

1 INTRODUCCION Y DEFINICION DEL CAMPO

La flotación es un proceso de separación de especies que se efectúa desde pulpas acuosas por medio de burbujas de gas en base a sus propiedades hidrofílicas o hidrofóbicas. En esencia, es un proceso de separación ya que se trata de la individualización de especies que formaban anteriormente una mezcla.

Esta separación se puede realizar de distintas formas, como por ejemplo por separación colectiva o global, en que se separa la mezcla en dos productos, uno de los cuales es el producto noble (concentrado), que contiene a dos o más componentes, o por flotación diferencial o selectiva, en la que se realiza la separación para obtener una sola especie individualizada.

La flotación es el método más moderno, eficaz y de mayor aceptación, aunque también en muchos aspectos es el más complejo de todos, constituye una aplicación técnica de un descubrimiento que de hecho es posterior a ella: en un sistema de distintos componentes, las burbujas de aire dentro del agua se adhieren únicamente a los minerales "hidrocarbonados". El invento de la flotación radica en producir superficies hidrocarbonadas en minerales no hidrocarbonados.

De la definición de flotación formulada anteriormente podemos deducir que el proceso es aplicable a materias de distinto origen. Según la clasificación habitual pueden ser orgánicos o inorgánicos, estas últimas son generalmente los minerales en todas sus variedades, metálicos o no metálicos, sulfurados, carbonatados, silicatados, sales, carbones, etc... Son materias orgánicas especies como resinas, semillas, fibras, e incluso, según Gaudin, se han llegado a flotar microorganismos.

La flotación es un proceso industrial que tiene múltiples facetas, aplicaciones y posibilidades, aunque nos vamos a centrar en la aplicada a la separación de minerales, que es el campo que la originó y es éste el de mayor aplicación técnica y económica.

2 ELEMENTOS DE LA FLOTACION

Por definición en el proceso existen tres fases, sólida , líquida y gaseosa.

La fase sólida es la materia a preparar, la líquida el agua, y la gaseosa el aire. que se inyecta en la pulpa mecánica o reumáticamente.

Los metales nativos, sulfurados o especies como grafito, carbón bituminoso, talco, etc. son poco mojables (hidrofóbicos) y otros como óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y algunos que generalmente representan la ganga son hidrofílicos (mojables). Si además tenemos en cuenta que los minerales hidrofóbicos generalmente son aerofílicos mientras que los hidrofílicos son aerofóbicos vemos las posibilidades de aplicación de los procesos de flotación.

3 ELEMENTOS TECNOLOGICOS DEL PROCESO

El tratamiento previo a la flotación precisa de la trituración del mineral procedente de la mina y molienda en húmedo hasta un tamaño de 50 a 200 micras según la disseminación, el mineral se molerá hasta el tamaño de liberación, en que cada grano contiene a una sola especie.

Posteriormente, la pulpa se acondiciona con distintos reactivos, unos **(modificadores)** tienen como objeto preparar la superficie de los minerales para la adsorción de otros reactivos, otros **(colectores)** aumentan las propiedades hidrofóbicas y otros **(espumantes)** que facilitan la formación de una espuma estable.

Las pulpas así preparadas se introducen en las máquinas de flotación donde el mineral valioso se separa en el concentrado y la ganga en el estéril o relave.

Posteriormente los productos pasan por espesado, filtrado y secado, y los relaves o estériles se llevan a un depósito donde se desagua por decantación.

Cuando el mineral lleva varios componentes útiles, por ejemplo Pb, Zn, Cu, la separación es más complicada, en primer término se debe optar por flotación colectiva o selectiva, es decir flotar las tres especies en una etapa y separar el estéril o flotar un componente tras otro de forma selectiva por flotación diferencial.

4 ANTECEDENTES HISTORICOS DEL PROCESO

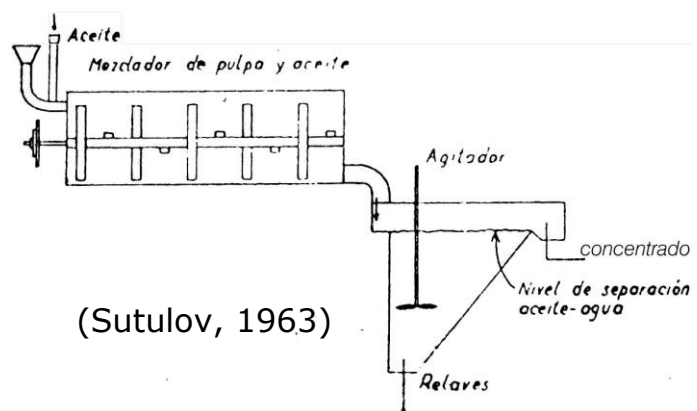
Pese a su aparente simplicidad el proceso de flotación es relativamente reciente y se puede considerar como un proceso moderno cuyos fundamentos técnicos y tecnológicos se han desarrollado en el siglo XX, sin embargo el proceso tiene antecedentes históricos que se pueden remontar hasta varios siglos atrás, ya los Fenicios conocían el arte de separar el oro de sus arenas y otros minerales metálicos, e incluso Herodoto en el 400 a de C escribió que 2500 años antes se empleaban plumas grasientas de ganso para hacerlas pasar por arenas auríferas y en una corriente de agua las partículas de oro se adherían a las plumas.

Gaudin describió que en el S XV se concentraba azurita con un método basado en la mojabilidad selectiva de ciertos minerales en aceite y agua, y también cita la obra de un francés (Petit) donde se discutía el problema fundamental de la flotación referente a la adhesión selectiva de distintos cuerpos sólidos a burbujas de aire. No obstante estos procedimientos indican que en aquella época no se tenía una idea clara de la flotación, y si se hacía esto era como un fenómeno extraño o curioso cuya generalización estaba lejana, por lo tanto los procesos de flotación no se puede considerar que nacieron hasta mediados del s XIX.

William Hainess en 1860, patentó un proceso en el que los minerales triturados y mezclados con una cantidad variable de aceite entre el 10 y 20% en peso y agitados con agua se comportaban de tal manera que los sulfuros se agregaban en una masa con el aceite y se segregaban de la ganga mojada y del agua, de ese modo se puede establecer la afinidad entre sulfuros y aceite.

El proceso Hainess aparentemente no tuvo aplicaciones industriales, aunque posteriormente fué industrializado por Elmore, que lo bautizó con el nombre de *Bulk-oil process*.

Las patentes se realizaron entre 1901 y 1902. El proceso de Elmore consistía en que el mineral finamente pulverizado se mezclaba con agua hasta un 15%



(Sutulov, 1963)

Proceso de Elmore. Bulk oil process 1907

en sólidos, y después pasaba a un mezclador horizontal donde se añadía el aceite en proporción de hasta 1 tonelada por tonelada de mineral seco. El mineral así acondicionado se descargaba en una celda con el fondo inclinado, de modo que su parte aglomerada junto con el aceite formaban una película 10 - 15 mm.

Para no provocar la decantación de esa película se disponía de un agitador, de modo que el concentrado que contenía el aceite y sulfuros se recuperaba en unos estanques, y el aceite se regeneraba por medio de centrifugación y filtrado, perdiéndose unos 5-10 kg por tonelada de mineral tratado.

Una instalación que funcionaba en Gales trataba 50 ton/día de sulfuros, obteniendo un 80% de recuperación y 20% de pérdidas de aceite.

Otro descubrimiento de mediados del s XIX fue la patente de los hermanos Bessel en 1857 para beneficio de grafito. Según la patente, el lavado se efectuaba al hervir el mineral con agua y aceite, de manera que al hervir el agua se producían burbujas y las partículas de grafito con aceite se pegaban a estas.

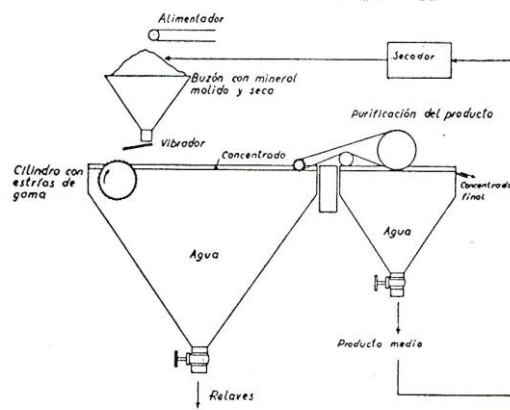
Fué la primera vez que se produjo la flotación con burbujas de gas.

Nueve años después patentaron un proceso en el que se usaba CO_2 sintético a partir de la reacción entre carbonato y ácido.

Sin embargo debido a la poca difusión, estos métodos quedaron desconocidos para países como EEUU y Australia.

La primera patente americana la realizó Everson en 1885 y era similar a la de Elmore empleando modificadores como el SO_4H_2 y sales minerales para mejorar la selectividad de la separación.

En paralelo con el proceso *Bulk-oil* se desarrolló otro proceso basado en la mojabilidad, el proceso de flotación por película (*Skin flotation process*). Consistía en la separación de minerales por



Wood. Proceso de flotación por película. Skin flotation process 1914

(Sutulov, 1963)

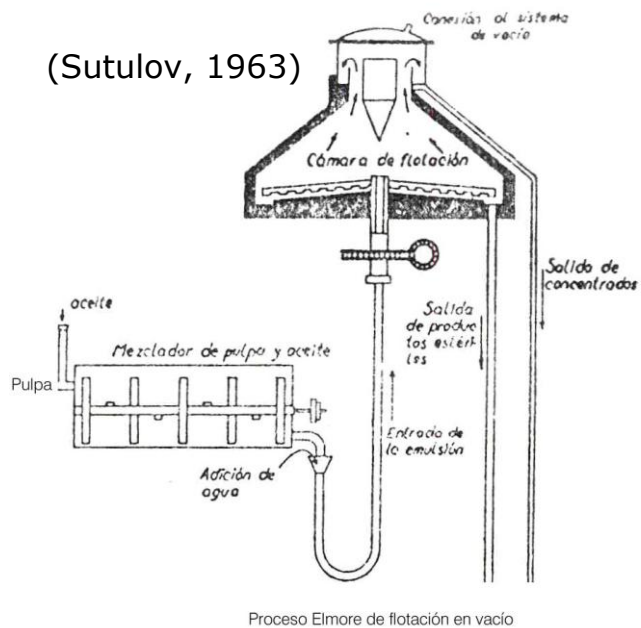
medio de agua aprovechándose de las propiedades hidrofóbicas de los sulfuros.

Este proceso fue patentado en 1885-1891 por Bradford-Nibelius en EE.UU. y no tuvo aplicación industrial. aunque en 1914 Wood patentó un proceso similar en el que incluso se añadía aceite.

Estas máquinas trataban hasta 1 ton/hora., necesitando un motor de 0.25 CV.

A principios del s XX se inician aportaciones tecnológicas importantes por parte de una serie de investigadores que se les puede considerar los padres del proceso de flotación.

Uno fue Elmore, que una vez que conoció la posibilidad de provocar burbujas patentó en Inglaterra en 1904 la flotación en vacío. y se aplicó de la siguiente forma: Los minerales que contenían sulfuros se molían con agua hasta 20 mallas y se decantaban hasta llegar a un 50% en sólidos. La pulpa densa y deslamada se introducía en un mezclador donde se añadía un 5% de aceite y las partículas preparadas se acondicionaban nuevamente con agua hasta un 15-20% en sólidos y alimentaban a una cámara comunicada con un sistema de vacío. Las burbujas de aire se cargaban con las partículas hidrofóbicas cubiertas de aceite mientras que las de ganga quedaban inactivas frente a ellas. Las burbujas mineralizadas subían a la superficie de la pulpa. rebalsaban y eran recogidas como concentrado, la ganga inactiva caía al fondo y se recogía por otra salida.

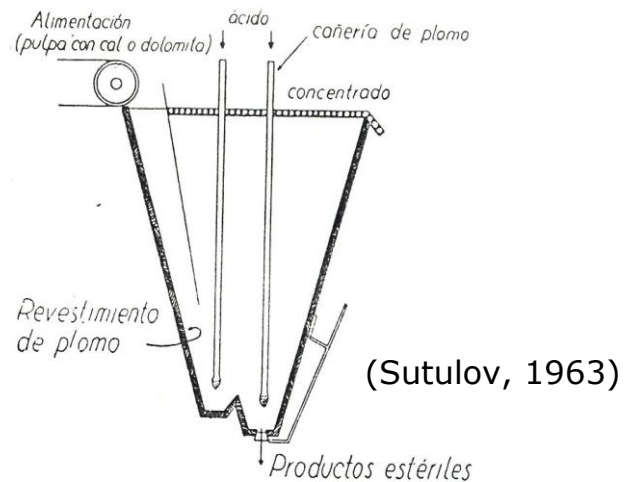


Este proceso se empleó para Zn, Pb, Ag y Mo, y con un aparato de unos 2 metros de diámetro se podía tener una producción de 50 ton/día, consumiendo menos de 5 CV. En aquella época era rentable, la eficiencia era buena, ya que se obtenían concentrados directos para la fundición y

recuperaciones hasta del 80%.

Casi simultáneamente al método de vacío aparecieron otros dos métodos basados en la formación de burbujas por electrolísis, pero tuvieron poca aplicación.

Otro método fué el de Potter-Delprat en EE.UU. 1904, tuvo importantes aplicaciones, se le considera la primera aplicación seria de flotación con espuma para sulfuros. El proceso consistía en lo siguiente: el mineral molido se introducía en un recipiente donde se acondicionaba con cal o dolomita, y durante esa operación se añadía una pequeña cantidad de aceite, la pulpa se introducía en un separador que asentaba las arenas y levantaba el agua. esa arenilla densa caía en una celda o recipiente donde por medio de dos tuberías se le adicionaba SO_4H_2 del 1-10% que al reaccionar con los carbonatos se producía la gasificación y agitación de la pulpa, separándose los sulfuros en un concentrado espumoso, mientras que los estériles se descargaban por el fondo. Además la reacción elevaba la temperatura y favorecía el proceso



Proceso Potter-Delprat de flotación espumosa

Este procedimiento se aplicó con éxito en Broken Hill. donde por medio de flotación se beneficiaron estériles de procesos gravimétricos, obteniéndose recuperaciones del 80-90% en Zn en operaciones de 300 ton/día.

De esa forma se aprovecharon cerca de 500 millones de toneladas de residuos gravimétricos, hasta que aparecieron otros métodos más rentables.

El uso de la flotación a gran escala puso en evidencia las ventajas de la flotación frente a otros métodos, en especial la separación gravimétrica, estas ventajas se centraban en:

- Posibilidad de tratar minerales de baja ley que no era posible tratar por

gravimetría, de modo que se podían tratar por flotación los estériles de procesos gravimétricos que se habían desechado.

- Se podían recuperar con gran eficiencia los valores metálicos que se encontraban en las lamas y que no se podían recuperar de ningún otro modo.
- La calidad de los productos obtenidos por flotación superaba cualquier otro método.

Pese a estas grandes ventajas también presentaba inconvenientes:

- En principio resultaba cara por el empleo de reactivos irrecuperables en grandes cantidades.
- El equipo mecánico empleado era bastante incomodo y mecánicamente imperfecto.
- Había un vacío en los conocimientos técnicos que hacia que la flotación fuera mas un arte que una ciencia.

La solución a todos estos problemas llevó a lo que es el proceso de flotación actual. Un importante cambio en la flotación por espuma y una mejora del método, se produjeron por la patente de Sulman-Pickard-Ballot, ingenieros de *Mineral Separations*, que en esencia consistía en un nuevo método de producir espuma aplicado a la agitación para succionar y dispersar el aire, empleando una pequeña cantidad de aceite para la colección y espumación.

Esta empresa creo una máquina de flotación con agitación mecánica. Y permitía un tratamiento con reducción considerable del consumo de aceite, menor del 1%.

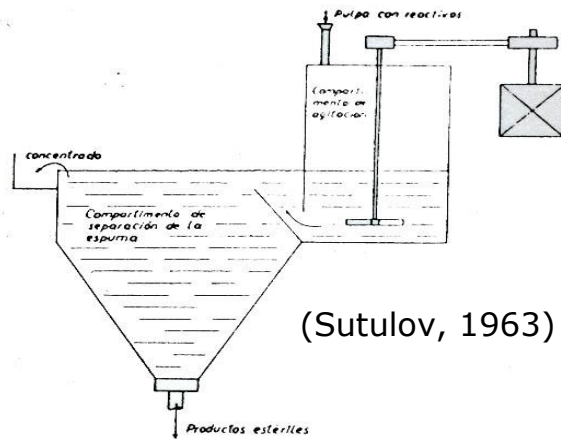
Estas dos ideas han sido la base del proceso moderno de la flotación espumosa, que fue perfeccionado y mejorado por Teodoro Hoover.

La idea de la máquina de Hoover consistía en un compartimento de agitación en forma de cuba rectangular abierto a la atmósfera, donde se succionaba el aire por el movimiento rápido de un agitador de paletas.

Este produce un vórtice y las paletas dispersan el aire impregnando la pulpa si previamente se han añadido a la misma reactivos que mejoren la colección y espumación.

Después de la agitación las burbujas de aire están cargadas con las partículas hidrofóbicas, y la separación de estas de las partículas hidrofílicas es función de la cámara inferior, donde se ha descargado la pulpa aireada y agitada.

El concentrado se recupera por la parte superior y el estéril queda en el fondo. Es un aparato de funcionamiento en continuo y esta máquina de flotación se aplicó en Broken Hill, donde se trataron con éxito mas de 10 millones de toneladas de residuos gravimétricos.



Máquina de flotación de Hoover

Posteriormente se empleó en Australia, EEUU, y se extendió a otros países.

5 DESARROLLO DE NUEVOS REACTIVOS y MAQUINAS

La posición exclusiva de *Mineral Separations* en el campo de la separación de minerales por flotación debido a la posesión de las patentes básicas creó en los 10 primeros años del siglo XX dos movimientos opuestos que beneficiaron enormemente el desarrollo de la flotación; por una parte todas las empresas que tenían que pagar derechos de patente a *Mineral Separations* intentaron deshacerse de esa patente y buscaron modificaciones y cambios en el proceso. Por otra parte *Mineral Separations* mantuvo el predominio de la patente e intentó mejorarla por medio de profundas investigaciones.

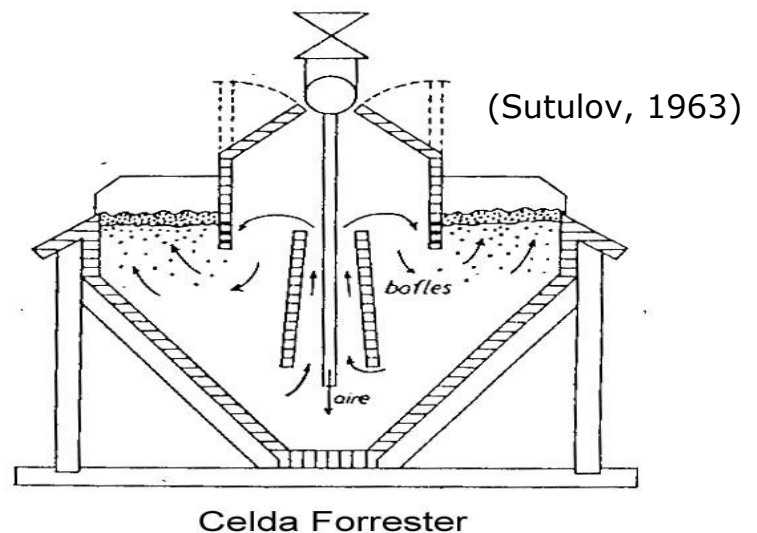
Debido a la primera causa aparecieron las máquinas de Forrester, Callow y otras, y debido a la segunda se llegó a una reducción de los consumos y a obtener reactivos solubles en agua.

La máquina de Callow reemplazaba la agitación mecánica por una corriente de aire inyectada neumáticamente a través de una tela que cubría

el tondo. La máquina era muy simple, tenía forma de cajón de aproximadamente de 0,5x1x2-20 m (*prof x ancho x largo*), la espuma se separaba por arriba, y por debajo había unos orificios para los relaves.

La ventaja era su bajo costo de construcción y ausencia de partes mecánicas, la desventaja era la obstrucción de la tela por partículas minerales y

CO_3Ca que se formaba en la reacción del CO_2 del aire con la cal que se empleaba como modificador en el proceso.



6 REACTIVOS SINTETICOS

Inicialmente los reactivos que se empleaban eran productos naturales, principalmente aceites procedentes de la destilación del petróleo, aceites de pino, eucalipto, residuos cresílicos etc... y presentaban el problema de ser insolubles en agua, lo que implicaba una dificultad en la creación de una espuma estable y un aumento del consumo.

Así, entre 1909-1925 se produjo un cambio progresivo pero que fué revolucionario reemplazando de forma casi completa el uso de los otros reactivos. y reduciendo las cantidades necesarias desde los kilos a las decenas de gramos. Probablemente el primer paso lo dió la *Mineral Separations*. patentando el uso de aldehidos, cetonas y ésteres sintéticos como. espumantes en la flotación de sulfuros.

Posteriormente Perkins y Sayre en 1921 patentaron colectores sintéticos que contienen N trivalente y S divalente.

En 1925 Keller patentó los Xantatos, en 1926 Whitwort patentó los ditiofosfatos o aerofloat. que competían con loa colectores sintéticos de Perkins y Keller en la flotación de sulfuros.

En el 1924 Sulman y Edser patentaron el uso de jabones para la flotación de minerales oxidados. y en 1935 le introdujeron los colectores

cati6nicos a base de amlnas para la flotaci6n de compuestos no met6licos.

Aparte de estas sustancias tuvieron gran importancia en su desarrollo los descubrimientos de reactivos espec6ficos para la coleccion y depresi6n de ciertos minerales, entre los mas importantes cabe destacar la patente australiana de Bradford que se1ala el SO_4Cu como poderoso activador de la blenda.

La americana Sheridan-Grisword indica los cianuros como eficientes depresores de blenda y pirita.

La patente de Lowry-Greenway que se1ala al dicromato como eficaz depresor de la galena.

En 1929 Gaudin demostr6 la influencia del pH sobre la flotabilidad de los minerales en distintas condiciones. y de este modo se introdujo el control de este importante factor en los procesos de flotaci6n.

7 IMPORTANCIA DEL PROCESO

La importancia de la flotaci6n en la metalurgia extractiva actual es tal, que no ser6 exagerado decir que sin ella no se hubiera llegado al nivel actual de desarrollo de nuestra civilizaci6n y haber podido satisfacer las necesidades que la especie humana tiene debido al creciente consumo de minerales, metales, sales y combustibles.

Tomando datos de la producci6n de minerales, metales y derivados se puede constatar que en los 6ltimos 100 a1os el consumo se ha incrementado enormemente, mientras que las reservas han deca6do de manera espectacular. No cabe duda de que sin la flotaci6n como m6todo de concentraci6n no se hubieran podido alcanzar los niveles de producci6n actuales. ya que no habr6a minerales para tratar.

La flotaci6n ha permitido tratar minerales que anteriormente se consideraban desechos por su baja ley. y bajar la ley m6nima de los minerales a tratar de 6 a 100 veces, lo que supone que las reservas disponibles han aumentado enormemente.

La flotaci6n ha permitido la recuperaci6n de minerales y metales que anteriormente no se pod6an recuperar por falta de m6todo o por la baja ley que ten6an en la naturaleza.

Hoy día la flotación selectiva permite el tratamiento de unos 100 metales y minerales distintos.

La flotación no solo abrió nuevas posibilidades de tratamiento para recuperar minerales de baja ley, granulometría desfavorable y composiciones complejas, sino que lo hace de mejor forma.

Las recuperaciones por flotación siempre son mas altas, las leyes de los concentrados mayores. los estériles menores y los costes de producción y explotación mas bajos.

Por esta razón el 95% de los metales no ferrosos y los no metálicos tienen a la flotación como principal método de concentración.