

UNIDAD I: FLOTACION

CONCEPTOS IMPORTANTES

Ley mineral: La ley mineral se refiere a la concentración de mineral valioso en una muestra. Se expresa típicamente en porcentaje de peso o en unidades de peso por unidad de volumen, como gramos por tonelada. La ley mineral del concentrado obtenido mediante flotación es significativamente mayor que la ley mineral del mineral de alimentación, lo que indica una concentración efectiva de los minerales valiosos.

Mineral: Cualquier sustancias con valor económico, del tipo minerales, rocas y sus derivados por procesos geológicos, que se extraiga de la corteza terrestre. Los minerales se encuentran en la naturaleza en forma nativa o en combinaciones químicas que es la forma más general.

Mena: Especie mineral (o conjunto de minerales) que se encuentra en un yacimiento y que tiene aplicación industrial y económica. Para que un mineral se clasifique como mena, la ley del yacimiento debe ser mayor que la ley límite económica, y su explotación debe producir beneficios técnicos y económicos.

Ganga: Resto de elementos del yacimiento que carecen de valor y que es necesario separar de la mena. No tienen valor comercial

Concentración: En el contexto de la minería, la concentración se refiere al proceso de aumentar la proporción de mineral valioso en una mena. Este proceso implica la separación de la ganga (material no deseado) del mineral de interés, a menudo mediante métodos físicos y químicos.

Concentrado: Se refiere al producto final obtenido después del proceso de concentración. El concentrado es una mezcla enriquecida del mineral de interés, con una alta proporción de este mineral en comparación con la ganga. Generalmente, el concentrado es más valioso y más fácil de transportar y procesar que la mena original.

Cola: También conocida como relave, la cola es el residuo resultante del proceso de concentración. Consiste en los materiales no deseados, como la ganga y los residuos de los reactivos de procesamiento, que se separaron del mineral valioso durante la concentración. La cola suele ser desechada o depositada en áreas designadas.

Eficiencia del proceso, La eficiencia del proceso de flotación se puede evaluar mediante varios parámetros, como la recuperación del concentrado y la ley mineral del concentrado. Una mayor recuperación con una ley mineral más alta indica un proceso de flotación más eficiente. Además, la selectividad del proceso, es decir, la capacidad de separar selectivamente el mineral valioso de la ganga, también es un factor importante para evaluar la eficiencia.

Recuperación mineral: Es una medida de la eficiencia del proceso de concentración. Se define como el porcentaje del mineral valioso presente en la mena original que se recupera en forma de concentrado después del procesamiento. Una alta tasa de recuperación mineral indica un proceso de concentración efectivo.

Tamaños de partículas (granulometría): En el proceso de flotación, el tamaño de las partículas de mineral es un factor crucial. Las partículas de mineral deben ser lo suficientemente pequeñas para liberar los minerales valiosos de la ganga, pero no tan pequeñas como para que se pierdan en la pulpa. Por lo general, se busca un tamaño de partícula fino, con la mayoría de las partículas en el rango de micrómetros a milímetros.

PRINCIPIOS DE LA FLOTACION

La flotación es un proceso físico químico de separación de minerales o compuestos finamente molidos, basados en las propiedades superficiales de los minerales, mojabilidad o diferencia en la afinidad por el aire y por el agua. Las propiedades superficiales pueden ser modificadas a voluntad con ayuda de reactivos. El proceso de flotación aprovecha las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los minerales. Fundamentalmente importa el comportamiento de sólidos frente al agua.

Los metales nativos, sulfuros, especies como el grafito, carbón bituminoso, talco y otros son poco mojables por el agua y se llaman minerales hidrofóbicos. Por otra parte, los sulfatos, carbonatos, silicatos, fosfatos, etc., son hidrofílicos o sea mojables por el agua.

Fundamentos de flotación

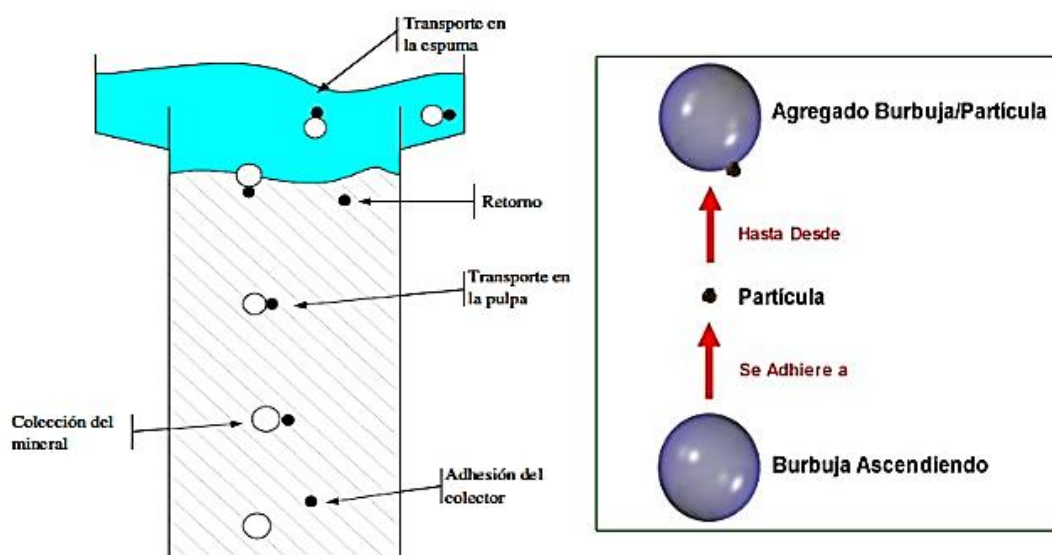
Minerales que no son mojables por el agua, se dicen que son **hidrofóbicos** (metales nativos, los sulfuros y otras especies) y que al mismo tiempo tienen afinidad o atracción por las burbujas de aire.

Minerales como los óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, etc., que generalmente representan la mayoría de los minerales estériles o ganga son **hidrofílicos**, o sea, mojables por el agua.

Mediante la flotación, se separan las partículas de sulfuros en forma de una espuma, y el resto de la pulpa constituye el relave. Las partículas que no se mojan con el agua, se van a adherir a las burbujas de aire y pasarán a la espuma. Las partículas de minerales que son mojables, van a caer al fondo del equipo de flotación, las que se eliminarán, posteriormente, en los relaves.

TIPOS DE FLOTACION

- **Flotación directa:** es aquella en la que el mineral valioso sale en la espuma y la ganga se queda en la pulpa.
- **Flotación indirecta:** en este tipo de flotación el mineral valioso se queda como la pulpa y la ganga es la que flota. Mayormente se aplica en la eliminación de impurezas minoritarias de un producto valioso, ya sea mineral o un concentrado proveniente de un proceso anterior.
- **Flotación Colectiva:** donde el concentrado contiene, a lo menos, 2 ó más componentes.
- **Flotación Selectiva:** hay una separación de compuestos complejos en productos que contengan no más de una especie individual.



Mecanismo de la flotación

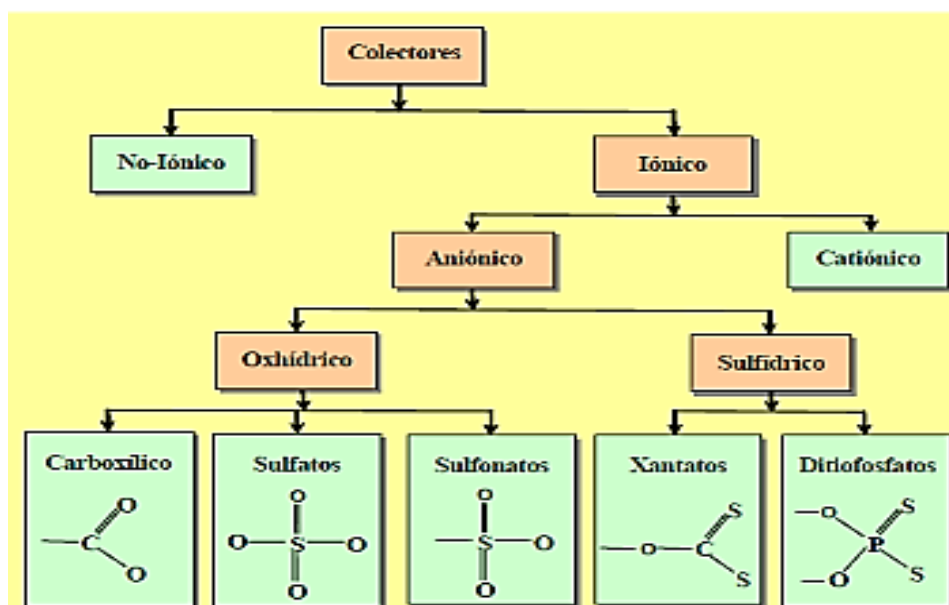
El mecanismo esencial de la flotación comprende la anexión de partículas minerales a las burbujas de aire, de tal modo que dichas partículas son llevadas

a la superficie de la pulpa mineral, donde pueden ser removidas. Este proceso abarca las siguientes etapas:

1. El mineral es molido húmedo hasta aproximadamente 48 mallas (297 micrones)
2. La pulpa que se forma, es diluida con agua hasta alcanzar un porcentaje de sólidos en peso entre 25% y 45%.
3. Se adiciona pequeñas cantidades de reactivos, que modifican la superficie de determinados minerales.
4. Otro reactivo, específicamente seleccionado, se adiciona para que actúe sobre el mineral que se desea separar por flotación. Este reactivo cubre la superficie del mineral haciéndola aerofílica e hidrofóbica.
5. Luego se adiciona otro reactivo, que ayuda a establecer una espuma estable.
6. La pulpa químicamente tratada en un depósito apropiado, entra en contactos con aire introducido por agitación o por la adición directa de aire a baja presión.
7. El mineral aerofílico, como parte de la espuma, sube a la superficie de donde es extraído. La pulpa empobrecida, pasa a través de una serie de tanques y celdas, con el objetivo de proveer tiempo y oportunidad a las partículas de mineral para contactar burbujas de aire y pueden ser recuperadas en la espuma

PRINCIPALES REACTIVOS USADOS EN LA FLOTACION

Los reactivos usados en la flotación se clasifican en **colectores**, **modificadores** (activadores, depresores y modificadores del medio) y **espumantes**.



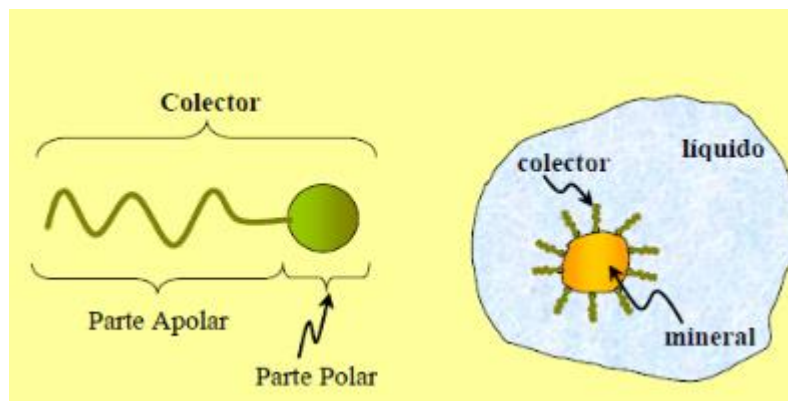
COLECTORES

Compuestos orgánicos cuya función es tornar hidrofóbicas las superficies de los minerales. Los más comunes son iónicos siendo compuestos heteropolares solubles en agua. Su grupo polar es la parte activa que se adsorbe (física o químicamente) en la superficie de un mineral. La parte apolar se orienta hacia la fase líquida, sin interactuar con ésta. Se clasifican como se observa en la figura anterior en iónicos y no iónicos.

- Colectores iónicos:

Compuesto orgánico heteropolar que se absorbe selectivamente sobre la superficie de las partículas, haciendo que estas se vuelvan hidrófobas (aerofilas).

La parte polar del ion se adsorbe en la superficie del mineral. Por otra parte, la parte apolar, constituida por una cadena de hidrocarburos, queda orientada hacia la fase acuosa, dando el carácter hidrófobo al mineral.



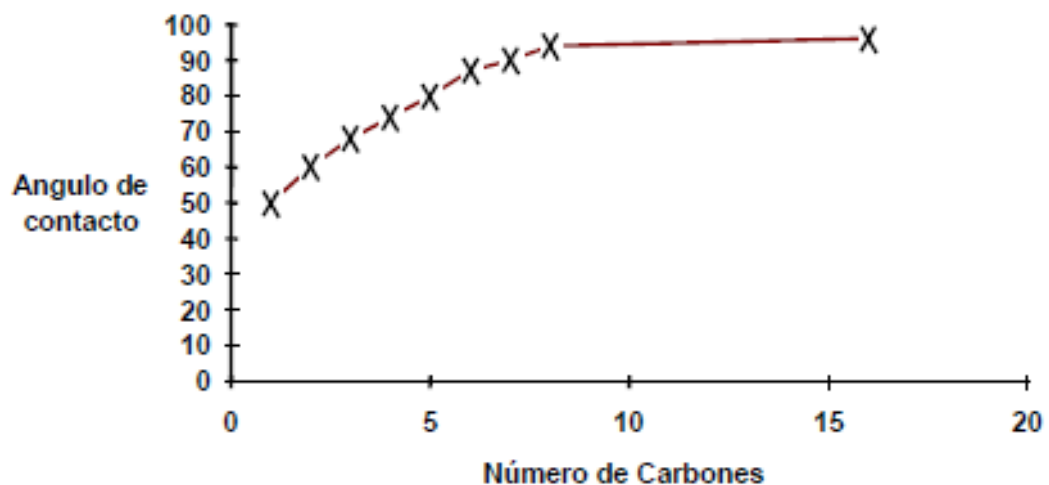
El largo de la cadena de hidrocarburos está asociado a la mayor o menor repelencia al agua. La parte que se adhiere al mineral dará la fuerza y selectividad. Lo anterior explica la diferencia de comportamiento de los diferentes colectores.

Por lo tanto, la colección estará íntimamente condicionada por la naturaleza de la superficie del mineral y de la estructura química del colector. La unión química entre el colector y el mineral deberá ser más fuerte que la que pueda existir entre el mineral y el agua.

Los niveles de molienda o de liberación de partículas nunca serán perfectos para suplir las posibles contaminaciones de las superficies mineralógicas que impiden una adecuada unión, de ahí la necesidad de buscar el colector más eficiente.

El ángulo de contacto no es una característica inherente del mineral, sino del grupo apolar (cadena hidrocarburos) del agente colector, por lo tanto, mientras

más larga sea la cadena de hidrocarburos mayor será el ángulo de contacto y, por lo tanto, mayor será la hidrofobicidad adquirida por el mineral.



Las partículas de mineral convertidas en hidrófobas por la acción del colector se adhieren a las burbujas de aire que van ascendiendo por la pulpa. Por lo tanto, la recuperación de mineral aumentará en la medida que aumente el ángulo de contacto.

Por lo general, solo se requiere una capa monomolecular de colector en la superficie del mineral. Incluso bastará con tener zonas de adsorción locales en la superficie para que la partícula se adhiera a la burbuja de aire y pueda ser flotada. Lo anterior se puede explicar por la rugosidad, forma irregular y la variedad mineralógica de la superficie del mineral.

Se pueden distinguir dos tipos de colectores, dependiendo de la carga de este: catiónicos y aniónicos.

- Colectores no iónicos:

Se usan para la flotación de minerales muy hidrofóbicos, como carbón, grafito, azufre, talco. Son del tipo hidrocarburos saturados o no saturado (Kerosene y/o Aceites) que no poseen grupos polares.

El problema es que debido a la ausencia de grupos polares y iónicos, estos colectores no tienen medios propios para adsorberse sobre las superficies minerales y tienen que ser agregados en combinación con otros compuestos orgánicos heteropolares para que puedan ser de gran utilidad.

Debido a su insolubilidad en agua, la distribución de los hidrocarburos ofrece ciertas dificultades y debido a su efecto negativo sobre la espuma, que se pone

frágil e inestable junto a la adición de los reactivos heteropolares, es necesario aplicar métodos mecánicos para su mejor distribución por dispersión.

El problema de los hidrocarburos en los circuitos de flotación tiene que abordarse no solamente desde el punto de vista de su adición intencionada. Otro problema es la contaminación de la pulpa con aceite y grasas de lubricación provenientes de las distintas etapas de la planta, esta adición no es considerada. Particularmente vale la pena recordar esto cuando hay dificultades con la espuma o trastornos generales con los reactivos de flotación.

En cuanto a su función, es reforzar las propiedades hidrofóbicas de algunos minerales y las propiedades de algunos colectores. Se agrega en forma de emulsión todos los reactivos oleosos se agregan en mollienda para darle el tiempo suficiente a reaccionar antes de llegar a la etapa de flotación.

Aspectos prácticos de operación con colectores

El exceso de colector, da como resultado una espuma sucia, que rebasa dificultosamente y, a la vez, cargada de elementos estériles. La deficiencia de colector, provoca una espuma pobremente mineralizada, provocando, a la vez, mermas en las recuperaciones.

Ejemplos de colectores;

_ XANTATOS

Son sales del ácido xantático, que se producen al reaccionar un alcohol con disulfuro de carbono. Características principales:

- Bajo costo, aprox. 1.1 – 1.2 US\$/kg
- Fuertes propiedades colectoras y buena selectividad.
- Reactivos fundamentales para la flotación de sulfuros comunes (Cu, Zn, Pb, Fe, Co, Ni, etc.), para metales nativos (Cu, Ag, Au) y para minerales oxidados previamente sulfidizados.
- Se descomponen a pH bajos. Se usan en circuitos a pH alcalino o neutro.
- Son sólidos (también líquidos).
- Dosificación usual 10 – 150 g/t. Alimentación en solución al 10 – 20% en peso.

_ Reactivo: SF-113

Usos: es el más usado de los xantatos en su aplicación como colector para la flotación colectiva de minerales sulfurados de cobre, molibdeno y otros.

Preparación y dosificación: debe ser usado preferentemente en soluciones acuosas siendo las más usuales al 10% en peso (esto quiere decir que, si queremos preparar 100 l de solución tendremos que agregar 10 k de este reactivo) y las dosificaciones más usuales están entre 25 y 150 g/t de mineral tratado.

_ Reactivo: SF-114

Usos: es un colector de amplio uso en la flotación colectiva de minerales de oro y plata, así como también de cobre, fierro y molibdeno.

Preparación y dosificación: debe ser usado preferentemente en soluciones acuosas siendo las más usuales al 10% en peso y su dosificación debe estar entre 25 y 150 g/t de mineral tratado

_ AERO 3302 promotor

Usos: Excelente colector para la molibdenita y a menudo usado en menas minerales que contengan cobre y molibdeno.

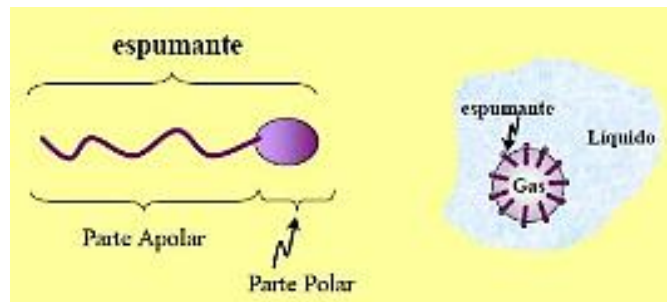
Preparación y dosificación: colector aceitoso, no soluble en agua (agregar en circuito de molienda) y su dosificación debe estar entre 2 y 25 g/t de mineral.

ESPUMANTES:

Reactivo encargado de proveer estabilidad a la burbuja. Dentro de los equipos se forma espontáneamente coalescencia, por lo que el espumante también se encargará de reducir este fenómeno para que las burbujas no crezcan desmedidamente.

Los líquidos puros (agua) no producen una espuma estable cuando se agitan con aire, entonces las burbujas generadas colapsan muy rápido. Sin embargo, la adición de pequeñas cantidades de sustancias activas como alcoholes, forman una espuma estable con la adición de aire disperso. La resistencia de la espuma dependerá de la intensidad en la interacción del espumante con el agua en la zona líquido-gas.

Al igual que los colectores, estos están constituidos por una “cabeza” polar que se orienta hacia la fase líquida y una “cola” de hidrocarburos que se orienta a la fase gas.



Las características importantes:

1. En mínimas concentraciones debe generar espumas de suficiente volumen y estabilidad.
2. Debe tener bajas condiciones colectoras.
3. Debe dispersarse en el agua con facilidad.
4. Una vez que la espuma que retiene al mineral es retirada de la celda de flotación, debe romperse fácilmente.
5. Generar burbujas pequeñas de 1 a 2 mm.

Aspectos prácticos de operación con espumantes

El exceso de espumante, produce un sobre volumen de espuma, la que arrastra una gran cantidad de estériles. Si se agrega exceso de espumante, se desfavorece la adhesión partícula burbuja. La deficiencia de espumante, produce en las celdas una escasa formación de espuma.

Pasada una cierta concentración de espumante no se producen cambios particulares y al pasar a una concentración más alta empiezan a sentirse efectos negativos, la espuma empieza a decaer. Al llegar a la saturación del espumante en el líquido la espuma desaparece completamente.

Respecto al espesor de la capa de espuma:

- Muy grande, cuando se tiene un exceso de reactivo
- Muy pequeña, si la cantidad es insuficiente

MODIFICADORES:

Son reactivos que se usan cuando se necesita mejorar las condiciones de colección y/o cuando se necesita mejorar la selectividad del proceso. Bajo esta categoría se incluye: Activadores, depresantes y los reguladores de PH.

- Activador:

Los reactivos de este tipo sirven para aumentar la adsorción de los colectores sobre la superficie de los minerales o para fortalecer el enlace entre la superficie y el colector.

Formas de activar una superficie mineral: se puede renovar y limpiar la superficie de un mineral afectada por un proceso secundario tal como es la oxidación y floculación de lamas. Por ejemplo la aplicación de un ácido para disolver las capas oxidadas de los sulfuros, o también, es formar en su superficie una capa favorable para la adsorción del colector. Un ejemplo de este caso es la sulfidización de los óxidos metálicos antes de la aplicación de colectores sulfhídricos.

Finalmente, la activación se puede efectuar al reemplazar en la red cristalina los iones metálicos por otros que forman un compuesto más firme con los colectores.

Hay distintas maneras de activar una superficie, éstas pueden ser:

- Limpiando la superficie del mineral afectado, por ejemplo, por un proceso secundario de oxidación. En este caso se puede agregar algún ácido para disolver las capas oxidadas de los sulfuros.
- Formando en la superficie una capa particularmente favorable para la adsorción del colector. Un ejemplo de este caso es la sulfidización (NaSH) de los óxidos metálicos antes de la aplicación de colectores sulfhídricos.
- Reemplazando en la red cristalina los iones metálicos por otros que formen un compuesto más firme con los colectores.

- Depresor:

Su función es la de disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que pueden hidrofobizarla.

Un ejemplo es introducir en la pulpa un ion que compite con el ion colector por la superficie del mineral. En este caso, naturalmente, si el colector es de tipo aniónico el ion del depresor en cuestión también tiene que ser un anión y viceversa.

Ejemplos de depresantes:

✓ Sulfuro de sodio, Na_2S , deprime a los sulfuros. Se usa por ejemplo para deprimir los sulfuros de cobre en la flotación selectiva de Cu -Mo.

✓ Sulfhidrato de sodio, NaSH , deprime a los sulfuros. Se usa por ejemplo para deprimir los sulfuros de cobre en la flotación selectiva de Cu -Mo.

✓ Cianuro de sodio, NaCN , no actúa sobre la galena (PbS) ni la molibdenita, pero deprime a la blenda (ZnS), a la piritita y a la calcopiritita (50-500 g/t).

- Regulador de pH:

El circuito alcalino se usa con mayor frecuencia en las operaciones industriales porque los reactivos son más estables en estas condiciones y además precipitan las sales de iones pesados, purificando la pulpa.

Para regular el pH, se usa principalmente ácido sulfúrico para acidificar por su bajo costo, gran disponibilidad, y para alcalinizar se usa cal, hidróxido de sodio y ceniza de soda. La cal es más barata, pero a veces, tiene el inconveniente de flocular pulpas. El hidróxido de sodio es un excelente dispersante, pero es de mayor costo que la cal. Finalmente, la ceniza de soda es un reactivo suave y muy empleado por el efecto tampón que produce en las pulpas.

FASES DE LA FLOTACION

La flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Una vez ingresada la pulpa al proceso, se inyecta el aire para poder formar las burbujas, que es la base sobre la cual se adhieren las partículas sólidas.

- Fase líquida (agua).
- Fase gaseosa (aire).
- Fase sólida (mineral, es la más variable).

INTERFACES DE LA FLOTACION

Las interfaces de la flotación mineral son las superficies de separación entre las fases presentes en un sistema de flotación de minerales. En este contexto, las interfaces son áreas donde interactúan el mineral a ser recuperado, el agua y los reactivos químicos utilizados en el proceso de flotación. Estas interfaces son críticas para el éxito del proceso de separación, ya que es en estas regiones

donde ocurren las interacciones que conducen a la selectividad de los minerales y su posterior recuperación.

- Interfase sólido-líquida.

Es la región donde las partículas minerales están en contacto directo con el agua y los reactivos químicos. Las partículas minerales hidrofílicas pueden ser recubiertas por colectores hidrofóbicos en esta interfaz, lo que las hace repeler el agua y facilita su separación del mineral útil.

- Interfase gas-líquido.

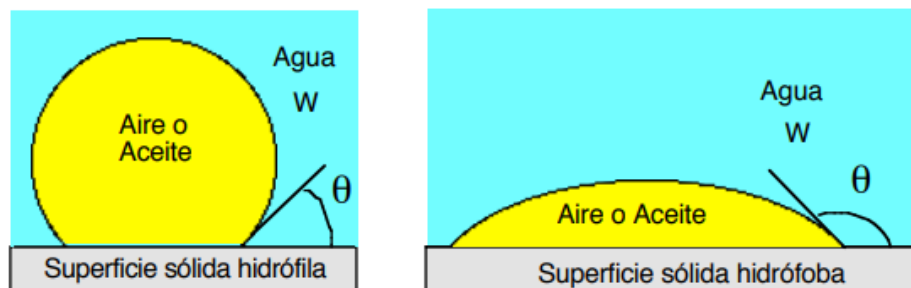
Esta interfaz se forma en la superficie del agua cuando se introduce aire a través de burbujas. Las burbujas de aire se adhieren a las partículas minerales hidrofóbicas, creando flóculos de partículas y burbujas que ascienden a la superficie.

- Interfase sólido-gas.

Es el área de contacto entre las burbujas de aire y las partículas minerales. Aquí, los colectores químicos adheridos a las burbujas de aire interactúan con las partículas minerales hidrofóbicas, promoviendo su unión y flotación hacia la superficie.

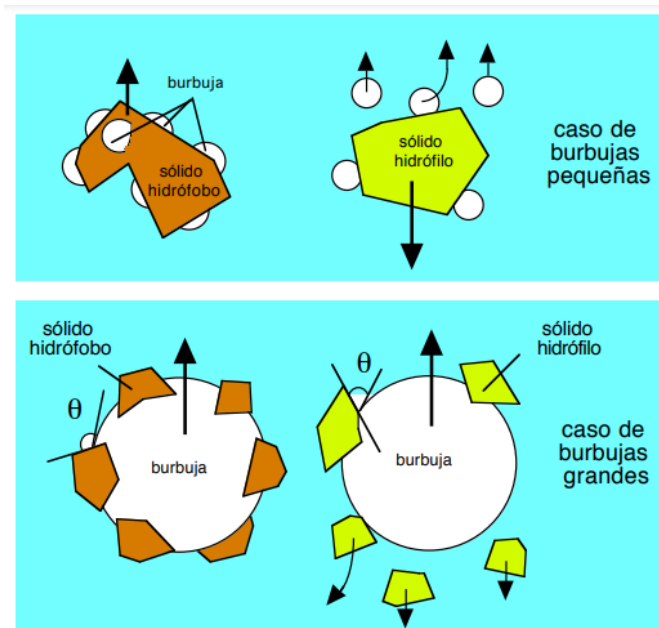
FENÓMENOS INTERFACIALES

Cuando dos fluidos están en contacto con un sólido, se puede definir la mojabilidad del sólido respecto a cada uno de los fluidos mediante el ángulo de contacto. En el presente caso los dos fluidos son el aire (A) y el agua (W) o un aceite (O) y por lo tanto se hablará de mojabilidad hidrófila o hidrófoba.

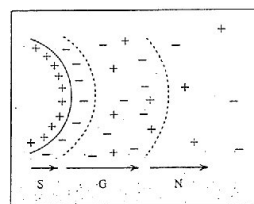


Si el ángulo de contacto entre el agua (W) y el sólido o partícula, es inferior a 90° , la superficie es hidrofílica; si es mayor que 90° , la superficie es hidrófoba. Cuando una superficie es hidrófoba, las gotas de aceite o las burbujas de aire tienen tendencia a "pegarse" a la superficie sólida. La probabilidad de despegue

o de arranque de una burbuja en un medio agitado es mucho menor si esta burbuja está aplastada sobre la superficie (arriba izq.), que si presenta un gran ángulo de contacto (arriba der.). Lo mismo ocurre en el caso en que las partículas son más pequeñas que las burbujas. Si la superficie sólida está hidrofobada (abajo izq.), las partículas tienden a penetrar en el interior de la burbuja, resultando así abrigadas de las turbulencias externas que puedan favorecer su despegue de la burbuja, como en el caso de una partícula hidrófila (abajo der.).



En la siguiente figura se puede apreciar las interacciones o capas formadas desde un sólido o partícula hasta el seno de la fase acuosa, de esta forma se logra ver como la fuerza de atracción que posee una partícula, va disminuyendo a medida que nos alejamos más de ella hacia el seno de fase acuosa. En la capa fija, la más cercana a la partícula posee características de fuerte adherencia y un mayor ordenamiento de moléculas de agua, la capa difusa es menos ordenada que la anterior debido a la menor fuerza de atracción generada por la partícula y por último una capa en equilibrio de iones donde las fuerzas de atracción de la partícula son nulas, esta capa pertenece al seno de la fase acuosa.



S - Capa Fija
 G - Capa Difusa
 N - Iones en Equilibrio en solución

CELDAS DE FLOTACION

Una celda de flotación es un equipo que tiene como función separar en forma eficiente material valorable desde la pulpa. En las celdas de flotación se hace burbujear oxígeno desde el fondo de manera que las partículas presentes en la pulpa se adhieran a las burbujas de aire y así suben con ellas y se acumulan en una espuma. La espuma rebasa hacia canaletas que bordean las celdas y que la llevan al proceso de decantación.

Características que deben reunir las celdas de flotación

- 1) Facilidad para la alimentación de la pulpa en formas continua.
- 2) Mantener la pulpa en estado de suspensión.
- 3) No debe ocurrir la sedimentación de las partículas.
- 4) Separación adecuada del concentrado y del relave.

Eficiencia de las celdas de flotación

La eficiencia de una celda de flotación se determina por los siguientes aspectos:

- 1) Tonelaje que se puede tratar por unidad de volumen.
- 2) Calidad de los productos obtenidos y recuperaciones.
- 3) Consumo de energía eléctrica, reactivos, espumantes y otros reactivos, con el fin de obtener los resultados óptimos.
- 4) Gastos de operación y mantención por tonelada de mineral tratado.

Las celdas de flotación se clasifican dos tipos, mecánicas y neumáticas.

- **Celdas mecánicas:**

La celda mecánica está constituida por un depósito en forma de paralelepípedo o forma cúbica, de distintas capacidades, con un mecanismo rotor-estator para la dispersión del sólido y el aire. Las celdas se juntan en serie y forman un banco de flotación agrupándose de diferentes formas. En las celdas de flotación se pueden distinguir tres zonas típicas:

1. Una zona de alta turbulencia, a nivel del mecanismo de agitación.
2. Una zona intermedia.
3. Una zona superior

En la zona de alta turbulencia o zona de agitación se producen los choques para la adhesión partícula/burbuja. En esta zona debe existir las condiciones hidrodinámicas y físico-químicas que favorezcan el contacto.

La zona intermedia se caracteriza por ser una zona de relativa calma, lo que favorece la migración de las burbujas hacia la parte superior de la celda.

La zona superior corresponde a la fase espuma, está formada por burbujas compuestas de pulpa. La pulpa descarga por rebalse natural, o con la ayuda de paletas mecánicas.

Cuando la turbulencia en la interfase pulpa/espuma es alta, se produce una contaminación debido al arrastre significativo de pulpa hacia la espuma.

En general, la espuma de flotación debe ser lo suficientemente estable como para retener la masa de mineral, y lo suficientemente frágil para romperse al caer a la canaleta de concentrados, y no producir trastornos en su transporte. Estos mecanismos sugieren las siguientes variables que controlan la espuma:

1. Tipo y dosificación del espumante.
2. Flujo o densidad de flujo de aire.
3. Altura de rebose o altura de la espuma.
4. Altura de remoción de la espuma.



Las funciones más importantes de las celdas de flotación son:

1. Mantener todas las partículas, aun las más gruesas o las más densas, en suspensión dentro de la pulpa. Para conseguir lo anterior, la pulpa debe ser mezclada o sometida a circulación dentro de la celda a altas velocidades, de modo de superar las velocidades de sedimentación de las partículas más gruesas.
2. La aireación, que involucra la diseminación de finas burbujas de aire, con la finalidad de permitir la adhesión selectiva y el transporte de las partículas de mineral deseado en la espuma.
3. Mantener la pulpa en condiciones de quietud, inmediatamente debajo de la columna de espuma. Las celdas se diseñan de modo de prevenir la turbulencia en las cercanías de la espuma, puesto que se produce una pérdida de estabilidad de la espuma y baja la recuperación.
4. Proveer un eficiente transporte de la pulpa alimentada a la celda y de la salida del concentrado y del relave desde el circuito.
5. Proveer un mecanismo de control de la profundidad de la pulpa y la profundidad de la columna de la espuma, la aireación de la celda es idealmente del grado de agitación de la pulpa.

- **Columnas de flotación (celdas neumáticas):**

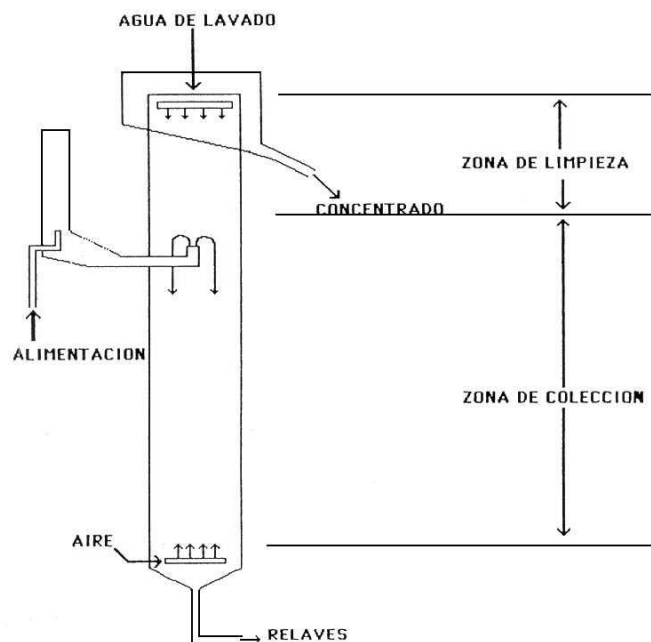
En años recientes, hay un considerable aumento en el uso y aplicación de las columnas de flotación en la recuperación y concentración de minerales, acelerando el interés en métodos alternativos más económicos y eficaces.

La columna de flotación ha constituido uno de los desarrollos más destacados de los últimos tiempos en el campo de la concentración de minerales. Las celdas columnares resultan especialmente atractivas en circuitos de limpieza, ya que, es posible efectuar en una sola etapa, varias de estas etapas que anteriormente se realizaban en celdas mecánicas convencionales.

En las columnas de flotación la alimentación es inyectada a aproximadamente $2/3$ de altura de la columna, el concentrado sale por la parte superior de la celda, mientras que, la cola o relave se recoge por la parte inferior de la columna.

Básicamente, la columna de flotación consiste de dos zonas: a) la zona de colección también conocida como zona de recuperación, y la zona de limpieza sobre la interface (también conocida como zona de espuma). En la zona de colección, las partículas de la suspensión de alimentación son conectadas en

contracorriente con las burbujas producidas por un distribuidor de burbujas que se encuentra en el fondo de la columna. Las partículas hidrofóbicas colisionan con las burbujas, se unen a ellas y son transportadas a la zona de limpieza. Las partículas hidrofílicas y menos hidrofóbicas son removidas por el fondo de la columna. En la zona de limpieza se agrega agua cerca del tope de la espuma, lo que provee un flujo neto de líquido descendente. La columna ha probado ser particularmente atractiva en aplicación de limpieza y puede alcanzar en una sola etapa aumentos de ley de concentrado comparables al de varias etapas ejecutadas en celdas mecánicas, a menudo con mejoras en la recuperación.



Hay tres aspectos en el diseño que distinguen las columnas de flotación de las celdas mecánicas:

1. El agua de lavado (adicionada al tope de la columna).
2. La ausencia de la agitación mecánica.
3. El sistema de generación de burbujas de aire.

Las variables operacionales más importantes de una columna de flotación son las siguientes:

- Flujo de aire.
- Agua de lavado.
- Altura de la espuma.
- Tiempo de residencia de la pulpa.
- Porcentaje de sólidos en la alimentación.

FLOTACION POR ESPUMAS

Este tipo de flotación es el que ha sobrevivido y es la técnica más empleada en la concentración de minerales.

Como se mencionó, la flotación por espuma se basa en la repelencia natural o inducida de los minerales al agua (hidrofobicidad). El principio de funcionamiento de un equipo de flotación esencialmente consta de mecanismos de inyección de burbujas de aire y de mantenimiento en suspensión de las partículas. El tiempo de flotación es el tiempo promedio de retención de las partículas en la celda. Es el tiempo suficiente para que las partículas hidrófobas se adhieran a las burbujas de aire y floten en la superficie. Este tiempo puede variar desde algunos segundos hasta varios minutos. El porcentaje de sólidos en peso es también muy importante y este puede estar entre 15 40 %.

ETAPAS DE FLOTACION

Sus objetivos involucran una alta recuperación de las especies útiles con la mayor selectividad posible. Para cumplir con estos objetivos los circuitos están divididos en etapas destinadas a que se consigan esos propósitos, y en estas etapas las celdas de flotación están ordenadas en bancos de celdas y en columnas de flotación. Así, en las plantas concentradoras existe el banco de celdas rougher, las celdas columnares de la etapa cleaner, el banco de celdas cleaner-scavenger, etc.

ROUGHER

La etapa rougher es la etapa primaria, en ella se logran altas recuperaciones y se elimina gran parte de la ganga. Debido a que esta etapa se opera con la mayor granulometría posible, el concentrado rougher está constituido por materiales medios, por lo cual las leyes de este concentrado son bajas y requieren una etapa de limpieza que seleccione el concentrado. Al circuito rougher llega la alimentación del proceso de flotación, y en algunas oportunidades, concentrados de la etapa scavenger o colas de la etapa cleaner. Las colas de la etapa rougher pueden ser colas finales del proceso, o bien, alimentación a un circuito scavenger.

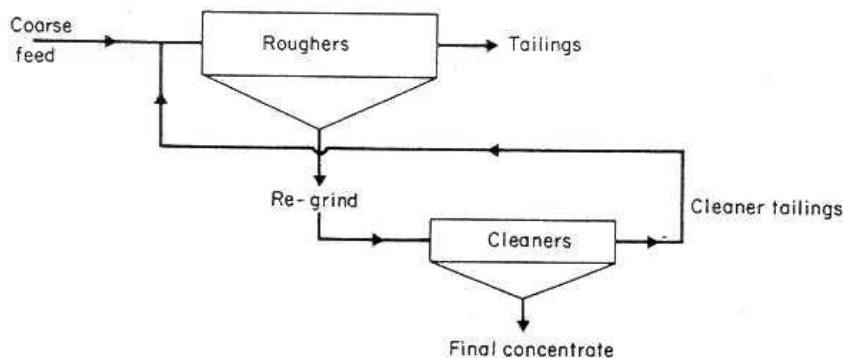
SCAVENGER

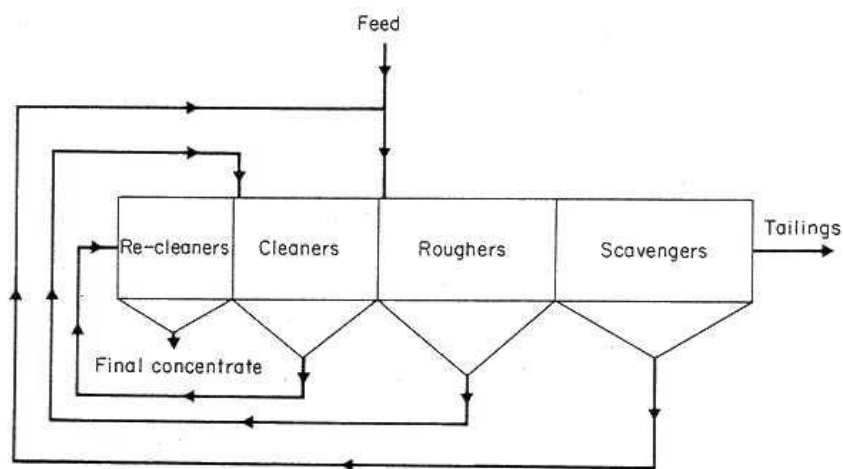
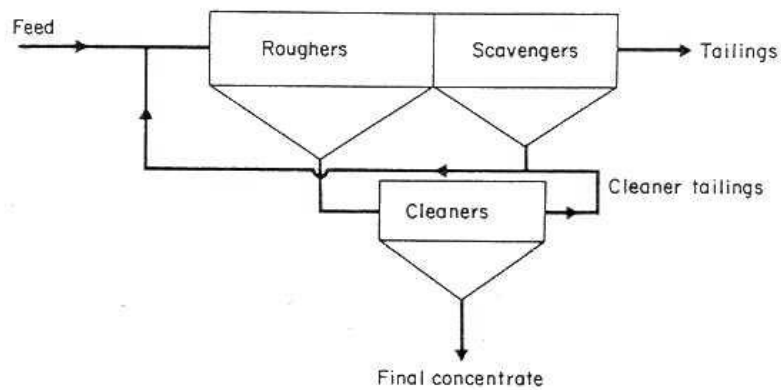
La etapa scavenger o de barrido tiene como objetivo aumentar la recuperación de las especies útiles desde las colas de la etapa rougher. Producen colas finales del proceso y un concentrado de baja ley que puede juntarse a la alimentación del proceso de flotación, o a una etapa de remolienda y su posterior tratamiento.

CLEANER / RECLEANER

Los circuitos cleaner o de limpieza, junto a los circuitos recleaner, tienen como objetivo aumentar la ley de los concentrados rougher, a fin de alcanzar un producto que cumpla con las exigencias del mercado, o bien, de la etapa del proceso siguiente a que será sometido el concentrado. Dado que la etapa cleaner es selectiva, normalmente el concentrado rougher es sometido a una etapa de remolienda previa, para alcanzar la mayor liberación posible de las especies útiles. antes de alimentarse al circuito cleaner.

En las plantas concentradoras de cobre se utilizan circuitos cleaner-scavenger, los cuales se alimentan con las colas de la etapa cleaner. En general, el concentrado de la etapa cleaner- scavenger se junta a los concentrados rougher y alimentan la etapa cleaner. Las colas de los circuitos cleaner-scavenger, dependiendo de la ley que posea se juntan a las colas finales.





VARIABLES DEL PROCESO DE FLOTACION

- **Factor mineral:**

Aquí cuentan la composición química de los minerales útiles y de la ganga, su diseminación, dureza, fenómenos secundarios de oxidación y meteorización, impurezas que acompañan a la mena, finalmente los antecedentes geológicos del yacimiento y su método de explotación. Aparte de la oxidación es de considerable importancia la dureza del mineral y la naturaleza de sus acompañantes.

Propiedades superficiales para el proceso de flotación dependen:

1. Naturaleza del mineral.
2. Heterogeneidad (liberación, diseminación, asociación)
3. Forma de las partículas.
4. Topografía de las partículas (rugosidad)

La superficie de los minerales es hidrofílica debido a las cargas eléctricas asociadas a la polarización generada durante el proceso de reducción de tamaño del mineral.

Dio proceso fractura el mineral y, por lo tanto, rompe enlaces químicos razón por la cual quedan cargas eléctricas expuestas debido a la polarización del mineral. Estas cargas se asocian con los iones de las moléculas de agua, que rodean las partículas para lograr el equilibrio eléctrico.

- **Factor granulométrico:**

Existe un tamaño máximo de las partículas que se pueden flotar. Este tamaño máximo, naturalmente, depende de la naturaleza del mineral mismo y su peso específico. Hay mala flotación en los gruesos porque hay una mala liberación y porque la burbuja no tiene capacidad de transporte (la partícula se desprende por su peso o por el movimiento centrifugo). También hay mala flotación en los finos porque no poseen suficiente energía cinética, debido a su masa, para romper la pared de la burbuja y hacer contacto con el aire.

Influencia de las lamas: el daño del material lamoso es de carácter doble: las partículas de diámetro pequeño flotan mal, y las lamas perjudican la flotación de las partículas de tamaño adecuado.

- **Factor pulpa:**

La densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos en la flotación de minerales viene determinada desde la etapa molienda/clasificación. Es raro que la pulpa se ajuste a un porcentaje de sólidos antes de entrar a la etapa de flotación, sin embargo, es un factor importante, ya que la flotación de los minerales ocurre en forma eficiente cuando la pulpa presenta un valor adecuado de porcentaje de sólidos.

La densidad de la pulpa afecta el tiempo de residencia del mineral en las etapas de flotación, y de esta forma en la capacidad del circuito. En general, la etapa de flotación las plantas concentradoras de cobre operan con un porcentaje de sólidos comprendido entre 30 y 45%

- **Factor agua:**

Las aguas naturales, particularmente las subterráneas, casi siempre llevan contaminaciones de sales inorgánicas. Aparte de contaminaciones inorgánicas las aguas naturales pueden tener contaminaciones orgánicas que provienen de la tierra (humus) o de la descomposición de materias orgánicas. Estas

contaminaciones pueden ser muy peligrosas particularmente cuando forman coloides orgánicos que se adhieren con gran facilidad a las superficies de los minerales y las pasivizan.

- **Factor tiempo:**

La flotación consta esencialmente de las siguientes etapas: 1) adsorción de los reactivos sobre las superficies minerales; 2) encuentro de las partículas preparadas con las burbujas de aire, también previamente preparadas; 3) transporte de las partículas hasta la superficie de la celda de flotación. La adsorción de los reactivos depende de su composición, solubilidad, disociación, concentración y de la temperatura de la pulpa. En primera instancia van a flotar las partículas que son 1) más hidrofóbicas, 2) mejor liberadas y 3) de un tamaño adecuado. Una vez que estas flotan, empiezan a flotar las menos hidrofóbicas, menos liberadas y de mayor tamaño.

- **Factor pH:**

El pH es la variable de control más utilizada en el proceso de flotación, ya que resulta fundamental en la recuperación y selectividad, así como, en la depresión de minerales. El proceso de flotación es sumamente sensible al pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Los reactivos de flotación, principalmente, los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH. La regulación del pH en la flotación se realiza con cal. Este reactivo es importante, ya que, además de actuar como modificador del pH, es un depresor de pirita en la flotación selectiva de minerales de cobre.

FLOTACION DE SULFUROS

Una parte de los minerales metálicos se encuentran en forma de sulfuros que son fuente importantísima de una serie de metales no ferrosos, tales como el cobre, zinc, plomo, níquel, cobalto, molibdeno y otros.

Los sulfuros metálicos tienen propiedades fuertemente hidrofóbicas, de manera que junto con los metales nativos, son los minerales más fácilmente flotables. Su flotación, generalmente, no presenta muchas dificultades por cuanto existen buenos colectores selectivos. Los únicos problemas de verdadera importancia práctica que surgen en la flotación de los sulfuros son las separaciones entre ellos mismos.

FLOTACION DE SULFUROS DE COBRE

La mayor parte proviene de los sulfuros tales como calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S), bornita (Cu_5FeS_4), covelina (CuS), tenantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), tetraedrita ($(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), enargita (Cu_3AsS_4) y varios otros. El resto proviene de minerales oxidados tales como la cuprita (Cu_2O), malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), azurita ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), crisocola ($(\text{Cu}, \text{Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_4\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$), calcantita, brochantita y otros.

En forma general, los sulfuros de cobre son minerales de flotabilidad buena y pareja. Su flotabilidad natural empieza a disminuir solo cuando son afectados por la oxidación o por algunos fenómenos secundarios como son, por ejemplo, la depresión por lamas y productos de descomposición.

Los sulfuros de cobre, normalmente, están acompañados por los de hierro, principalmente en forma de pirita (FeS). La pirita también es muy flotable, particularmente en circuito ácido. Ya que existe una proporción excesiva, generalmente se considera como un producto de desecho, y como acompaña la mayoría de los sulfuros de cobre hay que tomarla en cuenta en la metalurgia general de sus minerales.

Los minerales sulfurados de cobre flotan sin ninguna dificultad. La flotación se efectúa normalmente en un circuito alcalino de pH 9, para deprimir la pirita que los acompaña. Si hay problemas serios en la depresión de la pirita, se usa una alcalinidad más alta que puede llegar a pH 11,5 y 12, además la depresión se ayuda con pequeñas cantidades de cianuro. La alcalinidad se produce

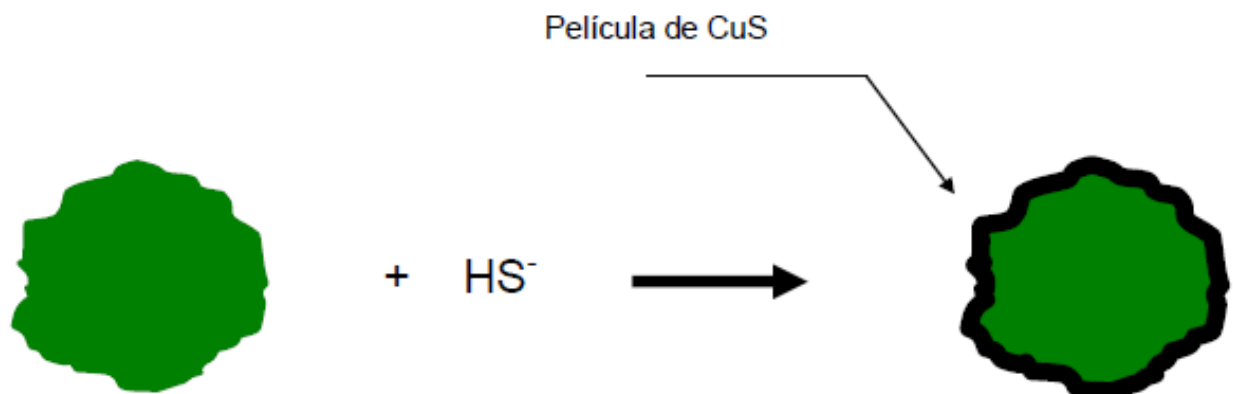
normalmente con cal, por razones económicas, pero hay casos en que se usa carbonato de sodio.

FLOTACION DE SULFUROS DE COBRE PARCIALMENTE OXIDADOS

Los sulfuros son una excepción, la mayoría se presenta en con cierto grado de oxidación, sin embargo, cuando la oxidación no ha alcanzado proporciones serias y cuando no es superficial, en forma de películas oxidadas, las recuperaciones no sufren mucho, de tal manera que cuando los minerales oxidados representan meno 5 – 8 % del cobre total, los rendimientos se mantienen normales y las recuperaciones son superiores a 90%. Esta situación cambia notablemente cuando la oxidación es más seria.

SULFIDIZACION

Consiste en la adición de sulfuro de sodio en cantidades que pueden variar entre 1 y 4 kg en el acondicionador, antes de la flotación. Los óxidos y carbonatos se cubren con una fina película de sulfuro de cobre y flotan con mayores recuperaciones. Sin embargo, como esta película es demasiado frágil, es necesario agregar reactivos poco a poco. Con esto se evita el desprendimiento de la película y su renovación. A modo de ejemplo se tiene la especie Atacamita, se ha comprobado que este mineral consume mucho colector y sin embargo su flotabilidad es baja. Al agregarse sulfuro de sodio a la pulpa, se produce, sobre la superficie del mineral, la siguiente reacción química:



Y de allí en adelante el mineral se comporta como si fuese un sulfuro de cobre respondiendo a la flotación con los colectores usuales.

FLOTACION DE METALES NATIVOS

Los metales nativos tienen una alta flotabilidad, que es a veces, superior a la de los sulfuros y no presentan problemas. Si la ley no es muy baja no hay ninguna dificultad en obtener recuperaciones, superiores a 90%.

En el caso de cobre metálico, la única dificultad es la de moler los grandes trozos de metal, debido a su ductilidad. Por eso se hace una concentración gravitacional del producto grueso y una flotación de los finos y de los relaves de la concentración anterior.

Las partículas de oro libre flotan bien con un colector débil, pero si está asociado a partículas de pirita se recurre a colectores más enérgicos.

Si hay partículas de oro libre mayores que 200 micrones, es muy difícil extraerlas por flotación. Previamente debe haber una amalgamación o separación en concentradores gravitacionales durante la molienda.

Si se trata de flotar solamente partículas de oro libre, es necesario dar estabilidad a la espuma.

CIRCUITOS DE FLOTACIÓN

Constan de varias etapas, en general, en la flotación de minerales de cobre se utilizan las etapas rougher, cleaner, cleaner-scavenger y recleaner. Sin embargo, en la flotación de otros minerales podrían encontrarse etapas rougher, scavenger, cleaner y recleaner.

La etapa primaria de flotación (etapa rougher) se alimenta con el rebalse de los Hidrociclones de un circuito cerrado molienda/clasificación. Por otra parte, es común que el concentrado de la etapa rougher se someta a una remolienda antes de ingresar a la etapa cleaner.

En relación a las celdas de flotación utilizadas en los circuitos, las celdas mecánicas son utilizadas en las etapas rougher, scavenger y cleaner-scavenger, mientras que, columnas de flotación se aplican a las etapas cleaner y recleaner. Sin embargo, existen algunas concentradoras que usan celdas mecánicas en la etapa cleaner y celdas columnares en la etapa recleaner. En la actualidad, la tendencia es aumentar el tamaño de los equipos hacia celdas mecánicas de volumen superior a los 4000 pies³, originada por la disminución de los costos de operación (energía, mantención, etc.) de estas celdas de gran volumen.

