

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

## 610 - 12 LA FLOTACION Y LA INDUSTRIA DEL CEMENTO

(Conclusión)

F. Soria Santamaria. Lic. en C. Químicas.

### III FACTORES QUE AFECTAN A LA FLOTACION EN GENERAL

#### INTRODUCCION

En toda operación industrial, y de un modo particular en flotación, se aprecia que los mejores resultados se consiguen, cuando las condiciones de operación son las más constantes. El propósito de este artículo es analizar las variables que afectan a los resultados y sugerir métodos para manejar estas variables, a fin de que pueda mejorarse el rendimiento de la instalación. Tales factores, entre los que podemos citar: grado de pureza de la materia prima, tonelaje, molienda, dilución, tiempo, temperatura, reactivos, etc., cuando son bien controlados, contribuyen eficazmente al éxito de cualquier operación industrial; una buena marcha en el control se refleja en el tiempo de operación total la cual, como regla general, debe efectuarse sin interrupción alguna. En los trabajos de flotación, donde se manejan miles de toneladas diarias, en la mayoría de los casos en forma de pulpa acuosa, que a veces ha de moverse por bombas al no poder aprovechar la gravedad, la continuidad en el proceso es fundamental y cualquier interrupción, por breve que sea, ocasiona grandes trastornos.

No siempre es posible mantener constantes las condiciones de la operación y esto es cierto sobre todo, en las instalaciones que tratan pequeños tonelajes; las reservas mineras no pueden preverse con bastante anticipación, para asegurarse un grado uniforme de alimentación del lavadero.

La solución a este problema, es mantener un esquema de instalación flexible a fin de luchar contra las variaciones, con la mínima cantidad de gastos posible.

### FACTORES QUE AFECTAN A LA FLOTACION

Los factores que siguen, son de especial aplicación en flotación. Debe dedicárseles un cuidadoso estudio y consideración, cuando se trata cualquier crudo por este proceso:

#### 1.- OXIDACION DE LA MATERIA PRIMA

Es muy importante disponer del crudo en la instalación lo más rápidamente posible. Lógicamente, la flotación resulta más eficaz sobre un mineral sulfurado limpio, que sobre un mineral oxidado; por tanto, cuanto más tiempo permanece el mineral triturado en depósito o en tránsito a la fábrica, más tenderá a ser modificado por las condiciones de oxidación. Los materiales de escombreras, por ejemplo, muestran un grado variable de oxidación, requiriendo un tratamiento especial y modificaciones en los reactivos; los ensayos de laboratorio son eficaces para elegir la mejor combinación de tratamientos. La oxidación es aproximadamente proporcional al área superficial y por ello la separación de finos se refleja siempre en una mayor recuperación.

## 2.- TAMAÑO DE GRANO A QUE EL MINERAL DEBE MOLERSE

El tamaño óptimo depende del peso específico del mineral útil y de su grado de diseminación, moliéndose lo suficiente para poder separar los componentes aprovechables de su ganga. El grado de molienda se determina por ensayos de laboratorio y siempre se busca que el mineral útil quede libre en los tamaños más gruesos posibles. La flotación moderna tiene en cuenta esta circunstancia y se manifiesta por la tendencia general de flotar el mineral en dos fases: primero el grueso - y después el fino.

Las ventajas de flotar un mineral tan grueso como sea posible son:

- a) Coste de molienda más bajo.
- b) Mayor recuperación, por evitar pérdidas de finos.
- c) Menor la cantidad de coloides formados.
- d) Se requiere menos área de espesadores y filtros - porque los concentrados granulares espesan y filtran con más rapidez.
- e) Las "tortas" en los filtros son más secas y por - tanto resulta menor carga a transportar.
- f) Aumenta la posibilidad de eliminar estériles gruesos limpios.
- g) Se requiere menor equipo de flotación.
- h) El grado de concentrado es más alto.

En muchas operaciones de flotación en gran escala, - puede resultar más económico producir un estéril final grueso y volver a moler los productos de desbaste o los mixtos resul-

tantes. Esta operación de molienda secundaria, que trata solo un porcentaje pequeño de la alimentación original, puede llevarse a un grado más alto, lo suficiente para conseguir la liberación de los componentes mineralógicos en los mixtos. Una flotación posterior produce un buen concentrado y la recuperación final resulta más económica por tonelada de mineral tratado.

Los equipos modernos de tratamiento se diseñan para manejar con eficacia pulpas de material grueso. Por ejemplo, la máquina de flotación Denver "Sub-A", permite manejar pulpas con granos que se retienen en el tamiz de 10 mallas/pulgada lineal, sin afectar los resultados metalúrgicos. Estos granos se manejan bien en las celdas, si hacen su entrada en la zona de succión junto con las burbujas de aire que allí se crean; de este modo y mediante una buena agitación, se impide la acumulación en zonas de alta densidad. Por otra parte el manejo de granos gruesos aumenta el desgaste de las máquinas, pero el uso reciente de forros de goma en las partes más afectadas, ha reducido el problema de la abrasión a un mínimo, aun manejando partículas de mayor diámetro.

#### Modernas tendencias en los circuitos de molienda

Una tendencia que predomina, es la aplicación general de una celda unidad o una criba en el circuito de molienda, para separar el mineral libre grueso. En algunas de las instalaciones más modernas esta idea se está llevando a cabo con más amplitud, trabajando un conjunto de celdas para la mayor y más alta recuperación en el circuito de molienda. En este último caso, los estériles son devueltos al clasifica -

dor, los gruesos de éste al molino, y lo que sobrenada del mismo, es considerado como esteril final.

Con un equipo adecuado para el manejo eficaz de pulpas gruesas, se tiende en flotación hacia una molienda lo menos acabada que sea compatible con la liberación de componentes. De este modo pueden tratarse mayores tonelajes con un coste unitario más bajo, utilizándose por otra parte tamices que reemplazan a los clasificadores en circuitos de molienda convencionales.

### 3.- AGUA

Debe usarse agua limpia, siempre que sea posible, pues la flotación puede ser afectada aun por pequeñas trazas de sales solubles presentes en el agua suministrada. El agua de mina corrientemente contiene ácidos u otros elementos perjudiciales en flotación; los ácidos orgánicos pueden estar presentes en aguas estancas y, si se usan, deberán o no (según los casos) ser neutralizados. En ocasiones también debe dudarse del agua de molienda y su nuevo uso, en muchos casos, queda desechado, a menos que se le de un tratamiento especial para separar las sales solubles y neutralizar los reactivos que puedan estar presentes. Ciertas plantas de flotación diferencial añaden una pequeña cantidad de fosfato mineral (apatito) al circuito de molienda; de este modo se hace posible el nuevo uso del agua de este circuito y se controlan bien las condiciones de espumación en los circuitos de flotación.

En el proyecto de una instalación de flotación debe

pues considerarse previamente el agua de que se dispone. Es aconsejable un análisis completo y deben llevarse a cabo ensayos de flotación de laboratorio con el agua a usar en gran escala, para determinar si son necesarias modificaciones en los reactivos. Esto se aplica tanto a materiales no metálicos como a minerales oxidados y sulfurados. La dureza del agua, si es excesiva, puede corregirse por las zeolitas naturales o por el proceso de reblandecimiento sosa-cal, particularmente en el caso de flotación de compuestos no metálicos con los que se usan reactivos de tipo ácido grasos.

El agua limpia, añadida en los circuitos de relevado, mejora en muchos casos las condiciones metalúrgicas del producto acabado: mayor selectividad y concentrados de más alto grado suelen ser los resultados de esta práctica. En circuitos donde ha de volverse a usar una porción sustancial del agua resulta mejor, como regla general, volver a usar este agua en los circuitos de molienda, clasificación y desbaste y la pequeña cantidad de agua limpia que se añada, puede usarse para rociar y diluir en los circuitos de relavado, donde es más eficaz. Esta práctica se está tomando en consideración de un modo gradual, porque significa la diferencia de buenos a malos resultados en muchos problemas complejos de flotación.

El agua usada en la instalación debe ser considerada también, al seleccionar la maquinaria de la misma. El agua del mar, por ejemplo, es corrosiva para las partes de fundición y acero ordinario y es por tanto necesario buscar aleaciones específicas para este caso concreto. Las aguas terrestres tam

bien pueden ser corrosivas debido a ácidos y sales disueltos y pueden ser necesarios materiales especiales de construcción si no se intenta evitar esta condición purificándolas por métodos químicos.

#### 4.- DILUCION DE LA PULPA

La mayoría de los minerales flotan más de prisa en pulpas de densidad alta, particularmente si el tamaño de grano es grueso.

Resulta lógico que cuanto más grueso sea el mineral a flotar, la pulpa sea más densa, porque el efecto de movimiento es más pronunciado y ayuda a elevar la burbuja cargada de mineral a la superficie. La relación de finos a gruesos en la pulpa limita la densidad óptima y en general interesa un contenido bajo en finos para llevar a cabo una flotación satisfactoria.

La capacidad de la máquina de flotación es normalmente proporcional a la densidad de la pulpa y a la cantidad de material a separar en el concentrado de la espuma, por esto conviene flotar con la mayor densidad posible, sobre todo en el circuito de desbaste donde se manejan mayores volúmenes de mineral. En materiales con ley de concentración baja, donde la cantidad de mineral a flotar es alta, resulta mejor dividir la alimentación en dos o más celdas en el mismo circuito. La separación de mixtos y estériles de baja densidad, seguida de espesamiento y posterior flotación, ha demostrado de un modo concluyente que la recuperación y grado del con -

centrado pueden conservarse a un nivel alto, particularmente en crudos no metálicos, tales como carbón y fluorita.

En tanto que las densidades altas resultan mejor en circuitos de desbaste, para los circuitos de lavado se buscan densidades inferiores. A veces se añade demasiado agua a los concentrados del desbaste, con el fin de facilitar el trabajo de las bombas y elevarlos a la máquina de lavado, pero como los estériles de esta máquina pasan de nuevo a las celdas de desbaste, resulta una dilución alta. Por eso es preferible el uso de la gravedad para hacer circular los concentrados de desbaste y mixtos a la máquina de lavado, a fin de evitar toda dilución.

Es muy importante comprobar regularmente la densidad de la pulpa, ya que además de su efecto en flotación, guarda relación con una molienda eficaz y con la calidad del producto que sobrenada en el clasificador. Por esto en las grandes instalaciones son ventajosos indicadores automáticos de densidad, no sólo en el circuito de molienda sino en otros puntos donde su control representa un factor en la recuperación.

#### 5.- CONTROL DE pH.

Siempre que pueda hacerse, presenta ventajas la flotación en circuitos neutros o alcalinos. Valores de pH bajos (circuitos ácidos) suelen requerir equipo especialmente construido para evitar la acción corrosiva de la pulpa, y con frecuencia es difícil contrarrestar esta condición debido a las sales solubles que se forman por reacción

del mineral con el reactivo ácido.

En muchas separaciones el secreto del éxito está en el control de pH dentro de límites muy estrechos. Esto es de interés sobre todo en la flotación diferencial, como por ejemplo en el caso de un mineral plomo - zinc - hierro. Algunos minerales no metálicos deben tratarse en circuitos altamente ácidos, a fin de llevar a cabo la separación que se desea entre minerales de tipo silicato, que de otra manera tendrían aproximadamente el mismo grado de flotabilidad. En circuitos que llevan a cabo dos o más separaciones suele necesitarse un intervalo de pH diferente para cada paso. Esto lógicamente, da una importancia vital a la regulación de reactivos, a fin de conseguir estas condiciones y controladas eficazmente.

El control de pH se considera como una operación de rutina en todas las plantas modernas de flotación. Pueden usarse métodos de medida bien colorimétricos, bien eléctricos. Si la regulación se hace automática, con el medidor de pH acoplado eléctricamente al sistema de alimentación de reactivos, se simplifican mucho las operaciones en la instalación.

## 6.- REACTIVOS

Cada mineral representa por sí mismo un problema y aunque puede contarse con la experiencia de una operación anterior en que se trató un mineral similar, es necesario y siempre supone seguridad, estudiar los reactivos adecuados

mediante cuidadosos ensayos y análisis de laboratorio. Es posible, que aun minerales de una misma mina tengan que ser cuidadosamente separados o mezclados para asegurar los mejores resultados metalúrgicos por flotación; una alimentación uniforme y controlada del mineral, permite una dosificación de reactivo estrechamente regulada para obtener los máximos resultados.

Es importante conocer los puntos del circuito en que deben añadirse los reactivos y debe dedicárseles siempre con considerable estudio. En la flotación selectiva de sulfuros de plomo y zinc los reguladores de pH y los depresores de cinz, se añaden siempre en el molino de bolas; promotores y espumantes en la flotación del plomo, se añaden justamente antes de introducir la pulpa en la máquina de flotación. El mismo procedimiento general se sigue en el circuito de zinc para activar la blenda y aunque es corriente en la práctica añadir primero la cal y después el sulfato de cobre, previos a la flotación, se conocen casos en que invirtiendo el procedimiento, se obtiene una mejora de la metalúrgia. Aquí, una vez más, los ensayos de Laboratorio, señalan el camino para el mejor método de recuperación.

La adición por partes de los reactivos, da muchas veces por resultado una recuperación más alta, con menor coste por tonelada tratada que en el caso en que todos los reactivos se añadieran juntos, bien en el condicionador o bien en la primera celda de flotación. El primer 75 % del mineral suele flo~~t~~arse fácilmente, pero el último 25 % suele requerir un cuidadoso tratamiento, asegurado por la adición y acondicionamiento

de reactivos en cantidades necesarias en las varias celdas en serie. La agitación mecánica en la máquina de flotación resulta muy efectiva, pues da lugar a un íntimo contacto entre pulpa y reactivos y reduce la cantidad necesaria de estos al producirse un emulsionamiento más perfecto, condición que no es tan estricta en las máquinas neumáticas.

Cada día están siendo más importantes los alimentadores automáticos de reactivos, para el exacto control de los mismos, control que es necesario, pues aún cantidades extremadamente pequeñas en exceso sobre las normalmente requeridas, pueden resultar perjudiciales sobre todo en separaciones donde es necesaria una flotación diferencial y selectiva.

Un paso en la mejora de recuperación, conservando el bajo coste de reactivo, es el emulsionamiento adecuado de los mismos antes de introducirlos en el condicionador o circuitos de flotación. A este respecto, se mezcla el reactivo con agua en un emulsionador, en condiciones de temperatura y pH adecuados, añadiéndolo después en el circuito por medio de un distribuidor de reactivos; esta práctica se lleva a cabo ya en muchas plantas modernas dedicadas a cualquier clase de flotación.

#### 7.- CONDICIONAMIENTO DE LA PULPA

Junto con el grado óptimo de molienda, son de importancia el momento y forma de añadir los reactivos para poder completar eficazmente las reacciones fisicoquímicas. Basta hacer unas consideraciones que aclararán un poco el porqué de esos "manejos" anteriores a la misma flotación.

En primer lugar los componentes de todos los minerales, junto con los reactivos y constituyentes del agua, suministran más de media docena de cationes (tales como Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, y tal vez Cu, Pb, Zn, y otros) en concentraciones pequeñas, pero a veces significantes. También puede haber muchos aniones (tales como carbonatos, silicato, sulfuro, sulfato, tiosulfato, xantato, tiofosfato u oleato) y frecuentemente otros, incluyendo complejos, aparte de una serie de coloides de naturaleza y número muchas veces desconocidos. Y todos estos iones asociados en un mismo recipiente, buscando su equilibrio individual y espacio vital, lo que incrementa considerablemente las muchas variables que intervienen en el fenómeno.

En segundo lugar la mayoría de las reacciones que ocurren, tienen lugar en la misma superficie de las partículas minerales, no siendo la química de la flotación un conjunto de reacciones en solución, como tanto tiempo se creyó. Es algo más que la química del "tubo de ensayo" aunque por desgracia tengamos que reconocer que el movimiento de iones en la superficie de sistemas coloidales complejos siga siendo para nosotros una de esas maravillas, de cuyos enredos no estamos más que oscuramente enterados. Día tras día aparecen nuevos trabajos, publicados en revistas científicas, pero raramente llegan a las manos de los técnicos de esta especialidad que a lo sumo leen revistas prácticas de minería, en las que lo más probable es que no se mencionen.

Pues bien, toda esta complejidad de reacciones químicas y fisicoquímicas requieren tiempo y espacio para llevarse a cabo. Por ello el condicionamiento previo a la flotación

se considera actualmente práctica standard, ya que con ello se disminuye el tiempo de flotación y es el camino más económico para aumentar la capacidad del circuito. De este modo los minerales se sitúan en forma fácilmente flotable como resultado de un condicionamiento adecuado, pudiendo tratarse un mayor volumen.

Aunque es posible condicionar en la máquina de flotación como suele hacerse en las de agitación mecánica, no es normalmente económico hacerlo así. La agitación regulada por un tiempo determinado se lleva a cabo satisfactoriamente, mezclando la pulpa y los reactivos en un tanque abierto provisto de un agitador rotatorio convencional. Es decir, el control de la circulación de la pulpa, la cantidad de aire introducido y la total dispersión de los reactivos ejercerán un efecto definitivo sobre el comportamiento del mineral frente al posterior tratamiento por flotación.

Normalmente, las pulpas se condicionan y flotan a la misma densidad, pero merece la pena investigar los efectos al variar este factor. Esto ocurre, sobre todo, en la flotación no metálica, donde se suele condicionar a 60 o 70% de sólidos y después diluir hasta alcanzar la densidad requerida para la flotación (normalmente de 15-25 % de sólidos). Las densidades de condicionamiento altas han resuelto muchos problemas difíciles de flotación.

#### 8. TEMPERATURA DE LA PULPA

Las pulpas de flotación se manejan normalmente a tem

peraturas de 12 á 20°. En muchos casos, sin embargo, la flotación es más efectiva si se aumenta la temperatura de la pulpa. Las soluciones calientes requieren una cantidad más pequeña de reactivos y dan reacciones físicas y químicas más completas, siendo esto notorio en separaciones de flotación selectiva y diferencial, particularmente si la diferencia de flotabilidad entre los componentes no es muy pronunciada.

Las temperaturas del agua y del aire se relacionan con los resultados en flotación y la primera sobre todo, debería vigilarse especialmente en circuitos de lavado donde puede emplearse como riego y para dilución.

Una temperatura de la pulpa muy alta o excesivamente alta puede dar lugar a efectos perjudiciales, lo mismo que las pulpas frías en ciertos tipos de flotación. Por ello deben llevarse a cabo cuidadosos ensayos para determinar las condiciones óptimas de temperatura. Una vez encontrada esta, debe llevarse un riguroso control de ella, lo mismo que se hace con el pH y con la densidad de la pulpa, en la marcha de un circuito industrial. Pueden ser ventajosas las temperaturas altas, incluso superiores a la de ebullición del medio y, en ocasiones, debe usarse vapor a presión, ya que así se altera la flotabilidad de ciertos constituyentes, como por ejemplo, la del azufre. En este caso concreto, las partículas coloidales se convierten en glóbulos de azufre elemental puro que es fácilmente flotable y puede recuperarse en forma de un producto de alto grado.

## 9.- EL AIRE EN LA FLOTACION

El aire es esencial en flotación y su acción es más efectiva en estado finamente dividido o difuso; el burbujeo - violento a través de la pulpa o la introducción del aire sin - difundirlo bien es ineficaz y caro. Quizás pueda considerarse como una ventaja de las células de agitación mecánica frente a las neumáticas, el que aquellas disponen de un medio más eficaz para producir dispersiones de dos fases semiestables. Las dispersiones así producidas de aire en agua conservan el color blanco lechoso y son estables durante 20 minutos; la - adición de un estabilizador como el aceite de pino alargaría este tiempo, aún cuando esta estabilidad debe ser solo temporal para poder destruir fácilmente la espuma de los concentrados, antes de su marcha a los espesadores.

La función primaria del aire en la flotación, es - formar burbujas que suben a la superficie de la pulpa sin violencia, llevando consigo el mineral flotable. Puesto que la flotación es un fenómeno superficial, la razón de que la difusión del aire en la celda sea más efectiva, se explica teniendo en cuenta como varía la relación volumen superficie al - fraccionar las burbujas más y más.

A pesar de ser necesario un burbujeo fino, existe - un tamaño óptimo de burbuja para llevar a cabo una flotación satisfactoria y precisamente las distintas máquinas tienen - propiedades características a este respecto. Actualmente, el intervalo de tamaños de burbuja óptimo, es mucho más amplio - que el intervalo de tamaños en partículas minerales, en cual-

quier nivel de una celda elemental; pueden presentarse tamaños des de una pulgada a menos de una micra.

Así como es importante el análisis granulométrico de la alimentación, también debería considerarse el "análisis por mallas" de las burbujas aunque probablemente nunca sabremos hacerlo, hasta que se consiga mediante un invento "superingenioso", el medio de me dirlo y expresarlo. Del mismo modo, puesto que el problema de ai -, reacción, se encuentra intimamente ligado con la presión atmosférica, deberían establecerse factores de corrección en el uso de las dis - tintas máquinas según las altitudes en que vayan a manejarse.

De importancia secundaria es el efecto oxidante del aire en la pulpa, propuesto ya en la teoría química de la flotación, por el profesor Taggart. Siendo un oxidante relativamente fuerte, debería controlarse, y este factor es posible que influya en algunos de los malos resultados conseguidos en varios de los métodos de aireación - de pulpas. Pero ¿en cuantas plantas se mide la concentración o consu - mo de oxígeno como parte del control de reactivos considerando al - oxígeno reactivo químico de flotación? o ¿Cuando haciendo estudios - comparativos de máquinas, se determinó la concentración de oxígeno?. ¿Es que acaso el hierro corroído u óxido de hierro hidratado no pre senta especial apetencia para el oxígeno disuelto?. La gran aplica - ción de la flotación en el campo de los minerales oxidables y el - frecuente uso de aire a presión en las máquinas de flotación hacen que este factor merezca la atención que le corresponde, ya que su - adecuada aplicación redundará en mejora de coste y metalurgia.

La cantidad de aire para una separación efectiva, no es - la misma para todos los minerales tratados por flotación, ya que in cluso dentro de un mismo tipo de crudo se presentan diferencias. - Las máquinas de desbaste y lavado pueden trabajar mejor con canti - dad restringida, en tanto que las celdas de mixtos pueden requerir

más aire para flotar las últimas fracciones, que en parte no presentan libres los componentes mineralógicos (quedan ya los granos más gruesos) y en parte ofrecen ya buena cantidad de mineral oxidado. Estas necesidades variables en cuanto a la aireación, se satisfacen mejor con un tipo mecánico de máquina en que el aire se introduce solo con el fin de formar burbujas.

Actualmente, los modernos diseños de máquinas de flotación, permiten el uso de aire a la presión atmosférica o presiones bajas con lo que se aumenta su porcentaje efectivo. La introducción de aire a presiones superiores a 250 mm. Hg, origina segregaciones y estratificaciones del mineral y resulta caro, sobre todo si se ha de usar aire adicional para hacer circular la pulpa a través de la máquina.

#### 10.- OTROS GASES EN LA FORMACION DE BURBUJAS.

Hoy día, el aire se usa universalmente en flotación, pero empiezan a recibir considerable atención otros gases, sobre todo en minerales de fácil oxidación y materiales no metálicos. Es lógico suponer que un gas reductor es más efectivo sobre un mineral oxidado, previamente tratado por reactivos de sulfuración, que el aire por su efecto oxidante, y a veces basta añadir una pequeña cantidad de gas reductor para "neutralizar" el efecto oxidante del aire siendo posible usarlos conjuntamente.

El añadir estos gases en las máquinas mecánicas de subaireación en la base del agitador y a bajas presiones, no es complicado. La agitación en una máquina adecuadamente diseñada, puede hacer uso efectivo de varios metros cúbicos de aire o gas con difusión total a través de la pulpa, lo que es tan necesario para la total realización de las reacciones físico-químicas

micas.

En ocasiones ciertos humos y gases extraños, pueden estropear las condiciones de flotación cuando se encuentran en la atmósfera de la instalación.

Debe hacerse un estudio físico y químico de los mismos, pues en ocasiones su presencia cerca de las máquinas de flotación destruye completamente la espuma e inutiliza el proceso.

#### 11.- SEPARACION DE CONCENTRADOS

Una vez que la burbuja de aire ha adherido y arrastrado su carga de partículas minerales a la espuma, debe conducirse al borde de la misma en línea recta, evitando la participación de corrientes cruzadas. Llegando al límite, se separa totalmente por la acción de una paleta mecánica.

En muchas máquinas no se usan paletas mecánicas, sino que la separación de la espuma es por efecto de compresión y apiñamiento. Este efecto de apiñado, si no se regula bien, impide la posibilidad de hacer un concentrado de alto grado en la primera máquina, requiriendo por tanto lavados y relavados. También puede dar por resultado una baja recuperación, al dejar caer algunas burbujas su carga mineral, antes de que puedan acabar su recorrido en el borde de la celda. Si esto último ocurre, no se consigue ninguna selectividad y ello puede dar lugar a dificultades en posteriores operaciones de limpieza.

Tratando de obtener una espuma selectiva o de alto

grado, va muy bien el tipo mecánico con aireación regulada, como lo ha demostrado la experiencia moderna en una gran variedad de minerales. Los concentrados finales de ley más alta, se suelen separar de la primera o dos primeras celdas y no requieren posterior lavado. Entonces puede dedicarse un lavado y relavado más intenso al producto inferior de las celdas posteriores.

En flotaciones rápidas, para minerales de ley de concentración baja, suelen usarse máquinas de doble vertido, como es el caso de los fosfatos, barita y carbón. A veces se emplean varias paletas por celda, para ayudar al rápido movimiento de la espuma hacia el punto de vertido, antes de que las burbujas tengan la oportunidad de soltar su carga en la pulpa. En otros casos, paletas radiales y normales al eje de rotación, contribuyen también a la rápida separación del mineral flotable desde la superficie de la celda.

Es importante en una buena separación de espuma, el regular el nivel de pulpa. En las máquinas de lavado y relavado es conveniente una espuma profunda que permita a la ganga y material indeseable en general, una amplia oportunidad para ser eliminados. Al final de la máquina de desbaste suele ser necesario un nivel de pulpa alto, para conseguir elevar hasta la espuma y someterlas a posteriores tratamientos las últimas fracciones de mineral grueso que flotan lentamente.

En la flotación del carbón, donde se forma una "mata" de carbón limpio en la superficie de la celda, se usan "rascadores" especiales de espuma; así pueden separarse concentrados

de carbón con densidades superiores a 60% de sólidos, que requieren poco o ningún espesamiento.

## 12.- MAQUINAS DE FLOTACION

Desde la aparición de la flotación diferencial (1922) se han ido desarrollando multitud de máquinas de flotación. Muchas surgieron y muchas desaparecieron y la competición ha quedado reducida a una media docena de máquinas, cada una de las cuales es defendida por unos operadores como la mejor en su caso particular y desechada por otros como de resultados pobres. Estos desacuerdos son justos y causados por una vasta experiencia; en muchas plantas de flotación se probó una máquina frente a otra bajo condiciones lo más idénticas posibles; a veces los resultados son en las dos por el estilo, pero con más frecuencia una máquina muestra un margen evidente de superioridad sobre la otra. En otros ensayos, la máquina A puede vencer a la B en un lugar y la B sobre la A por un gran margen en otro.

Trataremos de encontrar algunas de las razones más destacadas por lo que esto sucede así y evitar algunas de esas influencias, a veces imprevistas, que puedan inclinar la decisión en uno u otro sentido. Esto es interesante en los tiempos actuales, especialmente en el tratamiento continuo de materiales de bajo grado, donde variaciones de décimas en el % de los concentrados o del estéril, tanto pueden multiplicar el coste del proceso. Y lo mismo en problemas no acabados de resolver industrialmente, como es la flotación de minerales de hierro, donde

pueden existir o surgir nuevas causas o influencias previamente ignoradas.

#### Factores a elegir en una máquina de flotación.

Después de condicionar la pulpa con los reactivos adecuados, la máquina de flotación ha de ser la encargada de introducir adecuadamente el aire o gas en forma de burbujas para adherir las partículas de mineral a flotar. Es importante la separación rápida de la espuma por medio de paletas, como ya dijimos; la espuma es menos profunda a medida que la pulpa progresa a través de la máquina requiriendo esto el cambio de niveles de pulpa y las condiciones de aire para separar los concentrados.

Una característica que siempre debe presentar una máquina de flotación es la facilidad en el manejo de un amplio margen de condiciones en el tratamiento; por otra parte su mantenimiento y gasto de operación deben ser bajos. La goma moldeada en las partes de desgaste ha contribuido mucho al establecimiento de condiciones de trabajo de la máxima eficacia, teniendo una vida de 6 á 15 veces mayor que la fundición de hierro. La aireación controlada, como ya se discutió, habilita al técnico de flotación para enfocar los problemas especiales que puedan surgir en procesos en que deban manejarse minerales difíciles o productos industriales complejos.

El moderno técnico de flotación considerará este problema y elegirá su máquina por los resultados del Laboratorio

rio; comprende que la máquina es el corazón de la mayoría de las instalaciones modernas y no solo debe buscar la fama universal de un modelo concreto, sino una máquina que permita manejar los factores variables que intervienen en su proceso, al estudiar el mineral elegido.

#### Máquinas neumáticas.

Como regla general las máquinas neumáticas dan concentrados de alto grado pero baja recuperación y trabajan tanto mejor cuanto la alimentación es más fina. Hay muy escaso, por no decir nulo, consumo de energía en la unidad de flotación en sí, pero debe tenerse en cuenta el consumo de energía requerido para comprimir el aire, condicionar la pulpa, emulsificar los reactivos y también elevar la suspensión sólida de los circuitos de lavado y relavado; normalmente en las instalaciones neumáticas son siempre necesarias máquinas de lavado y relavado para elevar el grado del concentrado.

Lógicamente, se introduce una cantidad de aire excesivo en la pulpa, puesto que el aire se usa en estas máquinas, no sólo para producir la espuma y aireación necesarias, sino para mantener la pulpa en suspensión y hacerla circular. Este exceso de aire puede tener en algunos casos un efecto oxidante sobre el mineral a flotar y por tanto modificar las condiciones de flotación.

La tendencia común de practicar la flotación de partículas más gruesas con todas sus ventajas, no puede llevarse a cabo al usar máquinas neumáticas, sobre todo en minerales de peso específico elevado donde el grado así como la -

recuperación es interesante; las pulpas de mineral grueso - con poco o nada de finos se manejan mejor con máquinas de - tipo mecánico.

Valorando el coste de la máquina neumática y su - conservación, el soplado de aire comprimido y el movimiento en tuberías (bombeo), presenta pocas ventajas sobre las de - agitación mecánica.

#### Máquinas mecánicas.

Las máquinas con aireación mecánica, tienen la ven-  
taja de producir un concentrado menos alto pero con la máxi-  
ma recuperación. Aparte de hacer posible la adición de reac-  
tivos por etapas, presenta gran flexibilidad y particularmen-  
te donde deben manejarse pulpas pesadas o donde pueden presen-  
tarse inconvenientes para la introducción de aire, es prefe-  
rido el tipo mecánico. Pero presentan el inconveniente de -  
que la agitación enérgica de las paletas produce un molido -  
de los minerales demasiado blandos, aumentando la cantidad -  
de "Schlamms", lo que siempre es perjudicial.

Máquina de flotación Denver "Sub-A". Por ser el -  
tipo de celda aceptado actualmente como standard en los mode-  
los de agitación mecánica, vamos a dar una idea de las carac-  
terísticas del modelo de subaireación Denver. Como carácter  
distintivo, la circulación de la pulpa de - celda a celda -  
es por gravedad; esto habilita la máquina para manejar mate-  
rial grueso sin estratificación del mineral (por ejemplo: la

celda unidad en el circuito molino-clasificador).

En la mayoría de las instalaciones con estas máquinas se introduce suficiente cantidad de aire por succión debajo de la caperuza que cubre el agitador. La acción centrífuga producida por la agitación y el paso de la pulpa entre las aspas del disco inferior crea un vacío en la base y una condición de presión en la periferia del agitador tales, que dispersan íntimamente el aire en burbujas finas a través de la pulpa.

La cantidad de aire necesario, depende del tipo de material y otros factores tales como la densidad, reactivos y ley de concentración. Hay aplicaciones donde la cantidad de aire ha de ser aumentada y aún retardada, y en ocasiones estas condiciones han de variar a través del circuito; así, en el circuito de lavado, por ejemplo, se requiere menos aire - que en el circuito de mixtos y el de desbaste. La Denver - "Sub-A" está ya construida para este control flexible y el método de obtener aire y dispersarlo completamente en la pulpa es distinto de una máquina de subaireación a otra.

Se ha probado de un modo concluyente, que el aire - se introduce mejor en la pulpa por presión centrífuga que producido por la simple agitación. Así el aire se bate en la pulpa, difundiéndose completamente y produciendo burbujas de aire pequeñas con lo que se aumenta grandemente la capacidad de arrastre por unidad de volumen. El efecto final es similar a la práctica de introducir aire o gas en soluciones a presión, procedimiento con el que estamos todos familiariza

dos por el uso frecuente de bebidas carbónicas.

La cantidad de aire introducido, depende de la velocidad y tipo de agitador. Puede obtenerse más aire que - el necesario para la flotación normal, aumentando ligeramente la velocidad del agitador. Sin embargo, resulta más económico trabajar con la velocidad que asegure la agitación y luego, si se requiere más aire, añadirlo con un compresor a baja presión, tal como se hace en la máquina Denver "Sub-A" sobrecargada. Si se desean condiciones de aireación intensas pueden usarse distribuidores multi-hojeados e incluso agitadores dobles. En flotación de no metálicos, donde es necesario controlar tanto la agitación como la aireación o solo uno de los dos factores, deben usarse distribuidores lo más lisos posible.

En la construcción y diseño de la máquina Denver, hay partes que son standard e inmutables, pero por otro lado gozan de la flexibilidad precisa para cumplir las múltiples condiciones de flotación y en muy poco tiempo puede hacerse el acoplamiento a las condiciones requeridas.

#### APLICACIONES DEL PROCESO DE FLOTACION

Se han hecho grandes progresos aplicando la flotación en el campo de materiales no metálicos tales como - fluoritas, azufre, feldespato, barita, fosfato, carbón y potasa. La flotación también se está usando en la preparación y limpieza de materiales crudos para la industria del cemento, productos químicos y otras industrias. Está recibiendo

gran atención su aplicación a campos completamente ajenos - al tratamiento de minerales; en los últimos años se encuentran aplicaciones destacadas en la preparación y refinamiento de productos alimenticios, pigmentos colorantes, pulpa - de papel, corcho y deshechos industriales. La flotación - se está aplicando con éxito, para separar el aceite y sólidos del agua de deshecho de las fábricas de acero y en la - recuperación de naftaleno de los hornos de cok.

#### CONCLUSIONES

En este artículo solo se han mencionado los puntos fundamentales tal como se aplican en flotación práctica.

Se discute mucho el hecho de que la flotación sea aún un arte o haya llegado a ser una ciencia, pero el hecho concreto es que la flotación es una ciencia en la que influyen tantas variables, que solo el arte puede combinarlas. - Puede demostrarse que pasan de un centenar las variables que intervienen en algunas operaciones de flotación, la mayoría de ellas inmedibles por procedimientos rutinarios; el comportamiento de cada una de ellas está siempre regido por leyes tan inmutables y ordenadas, como quizás no podamos imaginarnos. No hay nada indefinido acerca de este comportamiento y la única duda está en nuestro conocimiento acerca de ello, bien en la causa original o bien en su comportamiento en ciertos puntos del circuito. Tratando con una ecuación simultánea, en la que intervienen tantas variables, - todas ellas no solo afectan el "éxito" de algún modo sino -

que muchas se influncian entre sí, por lo que poco puede extrañarnos que en el caso de la concentración de minerales con intervención concreta de la flotación, se preste a múltiples discusiones y explicaciones que a la vez son plausibles, convincentes y mutuamente contradictorias.

No es fácil controlar todas las variables que influyen de una u otra manera las funciones de la máquina de flotación. Conseguirlo sería muy análogo al manejo perfecto de un circo de 100 pistas; siendo, como a veces son, variables opuestas, uno podría esperar el elefante en la pista 36 para "jeringar" con la trompa llena de agua el artista del trampolín que están en la pista 37 y estropear su trabajo, análogo a lo que pasa en flotación cuando tratamos de deprimir un componente determinado y desconociendo las causas, se activa.

Y aparte de esto, siempre expuesto a alteraciones y acumulaciones de nuevas causas:

Cambios en la práctica de la metalurgia o precio de venta de un producto, pueden crear obsesión para un tipo de concentrado o estéril. El coste de laboreo puede subir. La práctica del minado puede cambiar en alguna de las formas más significantes. Una estación puede ser más seca que la otra; el distinto grado de humedad trae consigo el consecuente cambio en el deterioro de la superficie mineral y en la composición del agua utilizada. El contenido en oxígeno de esta, análogamente, cambiará con la temperatura ambiente y con ello pueden presentarse cambios profundos en la química

ca de flotación. Variaciones en la molienda y clasificación, pueden alterar el carácter y cantidad de finos indeseables producidos. La misma extensión de las reservas mineras puede ser decisivo; a veces se sabe que una modificación con medios más modernizados en la instalación, sería más eficiente que la ya en uso, pero el agotamiento de la mina no justifica el cambio.

A pesar de todo hay estilos, manías y pasiones locales en la práctica de flotación, exactamente a como ocurre en otros muchos quehaceres de la vida corriente. Tratando con tantos factores, las pequeñas plantas están faltas de facilidades para explorar sus necesidades específicas y puede asegurarse que tratarán de imitar los resultados que hayan probado ser buenos en cualquier instalación similar. Pero esto no es recto y a veces es contradictorio; uno puede tener ganga ligera, fina molienda y 20% de sólidos en flotación, mientras que el otro maneja ganga pesada, molienda gruesa y 40% de sólidos y aunque se utilice la misma máquina de flotación en el segundo caso habrá un desgaste más profundo y un costo de conservación más alto que en la primera.

La consecuencia final es que la flotación se encuentra en sus principios como ciencia y en espera de dar una solución clara a problemas fisicoquímicos tan complejos como son la adsorción, energías de enlace, tensión superficial y coloides.

Confiamos en el esfuerzo común, en la creación de iniciativas posteriores en el trabajo de investigación y aplicación

desarrollo de técnicas nuevas en flotación, tanto desde el punto de vista mecánico como metalúrgico. Conocemos la aplicación de esta herramienta maravillosa para el trabajo de minerales sulfurados, óxidos y materiales no metálicos y sabemos que comienza su introducción en muchos otros campos de la industria química incluyendo los alimentos, aplicaciones que ya hemos mencionado anteriormente.

\* \* \*