suspensión de sólidos, dispersión de gas, interacción burbuja-partícula,

que gobiernan el desempeño metalúrgico. Se señala la dispersión de aire como la característica hidrodinámica clave de la flotación.

Dado que el holdup de gas es más fácil de medir, pues no requiere el diámetro de burbujas, una relación entre flujo de área superficial y holdup de gas sería conveniente para usarla como un factor del equipo.

Con respecto a la relación entre holdup de gas y tamaño de burbujas, Dobby y Finch, indican que el holdup de gas crece cuando aumenta el flujo de aire y cuando decrece el tamaño de burbujas, debido a que las burbujas más pequeñas tienen menor velocidad de ascenso y permanecen más tiempo en la celda.

Dobby y Finch, en su revisión acerca de columnas de flotación, definen la capacidad de transporte del equipo como la masa de sólidos transportados por unidad de tiempo por unidad de área transversal de la columna. Esta capacidad de transporte depende del diámetro de burbuja, el diámetro de partícula, la densidad de la partícula y J_g . A través de análisis de los modelos obtienen que, para alcanzar la capacidad de transporte máxima con partículas de mayor tamaño, se necesitan burbujas de mayor tamaño.

Pyke, muestra en la figura N° 2.12 que existe una influencia distinta del diámetro de burbuja asociado a un tamaño de partícula en la flotación. Así para partículas de menor tamaño (menor que $25 \mu\text{m}$) se genera una mejor flotación con burbujas más

finas (D_b de 0,8 mm), mientras que para partículas más gruesas (mayores a 25 μm) se generan una mejor flotación con burbujas más gruesas (D_b de 1,2 mm).

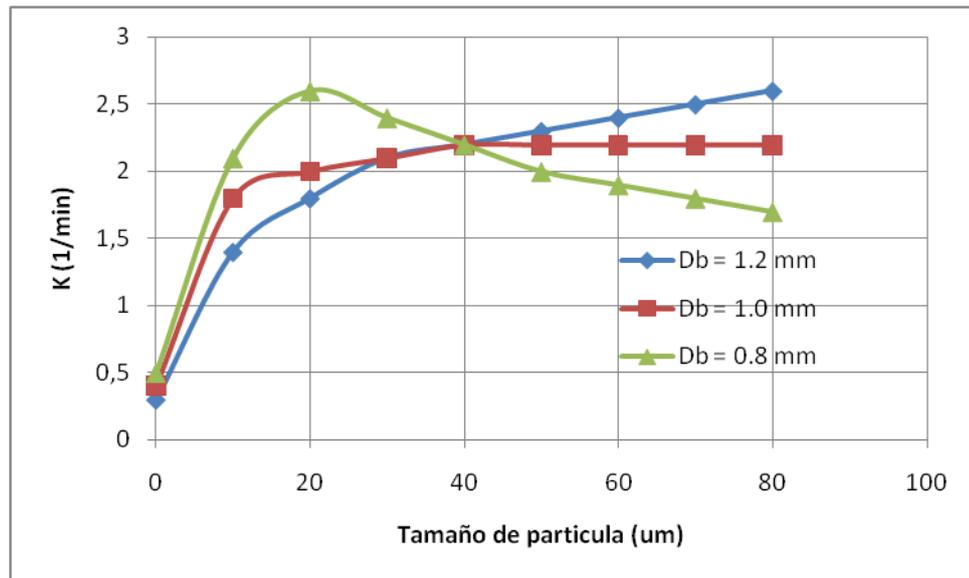


Figura N° 2.12: influencia del diámetro de burbuja en la cinética de flotación (Pyke)

CAPITULO III

QUIMICA DE LOS ESPUMANTES

3.1. Espumantes

Los espumantes son compuestos heteropolares de superficie activa que contiene un grupo polar y un radical de hidrocarburo, capaz de adsorberse en la interfase aire – agua. Las moléculas de espumante se ordenan en la interfase aire – agua de manera que los grupos hidrofílicos o polares son orientados hacia la fase del agua, y la cadena de hidrocarburo hidrófoba o no polar hacia la fase aire, de hecho, el espumante crea condiciones para la formación de espuma. La flotación por espuma es un sistema de tres fases, sólido, líquido y gaseoso. El espumante se concentra en la interfase agua – aire, formando una película de agua alrededor de las burbujas, que les impide chocar o tocarse. Los espumantes también bajan la tensión superficial del agua. Las fuerzas creadas alrededor de la burbuja de aire en la presencia de un espumante impiden a las burbujas romperse.

Un espumante reduce el tamaño de burbuja en la pulpa y estabiliza la burbuja cargada de mineral en la fase de espuma lo suficiente como para removerlo de la celda lo cual maximiza la operatividad y la performance Grado - Recuperación.

La coalescencia de la burbuja se retarda mientras que la capa de agua entre las dos burbujas evita el drenaje, este resulta en pequeñas burbujas en la pulpa y una espuma persistente en la parte superior de la celda. El espesor y las propiedades de la capa de agua son únicos para cada tipo de espumante.

Los espumantes más usados son del tipo: alcoholes y poliglicoles. Los espumantes se adsorben en la superficie de la burbuja con una orientación particular. El H del grupo OH (polar) se une a la molécula de agua construyendo una película de agua estable alrededor de la burbuja. La capa resiste el drenaje y retarda la coalescencia.

3.2. Clasificación de los espumantes

Dudencov, clasificado a los espumantes dependiendo del comportamiento a diferentes valores de pH. Esta clasificación es mostrada en la tabla 3.1, otra clasificación está basada por el tipo de espumante o compuesto que actúan como colector y espumante. Esta clasificación es tentativa porque algunos de los compuestos usados como espumantes han sido o aún son productos de marca registrada y sus estructuras son rara vez revelados.

Los espumantes ácidos han sido usados extensamente desde los años 60s. Su aplicación ha sido reducida debido a consideraciones medio ambientales. Dos tipos de espumante ácidos son comunes, llamados, fenoles y sulfonatos. Los espumantes neutros son la familia más larga de espumantes y son los más usados.

Tabla N° 3.1: Clasificación de los espumantes

<i>Acidos</i>	<i>Neutros</i>	<i>Basicos</i>
Fenoles	Alcoholes alifáticos	Base Piridina
Sulfonatos	Alcoholes ciclicos	
	Parafinas alcoxicas	
	Poliglicol ethers	
	Polipropilen glicol ethers	
	Poliglicol glicerol ethers	

3.3. Espumantes ácidos

Estos espumantes trabajan bien solamente en pH ácido. En medio alcalino, sus propiedades espumantes se reducen. Ejemplos típicos de estos reactivos son los fenoles. Estos espumantes son obtenidos como un subproducto de la destilación del petróleo. Los siguientes dos grupos de espumantes han sido usados en plantas de procesamiento de minerales, fenoles y sulfonatos alquil-lauril.

3.3.1. Fenoles

Los fenoles son también conocidos como alcoholes aromáticos, un espumante típico de éste grupo es el cresol, que consiste de una mezcla de orto (o) (35-40%), meta (m) (25 a 28%) y para (p) (35-40%) cresoles. Los cresoles y los homólogos cercanos a los fenoles son productos acidulantes del toluol. La figura N 3.1, muestra los componetes principales de los fenoles.

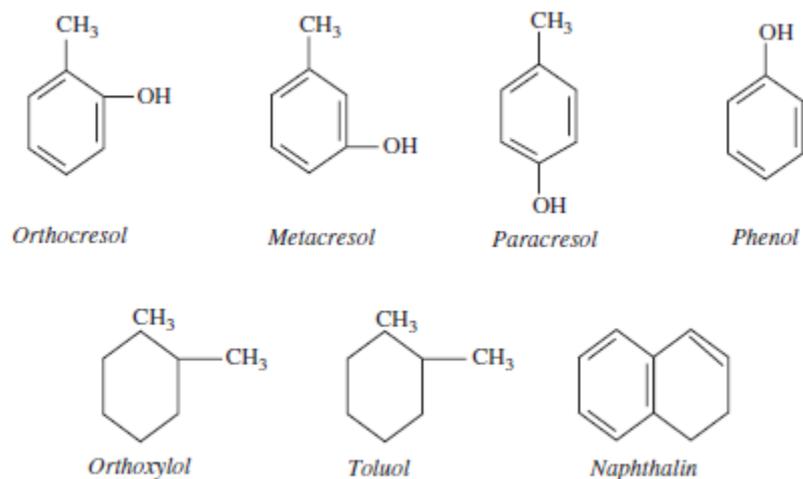


Figura N° 3.1: Componentes principales de los fenoles.

Los espumantes más efectivos de este grupo son los m-cresol, p-cresol y o-cresol, algunas propiedades físicas de los fenoles son mostrados en la tabla 3.2.

Tabla N° 3.2: Propiedades físicas de los fenoles

Nombre del producto	Formula Quimica	Punto de congelación (°C)	Punto de evaporacion (°C)
Fenol	C_6H_5OH	-43.3	182.0
<i>o</i> -Cresol	$CH_3C_6H_4 OH$	-31.6	191.0
<i>m</i> -Cresol	$CH_3C_6H_4 OH$	-11.9	202.0
<i>p</i> -Cresol	$CH_3C_6H_4 OH$	-35.0	202.0
<i>o</i> -Xilol	$1,2-(CH_3)_2C_6H_4$	-28.0	144.0
<i>m</i> -Xilol	$1,3-(CH_3)_2C_6H_4$	-54.0	139.0
<i>p</i> -Xylol	$1,4-(CH_3)_2C_6H_4$	-13.0	138.0
Toluol	$C_6H_5CH_3$	-93.0	110.6
Naftaleno	$C_{10}H_8$	-80.0	218.0

El principal problema asociado con el uso de los fenoles como un espumante es su composición variable, el cual depende de la materia prima del cual el espumante fue derivado. El xilenol pertenece al tipo de espumantes de alcoholes aromáticos. En apariencia, el xilenol es un líquido marrón oscuro similar a los fenoles con la misma característica olorosa.

Los grupos metil pueden asumir seis diferentes arreglos. La posición 3-4 es el más abundante. Estos espumantes son obtenidos también de las colas de destilación del petróleo. Similar a los fenoles, estos espumantes también tiene una composición variable.

3.3.2. Sulfonatos alquil aril

El Sulfonato puede ser descrito como un espumante aniónico con una estructura compuesto de un hidrocarburo aromático y un radical alifático. A pesar del hecho de que estos espumantes tienen buenas propiedades espumantes, su aplicación fue limitada, probablemente porque muchos espumantes sulfonatos contiene trazas de azufre, el cual interfiere en la flotación.

3.4. Espumantes básicos

Estos espumantes son representados por la piridina y sus similares, recuperado como un subproducto de la destilación de colas del alquitrán. Son usados para la flotación de minerales metálicos, mayormente en la Unión Soviética. En Europa, un producto similar fue usado para producir un colector usado en la flotación de plomo oxidado (Hoechst). Las siguientes dos estructuras son usados como espumantes:

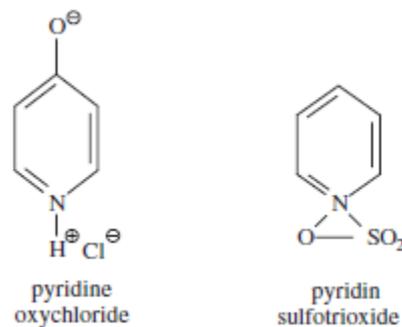


Figura N° 3.2: Estructura principal de la piridina

3.5. Espumantes neutros

Este es el más importante grupo de espumantes usados mayormente en la flotación minerales polimetálicos, minerales de cobre y oxidados. Son funcionales en pulpas ácidas y básicas. Estos espumantes están divididos en seis subgrupos, con grandes diferencias en composición química.

3.5.1. Alcoholes alifáticos

Estos espumantes son mezclas de alcoholes conteniendo 6-8 átomos de carbono. Es bien conocido que los espumantes de este grupo es el metil isobutil carbinol (MIBC) y el 2 - etil hexanol. Las propiedades más importantes de los alcoholes alifáticos son mostradas en la tabla 3.3.

Mezcla de alcoholes de C6 – C9: una gravedad especifica de 0.856 y viscosidad de 5 cps (Brookfield). Estos espumantes son considerados como altamente selectivos.

Mezcla de alcoholes C4 – C7 y aceite de hidrocarburo: una gravedad específica de 0.82 y una viscosidad de 4.5 cps (Brookfield). Estos espumantes son usualmente usados durante la flotación de cobre-molibdeno o flotación de molibdeno.

Mezcla de alcoholes C5 – C8: una gravedad específica de 0.81 – 0.83 y una viscosidad de 6.9 cps (Brookfield). Estos espumantes tienen espumas menos resistentes que las otras mezclas de alcoholes.

Tabla N° 3.3: Propiedades de los alcoholes alifáticos

Nombre del Producto	Formula Quimica	Punto de congelación (°C)	Punto de evaporación (°C)	Densidad (g/ml)	Solubilidad (g/l)
<i>n</i> -Pentanol	CH ₃ (CH ₂) ₃ CH ₂ OH	-75	137.3	0.8144	23.0
Isoamil	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH ₂ OH	-117	132.0	0.813	25.0
Hexanol	CH ₃ (CH ₂) ₂ CH ₂ OH	-52	156.5	0.819	6.0
Heptanol	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₂ OH	-34	176.0	0.822	1.8
MIBC	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CHOHCH ₃	-90	132.0	0.808	17.0
Caprilic acid	CH ₃ (CH ₂) ₅ CHOHCH ₃	-38	179.0	0.822	12.0
4-Heptanol	CH ₃ (CH ₂) ₂ CHOH(CH ₂) ₂ CH ₃	-41.2	161.0	0.8183	4.5

3.5.2. Alcoholes cíclicos

Estos espumantes fueron populares en los inicios de la flotación como el aceite de eucalipto. Estos espumantes son básicamente mezclas de diferente alcoholes ciclicos

y producidos como mezcla sintética de las resinas de Pino. Lo que sigue son las estructuras básicas de diferentes componentes de espumantes ciclo alcoholes:

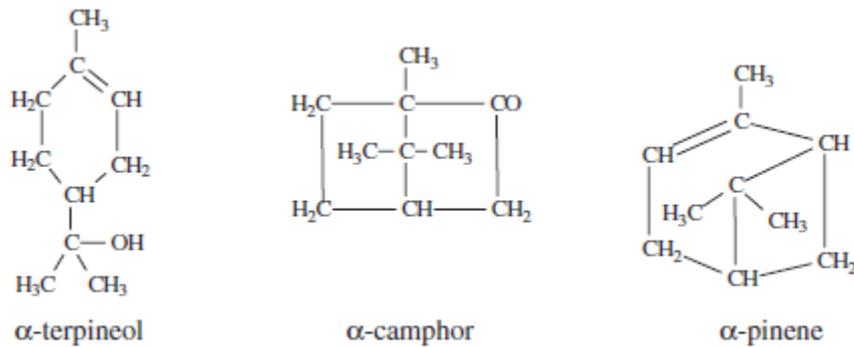


Figura N° 3.3: Estructura de alcoholes cíclicos

Las características físico químicas de los alcoholes ciclicos son mostrados en la tabla N° 3.4 estos espumantes son menos sensibles a la presencia de minerales arcillosos que los otros tipos de espumantes y por lo tanto son los más extensamente usados en mezclas con alcoholes alifáticos para la flotación de metales base, pórfidos de cobre con contenidos de minerales arcillosos. El mayor problema con el uso de alcoholes cíclicos derivados de los recursos naturales es que su composición no siempre es constante, y como consecuencia las propiedades de espumación son variables.

Tabla N° 3.4: Propiedades físico – químico de los alcoholes cíclicos

Nombre del Producto	Formula Química	Grupo Polar	Solubilidad (g/L)	Densidad (g/ml)	Punto de Evaporación (°C)	Punto de Congelación (°C)
α Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	-OH	2.2	0.919	219	-33
β Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	-OH	1.98	0.935	220	-35
γ Terpineol	C ₁₀ H ₁₈ O	-OH	2.09	0.925	222	-36
Borneol	C ₁₀ H ₁₈ O	-OH	0.64	1.010	212	-210
Anetol	C ₁₀ H ₁₂ O	O-C	Insoluble	0.933	233	-
α Camphor	C ₁₀ H ₁₆ O	C=O	1.60	0.912	201	-179
α Pinene	C ₁₀ H ₁₆	-	Insoluble	1.00	230	-65

3.5.3. Parafinas alcoxicas

Este grupo de espumantes fue desarrollado en 1951 por el Dr. Powell en Sudáfrica. En años recientes, un número de espumantes fueron producidos basados en dos estructuras principales, el trietoxibutano (TEB) y el trialkoxipropil trioxano.

Solamente existe información limitada de la química y las propiedades de estos espumantes, aunque son extensamente usados en la flotación de metales base y minerales oxidados. Sus propiedades espumantes tienen mucha diferencia de los alcoholes alifáticos y cíclicos con respecto a espumas estables y sensibles en presencia de minerales arcillosos. Sin embargo, son selectivos y en muchos casos dan mejores ratios de flotación en el tratamiento de minerales de cobre y zinc. Son altamente efectivos durante la flotación de minerales de cobre oxidado usando métodos de sulfurización.

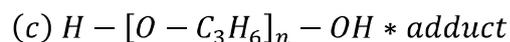
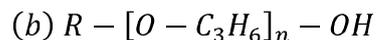
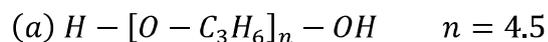
3.5.4. Poliglicol ethers

Tueter de Dow Chemical y Booth de Cyanamid fueron los primeros en desarrollar la serie de espumantes de poliglicol ethers a inicios de 1950. Estos productos son producidos de fluidos de freno sintético y son metoxi polipropilen glicol o polipropilen glicol metil ethers con la siguiente formula.



Hay muchas variaciones de poliglicol ethers producido por diferentes industrias.

Algunos de las más importantes estructuras de espumantes son listados abajo:



Algunos poliglicol ethers son producidos también como condensación del butanol con oxido de etilen (c) o el resultante de la reacción entre el butanol y soda caústica.

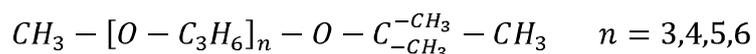
El peso molecular y la longitud del carbono del poliglicol ethers determinan su poder y performance. Un espumante con alto peso molecular tiene espumas más persistentes y menos selectivas que un espumante de bajo peso molecular.

Desafortunadamente, los poliglicol ethers de diferentes industrias se comportan también diferentes. Por ejemplo, los espumantes poliglicol ethers de Hoechst (Alemania), ofrecen mejor selectividad que los mismos producidos por la Dow (misma estructura general).

Los poliglicoles ethers producidos del butanol con oxido de etilen son más selectivos y tienen mejor poder de carga que sus similares producidos del butanol y soda cáustica.

3.5.5 Polipropilen glicol ethers

Estos espumantes son parcialmente solubles en agua, y son una mezcla de monometil ethers y polipropilen glicol con la siguiente fórmula general:

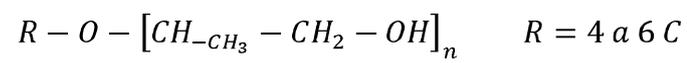


Estos espumantes son normalmente usados en flotación de minerales base. Estos producen espumas persistentes y tienen relativamente alto poder de carga.

3.5.6. Poliglicol glicerol ethers

Originalmente, estos espumantes fueron desarrollados en la antigua Unión Soviética bajo el código de Frother E1, y en 1985 la Dow Chemical produjo espumantes

similares bajo la nomenclatura de XK35004, XK35440Oil y Xk35004.20L. la formula general de estos espumantes es como sigue:



Estos espumantes originaron espumas relativamente fuertes con fina textura.

CAPITULO IV

HIDRODINAMICA DE CELDAS Y EL PAPEL DE LOS ESPUMANTES

Mucho trabajo se está haciendo para entender el papel que los espumantes desempeñan en la hidrodinámica de la celda de flotación, a medida que se desarrollan nuevas herramientas para estudiar éstos efectos. Como mencionamos en capítulo II, se realizan investigaciones entre las relaciones del tamaño de burbuja y el holdup de gas, y como estos parámetros hidrodinámicos son afectados por el espumante.

También se vienen realizando Investigaciones para determinar espesores de las paredes de la burbuja, y las propiedades de los límites de la capa formada en el agua por varias familias de espumantes.

Estudios continuos en el entendimiento de varias propiedades de los espumantes, permitirán al metalurgista predecir cuál espumante o mezcla, proveerá un óptimo rendimiento en las tres fases, la figura N° 4.1, nos muestra las propiedades de los espumantes en las zonas de pulpa, espuma y pos remoción.

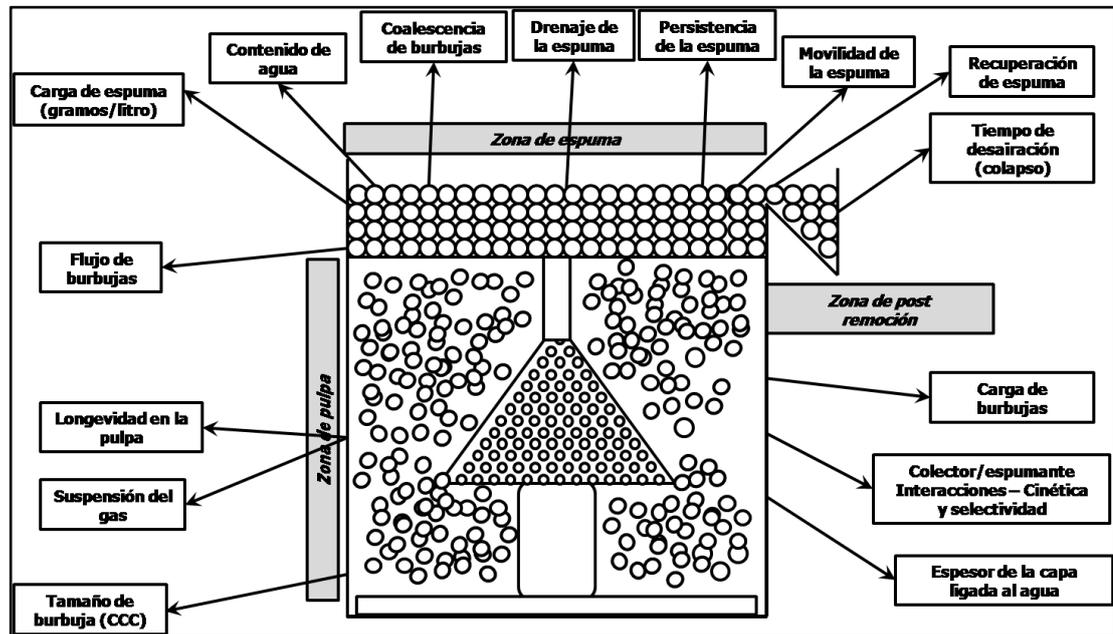


Figura N° 4.1: Propiedades de los espumantes relativos a la celda de flotación

(Cappuccitti).

La caracterización de los espumantes está dirigida a dos funciones principales como son el control del tamaño de la burbuja en pulpa y por tanto hidrodinámica de la pulpa y control de las propiedades de la espuma.

Aldrich y Feng, realizaron pruebas con diferentes espumantes para ver como afectaban la distribución de tamaño de burbujas en la pulpa y en la espuma, Reportes posteriores de Cho y Laskowski, indican la existencia de una concentración crítica de coalescencia (CCC) para los espumantes. Esta concentración representa un valor máximo para la dosis de espumante, pues se postula que a concentraciones mayores que la CCC no existe coalescencia de burbujas. En otras palabras, aumentar la concentración de espumante a un valor por sobre la CCC no tendría influencia en el

tamaño de las burbujas y este estaría dado únicamente por las condiciones de formación de la burbuja.

Se señalan valores de CCC para 2 de los espumantes utilizados por Aldrich y Feng, alrededor de 18 ppm para el espumante Dowfroth-200 y para el espumante MIBC se entrega una CCC de 11,2 ppm.

Cada estructura de los espumantes determina cierta característica en los parámetros hidrodinámicos y su relación, en la figura N° 4.2 observamos el comportamiento de holdup de gas para diversos espumantes, los alcoholes alifáticos requieren de mayor dosificación para aumentar el ε_g , mientras que poliglicoles a menores dosificaciones alcanzan mayores ε_g .

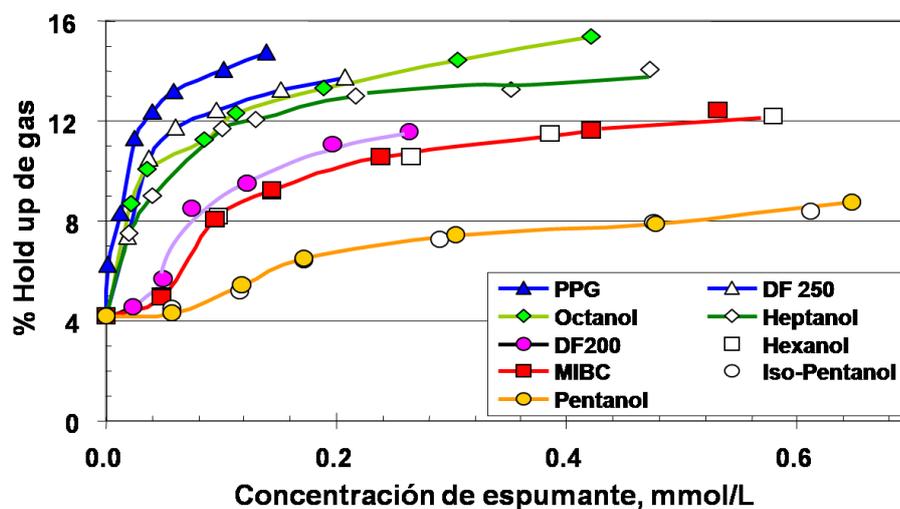


Figura N°4.2: Holdup de gas vs concentración de espumante (Mc Gill)

4.1. Efecto de la estructura del espumante sobre el tamaño de partícula

El trabajo desarrollado por Klimpel R, R y Isherwood S. con respecto al efecto de la modificación de la estructura de los espumantes sobre la flotabilidad del tamaño de partícula esta resumida en la figura N° 4.3 esta muestra como cada una de las

estructuras de los espumantes está directamente relacionada a un rango de tamaño de partícula donde su acción será más eficaz.

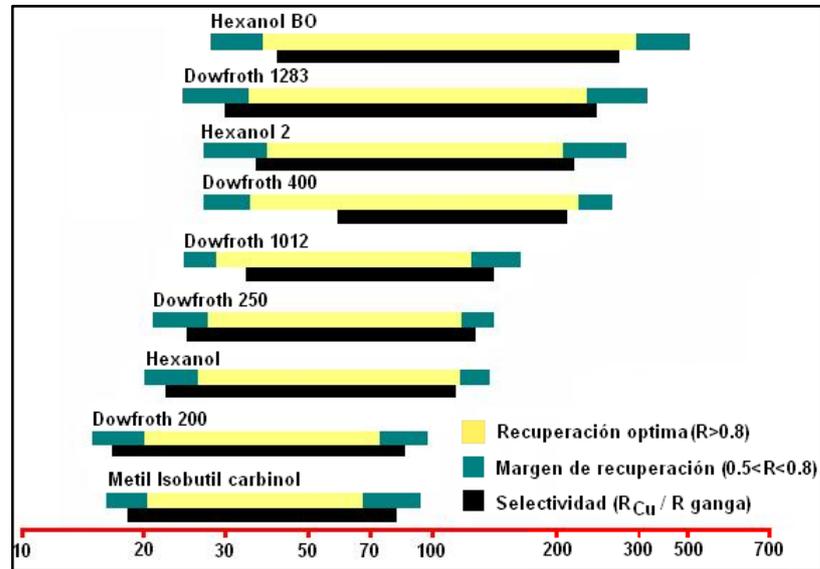


Figura N° 4.3: Influencia de la estructura del espumante sobre el tamaño de partícula (Klimpel – Ishewood).

El tamaño de partícula influye mucho en la recuperación de los minerales como podemos observar en la Figura 4.4

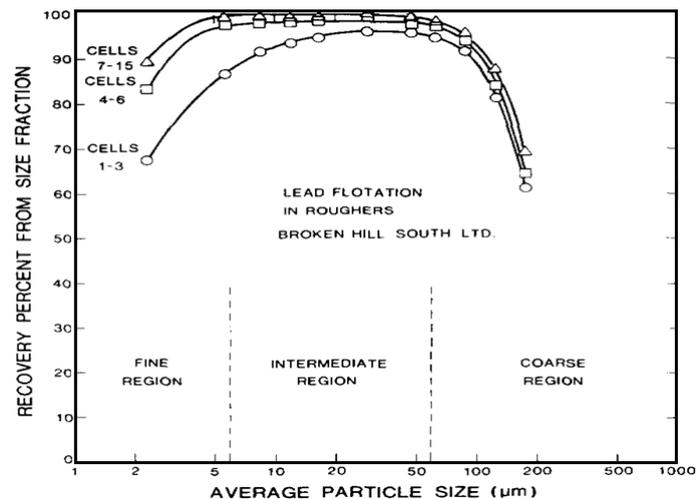


Figura N° 4.4: Influencia del tamaño de partícula sobre la recuperación (International Journal of Mineral Processing)

CAPITULO V

LA HIDROFOBICIDAD Y EL PAPEL DE LOS COLECTORES

Existen varias teorías de la interacción en la formación de agregados de partículas mineral burbuja, para su posterior formación como una cama de espuma mineralizada.

5.1. Angulo de contacto

El ángulo de contacto es una medida de la mojabilidad de la superficie solida por un líquido, es de suma importancia porque relaciona en forma cuantitativa las propiedades hidrofobicas de un mineral con su flotabilidad.

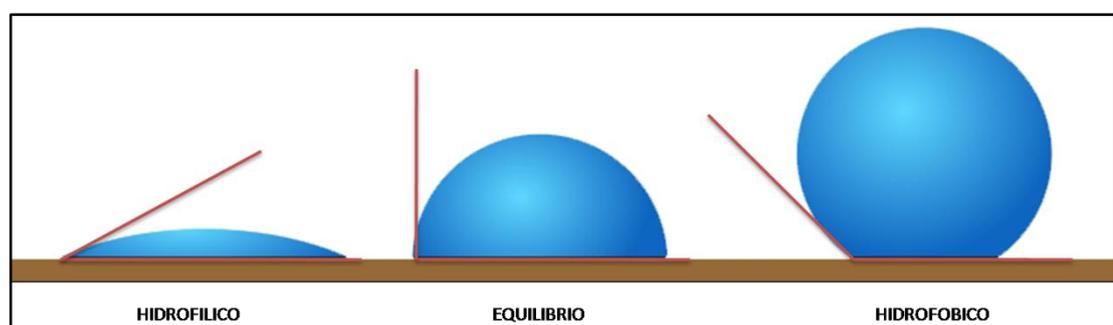


Figura N° 5.1: Angulo de Contacto

El ángulo de contacto es el ángulo formado por el plano tangente a la interfase líquido – gas y el plano formado por el sólido en un contacto trifásico sólido – líquido – gas.

La hidrofobicidad de una partícula puede ser cambiada agregando químicos específicos. Los colectores modifican la hidrofobicidad relativa de las partículas. El tipo y cantidad de colector hará que la partícula se adhiera a la burbuja, entre más colector se agregue, la adhesión a la partícula será mayor, si el colector es selectivo, éste causará que las partículas indeseadas no se adhieran a la burbuja. El colector solo puede mejorar la hidrofobicidad hasta un ángulo de contacto máximo, después no habrá más hidrofobicidad.

5.2. Interacción partícula – burbuja de Laskowski

La “hidrofobicidad, definida por el ángulo del contacto, no es suficiente para describir las propiedades de la flotación de un sólido dado, después de las condiciones de contacto, con la velocidad de desplazamiento de la capa líquida entre la partícula sólida y la burbuja que también deberá rellenar la superficie.” El fenómeno más importante en flotación es la captura de partículas por una burbuja bajo condiciones hidrodinámicas en la celda de flotación. El proceso que hace posible esta unión puede analizarse en términos de tres etapas individuales.

Etapas de Colisión. Las trayectorias de la partícula y la burbuja son tales que la distancia entre ellas se hace muy pequeña. Cuando la separación entre la partícula y la burbuja es lo suficientemente pequeña, predominan las fuerzas intermoleculares.

Etapa de Adelgazamiento de la Película de Líquido. Debido a las distancias tan pequeñas que predominan en esta etapa, se pueden producir esfuerzos viscosos muy altos; las fuerzas de superficie controlan la velocidad de acercamiento entre partícula y burbuja.

Etapa de Rompimiento y Retroceso de la Película de Líquido. La película de líquido entre la partícula y la burbuja se rompe, el líquido en el punto de ruptura retrocede y se forma un contacto estable con el sólido. En este caso las fuerzas de resistencia para el acercamiento de la burbuja, son las del agua de hidratación alrededor de las partículas y la capa de agua orientada a la interface líquido/gas. (Figura N° 5.2)

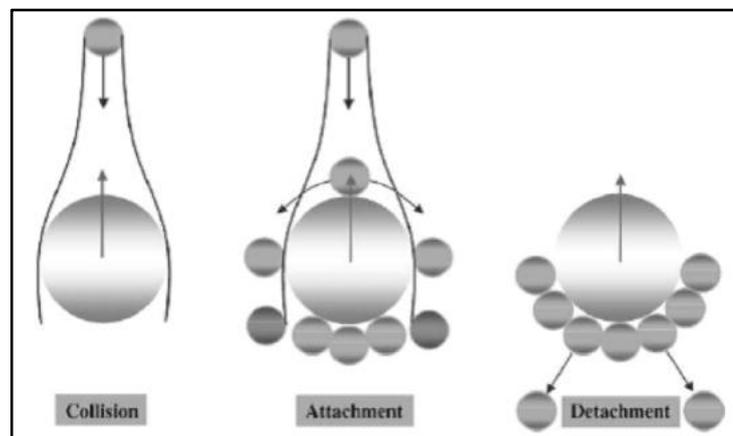


Figura N° 5.2: Etapas de colisión y atrapamiento

5.3. Teoría de La Interpenetración de Leja y Schulman

Leja y Schulman estudiaron la interacción entre los colectores y espumantes en 1954, y demostraron que una cobertura colector-mineral removerá espumante de una

solución. Su experimento fue bastante simple. Ellos observaron una muestra de galena, la cual colocaron en una solución del xantato, sacando la muestra de la solución y posteriormente colocada en una solución acuosa conteniendo una cantidad conocida de un espumante. El análisis de la solución acuosa de espumante posterior a la prueba, mostró una reducción en el contenido de espumante y por consiguiente la formación de alguna forma de interacción colector-espumante. El experimento se repitió con una gama de especies colector-espumante, y dio resultados similares. Como allí no había ninguna burbuja presente, la atracción entre el colector y las moléculas de espumante no podrían ser debidas a la tensión superficial. En este estudio ellos también propusieron su teoría de la interpenetración. Ellos asumieron que las fuerzas de atracción involucradas entre el sólido y los reactivos son iónicas.

5.4. Complejo superficial espumante - colector de Crozier y Klimplel

La figura N° 5.3, ilustra una interacción compleja xantato - espumante (MIBC) en la superficie de un sulfuro mineral. Se muestra la quimisorción de los átomos de los azufres transmisores de electrones y la adsorción física de la doble ligadura del átomo de azufre. Nótese que estas dobles ligaduras del átomo de azufre están en el mismo plano como ligaduras atómicas simples. Las moléculas de espumante se orientan con la matriz del colector de tal forma que los grupos hidroxilo estén apuntando hacia afuera de la superficie del mineral, así, cuando las burbujas se adhieren, estos grupos se localizan en la interface agua-aire ligando la burbuja a la superficie mineral.

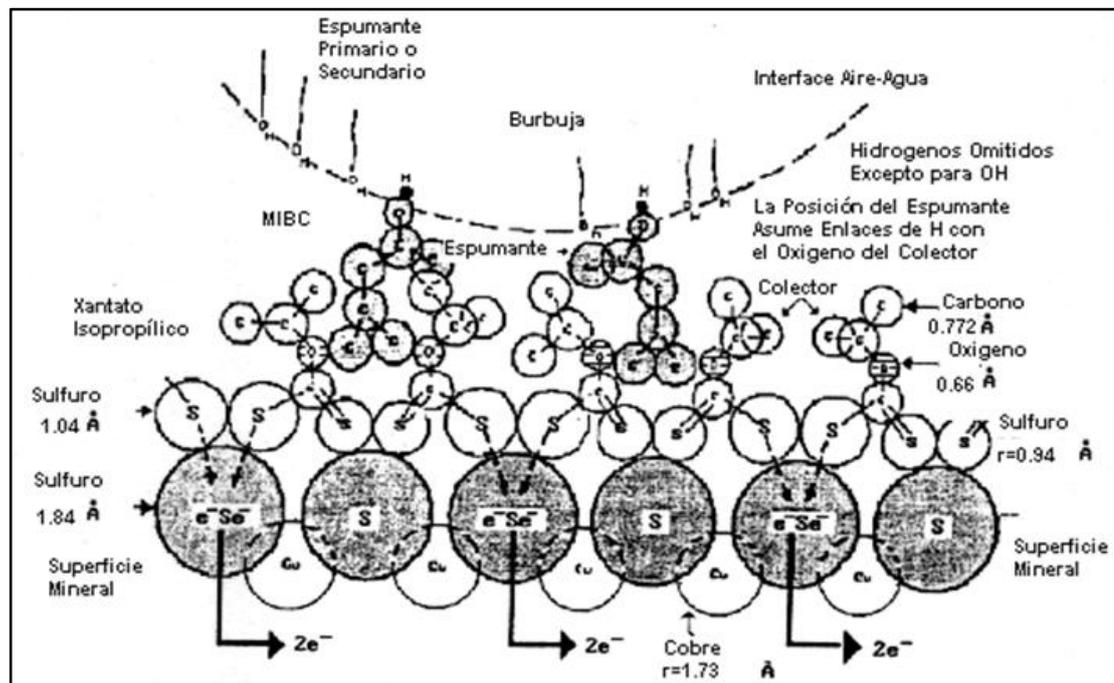


Figura N° 5.3: Inteacción complejo espumante – colector (Crozier y Klimplel)

5.4. Mecanismo de espumación

En la ausencia de un espumante específico en una pulpa aireada, la distribución de tamaño de las burbuja dentro de la pulpa será gruesa y se destruirán fácilmente los agregados burbuja/partícula que alcanzan la superficie de la pulpa, como resultado del rompimiento de la burbuja. La adición del espumante al sistema tiene dos efectos, reducción del tamaño medio de las burbujas dentro de la de la pulpa y en la formación de una fase separada de espuma sobre la pulpa. Los diámetros medidos de burbujas dentro de pulpas para celdas convencionales está en el rango de 0.5 a 2.5 de mm, y en columnas de flotación de 2.0 a 5.0 mm. En la espuma aumentan progresivamente tanto como 15 cm. pero el máximo depende del espumante, su concentración, carga de mineral, y la altura de espuma entre otros factores. La espuma está en un estado dinámico estable con un crecimiento de agregados de

burbujas/partículas y las burbujas producidas dentro de la pulpa pasando a través de la interface pulpa - espuma para formar los niveles más bajos de la espuma.

Al mismo tiempo, en las capas superficiales de espuma, hay algún colapsamiento de burbujas, pero principalmente un sobre flujo continuo de espuma, el cual se rompe en grado variable en las canaletas. Los dos efectos tienden a mantener un volumen de espuma constante así como minimizar los ajustes de control de espuma y que las características de mineralización permanezcan constantes. Los ajustes son realizados por el control de la adición de espumante dentro de los límites de operación, ajuste de volumen de espuma por incremento o disminución de los niveles de pulpa y flujo de aire. El ajuste del volumen/altura de espuma permite el incremento o disminución del tiempo de retención de los sólidos en la espuma como una forma de control de la selectividad y la calidad del concentrado. La figura N° 5.4 nos muestra la interacción partícula – burbuja en las diversas zonas.

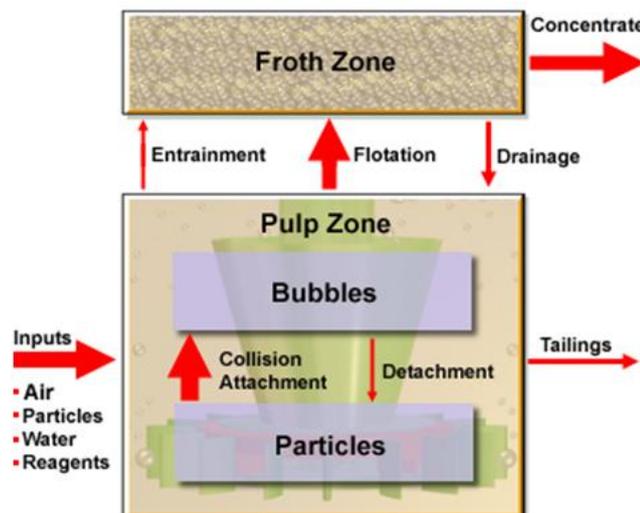


Figura N° 5.4: Interacción partículas–burbujas en la celda de flotación

5.5. Arrastre mecánico

Un mecanismo de flotación donde el agua y los sólidos suspendidos en la pulpa entran a la fase espuma entrampados entre las burbujas. El agua proviene de la capa ligada a la burbuja, pero además es transportada por la estela de la burbuja mientras asciende. El agua en la estela contiene todas las partículas que típicamente se hallan en la pulpa. La flotación real ocurre cuando las partículas se adhieren a la superficie de la burbuja.

El arrastre ocurre con partículas arrastradas hasta la fase de espuma desde la estela de la burbuja. El arrastre mecánico puede ser reducido por una disminución en la recuperación de agua, sin embargo, los espumantes requieren de una cierta cantidad de agua para permanecer estables y obtener una recuperación de espuma deseable de partículas minerales de valor.

El arrastre puede reducirse rebajando la cantidad de agua que entra en la espuma, puede controlarse permitiendo tiempo adecuado a la espuma para drenar el agua y remover los minerales embarcados, ambas acciones tienden a disminuir la recuperación.

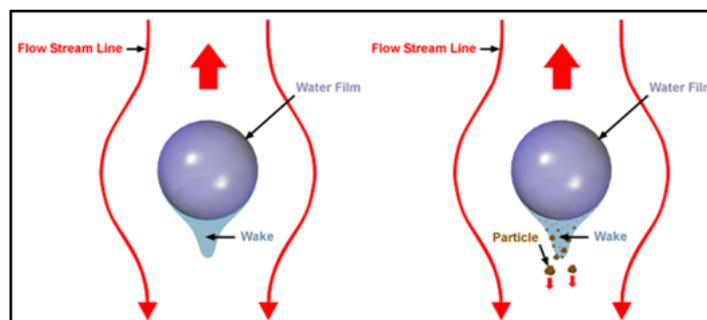


Figura N° 5.5: Mecanismo de arrastre mecánico.

Agua y sólidos entrando a la espuma debido al arrastre mecánico, involucra a las partículas suspendidas en la pulpa justamente debajo de la interfase pulpa – espuma, la pulpa entrampada entrando en la fase de espuma tiene el mismo contenido de agua y sólidos que en la región superior de la pulpa.

CAPITULO VI

CINETICA DE FLOTACION

La mejor manera que se ha encontrado para demostrar la influencia de los diferentes parámetros, es utilizar el concepto de los perfiles tiempo – recuperación, denominada cinética de flotación, los cuales se pueden ajustar con dos parámetros simples; es decir una constante de velocidad (k) y un parámetro de recuperación (R). Denotados por la ecuación.

$$R = R_{\infty} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{kt} \right) [1 - \exp(-kt)] \right\}$$

Donde:

R = Recuperación acumulada

R_{∞} = Recuperación de equilibrio

t = Tiempo

k = Constante de primer orden

En las celdas de flotación la constante de velocidad (k) describe el grado de rapidez de la porción de flotación rápida y recuperación acumulada (R) describe la recuperación final lograda en el circuito.

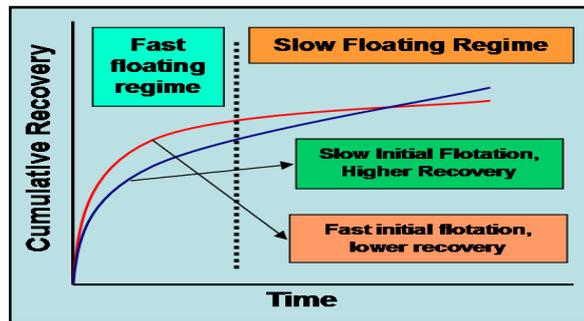


Figura N° 6.1: Perfil tiempo – recuperación para 2 minerales

6.1. Perfiles de circuitos de flotación

6.1.1. Perfil Cinético

La Cinética de un circuito de flotación podemos analizarla por el perfil tiempo – Recuperación, la flotación es un proceso de velocidad, la velocidad de remoción de la masa en un banco podemos compararla con los perfiles cinéticos de laboratorio, como se muestra en la figura N° 6.2. Las primeras celdas flotan los minerales de mayor flotabilidad y las restantes las minerales de lenta flotación, la constante del índice describe el grado de rapidez de la porción de flotación rápida. (Cómo de inclinada es la curva), La R final describe la recuperación final lograda en el circuito.

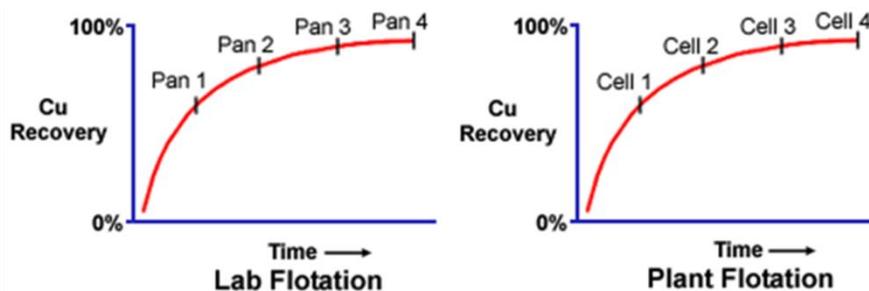


Figura N° 6.2: comparaciones de perfiles de laboratorio y planta.

Se ha estudiado los efectos del colector sobre los perfiles Cinéticos, encontrando que cuando la dosis de colector es baja, el perfil Cinético es plano y K y R son bajos, a medida que se aumenta el colector, el perfil cinético mejora y se aumentan K y R .

Algunas veces, si se usa aire para incrementar la velocidad de flotación, R y K se incrementarán también, pero cuando se alcanza un punto óptimo, el valor de K aumentará, pero el valor final de R bajará.

6.1.2. Perfiles de aire en un banco

Los suministros de aire en un banco deben ser analizados usando, La velocidad superficial de gas (J_g) esta se puede presentar en forma creciente, decreciente o un flujo igual en todo el banco, como observamos en la figura 6.3.

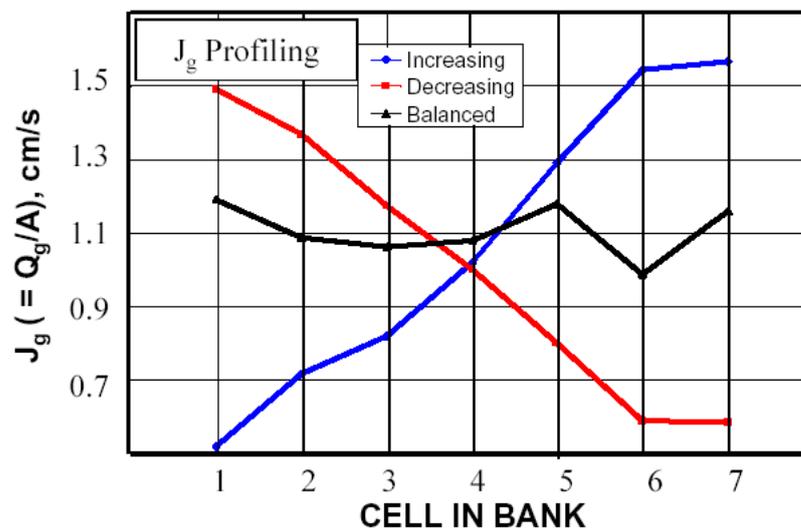


Figura N° 6.3: perfiles J_g en un banco de celdas

En la mina Brunswick se llevo a cabo trabajos sobre perfil de aire usando la velocidad superficial de gas (J_g) En la limpieza de zinc, determinando que un perfil creciente dio un grado de concentrado más alto manteniendo la recuperación, este perfil es ahora una práctica estándar, la razón principal es que el arrastre reducido en las primeras celdas aumentó el grado.

Los perfiles de aire tiene mucha incidencia en la estabilidad de la espuma, se requiere masa para dar estabilidad a la espuma, un mayor tiempo de residencia de la espuma baja la estabilidad, porque entre más permanezca la espuma en la celda, habrá mayor drenaje.

El tamaño de la celda afecta el tiempo de residencia, celdas grandes usualmente significan más tiempo de residencia y menos estabilidad de la espuma.

Las siguientes son aplicaciones industriales de los perfiles de aire:

- **Perfil de aire creciente.-** Si la estabilidad de la espuma es un problema en la última fase de flotación – empujar más masa hacia la parte trasera, para estabilizar la espuma e incrementar la recuperación de aire.
- **Perfil de aire balanceado.-** Cuando se presenta demasiada arcilla, no hay estabilidad en las últimas etapas. Use este tipo de perfil.
- **Perfil de aire decreciente.-** Cuando la estabilidad no es un problema, pero la oxidación y los sulfuros sí lo son, es recomendable usar este tipo de perfil.

Para maximizar la recuperación del mineral, se necesita maximizar recuperación de aire en el circuito de flotación, primeramente se requiere el entendimiento de las interacciones de los reactivos, profundidad de la espuma y tasas de aire a través de todo el circuito para crear la máxima recuperación de aire. Esto tiene que ser hecho mediante experimentación y enfocándose en lo que se puede hacer para incrementar la tasa de recuperación de aire en la parte lenta del circuito de flotación.

6.2. Diseños de espumantes – casos de estudios

Para el diseño de un espumante específico de una unidad minera, se realiza una serie de pruebas preliminares comparativas contra el espumante estándar, considerando las características mineralógicas y el actual performance metalúrgico alcanzado.

6.2.1 Caso de estudio 1

En este caso se realizaron prueba para reemplazar al espumante estándar T-100, de una mina polimetálica que trata 130,000 TMPD con leyes de cabeza promedio de 0.5% de plomo y 0.9% de zinc con contenidos de oro, plata y cobre, el objetivo principal es mejorar la recuperación de oro.

Se probaron 3 tipos de espumantes en base a alcoholes alifáticos con pequeñas cantidades de poliglicoles ethers y polipropilen glicoles, con códigos denominados CC-500PE, CC-602 y CC-695 F.

De los análisis de las pruebas preliminares de los balances metalúrgicos y las cinéticas de flotación podemos concluir, lo siguiente:

Hay una importante similitud en cuanto a comportamiento cinético entre el actual estándar y el CC-500PE que corresponde a un espumante con alto contenido de alcoholes alifáticos. La diferencia entre ambos destaca en una mejor recuperación de Au en el Circuito Pb producto de la presencia de poliglicoles ethers en este último, para el resto de los valores de plata, plomo y cobre la diferencia es mínima siempre favoreciendo al espumante CC-500 PE.

Para el caso del Circuito Zn se presenta una evidente falta de fuerza tanto con el estándar como con el CC-500PE y el CC-602 que corresponde a la alta selectividad de estos espumantes y la consecuente falta de fuerza. Para este caso y en el entendido de que el CC-695-FM es el más fuerte de los espumantes valorados este efecto es plenamente contrarrestado lo que se traduce en una mejora de los parámetros metalúrgicos analizados.

Las pruebas realizadas permiten concluir la buena respuesta que ofrece este mineral en el circuito plomo con espumantes de alta cinética como son todos aquellos que en su formulación contienen altas cantidades de alcoholes alifáticos.

Los resultados de estas prueba preliminares son la línea base para continuar el desarrollo de un espumante específico para esta unidad minera.

Tabla N° 6.1: Prueba con Espumante T-100

Espumante	Flotación	ENSAYES									CONTENIDOS					
		Tiempo (min)	Peso (gr)	% Peso	(gpt)			(%)			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
					Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe						
T-100	Primaria Pb	0.5	17.40	0.45	12.480	1,288.00	13,21	24.41	2.99	5.68	0.056	5.747	58.946	0.109	0.013	0.025
	Primaria Pb	1.0	10.73	0.28	15.710	1,866.00	19,79	28.44	5.49	5.57	0.043	5.135	54.456	0.078	0.015	0.015
	Primaria Pb	2.0	19.12	0.49	11.990	1,337.00	14,01	16.90	6.25	6.12	0.059	6.556	68.695	0.083	0.031	0.030
	Primaria Pb	4.0	27.21	0.70	7.205	696.30	6,879	7.86	6.26	6.34	0.050	4.859	48.002	0.055	0.044	0.044
	Agotativa Pb	8.0	54.48	1.40	1.767	211.80	1,797	2.13	3.78	5.00	0.025	2.959	25.107	0.030	0.053	0.070
	Primaria Zn	0.5	21.59	0.55	0.615	107.70	930	0.31	39.80	4.03	0.003	0.596	5.149	0.002	0.220	0.022
	Primaria Zn	1.0	33.34	0.86	0.799	95.84	820	0.34	23.86	12.44	0.007	0.819	7.011	0.003	0.204	0.106
	Primaria Zn	2.0	69.63	1.79	0.714	73.07	589	0.32	7.42	20.42	0.013	1.305	10.518	0.006	0.132	0.365
	Primaria Zn	4.0	98.33	2.52	0.749	48.53	439	0.28	2.02	20.49	0.019	1.224	11.070	0.007	0.051	0.517
	Agotativa Zn	8.0	113.88	2.92	0.716	29.59	344	0.24	0.51	13.85	0.021	0.864	10.046	0.007	0.015	0.404
	Cola Final		3,433.70	88.06	0.080	4.508	67	0.067	0.071	1.697	0.070	3.970	58.998	0.059	0.063	1.494

TOTAL 3,899.41 100.00

C.C. (T-100) 0.366 34.034 357.998 0.438 0.841 3.094

Tabla N° 6.2: Prueba con Espumante CC-500PE

Espumante	Flotación	Tiempo (min)	Peso (gr)	% Peso	ENSAYES						CONTENIDOS					
					(gpt)			(%)			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
					Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe						
CC-500PE	Primaria Pb	0.5	20.98	0.52	12.370	1,339.00	12,27	24.16	3.37	4.39	0.064	6.964	63.815	0.126	0.018	0.023
	Primaria Pb	1.0	16.79	0.42	10.100	1,095.00	12,16	15.60	4.51	4.78	0.042	4.558	50.612	0.065	0.019	0.020
	Primaria Pb	2.0	30.94	0.77	8.532	876.90	8,804	9.71	5.28	5.63	0.065	6.726	67.526	0.075	0.040	0.043
	Primaria Pb	4.0	49.65	1.23	4.153	363.30	3,789	4.26	4.41	5.30	0.051	4.472	46.635	0.052	0.054	0.065
	Agotativa Pb	8.0	68.42	1.70	1.561	161.70	1,407	1.75	3.06	4.41	0.026	2.743	23.864	0.030	0.052	0.075
	Primaria Zn	0.5	30.30	0.75	0.765	98.22	883	0.30	34.58	7.61	0.006	0.738	6.632	0.002	0.260	0.057
	Primaria Zn	1.0	36.41	0.90	1.231	86.26	753	0.31	17.63	16.63	0.011	0.779	6.797	0.003	0.159	0.150
	Primaria Zn	2.0	75.75	1.88	0.583	59.91	532	0.28	5.36	22.91	0.011	1.125	9.990	0.005	0.101	0.430
	Primaria Zn	4.0	111.27	2.76	0.399	44.27	397	0.26	1.69	21.45	0.011	1.221	10.951	0.007	0.047	0.592
	Agotativa Zn	8.0	115.88	2.87	0.383	21.76	322	0.23	0.43	12.20	0.011	0.625	9.250	0.007	0.012	0.350
	Cola Final		3,477.55	86.21	0.030	3.804	63	0.065	0.062	1.359	0.026	3.279	54.311	0.056	0.053	1.172

TOTAL 4,033.94 100.00

C.C. (CC-500PE) 0.325 33.228 350.382 0.427 0.815 2.977

Tabla N° 6.3: Prueba con Espumante CC-602

Espumante	Flotación	Tiempo (min)	Peso (gr)	% Peso	ENSAYES						CONTENIDOS					
					(gpt)			(%)			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
					Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe						
CC-602	Primaria Pb	0.5	20.47	0.52	13.550	1,443.00	13,71	26.55	3.01	6.61	0.070	7.466	70.935	0.137	0.016	0.034
	Primaria Pb	1.0	14.24	0.36	14.290	1,614.00	17,2	22.40	5.10	5.49	0.051	5.809	61.907	0.081	0.018	0.020
	Primaria Pb	2.0	25.67	0.65	8.151	867.10	9,381	10.69	4.89	5.52	0.053	5.626	60.867	0.069	0.032	0.036
	Primaria Pb	4.0	48.61	1.23	3.062	343.70	3,427	3.73	3.89	4.92	0.038	4.223	42.106	0.046	0.048	0.060
	Agotativa Pb	8.0	73.84	1.87	0.497	117.60	1,069	1.26	2.46	3.96	0.009	2.195	19.951	0.024	0.046	0.074
Primaria Zn	0.5	20.01	0.51	0.830	99.60	899	0.24	39.05	3.48	0.004	0.504	4.547	0.001	0.198	0.018	
Primaria Zn	1.0	41.10	1.04	0.383	67.91	611	0.22	18.13	10.27	0.004	0.705	6.347	0.002	0.188	0.107	
Primaria Zn	2.0	96.73	2.44	1.082	55.74	478	0.21	6.02	19.71	0.026	1.363	11.687	0.005	0.147	0.482	
Primaria Zn	4.0	149.24	3.77	0.416	42.60	373	0.21	1.77	21.22	0.016	1.607	14.070	0.008	0.067	0.800	
Agotativa Zn	8.0	154.02	3.89	0.515	26.87	301	0.19	0.44	11.95	0.020	1.046	11.718	0.008	0.017	0.465	
Cola Final		3,312.43	83.72	0.060	2.957	63	0.062	0.059	1.066	0.050	2.476	52.746	0.052	0.049	0.892	

TOTAL 3,956.36 100.00

C.C. (CC-602) 0.342 33.020 356.881 0.433 0.825 2.989

Tabla N° 6.4: Prueba con Espumante CC-695-FM

Espumante	Flotación	ENSAYES									CONTENIDOS					
		Tiempo (min)	Peso (gr)	% Peso	(gpt)			(%)			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
					Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe						
CC-695-FM	Primaria Pb	0.5	19.37	0.49	8.733	894.20	8,14	18.50	1.84	4.09	0.042	4.346	39.561	0.090	0.009	0.020
	Primaria Pb	1.0	19.46	0.49	7.164	812.50	8,507	14.09	2.16	3.38	0.035	3.967	41.536	0.069	0.011	0.016
	Primaria Pb	2.0	18.28	0.46	9.544	1,093.00	11,71	15.62	3.38	3.71	0.044	5.013	53.708	0.072	0.015	0.017
	Primaria Pb	4.0	22.75	0.57	9.161	903.30	9,345	10.37	4.34	4.34	0.052	5.156	53.342	0.059	0.025	0.025
	Agotativa Pb	8.0	39.75	1.00	3.747	365.50	3,423	3.57	3.44	4.14	0.037	3.645	34.139	0.036	0.034	0.041
	Primaria Zn	0.5	23.67	0.59	0.798	133.40	1,241	0.50	37.81	3.60	0.005	0.792	7.370	0.003	0.225	0.021
	Primaria Zn	1.0	31.06	0.78	0.949	128.10	1,288	0.56	24.35	8.66	0.007	0.998	10.038	0.004	0.190	0.068
	Primaria Zn	2.0	76.28	1.91	1.433	106.20	1,08	0.54	9.24	17.40	0.027	2.033	20.670	0.010	0.177	0.333
	Primaria Zn	4.0	93.84	2.35	1.032	79.17	761	0.48	2.46	19.85	0.024	1.864	17.918	0.011	0.058	0.467
	Agotativa Zn	8.0	107.60	2.70	0.566	43.30	507	0.35	0.60	13.44	0.015	1.169	13.688	0.010	0.016	0.363
	Cola Final		3,533.51	88.66	0.092	5.087	71	0.075	0.064	1.936	0.082	4.510	62.947	0.066	0.057	1.716

TOTAL 3,985.57 100.00

C.C. (CC-695-FM) 0.372 33.494 354.917 0.430 0.816 3.088

Tabla N° 6.6: Prueba con Espumante CC-500PE

Espumante	Producto	Tiempo	CONTENIDOS					DISTRIBUCION					DISTRIBUCION ACUMULADA				
			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Cu	Pb	Zn
CC-500PE		0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Conc. Prim. Pb	4.0	0.22	22.72	228.59	0.32	0.13	68.57	68.37	65.24	74.35	16.08	68.57	68.37	65.24	74.35	16.08
	Conc. Agot. Pb	8.0	0.03	2.74	23.86	0.03	0.05	8.14	8.25	6.81	6.93	6.37	76.72	76.63	72.05	81.28	22.45
	Conc. Prim. Zn	12.0	0.04	3.86	34.37	0.02	0.57	11.94	11.62	9.81	4.07	69.46	88.66	88.25	81.86	85.35	91.92
	Conc. Agot. Zn	16.0	0.01	0.63	9.25	0.01	0.01	3.39	1.88	2.64	1.57	1.52	92.05	90.13	84.50	86.92	93.44
	Cola Final		0.03	3.28	54.31	0.06	0.05	7.95	9.87	15.50	13.08	6.56	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
			0.325	33.228	350.382	0.427	0.815	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00					

Tabla N° 6.7: Prueba con Espumante CC-602

Espumante	Producto	Tiempo	CONTENIDOS					DISTRIBUCION					DISTRIBUCION ACUMULADA				
			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Cu	Pb	Zn
CC-602		0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Conc. Prim. Pb	4.0	0.21	23.12	235.81	0.33	0.11	62.02	70.03	66.08	76.99	13.75	62.02	70.03	66.08	76.99	13.75
	Conc. Agot. Pb	8.0	0.01	2.19	19.95	0.02	0.05	2.71	6.65	5.59	5.44	5.55	64.73	76.68	71.67	82.44	19.30
	Conc. Prim. Zn	12.0	0.05	4.18	36.65	0.02	0.60	14.72	12.66	10.27	3.86	72.64	79.45	89.33	81.94	86.30	91.94
	Conc. Agot. Zn	16.0	0.02	1.05	11.72	0.01	0.02	5.86	3.17	3.28	1.75	2.09	85.31	92.50	85.22	88.04	94.04
	Cola Final		0.05	2.48	52.75	0.05	0.05	14.69	7.50	14.78	11.96	5.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
			0.342	33.020	356.881	0.433	0.825	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00					

Tabla N° 6.8: Prueba con Espumante CC-695-FM

Espumante	Producto	Tiempo	CONTENIDOS					DISTRIBUCION					DISTRIBUCION ACUMULADA					
			Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	
CC-695-FM		0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Conc. Prim. Pb	4.0	0.17	18.48	188.15	0.29	0.06	46.70	55.18	53.01	67.37	7.31	46.70	55.18	53.01	67.37	7.31	
	Conc. Agot. Pb	8.0	0.04	3.65	34.14	0.04	0.03	10.06	10.88	9.62	8.29	4.20	56.76	66.06	62.63	75.66	11.52	
	Conc. Prim. Zn	12.0	0.06	5.69	56.00	0.03	0.65	17.19	16.98	15.78	6.75	79.53	73.95	83.04	78.41	82.41	91.05	
	Conc. Agot. Zn	16.0	0.02	1.17	13.69	0.01	0.02	4.11	3.49	3.86	2.22	1.98	78.06	86.53	82.26	84.63	93.04	
	Cola Final		0.08	4.51	62.95	0.07	0.06	21.94	13.47	17.74	15.37	6.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
			0.372	33.494	354.917	0.430	0.816	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00						

PERFILES CINETICOS DE RECUPERACIÓN POR ELEMENTO – CASO 1

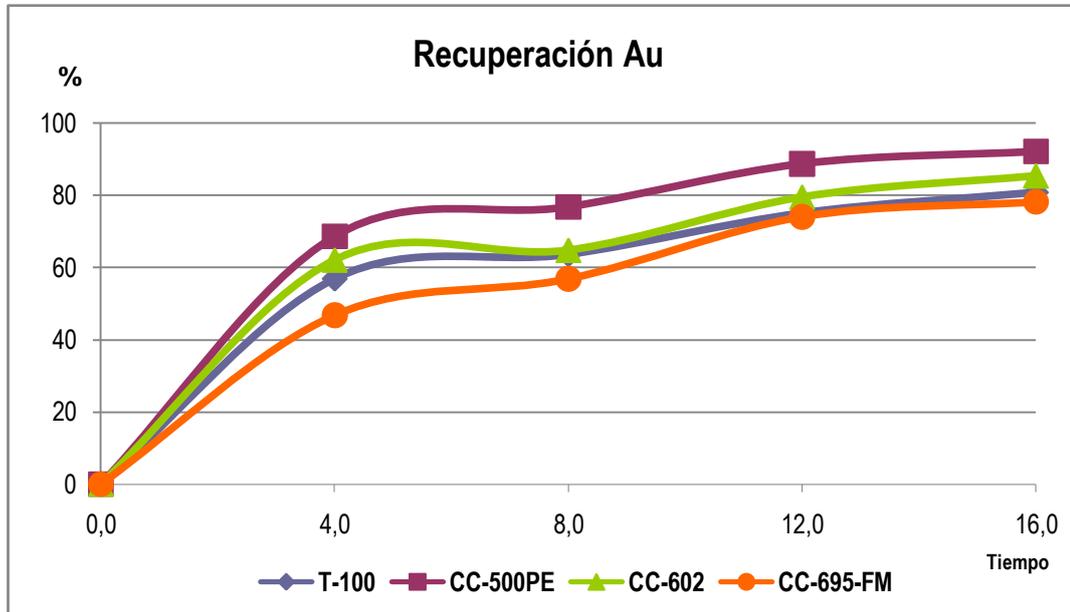


Figura N° 6.4: Perfil Cinético del Oro

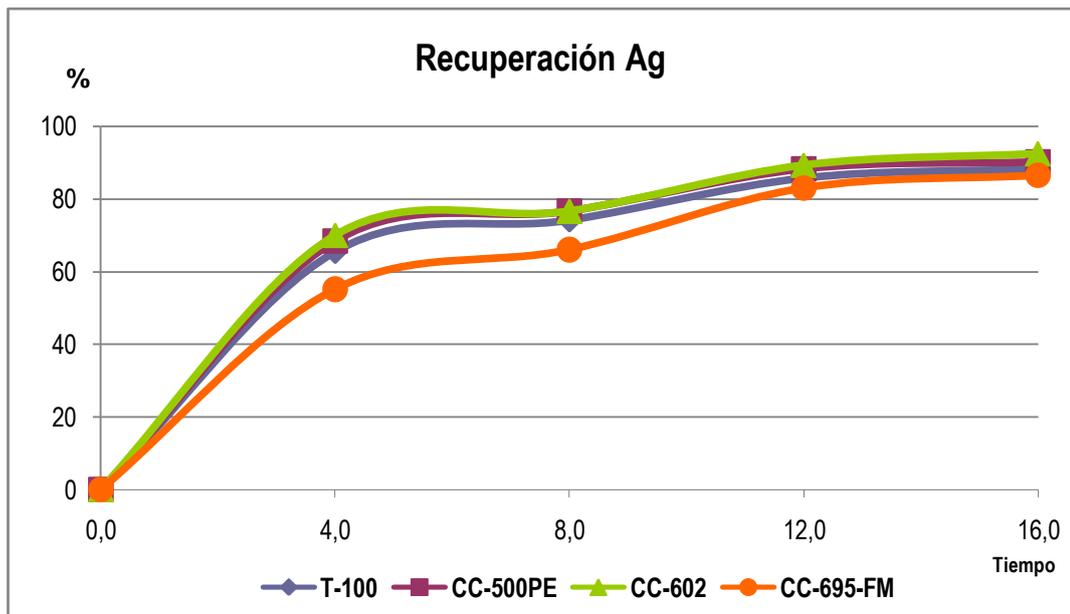


Figura N° 6.5: Perfil Cinético de la Plata

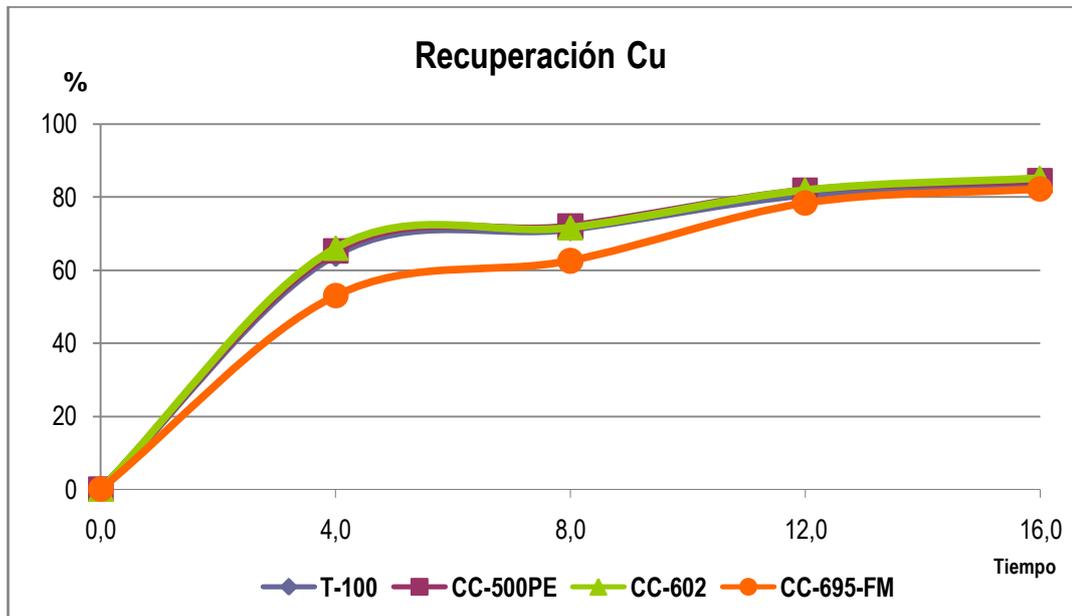


Figura N° 6.6: Perfil Cinético del Cobre

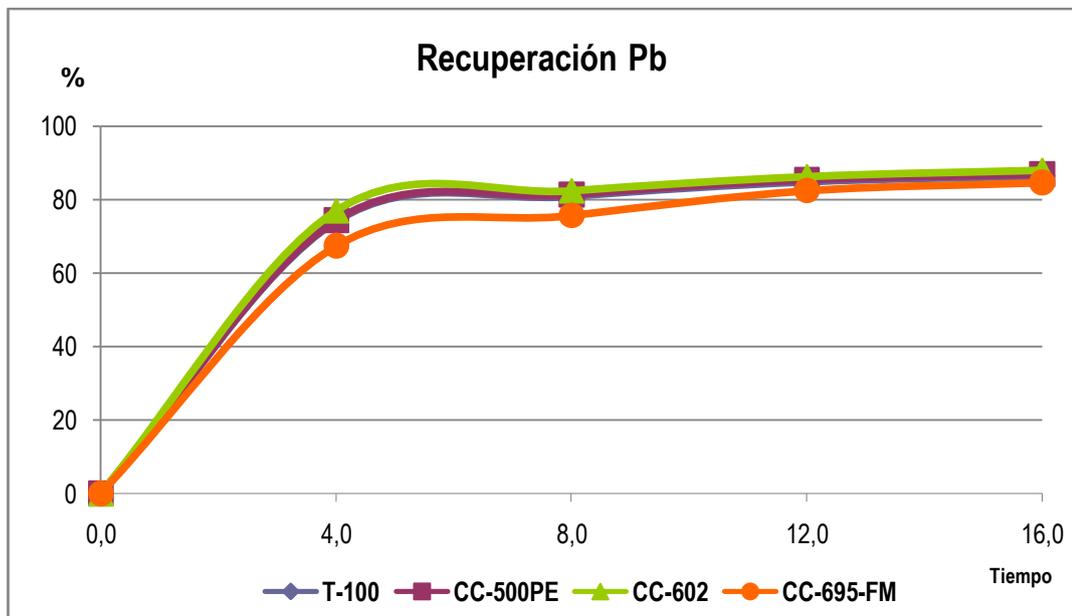


Figura N° 6.7: Perfil Cinético del Plomo

6.2.2 Caso de estudio 2

En este segundo caso presentamos las pruebas metalúrgicas efectuadas a nivel de laboratorio para mejorar la performance metalúrgica de una mina de plata. En esta primera fase de investigación, se inicia con pruebas preliminares comparativas para ver el comportamiento de distintos espumantes de estructuras conocidas, con la finalidad de disponer de una línea base para el desarrollo de un prototipo adecuado para mejorar la recuperación de plata que es nuestro objetivo.

Las pruebas cinéticas nos indican que en el caso del plomo los tres prototipos tienen en el primer minuto una mejor recuperación, pero la recuperación acumulada es muy similar para los cuatro espumantes probados.

Para la plata, el perfil cinético muestra que los tres prototipos superan al espumante estándar en recuperación en el primer minuto como en la acumulada, sobre todo el prototipo 2 que incrementa la recuperación 3.8%.

Estos resultados nos indicarían tener un posible remplazo del espumante estándar, el siguiente paso es realizar pruebas industriales para corroborar el comportamiento del espumante seleccionado.

Tabla N° 6.9: Prueba de cinética de flotación estándar

Tiempo, min	Peso (gr)	% Peso	Leyes					Recuperación Acumulada				
			Ag (Oz/tc)	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%	Ag %	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%
1	105.83	10.56	54.13	4.24	1.51	23.76	12.65	40.52	76.07	15.55	15.12	31.69
3	97.42	9.72	27.08	0.64	1.35	21.78	5.58	59.18	86.60	28.36	27.89	44.56
6	114.19	11.40	10.27	0.26	1.07	17.62	3.09	67.47	91.61	40.29	39.99	52.92
10	86.91	8.68	14.15	0.16	0.91	18.58	3.63	76.17	93.95	48.02	49.71	60.38
Relave	597.41	59.64	5.64	0.06	0.89	14.00	2.80					
Cabeza Calculada	1001.76	100.00	14.11	0.59	1.03	16.59	4.22					

Tabla N° 6.10: Prueba de cinética de flotación prototipo 1

Tiempo, min	Peso (gr)	% Peso	Leyes					Recuperación Acumulada				
			Ag (Oz/tc)	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%	Ag %	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%
1	127.06	12.62	51.78	3.98	1.29	24.64	11.95	46.04	79.59	16.52	20.16	36.40
3	81.32	8.08	29.37	0.68	1.43	23.19	5.75	62.75	88.25	28.24	32.30	47.61
6	63.33	6.29	19.20	0.36	1.19	20.44	4.24	71.26	91.82	35.84	40.64	54.05
10	67.70	6.73	11.88	0.18	0.99	17.37	3.34	76.89	93.73	42.61	48.21	59.47
Relave	667.13	66.28	4.95	0.06	0.86	12.06	2.53					
Cabeza Calculada	1006.54	100.00	14.20	0.63	0.99	15.43	4.14					

Tabla N° 6.11: Prueba de cinética de flotación prototipo 2

Tiempo, min	Peso (gr)	% Peso	Leyes					Recuperación Acumulada				
			Ag (Oz/tc)	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%	Ag %	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%
1	105.64	10.58	56.90	4.84	1.33	25.62	12.96	43.72	77.63	14.52	17.25	33.32
3	92.35	9.25	28.36	0.72	1.27	24.46	5.95	62.77	87.68	26.64	31.64	46.70
6	90.02	9.01	15.40	0.30	1.05	20.15	4.00	72.86	91.76	36.43	43.20	55.45
10	84.58	8.47	10.45	0.20	0.95	16.72	3.34	79.28	94.32	44.76	52.21	62.32
Relave	626.23	62.70	4.55	0.06	0.86	11.98	2.47					
Cabeza Calculada	998.82	100.00	13.76	0.66	0.97	15.71	4.11					

Tabla N° 6.12: Prueba de cinética de flotación prototipo 3

Tiempo, min	Peso (gr)	% Peso	Leyes					Recuperación Acumulada				
			Ag (Oz/tc)	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%	Ag %	Pb%	Zn%	Mn%	Fe%
1	112.55	11.27	53.30	4.56	1.27	26.11	12.61	43.00	77.70	14.95	18.61	34.60
3	72.35	7.24	35.29	0.92	1.41	26.54	6.35	61.30	87.74	25.62	30.76	45.79
6	86.22	8.63	17.24	0.34	1.13	20.41	4.08	71.95	92.15	35.82	41.90	54.36
10	69.80	6.99	11.10	0.18	0.93	17.62	3.32	77.50	94.05	42.63	49.69	60.01
Relave	658.08	65.87	4.77	0.06	0.84	12.07	2.49					
Cabeza Calculada	999	100.00	13.97	0.66	0.96	15.81	4.11					

PERFILES CINETICOS DE RECUPERACION POR ELEMENTO - CASO 2

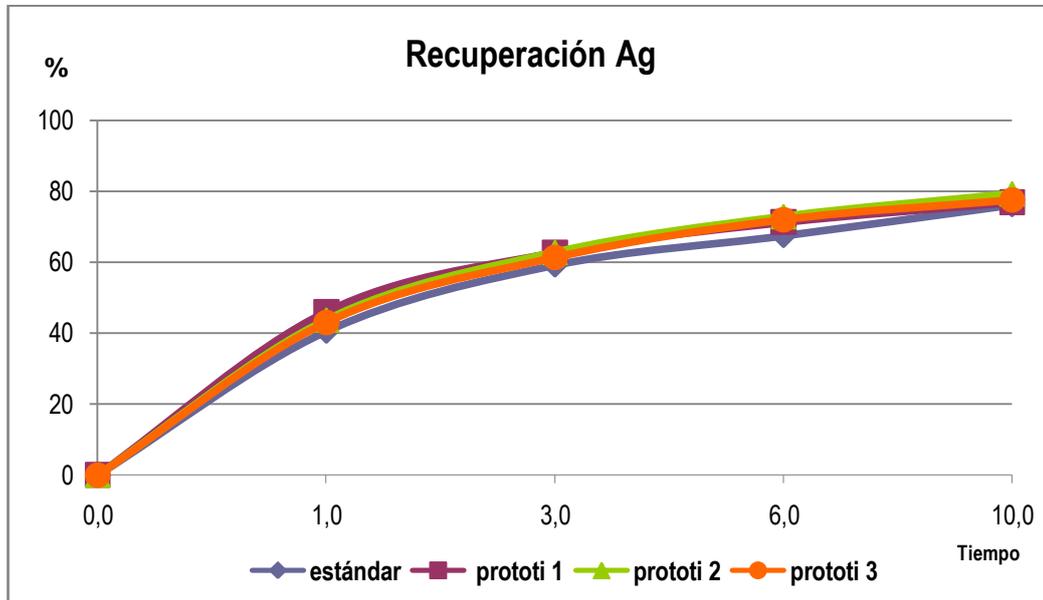


Figura N° 6.8: Perfil Cinético de la plata

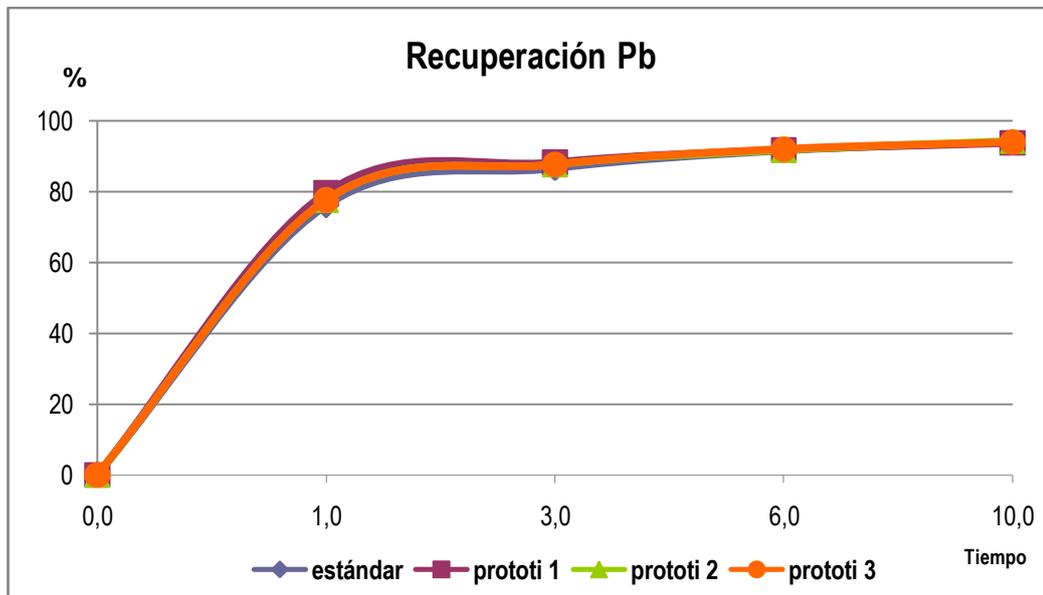


Figura N° 6.9: Perfil Cinético del plomo

6.2.3 Caso de estudio 3

En este caso mostramos el desarrollo de un espumante para una minera de cobre.

Los resultados a nivel de laboratorio indicaron tener posible perfil de reemplazo del espumante estándar, las pruebas metalúrgicas en el laboratorio no mostraron las siguientes diferencias:

Tabla N° 6.13: Recuperación de Cobre

Espumante PQM	Diferencias %Recuperación Cu			
	PQM - STD			
	Muestra %Rec. Baja	Muestra %Rec. Media	Muestra %Rec. Alta	Promedio
CC Prototipo 1	1.3	0.8	0.7	0.93

Estos resultados dieron lugar a la primera prueba a nivel industrial.

Primera Prueba Industrial

El espumante CC-prototipo 1 es probado en planta, en reemplazo del espumante estándar con la adquisición de 90 cilindros y una duración de 29 días.

Se tomó en consideración el Criterio petrológico cuyos primeros resultados a nivel industrial indicaron beneficios en mayor producción de molibdeno. Observándose diferencias de -1% en recuperación de cobre y +2.3% en recuperación de molibdeno.

Tabla N° 6.14: Período por Criterio Petrológico

Resultados Oficiales del SIC	Espumante		
	CC-Prototipo 1 (1)	Estandar (2)	Diferencia (1-2)
Ley %Cu	0.723	0.732	-0.011
Ley %Mo	0.025	0.024	+0.001
%Rec._Cu	84.2	85.2	-1.0
%Rec._Mo	73.3	71.0	+2.3
TMS	83693	83918	-225

Segunda Prueba Industrial

Con los datos obtenidos tanto a nivel de laboratorio y en la primera prueba industrial. El departamento de investigaciones procede a reformular el prototipo con la finalidad de mejorar su rendimiento de acuerdo a las observaciones y conclusiones de la prueba.

El espumante modificado CC-prototipo 1 es probado en planta, por segunda vez por espacio de 60 días, los resultados se muestran en la tabla adjunta.

Tabla N° 6.15: Período por Perfil de Planta

Fechas de Evaluación	Planta de Cobre						
	Alimentación Molinos			Concentrado Cu Mo		% Rec. Cu	% Rec. Mo
	TMD	%Cu	%Mo	% Cu	%Mo		
15 Ene – 10 Mar	87,635	0.678	0.021	25.91	0.67	85.9	68.5
15 Mar - 15 May	89,371	0.667	0.018	26.36	0.61	86.5	71.8

Tabla N° 6.16: Resultados finales

	%Cu	%Mo	% Rec. Cu	% Rec. Mo
Estandar	0.678	0.021	85.9	68.5
Prototipo 1	0.667	0.018	86.5	71.8
Diferencias	-0.011	-0.003	0.69	3.34

Los resultados finales del desarrollo de espumante llevaron a obtener una mejora en la recuperación de cobre de 0.69% y en molibdeno de 3.34%. Alcanzando los objetivos que se trazaron cuando se inicio el proceso de diseñar un espumante específico para esta unidad minera.

CONCLUSIONES

1. El proceso de flotación es un sistema triangular interactivo que involucra factores químicos, físicos y del equipo, se señala la dispersión de aire como la característica hidrodinámica clave en la flotación.
2. Para hacer la burbuja más pequeña, para crear una superficie más amplia, se requiere más energía; el espesor y la estabilidad de la capa adherida a la burbuja depende de los químicos que el agua contenga. El espesor y las propiedades de la capa ligada a la superficie de la burbuja son únicos para cada tipo de espumante.
3. En una celda de flotación se crean muchas burbujas, el denominado enjambre de burbujas posee una distribución de tamaños, esta puede ser descrita por el diámetro promedio (D_{10}) y el diámetro Sauter (D_{32}), estas se relaciona con el área superficial de las burbujas. La superficie de la burbuja es la que contiene las partículas de flotación, es la banda transportadora que mueve las partículas dentro de la espuma y fuera de la celda. Los diferentes tamaños de partículas necesitan de condiciones hidrodinámicas diferentes para ser flotados.

4. Actualmente existen sensores confiables y técnicas para medir los parámetros de dispersión de gas, se están diseñando equipos para instalaciones industriales. Las mediciones de la dispersión de gas proveen información para establecer si los cambios, en el equipo, las condiciones operativas o en los reactivos mejoraran el rendimiento metalúrgico.
5. El espumante reduce el tamaño de burbuja en la pulpa y estabiliza las burbujas en la zona de espuma el tiempo suficiente para ser removida de la celda mientras se máxima la operatividad en grado y recuperación.
6. Muchos trabajos se están haciendo para entender el papel que los espumantes desempeñan en la hidrodinámica de las celdas de flotación, a medida que se desarrollan nuevas herramientas para estudiar estos efectos; estudios continuos en el entendimiento de varias propiedades de los espumantes permitirán al metalurgista predecir cual espumante o mezcla proveerá un optimo rendimiento en las zonas de pulpa, de espuma y post remoción.
7. El colector solo puede mejorar la hidrofobicidad hasta un ángulo de contacto máximo, después ya no habrá más hidrofobicidad. El colector es un agente surfactante que en dosis muy alta puede causar emulsionamiento.
8. La selección de un espumante, debe ser el resultado de una meticulosa investigación, donde deben de ser tomados en cuenta factores como la interacción que existen entre el mineral, el colector y el espumante. Derivado de esto, el efecto que se tiene en la recuperación, cinética, selectividad y la fuerza de espumación que es un factor de importancia económica.

9. Los sólidos presentes en los sistemas de flotación así como algunas sales en solución y otros reactivos de flotación, deberán de ser considerados en la evaluación de espumantes y los problemas que se puedan presentar.
10. Con respecto a la zona de espuma, mientras las burbujas coalescen en la superficie de la celda, su superficie se reduce y las partículas y el agua escurren de la espuma. Los sólidos ayudan a estabilizar la espuma evitando la coalescencia, cuando el agua haya drenado completamente la espuma deja de crecer, la altura de la espuma depende de cuanta agua entre en ella y el tiempo que se toma en escurrir.
11. Las propiedades deseables más importantes de una espuma son: Estabilidad dinámica, con rápido ajuste a los cambios en adición del espumante a través de aumento o disminución en la altura de espuma y similares cambios en niveles de la pulpa. No tener una persistencia excesiva, para permitir el rompimiento de los derrames en las canaletas de concentrados. Efectividad a bajas concentraciones, por economía y para minimizar un exceso de espuma en el circuito de limpiadoras. Propiedades colectoras despreciables, en procesos selectivos.

BIBLIOGRAFIA

1. Amelunxen, P.A. and Rothman, P. (2009), The online determination of bubble surface area flux using the Cidra GH 100 gas holdup meter, IFAC MMM Conference, Viña, Chile.
2. Bartolacci, G., Ourriban, M., Lockart, A., Michaud, F., Faucher, A., Knuutila, D., Finch, J.A., Fortin, A. and Goyette, G. (2007), Copper 2007-Vol 2, Toronto, Canada, pp 1221-232.
3. Cappuccitti, F. and Finch, J. A. (2008), Development of new frothers through hydrodynamic characterization, Minerals Engineering, 21, pp 944-948.
4. Cytec (2002), Mining Chemicals Handbook, revised edition, pp 121-123.
5. Finch, J. A., Gélinas, S. and Moyo, P. (2006), Frother-related research at McGill University, Minerals Engineering, 19, pp 726-733.
6. Finch, J. A., Nasset, J. E. and Acuna, C. (2008), Role of frother in bubble production and behaviour in flotation, Minerals Engineering, 21, pp 949-957.
7. Flotation Theory, Reagent and Ore Testing Ronald D. Crozier Pag.8, 40-46, 85-100, Ed. Permon Press 1992.

8. Froth Flotation 50 th anniversary Editor Douglas Fuerstenau Pag. 258-275
Society of Mining Engineers of Aime 1962.
9. Gomez, C.O. and Finch, J.A. (2002), Gas dispersion measurements in flotation machines, CIM Bulletin, Vol 95 (1066), pp 73-78.
10. Hernandez-Aguilar, J.R. and S. Reddick (2007), Gas dispersion management in a copper / molybdenum separation circuit (2007), Proceedings Copper 2007, Vol 2, Toronto, Canada, pp 173-184.
11. Hernandez-Aguilar, J.R., Thorpe, R., Martin, C.J. (2006), Experiences in using gas dispersion measurements to understand and modify metallurgical performance, Proceedings 38th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors (CIM), pp 387-402.
12. Jameson, G.J., Nguyen, A.V., and Ata, S. (2007), The Flotation of fine and coarse particles, Froth Flotation (Eds M.C. Fuerstenau, G.J. Jameson, R.H. Yoon), SME Publication, pp 339-372.
13. Klimpel, R.R., (1986), Industrial practice of sulfide mineral collectors, Vol. Chemical Reagents in the Mineral Processing Industry, SME, Colorado, pp 73 – 86.
14. Laskowski J. S. (2003), Fundamental properties of flotation frothers, Proceedings of the 22nd International Mineral Processing Congress (IMPC), Edited by Lorenzen L., Bradshaw D., Cape Town, South Africa, pp 788-797
15. Moyo, P., Gomez, C. O. and Finch, J. A. (2007), Characterizing frothers using water carrying rate, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 46, No. 3, pp 215-220.

16. Nasset, J.E., Finch, J.A. and Gomez, C.O. (2007), Operating variables affecting the bubble size in forced-air mechanical flotation machines, Proceedings AusIMM 9th Mill Operators' Conference, Fremantle, Australia, pp 66-65.
17. Nasset, J.E., Gomez C.O., Finch J.A., Hernandez-Aguilar, J.R., and DiFeo, A. (2005), The use of gas dispersion measurements to improve flotation performance, Proceedings 37th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors (CIM), pp 401-421.
18. Nasset, J.E., Hernandez-Aguilar, J.R., Acuña, C., Gomez, C.O. and Finch, J.A., (2006), Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines, Minerals Engineering, 19, pp 807-815.
19. Pugh, R. (2006), Surface chemical studies on particle-stabilized froths, Proceedings XXIIIth International Mineral Processing Congress (eds. G. Önal, N. Acarkan, M. S. Celik, F. Arslan, G. Ateşok, A. Güney, A. A. Sirkeci, A. E. Yüce and K. T. Perek), Istanbul, pp 430-435.
20. Quinn, J. J., Kracht, W., Gomez, C. O. Cagnon, C. and Finch, J. A. (2007), Comparing the effect of salts and frother (MIBC) on gas dispersion and froth properties, Minerals Engineering, 20, pp 1296-1302.
21. SME Mineral Processing Handbook Editor N.L. Weiss Society of Mining Engineers of Aime 1985.
22. Tecnología de Procesamiento de Minerales A. Wills Pag. 356-358 Ed. LIMUSA 1987.
23. Zhang, W., Nasset, J.E. and Finch, J.A. (2009), Water recovery and bubble surface area flux, Proceedings CIM Conference of Metallurgists, Sudbury, Canada, August 23-26, 2009, pp 155-169.