

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y TEXTIL



“FLOTACION DE MINERALES EN CELDA-COLUMNA”

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION DE
CONOCIMIENTOS**

PRESENTADO POR:

FELIX MOISES ROJAS RAMIREZ

LIMA – PERU

2006

DEDICATORIA

A Dios, por el camino recorrido,

A mis padres, por su amor y apoyo,

A mi compañera sincera.

RESUMEN

La flotación en columna es particularmente atractiva para aplicaciones que implican múltiples etapas de limpieza en celdas convencionales y para minerales complejos que presentan problemas de selectividad, elevando sustancialmente el grado del concentrado y aumentando la recuperación, con una sola etapa de limpieza, adaptándose muy bien este equipo al control por computadora. Su aceptación en la industria minera está incrementándose debido a múltiples ventajas que incluyen menor costo de instalación y operación, menor ocupación de espacio, disminución sustancial del consumo de energía, principalmente porque no tiene sistema de agitación mecánica, y menor consumo de reactivos.

Este trabajo muestra la recopilación y análisis de nuevas técnicas de diseño, del funcionamiento de las columnas de flotación, con el objetivo de mejorar la recuperación de minerales valiosos.

La mayor eficiencia de la columna de flotación permite emplear menos tiempo en el proceso, disminuir el número de etapas y la carga circulante en el circuito de flotación, y como resultado, una mejora en la consistencia y rendimiento de las operaciones.

INDICE

RESUMEN	03
I.- INTRODUCCIÓN	05
II.- DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS	08
2.1 Flotación de minerales	08
2.2 Información general sobre la flotación en columna	15
III.-DESARROLLO DEL TEMA	21
3.1 Beneficios en el uso de celda-columna	21
3.2. Diseño de columnas de flotación	23
3.2.1 Tipos de aparatos	23
3.2.2 Aspectos de la cinética en la flotación	34
3.2.3 Elementos principales de los aparatos de columna	42
3.2.4 Características aerodinámicas de las columnas de flotación.	52
3.2.5 Dimensionamiento de las columnas de flotación	59
3.2.6 Experiencia en aplicaciones de celdas-columna	65
IV.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
V.- BIBLIOGRAFÍA	72

I.- INTRODUCCIÓN

La flotación puede ser definida como un proceso de separación de partículas (o agregados) o gotas vía adhesión a burbujas de aire. Las unidades burbujas - partículas (gotas) presentan una densidad aparente menor al del medio acuoso y flotan hasta la superficie de un reactor (celda o columna de flotación) o interfase líquido/aire, de donde son removidos.

La flotación de minerales es el proceso fisico-químico para separar el material valioso de la porción indeseada ("ganga"). Las partículas del mineral se tratan para hacerlas hidrofóbicas, y el aire se burbujea a través de la suspensión del mineral en agua con el fin que las partículas del mineral hidrofílicas se aferren a las superficies de las burbujas y estas asciendan, dentro una espuma, logrando así la separación.

La flotación en columna es mayormente utilizada para procesos que impliquen múltiples etapas de limpieza en celdas convencionales y para minerales complejos que presentan problemas de selectividad, elevando sustancialmente la ley del concentrado (2-4%) y aumentando la recuperación (2-3%), con una sola etapa de limpieza. Además permite adaptarse muy bien este equipo al control por computadora. Su aceptación en la industria minera está incrementándose debido a múltiples ventajas que incluyen menor costo de instalación y operación, menor ocupación de espacio, disminución sustancial del consumo de energía, principalmente porque no tiene sistema de agitación mecánica, y menor consumo de reactivos.

Los objetivos de este informe son los siguientes:

- 1.- Demostrar el beneficio de la flotación de minerales en celda-columna, en vez de las celdas convencionales, tanto en forma cualitativa como cuantitativa.

- 2.- Determinar los parámetros para la flotación en celda-columna, necesarios para mejorar la recuperación y la ley de concentrados para una calidad y flujo de pulpa conocidos.
- 3.- Mostrar los beneficios de las celdas-columnas en la actualidad, evidenciando las aplicaciones en los distintos circuitos de flotación de minerales a nivel nacional e internacional.

Para este informe se plantean los beneficios cualitativos de las celda-columna como son: el menor consumo energía, al no haber elementos rotatorios; un menor coste, 3 o 4 veces menor espacio que el requerido para aparatos convencionales; un mayor volumen de aireación; y la posibilidad de controlar el flujo de aire y la distribución de las burbujas según su tamaño.

No es el alcance de este informe el desarrollo de la mejor práctica en dosificación de reactivos, sino que se parte como base la misma dosificación en celdas convencionales, mejorando a partir de ello la recuperación y la ley del concentrado obtenido.

A continuación se examina el la base teórica sobre la que se basa el informe, enfocando lo más relevante para la flotación de minerales en columna:

- Desarrollo de nuevos mecanismos de flotación de minerales:

El desarrollo de mecanismos de flotación que mejoren la recuperación de minerales y permitan a su vez aumentar la ley del concentrado que se obtiene como producto de la flotación. [5]

- Desarrollo de celdas columnas de flotación de minerales:

Diseños y ventajas de los distintos tipos de celdas-columna, que muestran la evolución de los nuevos modelos de celdas-columna para la mejora en la flotación de minerales. [1]

- Beneficios de las celdas columnas:

Evaluación de la celda-columna para la flotación de minerales y sus ventajas comparadas con las celdas convencionales. [2]

Beneficios del uso de celda-columna en la flotación de cobre. [7]

II.- DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS

2.1 Flotación de minerales

La flotación de minerales es un fenómeno físico-químico, usado como un proceso de concentración de minerales finamente divididos, que comprende el tratamiento físico y químico de una pulpa de minerales creando condiciones favorables, para la adhesión de partículas de un mineral predeterminado a las burbujas de aire.

En este proceso que es bastante complejo, y del cual se efectúa la separación, está compuesto por tres fases: la fase líquida, generalmente agua, la cual es química y físicamente muy activa; la fase gaseosa, generalmente aire, la cual es relativamente simple y la fase sólida la que puede ser considerada infinitamente variable. Las partículas de aire o burbujas llevan los minerales seleccionados desde el fondo del equipo de flotación hasta la superficie de la pulpa formando una espuma estabilizada de la cual las partículas de mineral deseado son recuperadas.

Entre los factores químicos que afectan la flotación de minerales se encuentran: la química de la superficie, los efectos electroquímicos, la adsorción de los colectores y la adsorción de los depresores.

Entre los factores físicos que afectan la flotación de minerales se tiene: el tamaño de las partículas a ser flotadas, la composición de la partícula, es decir la mineralogía, la recuperación de agua, la heterocoagulación entre las partículas.

Los reactivos de flotación son el componente y la variable más importante del fenómeno de flotación, debido a que no puede efectuarse esta sin la participación de los reactivos. Siendo elementos tan importantes para la flotación de minerales, los reactivos influyen además con una gran sensibilidad, y también influyen la

combinación de reactivos, sus cantidades o dosificación, los puntos y medios en los que se alimentan a los circuitos.

La adsorción en la superficie de una partícula mineral está fuertemente controlada por la naturaleza eléctrica de esa superficie. La carga eléctrica de una superficie sólida puede ser generada por diferentes mecanismos: quimiadsorción, disolución preferencial de iones superficiales y sustitución cristalina.

La flotación de un sólido depende de la adsorción de un surfactante en su superficie ya que casi todos los minerales son humectables por la fase acuosa. El primer paso en la flotación es reemplazar la interfase mineral-líquido por la interfase mineral-gas, lo cual se logra mediante los reactivos químicos de flotación, para dar lugar a una superficie hidrofóbica. En algunos casos la estabilidad de la adhesión de las burbujas de aire a la superficie del mineral se mide mediante el ángulo de contacto, que se forma entre las fases sólida, líquida y gaseosa. La condición termodinámica general para que exista el contacto entre las tres fases presentes en los sistemas de flotación, está definida por la ecuación de Young:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

en donde γ_{SG} , γ_{SL} y γ_{LG} son las tensiones interfaciales sólido/gas, sólido/líquido, líquido/gas respectivamente y θ es el ángulo de contacto. El cambio energía libre que acompaña el desplazamiento de un área unitaria de la interfase sólido/líquido, por la interfase sólido/gas está dada por la ecuación de Dupre:

$$\Delta G = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG}) \quad (2)$$

Al combinar la ecuación de Dupre con la ecuación de Young se genera la expresión siguiente para el cambio de energía libre:

$$\Delta G = \gamma_{LG} (\cos \theta - 1) \quad (3)$$

Mediante esta última ecuación se deduce que para cualquier valor finito de ángulo de contacto existía una disminución de la energía libre al adherirse una partícula mineral a una burbuja de gas.

Es importante aclarar que la ecuación de Dupre no considera la deformación de las burbujas lo cual consume algo de energía del sistema. La ecuación de Young es válida en un sistema ideal donde los efectos gravitacionales están ausentes, y que se encuentra en equilibrio.

Durante el desplazamiento del gas de la superficie del mineral por las burbujas de gas, ocurre una separación de carga entre la fase acuosa y el sólido por lo que el mineral adquiere una carga. Frecuentemente, la movilidad de la carga en la fase sólida es ilimitada por los átomos de los cristales superficiales, mientras que la carga en la fase acuosa es móvil y se distribuye en una región adjunta a la superficie del mineral.

La selección de los mejores reactivos de flotación es una etapa muy compleja, adsorción de los reactivos se basa en el equilibrio en los iones de la pulpa que determina el potencial cinética, el potencial electroquímico y la hidratación de las partículas del mineral. Este equilibrio es difícil de controlar o prever, ya que aparte de los reactivos, en la pulpa existe una cantidad considerable de iones provenientes de las impurezas que trae el mineral y las aguas utilizadas.

Los reactivos de flotación, son productos químicos naturales o artificiales, que aseguran que la flotación de minerales sea selectiva y eficiente y produce condiciones óptimas para mejorar este método de concentración de minerales. Son generalmente surfactantes o modificadores de la superficie de los minerales.

Existen tres grupos principales en los cuales se clasifican los reactivos de flotación. Estos grupos son:

- Los colectores, cuya principal función es la de proporcionar propiedades hidrofóbicas a las superficies de los minerales.
- Los modificadores, que sirven para la regulación de las condiciones de funcionamiento de los colectores y aumentan su selectividad.
- Los espumantes, que permiten la formación de una espuma estable, de tamaño de burbujas apropiado para llevar los minerales al concentrado.

Los colectores son compuestos orgánicos de carácter heteropolar. Su grupo polar es la parte activa que los une a la superficie de un mineral en base a un mecanismo de adsorción (química o física). La interpretación de este fenómeno contempla la eliminación de una parte de la capa hidratada con formación de un contacto trifásico entre el aire, el agua y el mineral. Las interfaces sólido-líquido y líquido-gas son de gran importancia en la formación de un contacto estable, y es precisamente la función de un colector el influirlas en la dirección deseada. La adsorción de un colector sobre la superficie de un mineral es favorecida por un bajo potencial electrocinético y una vez que se efectúa, disminuye en forma notable la capa hidratada del mineral, creando las condiciones favorables para su unión con las burbujas de aire.

Los modificadores, por su parte, sirven para crear condiciones favorables en la superficie de los minerales para el funcionamiento selectivo de los colectores. En primer lugar, están los reguladores del pH, o sea, ácidos y bases inorgánicas que mediante un mecanismo iónico influyen el potencial electrocinético y la película hidratada de los minerales. Además, están los activantes que son reactivos que favorecen la formación de superficies hidrofóbicas y los depresores, que favorecen la hidratación de superficies minerales. En general, los modificadores son ácidos, bases y sales inorgánicas, aunque hay algunos de origen orgánico (tanino, almidón, etc.).

Los espumantes son reactivos tensoactivos de carácter heteropolar, que se adsorben selectivamente en la interfase gas-líquido para formar una espuma

estable. La parte apolar es generalmente un radical orgánico y la parte polar se caracteriza por la presencia del grupo hidroxilo (fenoles, cresoles) que los hace hidrofílicos. A veces el grupo hidroxilo está reemplazado por grupos hidrofílicos y contiene un nitrógeno, como en el caso de las aminas aromáticas y piridinas. En general, son productos de la destilación de sustancias naturales (ácido cresílico, aceite de pino, aceite de eucalipto) y por esta razón su composición es bastante compleja en el sentido de que son compuestos de varios productos químicos.

Es necesario destacar también que, bajo distintas condiciones, un mismo reactivo puede desempeñar distintas funciones. Los espumantes a menudo tienen propiedades de colectores y viceversa. Este carácter de funciones dobles generalmente dificulta el estudio de una fórmula de flotación y la tendencia moderna en la síntesis de reactivos de flotación es la de producirlos con una sola función.

Para la concentración de minerales, se debe contar con un circuito de flotación y dependiendo de la complejidad de separación se cuentan con etapas para la obtención de productos de clasificación: en flotación bulk o también denominada flotación en masa y en flotación selectiva.

Los circuitos de flotación están entonces conformados por etapas de flotación, y diferenciándolas por la operación a desarrollar:

Celdas Rougher: Son celdas desbastadoras o de flotación básica es donde se obtiene el primer concentrado.

Celdas Scavenger: Son celdas recuperadoras o agotadoras, es donde se realiza la recuperación de las especies valiosas que no han podido ser recuperadas en las celdas rougher.

Celdas Cleaner: Son celdas de limpieza donde se realiza la limpieza del concentrado de la celdas rougher.

Celdas Recleaner: Es donde se da la limpieza a las espumas que vienen de la flotación cleaner.

Los resultados de la operación de las celdas de flotación, pueden ser evaluados de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) Recuperación y ley de concentrado;
- b) Capacidad en toneladas tratadas por día por unidad de volumen de celda.
- c) Consumo de energía eléctrica por tonelada tratada
- d) Costos de mantenimiento, labor de operación y repuestos por tonelada tratada.
- e) Consumos de reactivos por tonelada tratada.

Las celdas de flotación comerciales pueden dividirse en cuatro tipos, y muy pocas escapan de dicha clasificación:

- a) Mecánicas, que son las más comunes y se caracterizan por que la agitación y la dispersión de aire en el interior de la celda lo produce un impulso. Cada impulsor produce una mezcla ideal en el recipiente.
- b) Neumáticas, las celdas no tienen impulsor y se airea y agita la pulpa por la acción de aire comprimido alimentada desde el exterior.
- c) Separadores de espuma, en estas máquinas la alimentación de la pulpa es por la parte superior, sobre la capa de espuma y no en la zona de la pulpa
- d) Celdas-columnas, el principio fundamental es el flujo contracorriente de las burbujas de aire y la pulpa, y de la pulpa y el agua de lavado.

Para la flotación de minerales con equipos convencionales, existen varios tipos de equipos para las distintas etapas en la flotación de minerales, a continuación se describen algunas de las más comerciales:

AGATAIR: Celdas de flotación, fabricadas por la Galigher Co. son fabricadas en los más diferentes tamaños, incluyendo las celdas de gran volumen. Las celdas Agitair tienen una alta cantidad de lengüetas estabilizadoras alrededor del impulsor. El aire es insuflado al interior gracias al mecanismo del impulsor a 1 o 2 psi.

DENVER: Denver Equipment son los fabricantes estas celdas. Se tienen dos tipos de celdas, uno abierto (o flujo libre) y otro de celda a celda. La última puede auto-airearse y puede proveer así mismo un control de la pulpa y los niveles de espuma para cada celda individual. Las celdas Denver tienen collares cónicos o cilíndricos que favorecen el incremento de la recirculación de la pulpa hacia el ojo del impulsor desde lo alto, la zona más quieta de la celda. Esta mejora en la recirculación vertical de la pulpa, facilita la suspensión de las partículas más gruesas.

OUTOKUMPU: el fabricante de estas celdas de flotación es Outokumpu Oy de Finlandia. Estas celdas cuentan con un novedoso impulsor con un diseño innovado, basado en principios hidrodinámicos. El aire es insuflado en la celda a través del eje vacío del impulsor a relativa profundidad, placas como hojas en el tope ocultan en impulsor tipo turbina. El conductor externo curvado, y las verticales en el perfil del impulsor, están diseñados para balancear el incremento de la presión hidrostática con las fuerzas dinámicas que desarrolla impulsor activamente en la profundidad al dispersar el aire. Cada hoja dispersadora del impulsor es en efecto, vaciado en perfiles en “V” invertidos. Esto sirve para atraer la pulpa desde el fondo de la celda y bombearla fuera, para mezclarlo íntimamente con el flujo de aire dispersado. Estas celdas tienen una excelente característica de mezclado y puede mantener aún partículas sólidas de gran tamaño en suspensión a través del tanque.

2.2 Información general sobre la flotación en columna

En los años 60, los investigadores P. Boutain y R. Tremblay, de origen canadiense, comenzaron la investigación de los procesos de flotación en una columna a contracorriente.

Los estudios se basaron en la similitud de la flotación con los procesos de separación de masas que se dan en la tecnología química, como son las columnas de absorción o desorción. La separación puede realizarse eficientemente con una mínima mezcla, y con patrones de flujos a contracorriente de aire y pulpa. Este principio subyace en las columnas de flotación. El diseño de las mismas es similar al de las columnas de burbujas, que fueron ampliamente utilizadas en la tecnología química de procesos de intercambios de masas (sistema gas-líquido).

La columna de flotación diseñada por P. Boutain y R. Tremblay [1] fue la primera de una nueva generación de aparatos basados en el flujo a contracorriente de aire y pulpa, dando el inicio a una gran variedad de tipos de columna de flotación. El principio del sistema es el siguiente: después de acondicionada la pulpa con reactivos, la alimentación se produce en la altura media de la columna, donde se mezcla con una corriente de agua procedente de la parte superior de la columna, y con la corriente ascendente de burbujas de aire procedente de la parte inferior.

Los mismos principios de fisicoquímica de superficie que se aplica a flotación en celdas convencionales son válidos para la flotación en columna, siendo la cinética de flotación mucho más rápida en esta última; de esa manera las partículas hidrofílicas son adheridas a las burbujas, las cuales ascienden y son removidas como concentrado.

En las columnas de flotación, el tipo de movimiento relativo entre partículas y burbujas es el factor de mayor peso que gobierna la probabilidad de unión burbuja/partícula, de la carga de las burbujas, del índice de flotación y del

requerimiento de energía del proceso. El flujo contracorriente de las burbujas y las partículas permite mejores condiciones de unión burbuja- partícula y ella de estabilidad al proceso. La probabilidad de la colisión burbuja-partícula está determinada, especialmente, por el valor del componente normal de velocidad relativa, el tiempo de contacto, y la magnitud de las fuerzas de inercia. La velocidad relativa de partículas y burbujas en la contracorriente es de alrededor de 10- 12 cm/s para un índice de flotación de 2 cm/s, y supone un tamaño de burbujas de 1.5 a 2.5 mm.

El aire a presión es introducido mediante generadores internos o externos de burbujas y son los inyectores de aire los que reciben mayor atención en toda instalación antigua o nueva; se puede afirmar que los generadores de burbujas son el "corazón" de la columna de flotación.

En contracorriente, la probabilidad de colisión burbuja-partícula es mayor debido al gran volumen de aireación de la celda, y al largo camino que las burbujas y las partículas deben realizar a lo largo de la columna. La velocidad relativa proporciona las mejores condiciones para la colisión, de acuerdo con los resultados obtenidos por F. Dedek [2]. La contracorriente de pulpa y aire produce una reducción en el crecimiento de la velocidad de ascensión de la multitud de burbujas, lo que incrementa el tiempo de retención de la pulpa, reduce la necesidad de aire comprimido, que incrementa la capacidad específica del aparato. Sin remolinos y una menor turbulencia del flujo de pulpa en la columna, las fuerzas de inercia que producen la separación son insignificantes. Y, por último, la intensidad de la mezcla longitudinal de la pulpa es menor en una columna. Todo esto muestra que el índice de flotación es mayor que las direcciones de los flujos de pulpa y aire.

Entre las principales ventajas de la columna de flotación es la de tener un menor consumo energía (al no necesitar de elementos rotatorios), un menor coste; 3 ó 4 veces menor espacio que el requerido para aparatos convencionales (celdas de

flotación convencionales), un mayor volumen de aireación, y la posibilidad de controlar el flujo de aire y la distribución de las burbujas según su tamaño.

La selectividad en el proceso de flotación en columna es mayor que en aparatos convencionales, debido a un segundo enriquecimiento en la capa de espuma. Esto permite la producción de concentrados de alta ley, una reducción de depesores y de simplificación de los diagramas de flujo. Las columnas de flotación son sencillas y compactas en su diseño, no tienen partes que se muevan en un medio abrasivo, y utilizan eficientemente el espacio operativo y su volumen.

El área principal de investigación en los aparatos de columna es la flotación de partículas finas. La ausencia de una mezcla intensiva de la pulpa, la limpieza de los productos situados en la zona superior al punto de alimentación y una gran fase de espuma, permiten la producción de concentrados de grano fino de mayor ley, comparados con los aparatos convencionales.

Durante largo tiempo los procesos de flotación de minerales han sido sometidos a los más diversos estudios de investigación y desarrollos de innovación tecnológica, sin embargo, estos estudios, en su gran mayoría, se han enfocado a optimizar recuperaciones o a mejorar las condiciones hidrodinámicas del contacto partícula-burbuja.

Las variables más importantes a considerar en la operación de una celda columna son el flujo alimentación, el flujo de aire, flujo de agua de lavado, el nivel de la pulpa y el nivel de la espuma, el porcentaje de sólidos y la dosificación de los reactivos. El efecto de cada una de ellas se detallará posteriormente y se mostrará el impacto que estas variables tienen en el resultado final del uso de este tipo de equipo de flotación.

En la Figura 01 se puede distinguir fácilmente dos zonas básicas de la columna de flotación: zona de recuperación o colección y zona de limpieza; en la figura 02

estudia más detalladamente a la columna de flotación de acuerdo a las siguientes zonas:

La zona de limpieza: en fase espuma, es la región que se extiende hacia arriba desde la interfaz pulpa-espuma hasta el rebalse de la columna.

La zona de limpieza: interfaz pulpa-espuma, región de longitud arbitraria en la interfase pulpa-espuma; a esta región se le asigna el espacio entre 0.15 m sobre la interfaz 0.15 m por debajo de la interfaz.

La zona de limpieza: en fase pulpa; es la región que se extiende hacia abajo desde la interfaz pulpa-espuma hasta la tobera de inyección del material de alimentación.

La zona de colección, es la región que se extiende hacia abajo desde la tobera de inyección o alimentación hasta los difusores.

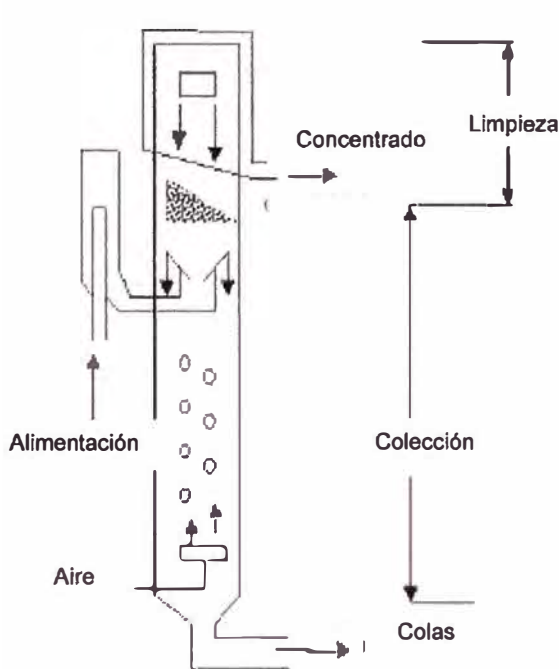


Figura 1 - Columna de flotación

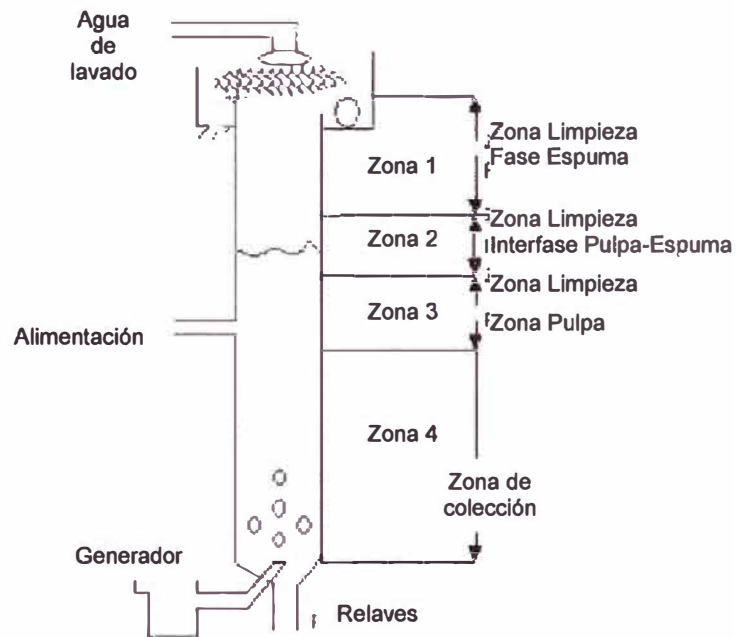


Figura 2 - Zonas de la columna de flotación

La forma geométrica de las columnas de flotación se puede caracterizar por su forma cilíndrica, rectangular o cuadrada y una gran altura. Prevalece la forma cilíndrica, poco diámetro y gran altura; las formas cuadradas y rectangulares requieren material extra, lo que representa un gasto adicional.

El sistema de inyección de aire es la parte fundamental de la celda y se realiza mediante inyectores internos o externos que buscan mejorar la producción de burbujas y el tamaño de las mismas; así, por ejemplo, se han usado inyectores cerámicos, tubos perforados, cubiertos con lonas de filtro y últimamente el generador de burbujas desarrollado por el Bureau de Minas de Estados Unidos. El sistema consiste en la disolución de aire en agua alimentado convenientemente a una cámara pequeña que contiene gravas, de preferencia de canto rodado, a presiones que fluctúan entre 60 a 70 psi.

El control del aire en la celda se puede hacer midiendo el tiempo de éste en el interior de la misma, lo que en inglés se llama holdup, que se define como la fracción de aire presente en la pulpa de cualquier celda de flotación expresada en porcentaje y se determina fácilmente implementando dos visores: uno en la parte inferior y otro en la parte superior de la columna (figura 03), deduciendo que la diferencia de niveles a través de dichos visores debe ser proporcional al aire contenido dentro de la celda.

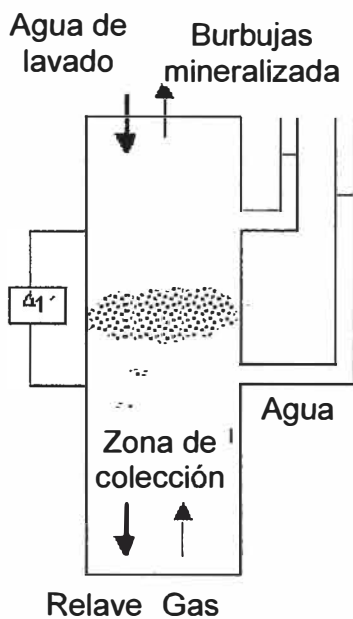


Figura 3 Presión del gas

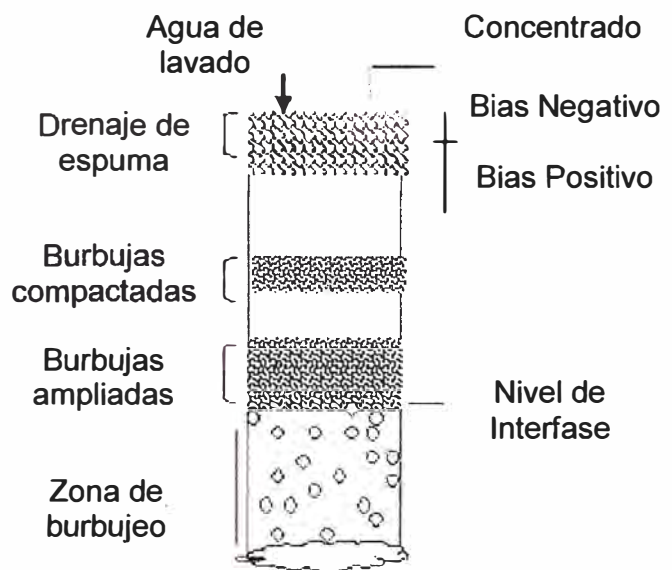


Figura 4 Zonas de la celda-columna

En la figura 04, se puede apreciar el perfil de la espuma en la columna de flotación. La forma y calidad de espuma serán factores importantes en la eficiencia del proceso. El agua de lavado tiene funciones muy importantes: el formar el bias (relación que hay entre el flujo del relave y el flujo de alimentación; este valor es igual o mayor que la unidad por adición de agua de lavado); mantener el nivel de pulpa y espuma; limpiar el concentrado.

III.- DESARROLLO DEL TEMA

3.1 Beneficios en el uso de celda-columna

Se ha acumulado una gran experiencia en la aplicación de columnas (para menas de metales no férricos y tierras raras, minerales industriales, carbón) y en diferentes operaciones del esquema de proceso.

Actualmente las celdas de flotación tipo columna tiene un amplio rango de posibilidades en función de otros tantos factores, como son: los buenos resultados obtenidos en el proceso, la posibilidad de aprovechamiento de partículas finas o gruesas, una alta selectividad en la separación debido al uso más eficiente de los procesos que ocurren en la espuma, el sencillo control del proceso, un menor consumo de energía, una flotación efectiva de pulpas pesadas y asimismo una disminución en el volumen de la celda y la dosificación de los reactivos, la ausencia de partes móviles, menor necesidad de espacio y un diseño más simple. Una de las ventajas es la posibilidad de crear diferentes condiciones aerodinámicas de flotación en un solo compartimiento. Una menor intensidad en la mezcla de la pulpa permite una mejora de la flotación selectiva de las partículas finas. Esto produce un brusco descenso en la interrelación de partículas y una reducción en la dispersión del tiempo de residencia de las partículas que están en la celda.

La mayor eficiencia de la columna de flotación permite emplear menos tiempo en el proceso, disminuir el número de etapas y la carga circulante en el circuito de flotación, y como resultado, una mejora en la consistencia y rendimiento de las operaciones. La experiencia del uso de columnas para procesos de diferentes minerales ha permitido bosquejar algunas conclusiones acerca de los campos más prometedores en su aplicación.

La aplicación principal de las columnas es para el desbaste y relavado de partículas finas. La ausencia de un mezclado intensivo de pulpa y captura de partículas, la estabilidad de los agregados burbuja-partícula, el alto contenido de burbujas finas, la limpieza del producto en la zona y se encuentra por encima del punto de entrada del alimentación, y una gran profundidad de la zona de espuma permite la obtención de concentrados de grano fino de mayor ley que en los aparatos de tipo impulsor.

Un campo prometedor para la aplicación de las columnas de flotación es la producción de concentrados superlimpios. Se puede producir carbón limpio, con una nueva generación de aparatos de columna multiseccionales, con patrones de flujos de fase a favor y contracorriente combinados, permite la extensión del rango granulométrico de las partículas que se introducen en la alimentación

El tratamiento de aguas del proceso y residuales es un potencial uso de las columnas. En los esquemas de flujo, éstas se combinan con los aparatos por aire disuelto o por electroflotación.

El problema de la producción de concentrados súper limpios se puede resolver en las columnas de flotación, que produzcan las condiciones óptimas para la flotación de finos libres y que eliminen la posibilidad de captura de material no selectivo en espuma.

Estas condiciones se dan las columnas, cuyo espacio operativo se rellena con paquetes de platos nervados, llamadas columnas empaquetadas. Con estos platos se elimina la circulación a gran escala de la pulpa y otra forma reduce la selectividad de flotación. El contacto cerrado entre partículas y burbujas es un movimiento a contracorriente a lo largo de las nervaciones intensifica la flotación de pulpas de finos.

3.2. Diseño de columnas de flotación

3.2.1 Tipos de aparatos

Las grandes ventajas mostradas en el proceso, como en el diseño de las columnas de flotación, promovieron el desarrollo de un gran número de tipos de columnas de flotación. Durante las dos últimas décadas se concedieron alrededor de 100 patentes para diferentes modificaciones de los aparatos y de los difusores de aire. Hay distintas aproximaciones para la clasificación de los diseños existentes, la primera de ellas es en función de la pulpa y de la corriente de aire.

La gran mayoría de columnas de flotación operan en un régimen de contracorriente: la alimentación se realiza en la zona superior (normalmente a una profundidad de $1/3$ a $1/5$ de la altura total de la columna), y las colas de descarga (partículas hidrófobas que se hunden) se evacúan por la parte inferior de la columna. Así, se desarrollaron aparatos que combinan corrientes paralelas y contracorrientes de los flujos de pulpa y de aire. Existe también columnas que introducen el aire y la pulpa en la parte inferior de la celda, y cuyas colas también se descargan en la parte inferior de la celda. Este tipo puede ser considerado como corriente paralela; aunque el flujo ascendente se debe únicamente al líquido atrapado entre las burbujas y a los procesos de circulación. Existen aparatos monoceldas como multiseccionales; los últimos se subdividen en dos grupos: columnas con corrientes paralelas de pulpa y flujo de aire y aquellos que combinan secciones de corriente paralela y contracorrientes. Las columnas que poseen diferentes tipos de inyectores que pueden ser consideradas un grupo aparte.

Exceptuando lo dicho anteriormente, otras diferencias incluyen opciones de diseño para los elementos principales de los aparatos como son los difusores de aire, distribuidores de la alimentación y en el interior de la celda, boquillas de

lavado, incluyendo también sistemas de procesamiento de datos, monitorización y control.

El tipo de movimiento de las partículas y burbujas es uno de los factores principales que gobiernan la probabilidad de la formación de agregados en la flotación, el grado de cobertura de la superficie de burbujas, el índice de flotación, y el requerimiento de energía del proceso. El régimen a contracorriente produce mejores condiciones para la unión partícula-burbuja y además añade estabilidad a la misma. La probabilidad de colisión partícula-burbuja y de unión partículas esta determinado por el componente normal de velocidad relativa, tiempo de contacto y fuerzas de inercia.

En una contracorriente de pulpa y aire, la velocidad de ascensión de las burbujas se reduce, lo que incrementa su tiempo de retención y aumenta el coeficiente de utilización del aire y la capacidad específica del aparato. Las fuerzas de inercia que podrían romper el agregado burbuja-partícula son insignificantes en una columna de flotación.

Aún más la probabilidad de colisión burbuja-partícula es mayor en un régimen a contracorriente porque la celda presenta un mayor volumen de aireación y tanto partículas como burbujas realizan un largo viaje, a lo largo de toda la columna y el porcentaje de mezcla longitudinal de la pulpa es bajo.

Los aparatos de columna tienen las siguientes ventajas: menor necesidad de energía (en ausencia de partes móviles, el consumo de energía está determinado solo por la soplante de aire), menor inversión de capital, mayor espacio de aireación, posibilidad de controlar el caudal de aire y la dispersión, una menor necesidad de espacio (de 3 a 5 veces) que en aparatos de tipo impulsor, para la misma capacidad. Se debe acentuar también la mayor selectividad de la flotación en columna debido a una mayor concentración secundaria en la zona de lavado y

en la capa de espuma. Esto permite producción de concentrados de alta ley, con reducido consumo de depresores y simplifica los diagramas de flujo.

Los aparatos se caracterizan por las siguientes particularidades en su diseño, no presentan partes móviles, requieren poco espacio, ausencia de partes rotatorias en un medio abrasivo y utilización eficiente de su volumen y área operativa.

La altura de la columna es el parámetro principal en el diseño. El problema de la altura óptima para el aparato de columna no presenta aún una solución única. La mayoría de las investigaciones consideran la altura óptima entre 10 y 13 m ya que la intensidad de mezclado disminuye cuando aumenta el ratio altura-diámetro. Si se va aumentando el diámetro para una misma altura y caudales de aire y pulpa en superficie, la intensidad del mezclado de pulpa crece.

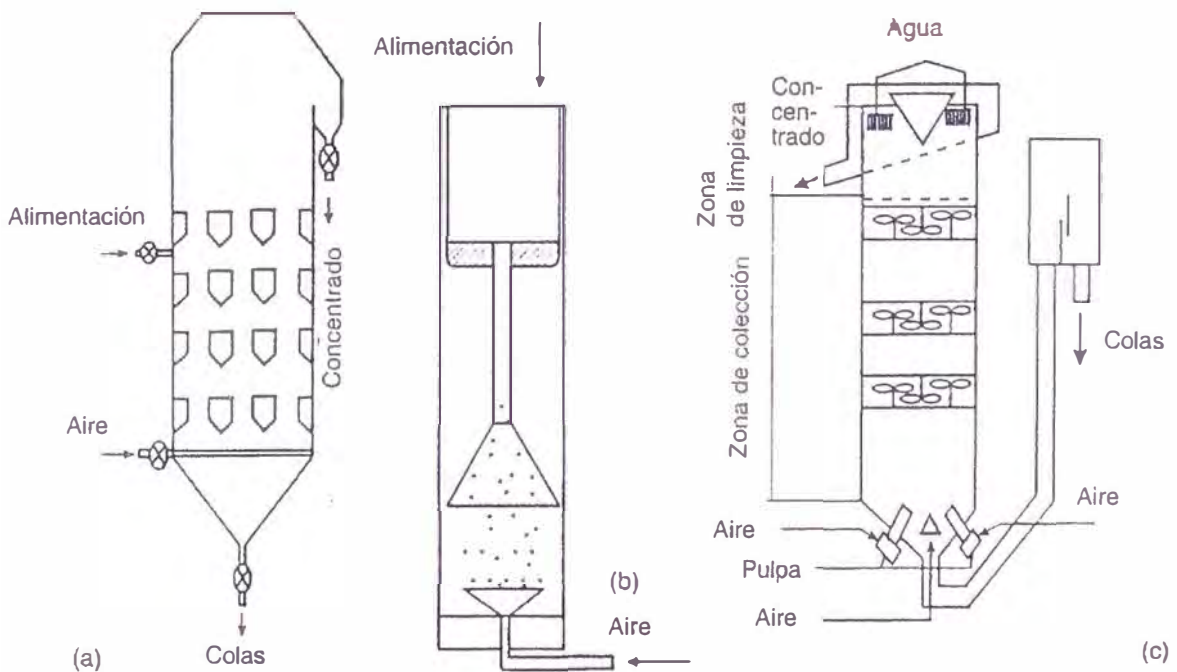


Figura 5 Columnas de flotación con reguladores (a, b) estáticos (c) dinámicos

La comparación de datos experimentales con el perfil del flujo calculado basándose en el número de dispersión del recipiente, da el rango de variación óptima de dicho número para aparatos de gran capacidad. Es conveniente instalar reguladores para optimizar el régimen aerodinámico en este tipo de aparatos. Se realizaron ensayos con reguladores de diferente diseño (parrillas horizontales situadas a intervalos definidos a lo largo del aparato, platos de diversas geometrías, cilindro, hechos de alambre, etc). Se obtuvieron los mejores resultados al dividir en compartimientos verticales la zona de colección. Cada uno de los compartimientos es una columna con óptimas características hidrodinámicas. El primer aparato de gran capacidad, con una celda de 40 m, de volumen 5.5 de altura y un área de sección de 9 m.

El incremento en el diámetro de la columna tiene como resultado el aumento de la proporción de pulpa circulante lo que proporciona el porqué de la reducción de la exactitud de la separación y el incremento de la captura hidráulica.

La intensidad del mezclado longitudinal puede ser reducida para forzar la redistribución de energía a través de la sección de la columna usando un sistema de paletas móviles (reguladores dinámicos) como se observa en la figura 5,c. Los resultados de la investigación muestran las ventajas del montaje excéntrico en vez de coaxial de un conjunto de paletas móviles a través de la sección de la columna

Las columnas de flotación manufacturadas por Column Flotation Co., Cominco, Armco Co, Deister Concentrador Co, Dorfner y otras compañías son monoceldas. Las monoceldas presentan hidrodinámica uniforme y los mismos parámetros de aireación para todos los tamaños de partículas del material de flotación. Como es bien sabido, el comportamiento de la separación (denominada colisión partícula burbuja, unión de partículas y transporte a la zona de relave y a la capa de espuma captura hidráulica y relavado en la zona de espuma) está determinado principalmente por los patrones de flujo, liberación de gas, y distribución de las burbujas según su tamaño. Además de esto, un régimen hidrodinámico particular,

proporciona en la monocelda las condiciones necesarias para la selección eficiente de partículas de un tamaño determinado y con unas determinadas características de flotabilidad. En condiciones industriales reales, la distribución según tamaños y la características de superficie, por ejemplo la flotabilidad tanto de partículas valiosas como de ganga, varía considerablemente.

El cambio de monoceldas a columnas multiseccionales permite la provisión de condiciones favorables para la separación de partículas con diversos grados de flotabilidad. Para permitir esto, se establece un régimen especial de aireación e hidrodinámica en cada una de las secciones de la columna y se ajustan las variables de operación de acuerdo a la flotabilidad del material. Cuando cambian las características del alimentación, se varían los parámetros del proceso por secciones.

Además, en las columnas multiseccionales, se puede establecer una condición material-aparato, y optimizar las variables del proceso, dependiendo de las características de los materiales a flotar.

Una visión general de la columna multiseccional se muestra en la Figura 6. El volumen de la celda se divide en secciones mediante un conjunto de paneles cilíndricos coaxiales, que permite un retorno múltiple y mixtos a la zona de colección, alternando corrientes de aire y pulpa a favor y en contra (contra corrientes). Un incremento de sección de la columna, en la dirección en la que se mueve el material, reduce la velocidad de flujo, proporciona un aumento del tiempo de retención y mejora las condiciones de colección de las fracciones de baja flotabilidad.

Un diseño que comprende secciones a favor y contracorriente en el aparato, permite la provisión y el control de diferentes regímenes aerohidrodinámicos por secciones de columna, y su control dependiendo de las características de alimentación. La sección “a favor de corriente” se caracteriza por el incremento

del tiempo de retención de las partículas en la celda, una mayor densidad de la mezcla aire-pulpa, menor intensidad de mezcla, menor tiempo de transporte de las partículas a la zona de espuma, resultando en un incremento en la velocidad y ascensión de las burbujas y una mayor probabilidad de recuperación de las partículas gruesas en el caso de que estas drenen desde la espuma.

Una de las grandes ventajas de las columnas multiseccionales es la probabilidad de obtener dos productos finales mediante la creación de procesos de flotación diferentes en el mismo aparato. Esto es posible gracias a una circulación separada de los diferentes productos en distintas secciones de la columna y transporte del espuma desde la secciones segunda, tercera, cuarta, etc... a las siguientes.

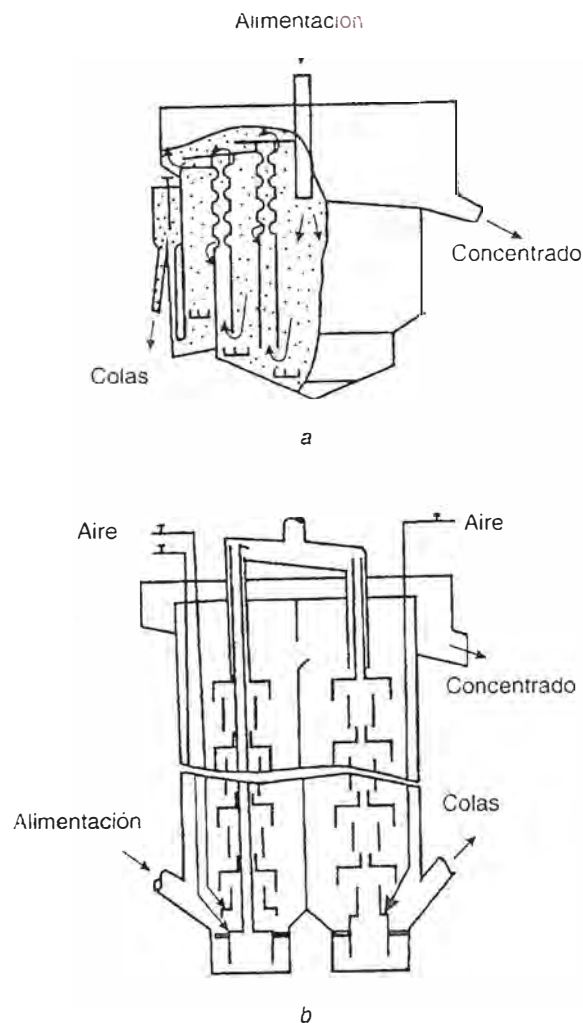


Figura 6 Columnas de flotación multiseccionales diseñadas en IOTT.

Otra de las ventajas de las columnas multiseccionales a tener en cuenta es cuando la producción de espuma sea grande, ocurre en el caso de operaciones de relavado. La limitación en el comportamiento de la columna puede ser atribuida más a la capacidad de arrastre de la burbujas que los procesos cinéticos. Se propone incrementar el caudal de aire o disminuir la densidad de la pulpa. Está claro que éstas recomendaciones no son fáciles de implementar, ya que implican un incremento de la capacidad de la columna. En una columna multiseccionales de menor altura, se incrementa el porcentaje total de flujo de aire; por consiguiente se reduce la carga de burbujas y así superan las limitaciones de comportamiento.

Se ha acumulado una significativa experiencia en operaciones de columna biseccionales. Para eliminar la posibilidad de taponamiento, la sección a favor de corriente se provee de un circulado de aire que transporta partículas gruesas en la sección de contracorriente. Un aparato difusor singular consiste en un circulado de aire escalonado, se usa en la columna como aliviador, permitiendo la dispersión de partículas a lo largo de la columna y la manipulación de la distribución de las partículas según su tamaño. El volumen de las celdas de este tipo fabricado es de 25 y 80 m³, y la altura es de 6 m (figura 6, b).

Para procesar un material distribuido en un amplio rango de tamaño de partículas, es necesario usar un aparato que comprenda de 3 a 5 secciones. Un aparato piloto de 3 secciones con flujos a favor y en contracorriente fue probado en carbones de baja lavabilidad en el instituto IOTT (Rusia). La primera y la tercera secciones operan en contracorriente de aire y pulpa, mientras que la segunda sección opera a favor de corriente. Las áreas seccionales de los compartimentos fueron calculadas basándose en la curva de flotabilidad del carbón.

Para intensificar la flotación de las partículas gruesas se desarrolló un aparato donde la separación en espuma y la flotación contracorriente eran procesos combinados: a través de un distribuidor especial se introduce la alimentación en la capa de espuma para recuperar las partículas gruesas y las flotantes y efectuar la

pre aireación de la pulpa, mientras que el material no flotado se dirige a la parte inferior de la celda.

Cuando exista una gran cantidad de partículas gruesas parece recomendable utilizar un hidrociclón cuyo flujo inferior después de agotado es escurridor, se alimentaría en la capa de espuma. En este régimen (para fracciones estrechas de tamaño), el proceso de separación de la espuma es más eficiente, y el rebose se usa para alimentar a la primera sección de un aparato multizona, al igual que las colas de descarga de espuma. Para controlar el régimen aéreo hidrodinámico se introducen una empaquetadura por espiral en la sección a favor de corriente, por encima de los difusores de aire (Figura 7).

Para incrementar los procesos secundarios de aumento de ley y en la capa de espuma, la celda se divide en secciones espuma y colección, conectadas por un tubo. El control del flujo de aire en el difusor en la sección de espuma, y del flujo de agua para el riego sobre la espuma, permite la ley óptima de los concentrados y su rendimiento, así como de los mixtos (diseño IOTT).

Ya sea apuntado la gran variedad de diseños de columna desarrollados en distintos países, habiéndose concedido más de 100 patentes. Es imposible y de escasa utilidad en escribir todos los diseños, pero se debe considerar los más interesantes y aquellos más prometedores.

Para aumentar el contacto interfase, aumentar el tiempo de refinación de las burbujas y eliminar la macro circulación, en procesos de tratamiento de masas de la tecnología química se utilizan columnas con paquetes. Una columna de flotación de diseño similar se desarrolló en la Universidad Tecnológica de Michigan (EEUU) por el profesor D.C. Yang [3] para el beneficio de partículas finas. La columna es de sección cuadrada y de diseño similar a la columna de la Column Flotation Co. de Canadá Ltd. (Canadá), la mayor parte de su volumen se rellena de paquetes (Figura 8). Los paquetes están constituidos por parejas de

varillas que se sitúan verticalmente, colocándose con un ángulo respecto a la vertical (normalmente alrededor de 45°), y su altura es aproximadamente de 3 mm. los paquetes se apilan de manera que las varillas de las bandejas de bloques próximos se posicionan en planos perpendiculares. Las zonas de colección y de lavado se llenan con estos bloques, pero la zona de la capa de espuma (regada con agua), de alimentación y de inyección de aire quedan libres.

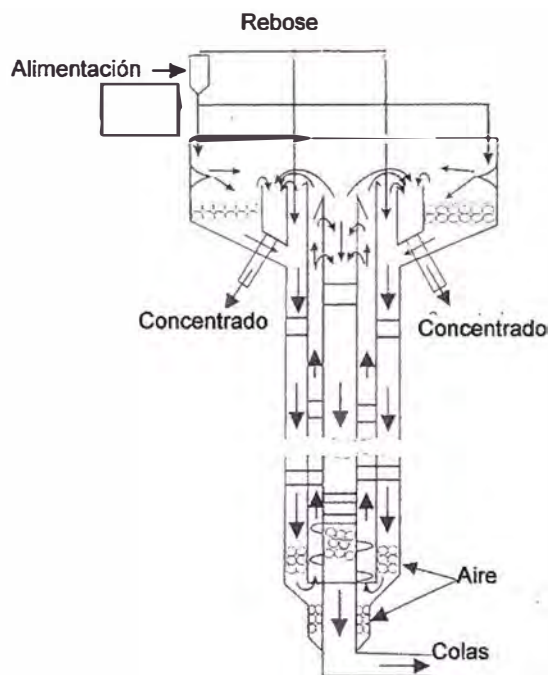


Figura 7 Columna de flotación multiseccional diseñada en IOTT y IrPI

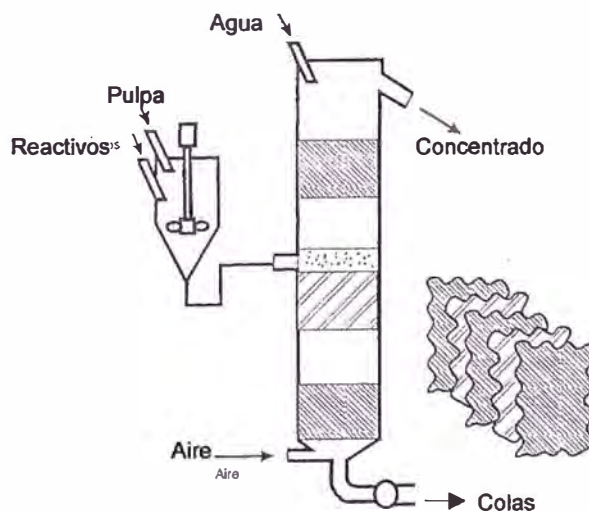


Figura 8 Columna de flotación con paquetes

La división de las burbujas se produce en su avance ascendente a través de la superficie de varillas. La alimentación de aire en la columna se realiza a través de tubos abiertos que permiten la reducción de la presión introducido al valor de la presión hidrostática de la pulpa en la columna. Las velocidades de los flujos superficiales son: pulpa alrededor de 0.3 cm/s, aire de 6 a 10 cm/s, y agua del lavado de 0.1 a 0.15 cm/s. El contacto partícula-burbuja y la activa microturbulencia facilitan un incremento en la recuperación de partículas finas.

La ausencia del efecto mezcla a gran escala y una gran profundidad de la capa de espuma elimina los arrastres hidráulicos y permiten en un solo paso la producción de concentrados de alta ley y con alimentación de partículas finas. Los patrones de flujo en una columna con paquetes vienen determinados por la relación de flujos en cada fase de la corriente y por las características de los paquetes. Así pues, para una profundidad constante de las varillas, una determinada altura del aparato y una relación de flujos superficiales, la flotación resultante no depende de la sección de la columna (ni de su capacidad).

Las condiciones óptimas para una unión burbuja-partícula y la separación de la mezcla aire-pulpa son diferentes. Es necesario realizar el proceso de formación a velocidades relativamente altas de partículas y burbujas, mientras que en el proceso posterior las condiciones de quietud son óptimas para eliminar el arrastre hidráulico y la destrucción de los agregados partícula-burbuja. Un aparato con preaireación de la pulpa puede resultar una alternativa eficiente. La introducción de aire y pulpa hace imposible la formación de un flujo a contracorriente de aire y pulpa.

La experiencia de la operatividad de la columna en diferentes usos para beneficios de minerales, permite definir las características en diseño y del proceso, y el desarrollo de los diseños de las unidades principales: difusores de aire, distribuidores de alimentos, dispositivos de descarga estabilizadores del nivel de pulpa en la celda.

Las principales tendencias en el desarrollo de las columnas de flotación son las siguientes:

- Incremento de la sección y capacidad de los aparatos;
- Preaireación y mezcla intensiva de la pulpa;
- Reducción de tamaño de las burbujas, mejor utilización del aire resultante al reducir altura de la columna;
- Desarrollo de aparatos multiseccionales con flujos a favor y contracorriente y diferentes parámetros aerodinámicos en cada sección para poder flotar materiales de diferentes tamaños y diferentes gamas de flotabilidad
- Desarrollo de diseños especiales para la flotación de partículas finas (por ejemplo columna de paquetes) y gruesas (por ejemplo columnas tipo Flotaire)

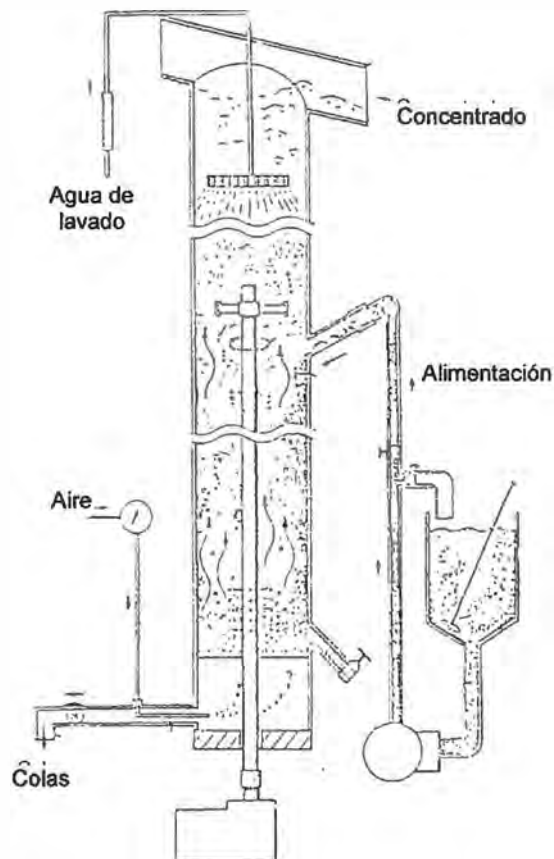


Figura 9 Columna combinada con un molino vertical (Patente EEUU N° 4964576)

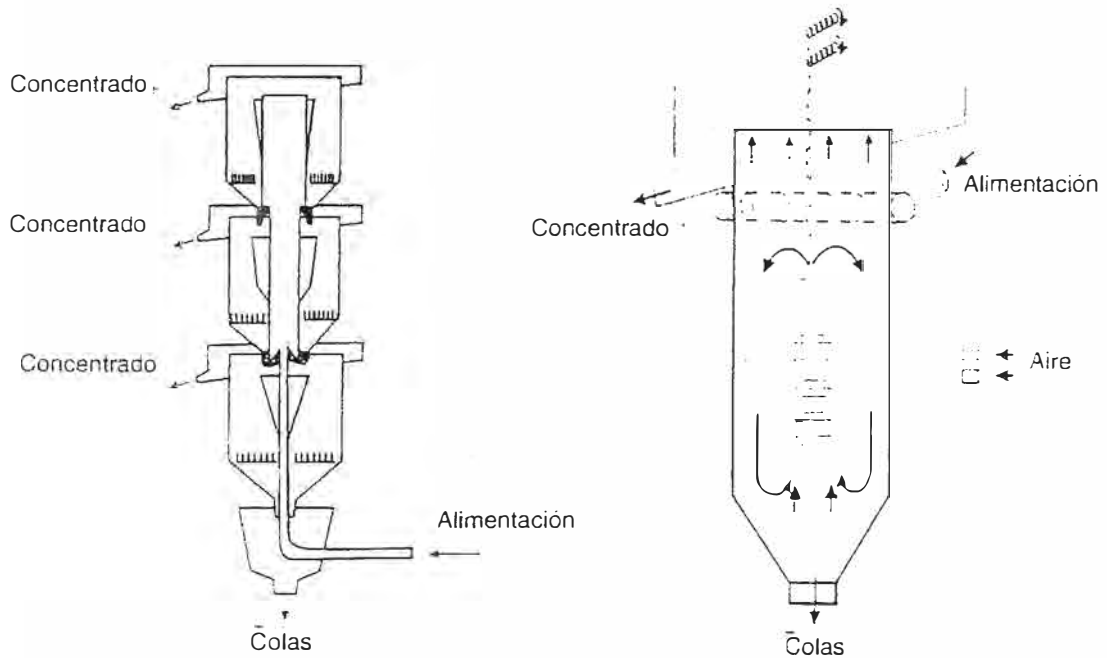


Figura 10 Columna de flotación desarrolladas en IOTT

3.2.2 Aspectos de la cinética en la flotación

La perspectiva del campo de las aplicaciones de las columnas de flotación necesita una descripción cualitativa de los fenómenos observados en los procesos actuales; por ejemplo, si es necesario un modelo matemático. Con esta idea en mente, es imprescindible considerar los modelos conocidos de flotación convencional y determinar las características específicas de proceso de los aparatos de columna.

La descomposición de las tareas de modernización de la flotación puede variar. Los modelos más generales son los siguientes:

- 1.- Interacciones químicas de los activos en la pulpa, composición de la fase líquida y parámetros de la energía de la superficie.

- 2.- Fenómenos de adsorción y de oxidación-reducción en la superficie del mineral, adsorción de reactivos en la interfase aire-líquido.
- 3.- El rango de velocidades de flotación de la fase y los contenidos de gas y sólidos en la celda de flotación.
- 4.- Heterocoagulación de partículas y burbujas, coagulación (floculación) de partículas, drenaje de líquido de la película, estabilidad de los flóculos y de los agregados de la flotación en la pulpa y en la capa de espuma.
- 5.- Macrohidrodinamismo de la celda de flotación, movimiento de partículas libres y unidas en la pulpa y en la espuma.
- 6.- Estructura de los flujos en un aparato multicelda, mezclado posterior intercelda, difusión de reactivos en la celda de flotación y su adición en etapas.
- 7.- Topología de los circuitos de flotación, de productos circulantes características dinámicas del circuito según variaciones de la composición de la alimentación el control de los parámetros.

Para la optimización del diseño de la columna son necesarios modelos de los niveles 3, 4 y 5 su extrapolación, procesamiento y equipamiento, y también para el desarrollo de sistemas para medir los parámetros de los procesos de control de los mismos. El más interesante de sus modelos se considera posteriormente.

Las características de diseño del aparato de columna determinan las siguientes diferencias en el mecanismo de los procesos, comparado con aparatos convencionales:

- Un considerable gradiente de concentración de partículas unidas y libres a lo largo de la altura de la columna, especialmente en la zona de relavado;
- Ausencia de macrocirculación activa de pulpa y una disminución en la intensidad de captura de partículas;
- Las velocidades relativas de las partículas y de las burbujas están determinadas, en los procesos de flotación, por su movimiento en el campo gravitacional

mientras que las velocidades pursátiles tienen un menor efecto en los microprocesos;

- La gran profundidad de la espuma bajo riesgos produce una limpieza activa;
- La colocación de aireadores neumohidráulicos permite el incremento de la concentración de micro burbujas que intensifica la flotación por el mecanismo de coalescencia.

La mayoría de los investigadores consideran que los resultados de la flotación dependen del tipo de aparato y de sus dimensiones, lo que puede ser caracterizado por los cambios en la dispersión de la distribución del tiempo de residencia.

La colisión partícula-burbuja es la etapa que limita la velocidad de flotación. La intensidad de las colisiones está determinada por algunas características de las partículas como el tamaño y la densidad, y por los patrones del flujo en la celda de flotación. No depende de las propiedades físico-químicas de las partículas ni del régimen de reactivos. H. Plate y H. Schulze [4], en 1991, describen los siguientes mecanismos del proceso de flotación (Figura 11): por intercepción (a), sedimentación por factores de gravitación-inercia (b), precipitación en el área turbulenta bajo las burbujas ascendentes (c), mecanismos de difusión turbulentos (d).

El mecanismo del proceso considerado es diferente en los aparatos de columna y en los convencionales: para mezclado intensivo, se puede dar la colisión burbuja-partícula en el proceso de su movimiento relativo, el cual está determinado por las pulsaciones turbulentas de la velocidad. Bajo condiciones más tranquilas, es más probable la sedimentación por gravitación-inercia.

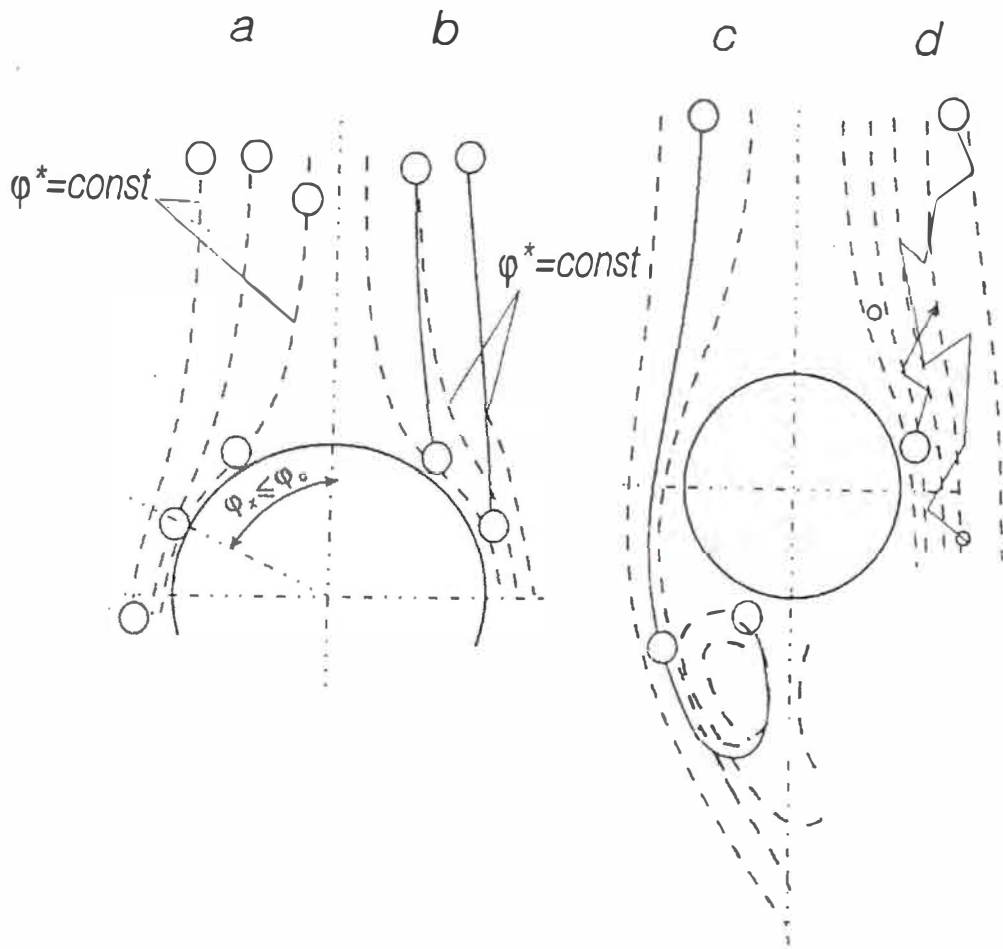


Figura 11 Representación esquemática de los mecanismos de unión en la flotación [4]

Se debe resaltar que, en la mayoría de los trabajos de hidrodinamismo de los procesos elementales de flotación, la trayectoria de las partículas se incluye (bajo una u otra hipótesis) en el campo de las velocidades. Las velocidades resultan del flujo alrededor de una burbuja ascendente, ignorándose el componente turbulento de la velocidad. Está claro que esta aproximación es más adecuada para columnas de flotación neumática que para aparatos convencionales, en los que las partículas están generalmente suspendidas en el flujo.

Conforme aumenta el tamaño de las partículas, el efecto de la fuerza de inercia se hace significativo en la colisión burbuja-partícula. En el sistema de referencia conectado con la partícula, la fuerza actúa a lo largo del radio de curvatura de su

trayectoria. En la etapa en la que la partícula y la burbuja se mueven una contra la otra, la convexidad de la trayectoria está dirigida a la burbuja y la fuerza de inercia promueve su aproximación. Cuando una partícula se mueve alrededor de una burbuja, la fuerza de inercia es centrífuga. Su valor depende de la velocidad de la partícula en curvarse alrededor de la burbuja, cuyo giro está determinado por el grado de retardo de la superficie de la burbuja. Para una superficie de la burbuja totalmente retardada, la influencia negativa en el proceso de flotación elemental es mínima. Esta es una de las razones por las que la velocidad de flotación elemental es mínima. Conforme la partícula de la burbuja se mueven una contra la otra, el valor y la dirección de la fuerza de inercia cambia.

Así pues, el modelo de flotación bajo condiciones del flujo turbulento puede comprender la modelización bajo condiciones de quiescencia (cálculo de la trayectoria de las partículas) y el análisis de los procesos de transferencia de masa. La técnica del cálculo numérico de la intensidad de la heterocoagulación debe incluir:

- Evaluación del rango de velocidades del líquido alrededor de la burbuja.
- Cálculos de las trayectorias de las partículas para diferentes distancias iniciales al eje de ascensión de las burbujas
- Cálculo del campo de velocidades de las partículas teniendo en cuenta el componente estocástico.
- Evaluación de la probabilidad de colisión burbuja-partícula.

La inclusión de la interacción hidrodinámica de campos creada por las partículas y burbujas (son en el caso general, por muchas partículas y burbujas) hace muy complicada la investigación del proceso. El movimiento de las partículas debe considerarse en el campo creado por las burbujas ascendentes con referencia a las alteraciones causadas por la presencia de las partículas.

Hasta hace poco, el problema no había sido estudiado en la teoría de la flotación. Un estudio de las interacciones hidrodinámicas refuta la idea generalmente

aceptada de que la probabilidad de colisión burbuja-partícula aumenta con el tamaño de las partículas. A mayor grosor de la partícula, más significativo es el efecto de alteración que introduce (éste es similar al flujo alrededor de la burbuja). Conforme se incrementa el tamaño de las partículas, al principio crece la eficiencia en la captura como resultado del aumento de la fuerza de inercia y el efecto de intercepción. Con un posterior incremento del tamaño de las partículas, su campo hidrodinámico comienza a tener un mayor efecto del proceso de colisión. Para un incremento del ratio diámetro de partícula y diámetro de burbuja (d_p/db), de valores muy pequeños ($d_p \ll db$) a muy grandes ($d_p \gg db$), la probabilidad de colisión aumenta al principio, luego decrece.

En el proceso de contacto de la partícula con la superficie de la burbuja, la película del líquido se hace más delgada y se rompe. Se forma un perímetro trifásico de contacto (estrictamente hablando, en un estado estacionario, una fina película del líquido condensado puede quedar en la superficie de la partícula estando sólo su grosor determinado por la presión mínima de desconexión en la isoterma).

La aproximación general a la evaluación de la unión de las partículas implica la aceptación de la relación entre las superficies burbuja-partícula en el tiempo de contacto t_c y en el tiempo de inducción τ . La probabilidad de unión de la partícula a la burbuja es igual a 1 cuando $t_c > \tau$, y a 0 cuando el signo es opuesto.

Dependiendo del tamaño y de la velocidad relativa de partícula y burbuja, son posibles dos métodos de unión diferentes. Para partículas gruesas, o en un mezclado intensivo, la unión se da cuando una partícula colisiona con la superficie de la burbuja. Para las partículas finas es común la unión durante el proceso de deslizamiento.

Los cambios en el tamaño de las burbujas influyen en la selectividad de la flotación. La baja flotabilidad de las partículas gruesas resulta del incremento del

tiempo de inducción (t) y un tiempo de contacto (t_c), conforme aumenta el diámetro de la partícula (d_p).

El tiempo de inducción comprende el tiempo de reducción de la película del líquido y de la formación de un perímetro húmedo trifásico, y el período de su propagación hasta alcanzar el valor de equilibrio.

Se consideran tres partes en la trayectoria de una partícula: en la primera parte las fuerzas de inercia tienen un efecto predominante, en la segunda parte, este efecto lo tienen las fuerzas de viscosidad y gravedad, y en la tercera parte de la trayectoria de la partícula está determinada por el campo hidrodinámico de la burbuja. Conforme decrece la velocidad relativa, la probabilidad de unión de las partículas cambia de manera complicada. Por un lado, en condiciones estáticas se muestra que el tiempo de inducción se reduce al aumentar la fuerza de presión de la partícula contra la burbuja (en el proceso de flotación es el efecto de la inercia, de la fuerza centrífuga o de la gravedad. Conforme decrece el tamaño de la partícula y su velocidad relativa, la energía final se reduce en el momento de la colisión; consecuentemente, disminuye la posibilidad de rebote, y aumenta la probabilidad de unión en impactos repetidos. Por lo tanto, en la reducción de la intensidad de mezclado y de la potencia del campo de esfuerzo, se optimiza el conjunto de la estructura de los flujos; igualmente se mejoran las condiciones de los parámetros de los subprocesos de flotación, lo que demuestra que existen buenas perspectivas para las columnas de flotación.

La selectividad de la flotación viene determinada no sólo por la intensidad del proceso de colección sino también por la probabilidad de separación de las partículas de la burbuja antes de la recuperación del agregado en la espuma.

Las fuerzas de origen físico-químico, hidrodinámico y gravitacional, están activas en el sistema partícula-burbuja. Las fuerzas de London-Van-der-Waals (electrodinámicas), electrostáticas (conectadas con la interacción de dobles capas

eléctricas), estructurales, adsorcionales y esféricas pertenecen al primer grupo. Las fuerzas hidrodinámicas resultan de la presencia de micro-remolinos cerca de la superficie de las burbujas. El aumento de la velocidad del gas provoca un incremento de la tensión de corte y una mayor probabilidad de destrucción del agregado burbuja/partícula.

La ley del concentrado de flotación se reduce considerablemente como resultado de la captura hidráulica no selectiva de partículas finas en la espuma. Este proceso aún no ha sido estudiado en detalle. La mayoría de los investigadores consideran que la recuperación por la captura es proporcional a la recuperación de agua en el concentrado.

En una transferencia desde el impulsor a la columna de flotación, pueden darse cambios en el mecanismo de contacto partícula-burbuja (desde el impacto al deslizamiento), en la naturaleza de la deformación de la superficie, en la dinámica de adelgazamiento de la película y en el tiempo de inducción. Al mismo tiempo, la brusca reducción de la disipación de energía específica en aparatos sin rotor produce un descenso en la probabilidad de despegue de las partículas gruesas de las burbujas.

En una columna de flotación se dan procesos simultáneos de unión y separación de partículas y burbujas, captura hidráulica, transporte de partículas a la espuma y drenaje de la misma. La constante cinética general de una columna de flotación (calculada como el valor inverso del tiempo medio requerido para la recuperación de partículas para concentrarse en un proceso de relavado múltiple de las descargas de la columna) está conectada con la velocidad de cada uno de los subprocesos. El problema de establecer esta relación es resolverla para un aparato con condiciones de flujo tapón, en el caso en el que todos los subprocesos sean descritos adecuadamente por ecuaciones cinéticas de primer orden.

Los cambios en el comportamiento de la flotación de las partículas en diferentes celdas, para los mismos valores de los parámetros físico -químico, vienen determinados por las diferencias en la aireación y en el hidrodinamismo. Al mismo tiempo, la característica de la intensidad de las colisiones burbuja-partícula en la celda, depende de la distribución granulométrica de las partículas. Otras características del material no son significativas en el estado de colisión burbuja-partícula; por tanto, el tamaño de las partículas debe ser elegido de entre el conjunto de propiedades que determinan la flotabilidad del material.

3.2.3 Elementos principales de los aparatos de columna

Requieren una especial atención las características de diseño de la unidad de alimentación y su distribución a través de la sección de la columna. Un aparato que combina la contracorriente con un acondicionamiento previo de las partículas del mineral fue desarrollado en el Instituto Gintsvetmet en Rusia. Las partículas se activan mediante aire disuelto, liberado en la introducción de la pulpa a través del eductor. Una cámara cilíndrica de mezclado de inyectores, está localizada en el interior de la columna. La pulpa y el aire son introducidos en la celda tangencialmente. La celda está provista de un armazón en la zona de introducción de la pulpa. En la cámara de mezcla se establece el flujo en forma de vértice ascendente de pulpa aireada. Al combinarse este con un gran incremento en la sección de la columna a la salida del cilindro, se produce la separación de partículas gruesas.

La parte superior de la columna (Figura 12,a) tiene la forma de dos conos truncados, conectados por bases muy anchas para aumentar la zona de formación de espuma y su drenaje. El dispositivo para la descarga de la espuma, consiste en varias portillas situadas en lo alto y a lo largo del perímetro del cono. Ensayos comerciales realizados en tales aparatos con volumen de celda de 1.2 m^3 en la planta de Urup Mining and Beneficiación Enterprise” mostraron que el tiempo de flotación de una operación de relavado de cobre era de 3 a 5 veces menor que en

el aparato tipo impulsor FMZ2 para un incremento idéntico de la ley del concentrado.

Las mejoras de los resultados del proceso se explican por la mejor flotación de las partículas finas y gruesas. Para efectuar la clasificación del material de alimentación y su distribución uniforme en fracciones, según su tamaño a diferentes alturas de la columna, se propuso realizar el sistema de alimentación con una serie de tubos montados coaxialmente estando situadas sus secciones superiores en un cilindro herméticamente cerrado, con una portilla tangencial para la entrada de la alimentación (aparato ciclónico) y las secciones inferiores quedan situadas a diferentes niveles a lo largo de la altura de la columna.

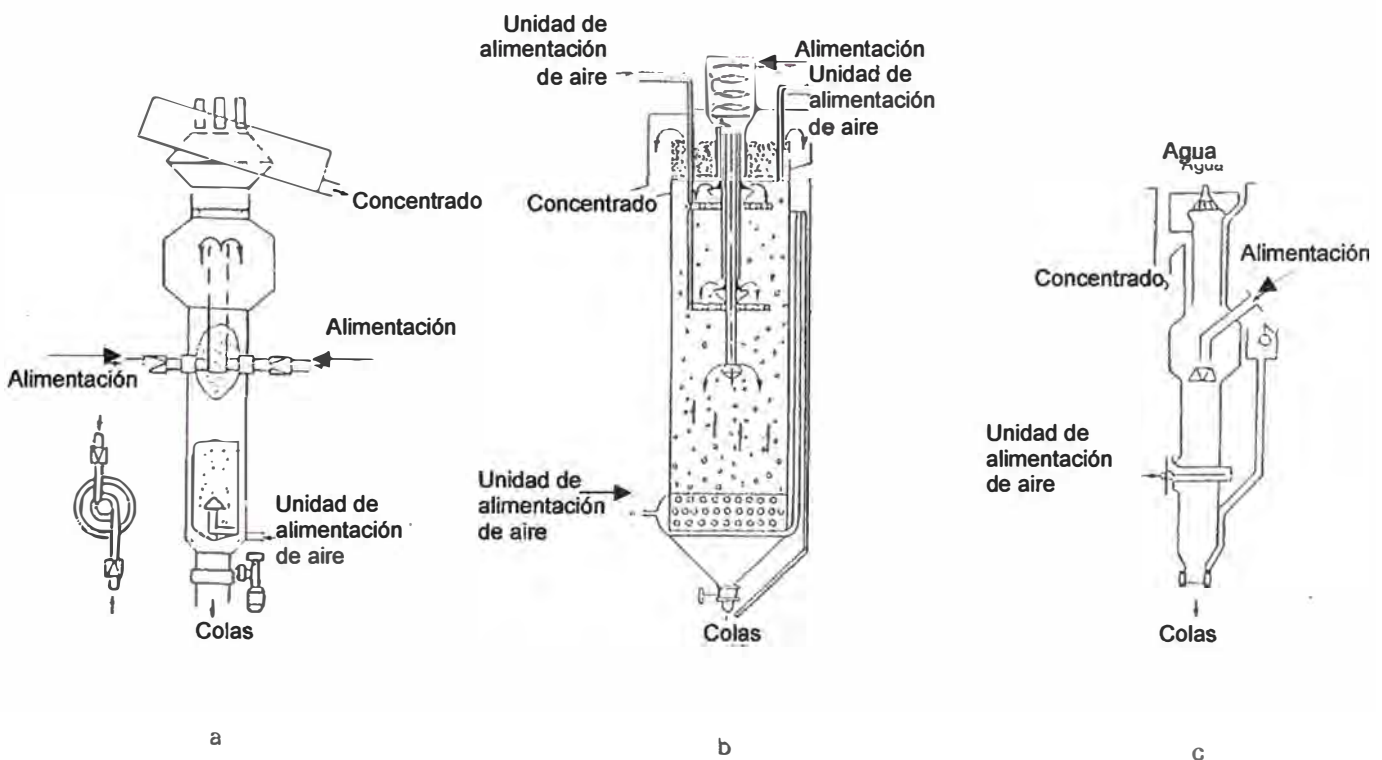


Figura 12 Columnas de flotación desarrolladas en los Institutos de Ginstsvetmet (a) IMR (b) y Gosgorchimproject (c)

La separación del material en función de su tamaño se realiza en un campo centrífugo creado por entrada tangencial de la alimentación. El material separado según su tamaño pasa a través de los tubos montados coaxialmente y entra a diferentes alturas de la columna (las partículas gruesas más próximas a la capa de espuma) lo que incrementa el porcentaje de flotación de las partículas gruesas. Bajo los tubos de alimentación se sitúan deflectores con difusores adicionales montados bajo ellos, que reducen la energía cinética de la corriente. El trabajo de desarrollo e introducción de los diseños de Gosgorchimproject (Rusia) se llevó a cabo para las plantas de beneficio de minerales industriales. Se probaron plantas de demostración en la Minino and Chemical Enterprise, cerca de Moscú y en Uralkaly Enterprise para las siguientes operaciones: flotación de desbaste y relevado para lamas y flotación de desbaste para silvinita gruesa y fina. La alimentación de pulpa se realiza mediante el distribuidor de alimentación situado en la parte más ancha de la columna. El sistema de distribución de la pulpa está diseñada en forma de cono con una base cóncava girada arriba y abajo montada bajo el tubo. La espuma se libera a través de un tubo telescópico cuyo diámetro de salida está próximo al diámetro interior de la columna. El diámetro y la altura del aparato son respectivamente 0.415 y 4.35 m y su capacidad es de 0.58 m. La capacidad máxima del aparato en tratamiento de fosfatos de 0.00-0.18 mm era de 5 t/h. Pruebas realizadas en plantas de potasa nos muestran que la columna permite la producción de concentrados limpios, con una recuperación suficientemente alta del componente valioso.

A continuación se consideran los problemas de la entrada de alimentación y su distribución en columnas de gran sección poniendo como ejemplo la celda Flotaire de Deister Concentrador (EEUU). En los primeros diseños, la alimentación se introducía a través de la sección de la columna mediante un canal rectangular con aberturas en el fondo cónico. En diseños posteriores el sistema de alimentación es una vasija cilindrocónica abierta en su parte superior y dividida en cámaras de flotación aire-agua. Se sitúan un número de aberturas en las paredes de la celda. Las partículas de alta flotabilidad se unen a las burbujas en la

caja de alimentación, mientras la masa de pulpa entra en la celda de flotación a través de las aberturas.

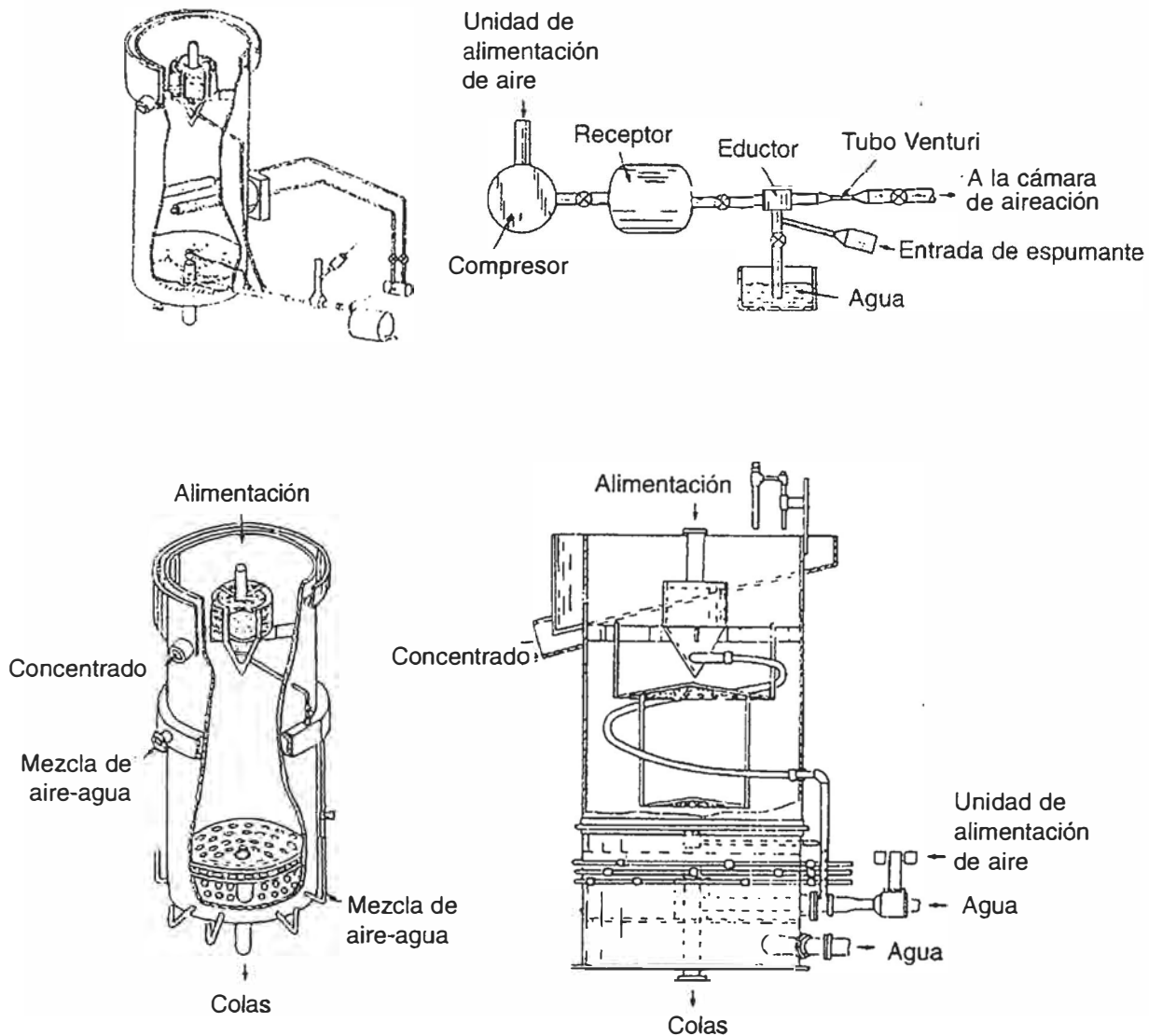


Figura 13 Columnas de flotación Flotaire y unidad de aireación

Para mejorar los flujos y producir una distribución más uniforme de pulpa en las celdas Flotaire se propuso utilizar platos cónicos colocados de tal manera que el cono esté invertido (Figura 13). En cada celda se instalaban dos reguladores de este tipo, para una celda de 2.5 m de diámetro, el plato superior es de 1.8 m de diámetro y el inferior de 1.2 m de diámetro. Hay aberturas en los platos de 50 mm

de diámetro con la distancia entre ellos de alrededor de 150 mm. Las aberturas se realizan a través de la superficie del plato. Las columnas Flotaire se fabrican en un rango de diámetros de 0.2 a 3.7 m y con alturas de 3.5 a 15 m. Se aspira el aire mediante una solución de espumante presurizada y la mezcla aire-agua se introduce en la unidad de alimentación. Se usan tubos venturi como difusores de aire.

El aparato Flotaire también presenta la separación en cámaras de flotación y de aire-agua. Debido a la excesiva presión en la cámara de aire-agua la mezcla es impulsada a través de las aberturas del plato con perforaciones a la celda de flotación, tanto el diámetro como la sección de las aberturas están seleccionadas para que la velocidad de la mezcla aire-agua exceda el valor de la de sedimentación de las partículas. Esto elimina la posibilidad de un taponamiento de la cámara de aire-agua por partículas del mineral. Se debe acentuar que el plato perforado no es un difusor de aire en la columna de Flotaire, se usa solo como alimentador de la mezcla aire-agua en el aparato. Mas aún se produce un lecho fluidificado trifásico en la superficie del plato que mejora la flotación de las partículas gruesas para el caso de los fosfatos (se dan partículas mayores de 1.2 mm) el plato presenta una superficie cónica para transferir hacia la tubería de descarga las partículas no flotadas. La pendiente óptima con el plato es de 6 grados cuando ésta se aumenta se sitúan burbujas bajo el plato y se percibe a lo largo de la sección de la columna su coalescencia y una aireación no uniforme. Para reducir estos efectos, se sitúan bajo el plato un conjunto de deflectores de manera radial y concéntrica. Otra posibilidad es la de añadir un suplemento extra de agua no aireada y eliminar el exceso de agua para mantener la presión necesaria y la liberación de gas. Para incrementar la presión en las aberturas del plato y eliminar completamente el taponamiento de la cámara aire-agua se propuso utilizar 2 platos perforados y un suplemento adicional de agua entre ellos. Para incrementar la uniformidad de la aireación también se introduce la alimentación con la mezcla aire-agua a través de un difusor de aire adicional, colocado en la parte central de la celda sobre la tubería de descarga.

Otra opción propuesta para la columna Flotaire consistía en tubos verticales abiertos por abajo y con ranuras laterales actuando como difusores, reemplazando así los inyectores. Las tuberías se sitúan sobre la abertura de los platos perforados que separan la celda de flotación y la cámara de aire-agua. La parte superior de las tuberías lleva unos discos hendidos con ranuras situadas encima de la tubería de salida del líquido aireado. La parte inferior de las tuberías se sitúan en la cámara aire-agua, donde se inyectan aire-agua a presiones superiores a 150 kPa.

En la cámara de aire-agua se mantienen la presión necesaria y el nivel del agua. El agua entra en las tuberías a través de la abertura inferior y después a través de unas ranuras laterales sumergidas en el agua. El aire entra desde la campana de aire a través de las ranuras laterales, para mezclarse con el agua en las tuberías. El resultado final es una mezcla aire-agua finamente dispersada que rebosa por surtidores situados radial y horizontalmente bajo los discos seccionados.

También existe una modificación de los aparatos Flotaire en la que tanto el agua como los reactivos necesarios se inyectan mediante un surtidor de aire comprimido esto permite la reducción en el consumo de energía para crear la presión óptima del agua, incrementando la liberación del gas de la mezcla aire-agua y reduciendo la dilución de la pulpa con agua para el proceso de flotación. Esto último es muy importante para bajas densidades de pulpa por ejemplo en la flotación de sulfuros. La baja proporción de agua en los eductores de las columnas grandes proviene del hecho de que tanto el espumante como el agua son introducidos por un surtidor de aire comprimido, mientras que en una columna de pequeño diámetro se inyectan los reactivos y el aire mediante agua. Esto es importante para una reducción considerable del consumo de energía específico por unidad de volumen de celda en un aparato grande. La reducción de la proporción de agua en el eductor elimina la necesidad de su reciclado desde la cámara aire-agua por medio de una bomba y su tolva. El tiempo de flotación normal en una columna está entre 2 y 4 min.

Los resultados de la investigación muestran que los datos de este proceso pueden ser mejorados optimizando la aireación. Además de la aireación por la mezcla de aire-agua del aparato Flotaire, el aire también puede ser difundido a través de tubos perforados, cubiertos por un material poroso situados en la zona media de la columna. Los volúmenes de aire suministrados a través de inyectores y de difusores neumáticos son equivalentes.

La operatividad de la columna depende en gran parte del diseño de la unidad de descarga de hundidos o colas. Las más ampliamente utilizadas son compuertas y dispositivos de válvulas, combinados generalmente con diferentes sistemas de control de nivel de pulpa en la celda.

En un determinado número de casos se realiza la descarga combinada de los hundidos: el material grueso se descarga a través de una válvula situada en la parte inferior de la celda y la corriente principal de la pulpa sale del aparato via una compuerta.

A continuación se detallará sobre los difusores, otro elemento principal en la flotación utilizando las columnas.

El difusor es el “corazón” de la celda de flotación. Tanto los parámetros tecnológicos y económicos, como la vida y el coste operacional del aparato, dependen principalmente del diseño de esta unidad.

La técnica más común de difusión es la inyección de aire a presión a través de tubos y placas perforadas. Estos difusores se usaron en una de las primeras máquinas de flotación por espuma conocidas, la Callow.

En muchas columnas de flotación se usan difusores con filtros de tela. Las ventajas de estos difusores son su bajo coste y la reutilización del filtro mediante lavado. Los inconvenientes que presentan son una difusión no uniforme del aire,

grandes burbujas (hasta 3 mm), y la posibilidad del paso de pulpa a las tuberías de aire. El difusor puede presentarse en varios diseños como placa, bastidor, rejilla o filtro de tela que puede ser unido alrededor de una tubería de acero perforada. Los diseños usados en Occidente son rejillas de distribución de aire de diferentes formas.

En las columnas de flotación de la planta Cyprus Sierrita (EEUU) se utilizó, por primera vez, un tubo macizo que permitía cerrar de forma estanca el difusor en caso de fallo. Esto permite la sustitución de los tubos el difusor sin interrumpir el proceso de flotación, incrementando así la vida del difusor.

La experiencia ha demostrado la poca utilidad de los difusores hechos de teflón, cerámica porosa y metalocerámica en columnas comerciales, debido tanto a su elevado coste, como a la obstrucción de los poros y su difícil sustitución en las celdas de flotación neumáticas. Se siguen manteniendo los tubos perforados o porosos como tipo de difusores básicos.

Los mejores resultados se obtuvieron con tubos de goma perforados, de diámetro entre 8 y 12 mm (con una vida media superior a 6 meses). Cada orificio, con su borde elástico, actúa como una válvula de contrapresión, cerrándose en caso de flujo de aire escaso, lo que previene el taponamiento de los poros y la entrada de pulpa en el conducto de aire. Se probaron diferentes tubos de goma, realizados en distintos materiales con diversas características físicas. Los resultados muestran que un incremento en la dureza de la goma hace al difusor menos sensible a las variaciones de presión de aire, incrementándose la uniformidad de la distribución del aire en la celda y disminuye el rango de tamaños de las burbujas. Como norma se usan tubos de un grosor no mayor a 4 mm; sin embargo, los experimentos con tubos de goma de pared de 6 mm demostraron que su duración se prolonga considerablemente, pero precisan una mayor presión de aire. Cuando se realizan punciones con agujas de 0.8 mm de diámetro, el difusor produce burbujas al tamaño óptimo. El número de orificios por superficie es de 40 a 60 orificios/cm²,

y se puede llevar la velocidad del gas hasta 2.5 cm/s a una presión de aire de 150 kPa. En caso de pequeñas ranuras, producidas por punciones de aguja, cuyo extremo ha sido afiliado para formar una cuchilla, la presión se reduce a la requerida de 30 a 90 kPa. Esto aumenta la vida media de difusor, pero disminuye la uniformidad de las burbujas. El mayor inconveniente de los difusores de goma son su deterioro y alto desgaste de la goma, el incremento de diámetro de los orificios y la aireación no uniforme durante la operación, y la necesidad de cambiar el difusor en caso de desgastes locales, lo que reduce considerablemente la vida del mismo. Para prevenir la pérdida de elasticidad de la goma se baña el difusor regularmente en aceite neutro. Se desarrollaron unas unidades especiales con compuertas para cambiar los tubos sin detener el proceso de flotación.

La geometría y la distribución de los tubos de difusión (que incluye una tubería recta a lo largo del diámetro de la columna, dos tuberías perpendiculares, una o dos tuberías concéntricas y sus uniones con los tubos rectos), tiene una gran influencia en la uniformidad de la aireación, en la liberación de gas y en el mezclado realizado en las columnas de flotación. En una columna de sección circular se produce la mayor liberación de gas y la mínima mezcla cuando el aire se difunde a través de una tubería circular perforada. En las columnas de flotación las tuberías de goma están situadas generalmente de manera cruzada, a diferentes niveles colocadas sobre un armazón metálico.

En los últimos años se han patentado en C.E.I. muchos diseños de difusores. Para variar el tamaño de las burbujas (de 5 a 10 veces), cuando se usan materiales elásticos con poros, se reajustan el grado de compresión del plato difusor. Se pueden aumentar los parámetros de aireación y la vida del difusor usando un tubo o cono de metal perforado, en el que se fijan conos o anillos elásticos. Las oscilaciones acústicas producidas en el líquido pueden aumentar el proceso de ruptura de las burbujas, incrementar el porcentaje de burbujas liberadas por el difusor, y aumentar la uniformidad de la aireación. Se puede usar como resonador un sistema especial o el mismo difusor. En un difusor de tubería perforada, donde

las tuberías de difusión se mueven a lo largo de trayectorias elípticas, la alimentación de aire se controla automáticamente. Para intensificar el mezclado total y la dispersión de las burbujas e incrementar la fiabilidad del sistema, se propuso disponer los tubos perforados como en una jaula y efectuar la difusión del aire a través de varias superficies perforadas.

El espacio regulable mediante un anillo, junto con el sistema de válvulas de contrapresión, que previene la entrada de agua en la tubería, permite una reducción del taponamiento de los orificios de los difusores y hace más uniforme la distribución del tamaño de las burbujas. El inconveniente de este sistema, así como el sistema “esfera en cono”, es la formación de burbujas relativamente grandes, que no sirven para la flotación.

Otro diseño de difusor, propuesto para mejorar los parámetros de aireación, comprende un número de anillos huecos hechos de material poroso (polietileno poroso o fieltro) o elástico (goma) unidos mediante tuercas de acoplamiento. El aire se introduce en un barril perforado a través de los orificios de la tubería. Los elementos difusores consisten en anillos trapezoidales o secciones anulares, que llevan ranuras ciegas en dirección radial en las superficies laterales. La presión operativa de un difusor anular a 8 m de profundidad es de 90 a 130 kPa, menor que en otros difusores neumáticos. Cuando se suspende el suministro de aire, las ranuras se cierran debido a una deformación elástica, lo que previene la entrada de pulpa en el barril. Difusores de aire de este diseño, desarrollados en los institutos Gintsvetment VNIKTIRP, presentan una gran fiabilidad operacional, con una vida media de los anillos de goma no inferior a 10 000 horas. Se varia el tamaño de las burbujas manipulando el grado de compresión de los anillos de goma inferior a 10 000 horas. Se varía el tamaño de las burbujas manipulando el grado de compresión de anillos (Figura 14, a). El difusor espaciador es de diseño similar. El eje de los anillos es vertical, y su diámetro aumenta según descende (Figura 14, b). El difusor consta de varios miembros de goma huecos que forman un cilindro. El espacio interior de cada anillo está separado por finas paredes

internas y externas, y con ranuras verticales entre las muescas para la entrada del aire. El difusor espaciado ASh15, con 14 cm de diámetro y una altura de 13.5 cm, alimenta hasta 15 m^3 de aire por hora a una presión de 0.15 MPa. Aunque estos difusores son fiables y tienen una larga vida media, precisan más presión de aire para su funcionamiento.

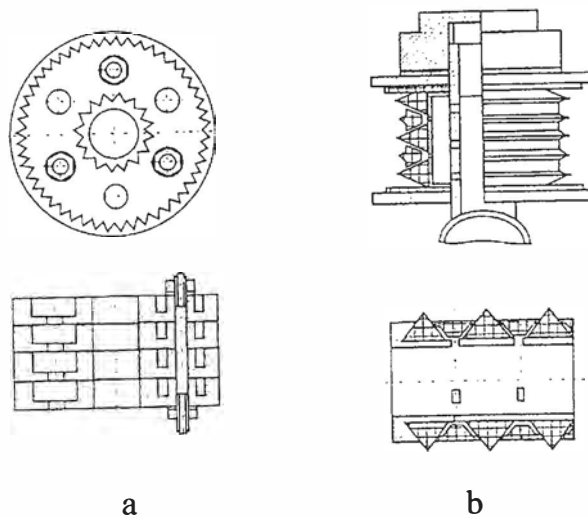


Figura 14 Difusores de aire neumáticos diseñados en institutos: (a) IOTT (b) Ginsvetment [5]

3.2.4 Características aerodinámicas de las columnas de flotación

La velocidad de las burbujas en las columnas de flotación generalmente es bastante mayor que la de pulpa. Debido a esto, la mayor parte del hidrodinamismo y, consecuentemente, las características de flotación, están determinadas por la velocidad de la corriente de aire y el método de difusión. La velocidad del flujo de pulpa influye principalmente en el tiempo de retención de las partículas.

Uno de los parámetros principales es la distribución de las burbujas según su tamaño. Tanto el mezclado como la presencia de distintos tamaños producen en la coalescencia y ruptura de las burbujas en su ascensión y la cinética de estos procesos está determinada por las condiciones hidrodinámicas y físico-químicas.

Como un incremento ilimitado de la altura de la columna, la distribución de las burbujas según tamaños, tendería a un estado estacionario en la zona superior de la celda. La media del tamaño de las burbujas, a larga distancia del difusor, no depende de los parámetros de difusión y está determinada por la condición de mínima energía potencial:

$$d_b = \varepsilon U_b^3 / 4g \quad (04)$$

Donde d_b es el diámetro de la burbuja, ε es el coeficiente de resistencia dependiente de la velocidad superficial del aire V_g , y u_b es la velocidad terminal de una burbuja. El tiempo requerido para que se establezca el estado estacionario en la distribución de los tamaños de las burbujas depende de la velocidad de aireación y de las concentraciones y propiedades de sólidos y surfactantes. De acuerdo con resultados experimentales, la última ecuación puede ser usada para estimar el tamaño de las burbujas a gran distancia del difusor; para un sistema de aire-agua sin impurezas es de 3-6 mm. La media del tamaño de las burbujas crece con un incremento de caudal de aire, con la densidad y viscosidad de la pulpa, y con el tamaño de las partículas. La distribución de las burbujas según su tamaño está determinada por la estructura de la capa de burbuja.

A menor velocidad del flujo de aire y a una mayor concentración espumante, se reduce tanto el tamaño de las burbujas como la varianza, lo que implica una mayor uniformidad de las burbujas.

Cuando se incrementan los caudales de aire y líquido, y se reduce la concentración de surfactantes, la coalescencia juega un papel esencial en el tamaño de las burbujas. Como resultado de la coalescencia se forman grandes burbujas y los pulsos de la velocidad de líquido y gas en la columna crecen, incluso en el caso de tamaños realmente pequeños de las burbujas en el inicio del proceso (por un difusores con discos porosos con poros de diámetro entre 25 y 75 μm).

Cuando la capa de burbujas es heterogénea, se pueden distinguir dos tipos de burbujas: grandes (de transporte), y pequeñas. Un estudio experimental de la capa de burbujas, usando el método de separación, mostró que una gran parte del aire es llevada por las burbujas grandes. En la figura 15 se muestran perfiles de la liberación de gas, en soluciones de glicerol, para burbujas de aire grandes y pequeñas. Distribuciones bimodales del tamaño pueden intensificar el proceso de flotación, lo que asegura el mecanismo de coalescencia. También se captura partículas finas en las burbujas pequeñas, y son llevadas, con el flujo, hasta la espuma o, junto con las pequeñas burbujas, se adhieren a las burbujas del flujo de transporte. La flotación en un régimen heterogéneo se caracteriza por una alta intensidad de mezclado y de atrapado de partículas. Un incremento de 6 a 10 cm/s no afecta de manera significativa a la liberación de gas. Su valor para las burbujas pequeñas es de alrededor del 14%, y para burbujas grandes del 6%.

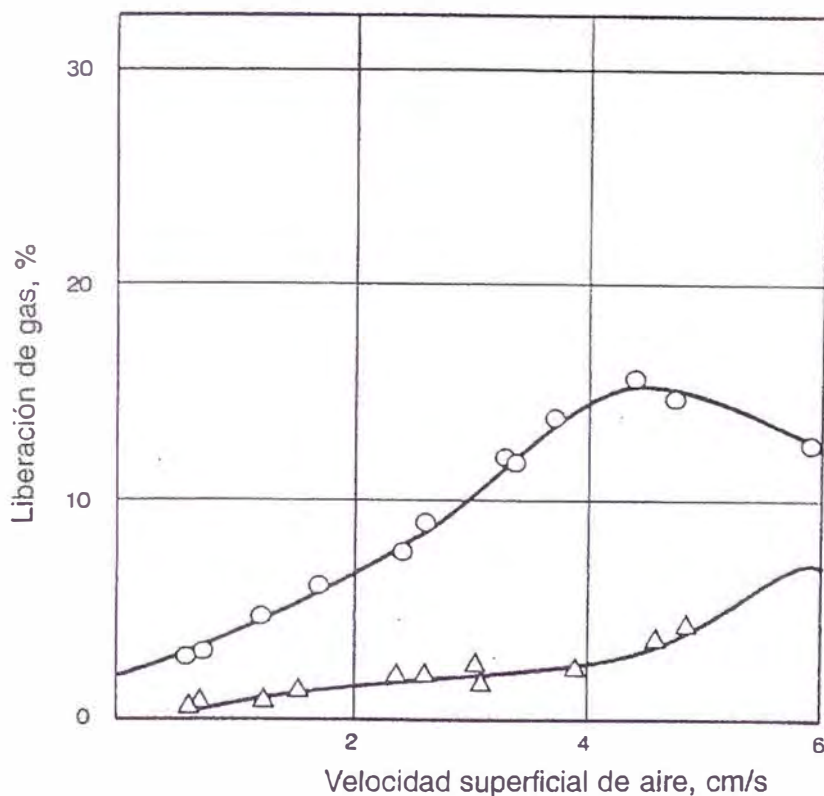


Figura 15 Liberación de gas debida a burbujas finas (Δ) y gruesas (O) [6]

Cuando se modeliza la flotación en columnas altas, se debe tener en cuenta que el volumen de las burbujas aumenta conforme las burbujas ascienden, debido a una reducción de presión y de hidrostática.

El alto gradiente de velocidad, en la capa de la pared (con un grosor de varios centímetros) y un incremento de la liberación de gas, en la parte axial de la columna, provoca coalescencia y un incremento del tamaño de las burbujas en estas zonas, comparado con la parte intermedia del aparato.

La velocidad de ascensión de una burbuja simple depende de su tamaño y de las propiedades de la fase.

Un incremento en la concentración de espumante produce una menor movilidad de la superficie de burbujas, y consecuentemente, en la reducción de la velocidad de ascensión de las mismas. Más aún, la reducción de la tensión superficial disminuye significativamente la intensidad de la coalescencia, lo que causa una reducción del tamaño medio de las burbujas. Bajo condiciones típicas de columnas de flotación, alrededor de 80-90 % de la superficie de interfase gas-líquido es debida a la superficie de las burbujas de 0.5-2.0 mm de tamaño (aireación a través de materiales perforados).

Como resultado de las diferentes velocidades de ascenso de burbujas grandes y pequeñas, su tiempo de retención en la columna es diferente. La distribución del tamaño de las burbujas a la altura del difusor difiere de la distribución media en la celda incluso en ausencia de coalescencia, ruptura o incremento del tamaño de las burbujas debido a la reducción de presión. Como consecuencia del menor tiempo de retención de las burbujas grandes, el tamaño medio de las burbujas en la pulpa es menor que tamaño medio de las burbujas iniciales.

Dependiendo de la relación de caudales en las fases, se puede observar patrones de flujo cualitativamente diferentes en el aparato del tipo considerado. Un

incremento del caudal de gas produce las condiciones del siguiente patrón de flujo: burbujeante, pastoso (coalescencia en masa de las burbujas y formación de una capa inactiva de aire a través de decisión de la columna), circular (un flujo separado del líquido a lo largo de las paredes y un flujo de gas en la zona axial del aparato), y emulsión (inversión de las fases y formación emulsiones debido a los goteos del medio gaseoso). También son posibles los patrones de transición. Las condiciones óptimas del proceso deben satisfacer los siguientes requerimientos: máxima superficie de burbujas y mínimo mezclado. Los patrones burbujeantes y de emulsión satisfacen los requerimientos de mayor extensión, siendo el último implementado en los precipitadores de polvo.

La liberación volumétrica de gas en el aparato de columna afecta no solamente a la distribución por tamaños de las burbujas, sino también a la velocidad y selectividad del proceso. Está gobernado por el caudal de las fases y por el tamaño de las burbujas. Cuando se tiene la relación entre ambos factores se puede suponer la distribución de burbujas de tamaño uniforme y velocidades uniformes de las fases. En este caso, una porción de la sección transversal de la columna -ocupada por gas- es igual a la liberación volumen de gas. La capa de burbujas ascendentes desplaza a un determinado volumen del líquido que se mueve en sentido descendente.

La aireación no uniforme en un aparato de flotación reduce significativamente la eficiencia de selección, debido a la aparición de circulación de líquido en gran escala.

Existen dos tipos de capas de burbujas: la (pseudo) homogénea, con una distribución uniforme a lo largo de la celda y heterogénea, caracterizado por la formación de grandes burbujas y por un mezclado intensivo. Un patrón se transforma en el otro gradualmente; se estableció que, en el sistema aire-agua para una velocidad superficial de aire superior 1-2 cm/s, hay una falta considerable de uniformidad en la liberación de gas en dirección radial.

Hay varias razones que afectan al mezclado de pulpa en columnas de burbujas:

- 1.- La velocidad no uniforme a través de la sección causada por el retardo de líquido en la capa de la pared;
- 2.- Flotación de las burbujas hacia la superficie (captación en la estela de burbujas);
- 3.- Circulación a gran escala causada por la liberación de gas a lo largo del eje de la columna. La interrelación de estos mecanismos del mezclado depende de la liberación de gas y del diámetro de la columna.

La flotación de pulpa está caracterizada por la presencia de partículas finas sólidas (más de 50% en peso) y surfactantes solubles y emulsionables. Las características reológicas de esta mezcla difieren de los sistemas aire-agua, lo que explica la diferencia entre los patrones de flujo de una columna de flotación que sus pruebas con sistemas aire-agua.

La presencia de impurezas provoca, por una parte, una mayor viscosidad y densidad (en sistemas de trifásicos), y por otro lado, una menor tensión superficial de las burbujas para la adsorción del surfactante. El crecimiento en la media de la densidad y viscosidad de la pulpa aumenta las diferencias en la velocidad de ascensión de las burbujas de diferentes tamaños, lo que intensifica la coalescencia. Esto provoca un incremento en el tamaño medio de las burbujas y de su velocidad de ascensión, consecuentemente, una reducción en la liberación de gas. Conforme aumenta la fuerza iónica de la pulpa, se reduce la intensidad de la coalescencia, y la liberación de gas aumenta considerablemente bajo las condiciones de un flujo homogéneo de burbujas.

La gran profundidad y flotación neumática está gobernada por las características de la espuma. La gran profundidad de espuma (hasta 1.5 m) y la división de agua del lavado para un valor positivo de la relación provoca cambios cualitativos en los procesos que se dan en la zona de espuma de la columna y en la flotación, aparatos convencionales. Comparada con la zona de burbujas, las características

de la estructura de la espuma depende fuertemente de la composición y concentración de la fase sólida y de la concentración de surfactante. La hidrodinámica de la capa de espuma tiene un efecto pronunciado en la distribución de las partículas minerales a lo largo de su altura.

La dispersión de la espuma, puede estimarse por el tamaño de las burbujas, por la distribución del tamaño medio de las burbujas o por el área de interfase gas-líquido por unidad de volumen de espuma. La estabilidad de la espuma influye en la intensidad del drenaje de partículas minerales en el proceso de flotación en la espuma y determinan los resultados de la separación en la misma.

El líquido fluye de la espuma a lo largo de los canales de Plateau-Gibbs (las costillas del esqueleto humano de la película que divide a las burbujas). El flujo de líquido desde las películas a los canales se hace por gravedad. La estabilidad de las espumas se explica por los sentidos opuestos de la fuerza de gravedad y del gradiente de la presión del líquido en los canales Plateau-Gibbs.

La concentración del producto secundario se realiza en la porción inferior de la espuma como resultado del drenaje de las partículas capturadas. La porción superior de la espuma, tan sólo realiza las funciones de transporte de partículas al concentrado.

Conforme aumenta el diámetro de la columna, decrece el perímetro específico del labio de espuma por unidad de superficie de espuma y, como resultado, emergen zonas muertas en la espuma reduciéndose la recuperación. Para eliminar éste fenómeno desfavorable en las columnas de flotación de más de 1.8 m de diámetro, se propone colocar canales adicionales de espuma en la celda.

Conforme aumenta el contenido de sólidos y la estabilidad de la espuma, decrece la intensidad del drenaje y del relavado secundario.

La alimentación con agua de lavado aumenta la reología del espuma y la descarga de producto. La optimización de los patrones de flujo en espuma, modificados por el flujo del agua del lavado, es una fuente que debe considerarse para mejorar los resultados del proceso de flotación en columna.

3.2.5 Dimensionamiento de las columnas de flotación

Tal como en las celdas convencionales, el dimensionamiento de las columnas de flotación se realiza tomando en consideración el tiempo de flotación y capacidad de carguío de la espuma. Una vez satisfecha ambas condiciones se considera que las dimensiones son apropiadas.

No existe sección máxima para una columna de flotación, pero en la práctica se ha encontrado que es necesario dividir el interior en secciones inferiores a 0.28 m^2 , con el objeto de reducir el efecto de corto circuito (by-pass de finos).

Si observamos la figura 1 de la página 18, donde se detalla las principales zonas de una columna de flotación, se tiene:

Zona de recuperación:

La zona de recuperación se puede estimar mediante el tiempo de flotación. Asumiendo un flujo “tapón” se tiene:

$$H_r = (T \times U_p) / (1 - E) \quad (5)$$

Donde: H_r : longitud de la zona de recuperación (m)

T : tiempo de residencia (h)

U_p : velocidad de las partículas (m/h)

E : volumen de aire retenido en la pulpa por unidad de volumen de pulpa (5% - 20% normalmente)

Debido a que el flujo es descendente, la velocidad de las partículas es la suma de la velocidad de la pulpa más la velocidad de sedimentación. Es decir:

$$U_p = U_l + U_s \quad (6)$$

Donde: U_p : velocidad de las partículas (m/h)

U_l : velocidad de la pulpa (m/h)

U_s : velocidad de sedimentación de la partícula (m/h) (tabla 1)

El tiempo de residencia en la celda es función directa del tamaño de las partículas, razón por la cual su uso se restringe en la práctica a pulpas de granulometría fina.

Tabla 1
Velocidad de Sedimentación
cm/s

Malla #	Tamaño micras	Cuarzo	Esfarelita	Galena	Chalcopyrita
+150	100	0.93	1.63	3.54	1.74
200	75	0.52	0.92	1.99	0.98
325	45	0.18	0.33	0.72	0.35
400	37	0.13	0.24	0.51	0.25
	10	0.01	0.02	0.04	0.02

Es evidente que la velocidad de la pulpa debe ser significativamente menor que la velocidad ascendente de las burbujas ya que de lo contrario éstas serían arrastradas hacia la descarga de la celda. La velocidad de la pulpa en la columna de flotación varía entre 9 m/h y 73 m/h, siendo 37 m/h la más común.

La sección de la celda está dada por:

$$A = F / U_l \quad (7)$$

Donde: A : área de la columna (m²)

F : flujo de la pulpa (m³/h)

U_l : velocidad de la pulpa (m/h) generalmente entre 9 y 73 m/h

Capacidad de producción de concentrados:

Las variables que afectan la capacidad de producción de concentrados son:

El flujo de aire inyectado a la celda, estimado por la fórmula:

$$L = A \times Fl \quad (8)$$

Donde: L : consumo de aire de la columna (m^3/h)

A : área de la columna (m^2)

Fl : flujo de aire promedio por unidad de área, mayormente ente 55 y $90 m^3/h/m^2$

La capacidad de carguío de la espuma (CA), es una variable del mineral y función de la granulometría del concentrado. Un estimado se obtiene por la fórmula:

$$CA = -0.64 + d(80) \times 0.27 \quad (9)$$

Donde: CA : capacidad máxima de carguío de la espuma

d(80) : malla debajo de la cual se encuentra el 80% del concentrado expresado en micras.

Cabe señalar que la producción de concentrado debe ser inferior a CA y mayor que $0.4 g/min\text{-}cm^2$. En caso de que el flujo de concentrado por unidad de área resultara menor que 0.4, es evidente reducir el área de la zona de limpieza para mantenerse por encima del límite.

Además de los parámetros indicados se debe verificar la capacidad de rebose de concentrado por longitud de labio de la canaleta manteniendo una relación labio/área de aproximadamente $2 m/m^2$ mediante el uso de canaletas internas. Es muy importante esta relación especialmente en celdas de columnas de más de 2 metros de diámetro.

Zona de limpieza:

En la práctica se ha encontrado que las columnas de espuma mayores de 3 metros no mejoran la ley del concentrado. Como consecuencia la altura de la zona de limpieza varía entre 2 y 2.5 m, de los cuales 0.5 a 1 m, se utilizan para distribuir la carga.

Volumen de agua de lavado:

El lavado de la espuma con agua limpia es una particularidad de las columnas de flotación. Permiten desplazar la ganga que flota en el concentrado por arrastre mecánico al reemplazar el agua de la espuma por agua limpia. Su efecto es un lavado de la espuma en contra corriente equivalente a varias etapas de limpieza de un circuito de limpieza convencional. En la práctica el agua de lavado es 1.5 a 2 veces el volumen del agua contenida en la espuma del concentrado.

A continuación se presenta un ejemplo de los cálculos básicos para diseñar una celda-columna para mejorar la recuperación de zinc en un circuito de lavado, demostrando el beneficio del uso de la columna de flotación. Para la comparación entre la celda convencional y la celda-columna se tiene como base el flujo, la calidad de la pulpa al circuito de limpieza de recuperación de zinc y el tiempo de flotación, así como la temperatura y presión en el sistema y excluyendo la dosificación de reactivos y los demás parámetros operacionales.

En la tabla 2 se muestran los resultados de la flotación en celda convencional para el circuito de limpieza:

Tabla 2: Mineral Pb-Zn: Celda convencional – Circuito Limpieza Zinc

PRODUCTO	PESO, %	LEYES, %			RECUPERACION, %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
Alimentación	100.00	1.17	45.47	6.95	100.00	100.00	100.00
Concentrado	16.20	1.20	54.60	5.90	16.70	19.50	13.80
Relave	83.80	1.16	43.70	7.15	83.30	80.50	86.20

Tenemos entonces que dimensionar una celda-columna para recuperar el zinc de la pulpa que se muestra con las siguientes características:

Circuito	= Limpieza – Recuperación de Zinc
Tipo de mineral	= Zinc en ganga calcárea
Especie mineralógica	= esfarelita
Tiempo de flotación	= 15 min
Toneladas de mineral	= 350 tm/día
% Sólidos	= 15%
Gravedad específica del mineral	= 2.8
Granulometría (d80)	= 37 micras
E (Hold Up)	= 0.10

Calculamos la capacidad de carguío de la espuma, usando la ecuación 9:

$$CA = -0.64 + 37 \times 0.27 = 9.8 \text{ g/min-cm}^2$$

Asumimos una velocidad de pulpa de 37 m/h y una altura de la zona de limpieza de 2 m.

Entonces, para la zona de recuperación se tiene un flujo de pulpa (F) de 87.7 m³/h, y un área de:

$$A = 87.7 \text{ m}^3/\text{h} / 37 \text{ m/h} = 2.37 \text{ m}^2$$

Es decir, la columna tiene un diámetro de 1.23m.

Para obtener el valor de la velocidad de sedimentación de la partícula (Us), utilizamos la tabla 1:

$$U_s = 0.24 \text{ cm/s} = 8.64 \text{ m/h}$$

Entonces el valor de la velocidad de las partículas (Up), ecuación 6:

$$U_p = 37 + 8.64 = 45.64 \text{ m/h}$$

Y ya podemos estimar la altura de la zona de recuperación (Hr), de acuerdo a la ecuación 5 y con un valor de hold up (E) de 10%:

$$Hr = (0.25 \text{ h} \times 45.64)/(1-0.1) = 11.41 / 0.9 = 12.68 \text{ m}$$

Por lo tanto la altura de la columna es:

$$Hr + Hl = 12.68 + 2.00 = 14.68 \text{ m}$$

Calcularemos ahora la el flujo de aire (L), usando la ecuación 8:

$$L = 2.37 \text{ m}^2 \times 90 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2 = 213.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Y para el agua de lavado, tenemos que con un porcentaje de concentración de 10% y un porcentaje de sólidos de 25% aproximadamente, se tiene el contenido de agua del concentrado en:

$$350 \text{ tm/día} \times 0.10 \times (75/25) = 105 \text{ tmd}$$

Para el cálculo del agua de lavado se tiene como práctica el 1.5 a 2 veces el volumen de agua contenida en la espuma del concentrado, es decir:

$$[1.5 \text{ a } 2.0] \times 105 \text{ tmd} = 87 \text{ a } 110 \text{ l/h}$$

En base a los resultados de diseño y encontrando los mejores parametros de flujo de aire y lavado, densidad de burbujas, dosificación de reactivos y manteniendo el mismo tipo de colector, modificador y espumante, se obtienen los siguientes resultados mostrados en la tabla 3:

Tabla 3: Mineral Pb-Zn: Celda columna – Circuito Limpieza Zinc

PRODUCTO	PESO, %	LEYES, %			RECUPERACION, %		
		Pb	Zn	Fe	Pb	Zn	Fe
Alimentación	100.00	1.24	45.50	6.90	100.00	100.00	100.00
Concentrado	18.06	1.00	56.00	5.02	14.56	22.22	13.14
Relave	81.94	1.26	42.50	7.70	85.44	77.78	86.86

En el gráfico 1 se muestran los resultados de la operación con la celda-columna diseñada anteriormente.

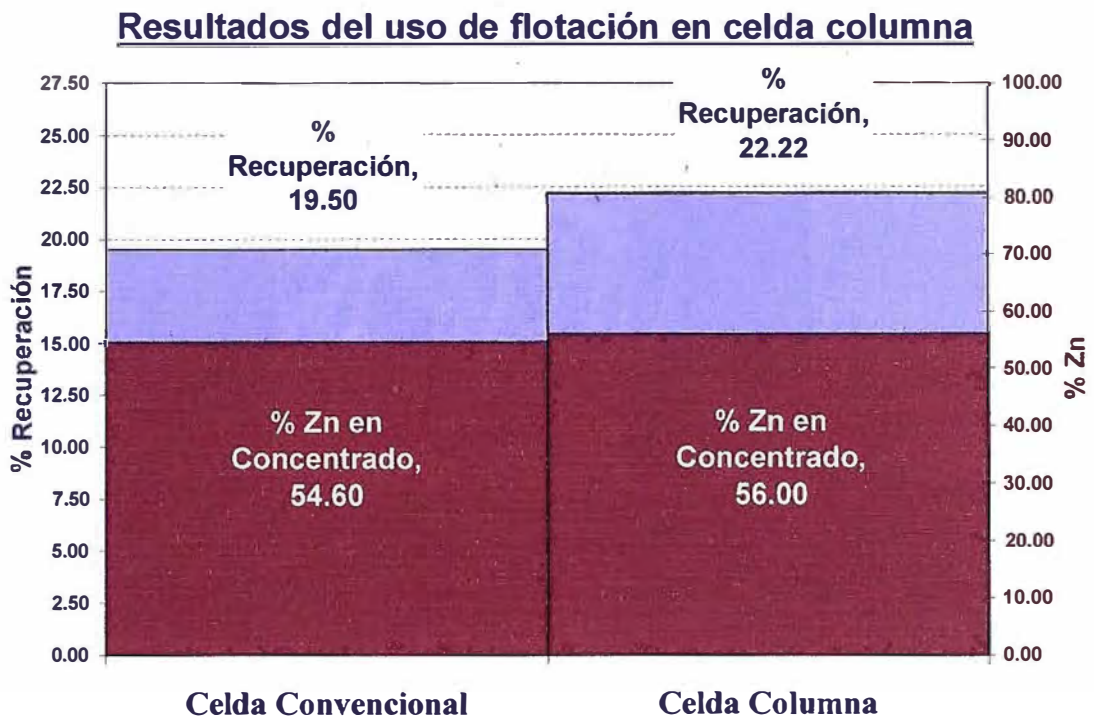


Gráfico 1 Beneficio de flotación en celda-columna

3.2.6 Experiencia peruana en la aplicación de celdas - columna

Para nuestro país que es uno de los pocos en el mundo que tiene una riqueza de minerales, es importante el desarrollo de nuevas tecnologías que nos permitan recuperar aún más los elementos valiosos.

Para demostrar el beneficio en la recuperación de los minerales valiosos y en la ley del concentrado, se muestra a continuación la aplicación del uso de celda columna en vez de la celda convencional para la flotación de mineral de cobre, gráfico 2, teniendo como base de comparación el tiempo de flotación requerido

para la misma pulpa a flotar y encontrando los mejores parámetros de flotación, como son: dosificación de reactivos, flujos de pulpa y aire, y agua de lavado.

Resultados del uso de flotación en celda columna

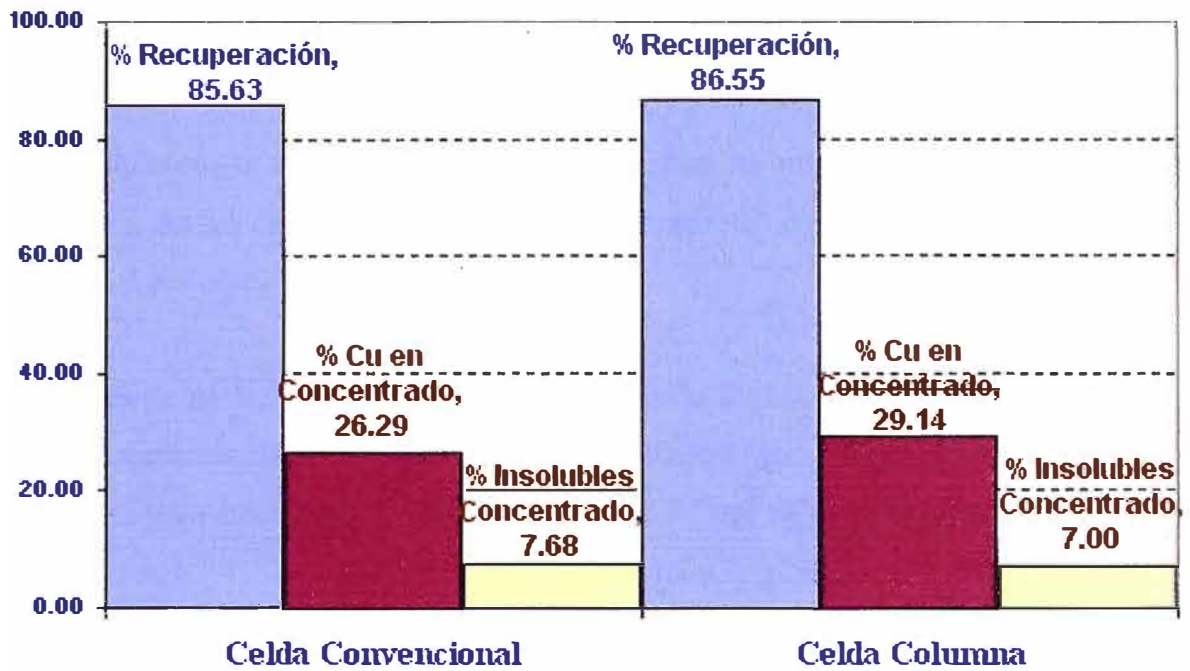


Gráfico 2 Flotación de mineral de Cu en celda convencional y celda columna

La experiencia en el uso de las columnas de flotación para procesos de diferentes minerales ha permitido bosquejar algunas conclusiones acerca de los campos más prometedores en su aplicación.

La aplicación principal de las columnas de flotación es para el desgaste y relavado de partículas finas. La ausencia de mezclado intensivo de pulpa y captura de partículas, la estabilidad de los agregados burbuja-partícula, el alto contenido de burbujas finas, la limpieza del producto en la zona que se encuentra por encima del punto de entrada de alimentación, y una gran profundidad de la zona de espuma permite la atención de concentrados de grano fino de mayor ley que en los aparatos del tipo impulsor.

Un campo prometedor para la aplicación de las columnas empaquetadas es la producción de concentrados súper limpios.

Una nueva generación de aparatos de columna multiseccionales con patrones de flujos de fase a favor y contra corriente combinados, permite la extensión del rango granulométrico de las partículas que se introducen en la alimentación.

El tratamiento de aguas del proceso y residuales es un potencial uso de las columnas. En los esquemas de flujo, éstas se combinan con los aparatos por aire disuelto o por electro flotación

En la planta de Sullivan, en Canadá, la aplicación de las columnas de flotación para la operación de relavado de Pb-Zn se demuestra cuando una columna de 2.4 m de diámetro sustituye a 19 celdas Denver de 3.2 m³ de capacidad cada una de ellas.

En las plantas de beneficio de Belo Horizonte, en Brasil, se instalaron cuatro columna para reducir el contenido de cuarzo en los concentrados de hierro. Comparado con las celdas convencionales, los costes de capital en la instalación de la columna se reducen en un 20-40%, y los costes operacionales hasta un 20%.

Con respecto a la tecnología de las columnas de flotación en el Perú, se tiene la siguiente actualización:

La instalación de una columna Cominco de 1.8 m de diámetro y dos canales internos de espuma en la planta de San Vicente, en Perú, permitieron la reducción en un 45% de la ley en MgO del concentrado.

Se cuenta con tres columnas Cominco en la planta de Cuajone, en Perú, para la operación de relavado y barrido de Cu y Mo. Esta columnas tiene un diámetro de 0.6 a 3 metros.

En el circuito de limpieza de la concentradora de Toquepala de la empresa Southern Peru Copper Corporation, se adicionaron 3 columnas de flotación de 2.5 m de diámetro por 12 m de altura (adicionándose a las 8 columnas ya existentes con las mismas dimensiones). Esto incrementó el tiempo de residencia de la pulpa en los circuitos de flotación primaria y de limpieza, permitiendo incrementar de manera considerable y sostenida el porcentaje de recuperación de cobre y molibdeno en la concentradora de Toquepala (1.7% en Cu y 3.5% en Mo).

IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- 1.- La flotación de minerales se ha visto beneficiado en estos últimos años. La flotación en celda-columna se basó en los procesos de separación de masas de flujos a contracorriente, mejorando así el porcentaje de recuperación y la ley de los concentrados que antes se tenían utilizando las celdas convencionales de flotación, mostrando otra buena práctica de recuperar y concentrar los minerales valiosos.
- 2.- Las columnas de flotación presentan zonas muy bien definidas que hacen la diferencia con las celdas convencionales: la zona de colección en la que las partículas hidrofóbicas sólidas que se encuentran suspendidas contactan en contracorriente como un lecho de burbujas, se unen a ella y son transportadas hacia la zona de limpieza donde existe un flujo en contracorriente entre las burbujas generadas y el agua de lavado que es agregado suavemente para evitar la ruptura de las burbujas. Las partículas hidrofílicas y menos hidrofóbicas se mojan y caen, siendo removidas por el fondo de la columna.
- 3.- Las ventajas principales del uso de las columnas de flotación masa resaltantes son:
Menor consumo energía (al no haber elementos rotatorios), un menor coste, 3 o 4 veces menor espacio que el requerido para aparatos convencionales, un mayor volumen de aireación, y la posibilidad de controlar el flujo de aire y la distribución de las burbujas según su tamaño.
- 4.- La selectividad en los procesos de flotación de minerales usando las columnas de flotación para recuperar el mineral valioso se ve beneficiada

debido a un segundo enriquecimiento en la capa de espuma, aumentando la ley, y reduciendo el consumo de reactivos (depresores).

- 5.- La mayor eficiencia de una columna de flotación permite emplear menos tiempo en el proceso, disminuyen en número de etapas de flotación y reducir la carrera circulante en el circuito de flotación, mejorando así el rendimiento global de las operaciones de concentración de minerales.
- 6.- El incremento en el diámetro de la columna tiene como resultado el aumento de la proporción de pulpa circulante, creciendo así la intensidad de mezclado de la pulpa con los reactivos y el flujo ascendente de burbujas.
- 7.- El tiempo de residencia en la celda es función directa del tamaño de las partículas, razón por la cual su uso se restringe en la práctica a pulpas de granulometría fina.

Recomendaciones:

- 1.- Es necesario mejorar la tecnología de extracción de minerales en el Perú, para ello se debe desarrollar los conocimientos ya adquiridos e implementarlos en las empresas de extracción de minerales en el Perú. Los beneficios del uso de esta tecnología se verían incrementados si se muestran todas las mejoras en el proceso de flotación, que se muestran en este trabajo, sin embargo existen mejoras que se puedan dar a partir de lo desarrollado en este trabajo, como es la dosificación de reactivos y la selección del espumante, modificador y espumante necesarios para flotar una determinada pulpa.

- 2.- Para el caso de flotación de minerales de una granulometría fina, está garantizada la mejora en el proceso, tanto en lo operacional como en el mantenimiento, costos fijos y costos variables.

- 3.- La aplicación de las columnas de flotación ha sido desarrollada en su mayor parte para la concentración de minerales, sin embargo el alcance de esta tecnología de separación no ha sido aún beneficiada, por ejemplo, en el tratamiento de aguas residuales. Se debe continuar en la aplicación de la tecnología desarrollada hasta ahora de las columnas de flotación.

V.- BIBLIOGRAFÍA

- Rubinstein, J., Flotación en columna: Procesos, diseños y prácticas, página 9, Editorial Rocas y Minerales, Madrid, año 1997.
 - Astucuri, V., Introducción a la flotación de minerales, página 179, Perú, año 1994.
 - Sutulov, A., Flotación de minerales, página 51, Instituto de Investigaciones Tecnológicas de la universidad de Concepción., Chile, año 1963.
 - Plenge, G., Dimensionamiento de celdas de columna, Laboratorio de Concentración y Análisis de Minerales - Perú, año 1991, página 2.
 - Kojima, H., La mezcla axial en columna de burbuja con partículas sólidas suspendidas, Journal of the Chemical Engineering of Japan, año 1986, página 232.
 - Girardi, S., Columna de flotación: Exámen de un equipo de procesamiento que comienza a competir con la celda convencional y su simulación por modelaje matemático, Revista Minerales, año 1985, Volumen 40, página 43.
- [1] Boutin, P., La columna de flotación, Canadian Mining Journal, año 1984, página 55.
- [2] Degner, V., Evaluación de las celda-columna, Mineral Engineering, año 1991, página 950.
- [3] Yang, Z., Perfil del flujo del líquido en las columnas burbuja, Chemical Engineering Communications, año 1986, página 51.

- [4] Plate, H., Modelación del conjunto del proceso de flotación basado en los microprocesos fisico-químicos, técnica y aplicación, Congreso Internacional de Procesamiento de Minerales, año 1991, página 365.
- [5] Chemykh, S., Desarrollo de una máquina neumática de flotación con un aireador de una fiabilidad operacional mejorada, Congreso Metalurgia, año 1989, página 9.
- [6] Huls, B., Valoración de la generación de burbujas para una celda industrial de columna, Mineral Engineering, año 1991, página 37.
- [7] Carter, R., Concentración de cobre con columnas de flotación, Engineering and Mining Journal, año 1991, página 192.