

CAPITULO II

AGENTES QUÍMICOS DE FLOTACIÓN DE ESPUMAS



ING. MSc. NATANIEL LINARES GUTIÉRREZ
DOCENTE ESME/FAME – UNJBG
TACNA – PERÚ
2010

nlinaresg6@hotmail.com

OBJETIVO

- Al concluir el estudio de este capítulo, el lector estará capacitado para identificar, preparar, controlar y dosificar adecuadamente los diferentes **reactivos** que se utilizan en la **flotación de espumas** de los minerales valiosos.
- Asimismo estará capacitado para establecer los **lugares de adición de los reactivos de flotación**.
- También estará capacitado para **investigar, evaluar y seleccionar las fórmulas de reactivos** más eficaces para cada mineral que se desee procesar.

REACTIVOS DE FLOTACIÓN DE ESPUMAS

- Los reactivos de flotación corresponden a sustancias orgánicas e inorgánicas que promueven, intensifican y modifican las condiciones óptimas del mecanismo físico-químico del proceso de flotación de espumas de minerales, sean estos polares o apolares, sulfuros o no sulfuros; metálicos y no metálicos.



CLASIFICACIÓN DE LOS REACTIVOS DE FLOTACIÓN

A los reactivos de flotación los podemos clasificar en tres grandes grupo, a saber:

Los Colectores, cuya función es la de proporcionar propiedades hidrofóbicas a las superficies minerales.

Los Espumantes, que permiten la formación de espuma estable, de tamaño y mineralización adecuada.

Los Modificadores, que se utilizan para la regulación de las condiciones adecuadas para la acción selectiva de los colectores. A su vez pueden ser:

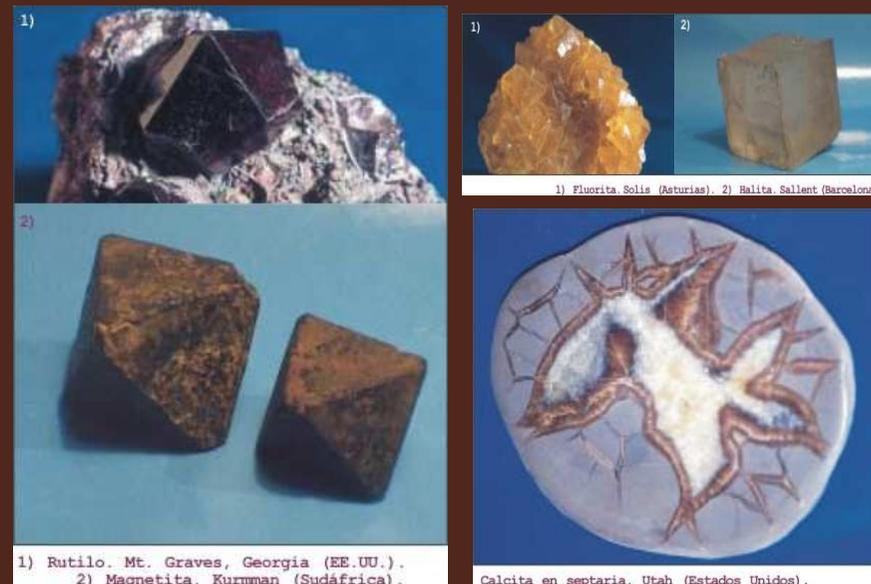
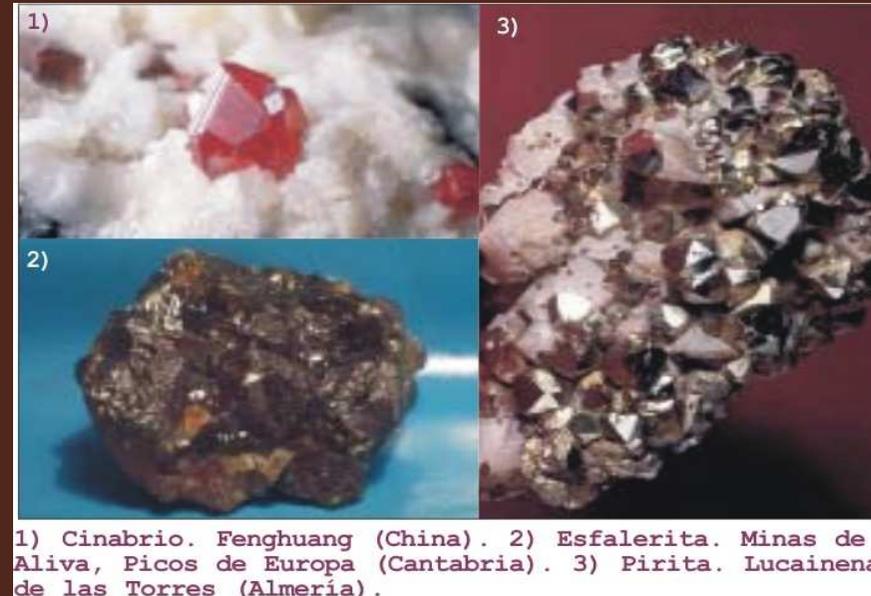
- Modificadores de pH.
- Depresores.
- Activadores.



- Para poder entender, la acción de los reactivos de flotación tenemos que recordar que todos los minerales los podemos clasificar en dos tipos, según sus características superficiales:

- Polares
- No polares ó Apolares

- Los minerales con un fuerte enlace superficial covalente o iónico se conocen como de **tipo polar** y exhiben altos valores de energía libre en la superficie polar, la cual reacciona fuertemente con las moléculas de agua y por lo tanto son hidrofílicos.
- Los **minerales polares** se subdividen en varias clases que dependen de la magnitud de la polaridad, la cual se incrementa de los grupos 1 al 5 de la tabla que se muestra a continuación.



GRUPO 1

<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
Galena	PbS
Covelita	CuS
Bornita	Cu ₅ FeS ₄
Chalcosita	Cu ₂ S
Chalcopirita	CuFeS ₂
Estibinita	Sb ₂ S ₃
Argentita	Ag ₂ S
Bismutita	Bi ₂ S ₃
Milerita	NiS
Cobaltita	CoAsS
Arsenopirita	FeAsS
Pirita	FeS ₂
Esfalerita	ZnS
Oropimente	As ₂ S ₃
Pentlandita	(Fe,Ni)S
Rejalgar	AsS
Au, Ag, Pt, Cu	(nativos)

GRUPO 4

<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
Hematita	Fe ₂ O ₃
Magnetita	Fe ₃ O ₄
Goetita	Fe ₂ O ₃ .H ₂ O
Cromita	FeO.Cr ₂ O ₃
(Ce,La,Di)PO ₄ .ThSiO ₄	
Ilmenita	FeTiO ₃
Corindón	Al ₂ O ₃
Pirolusita	MnO ₂
Limonita	2Fe ₂ O ₃ .3H ₂ O
Borác	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O
Wolframita	(Fe,Mn)WO ₄
Columbita	(Fe,Mn)(NbTa) ₂ O ₆
Tantalita	Fe(Ta ₂)O ₆
Rutilo	TiO ₂
Casiterita	SnO ₂
(Al,Fe,Cr) ₂ (Ca,Mg,Mn) ₃ (SiO ₂) ₃	

GRUPO 2

<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
Barita	BaSO ₄
Anhidrita	CaSO ₄
Yeso	CaSO ₄ .2H ₂ O

GRUPO 3a

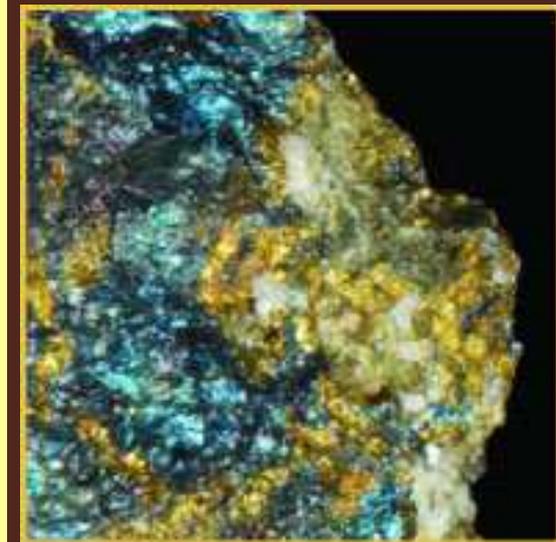
<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
Cerusita	PbCO ₃
Malaquita	CuCO ₃ .Cu(OH) ₂
Azurita	2CuCO ₃ .Cu(OH) ₂
Wulfenita	PbMoO ₄

GRUPO 3b

<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
Fluorita	CaF ₂
Calcita	CaCO ₃
Widerita	BaCO ₃
Magnesita	MgCO ₃
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
Apatita	Ca ₄ (CaF)(PO ₄) ₃
Scheelita	CaWO ₄
Smithsonita	ZnCO ₃
Rodocrosita	MnCO ₃
Siderita	FeCO ₃
Monacita	

GRUPO 5

<u>Mineral</u>	<u>Fórmula</u>
Zircón	ZrO ₂ .SiO ₂
Willemita	Zn ₂ SiO ₄
Hemimorfita	Zn ₄ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ .H ₂ O
Berilo	Be ₃ Al ₂ (SiO ₃) ₆
Feldespato	
Silimanita	Al ₂ SiO ₅
Granate	
Cuarzo	SiO ₂



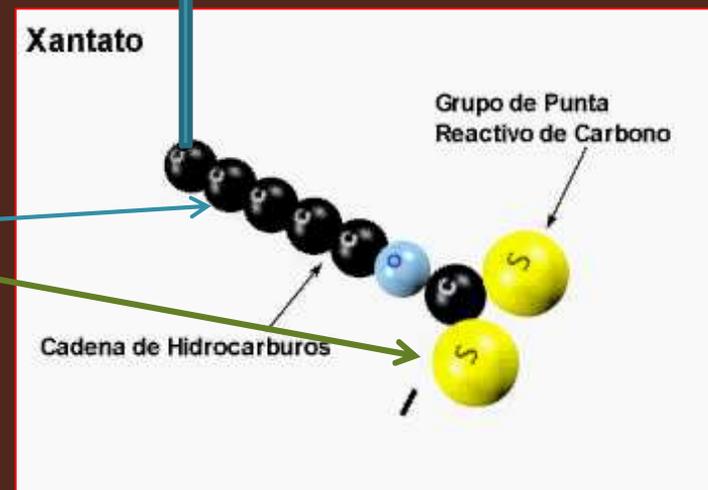
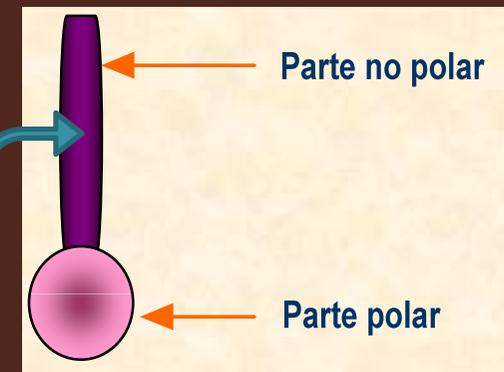
Los **minerales no polares** se caracterizan por enlaces moleculares relativamente débiles, es decir, las moléculas covalentes se mantienen juntas por las fuerzas de Van der Waals, ello hace que las superficies no polares no se unan fácilmente a los dipolos del agua y en consecuencia son hidrofóbicas.

- Los minerales del tipo apolar son:
 - **El grafito**
 - **El azufre**
 - **La molibdenita**
 - **El diamante**
 - **El carbón**
 - **El talco**

Todos ellos tienen alta flotabilidad natural con ángulos de contacto entre 60° y 90° .

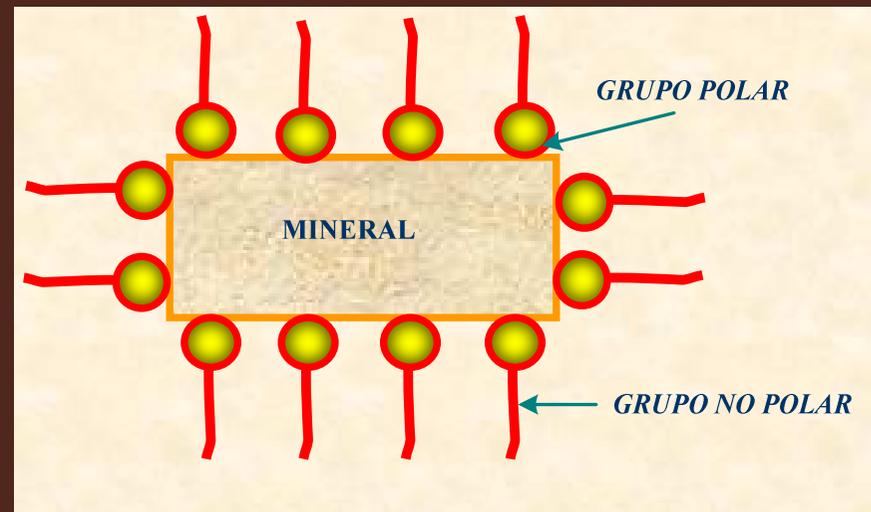
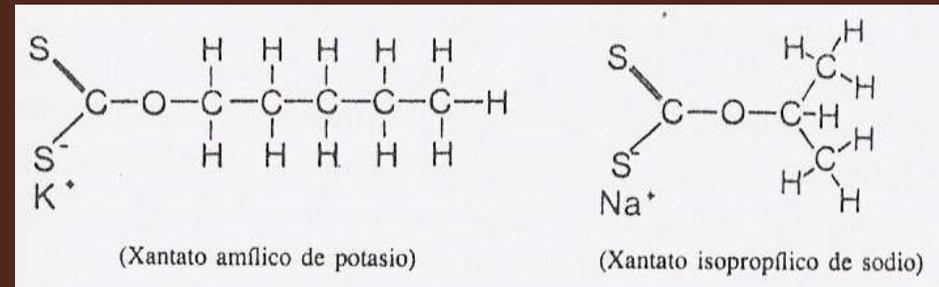
COLECTORES

- Los **colectores** son compuestos orgánicos de moléculas complejas de **estructura asimétrica y heteropolar**, cuya función principal es la de adsorberse en la superficie del mineral valioso hidrofobizándola selectivamente dentro de la **pulpa**, para crear condiciones de **reducción de la energía libre superficial del mineral hidratado** (mojado) a un punto donde sea posible la formación de un perímetro de contacto de fases (mineral-agua-aire), favoreciendo la adherencia de la partícula mineral a la burbuja.
- La mayoría de colectores tiene dos partes:
 - ❖ Una parte polar, y
 - ❖ Una parte no polar
- Ambas con propiedades diferentes.

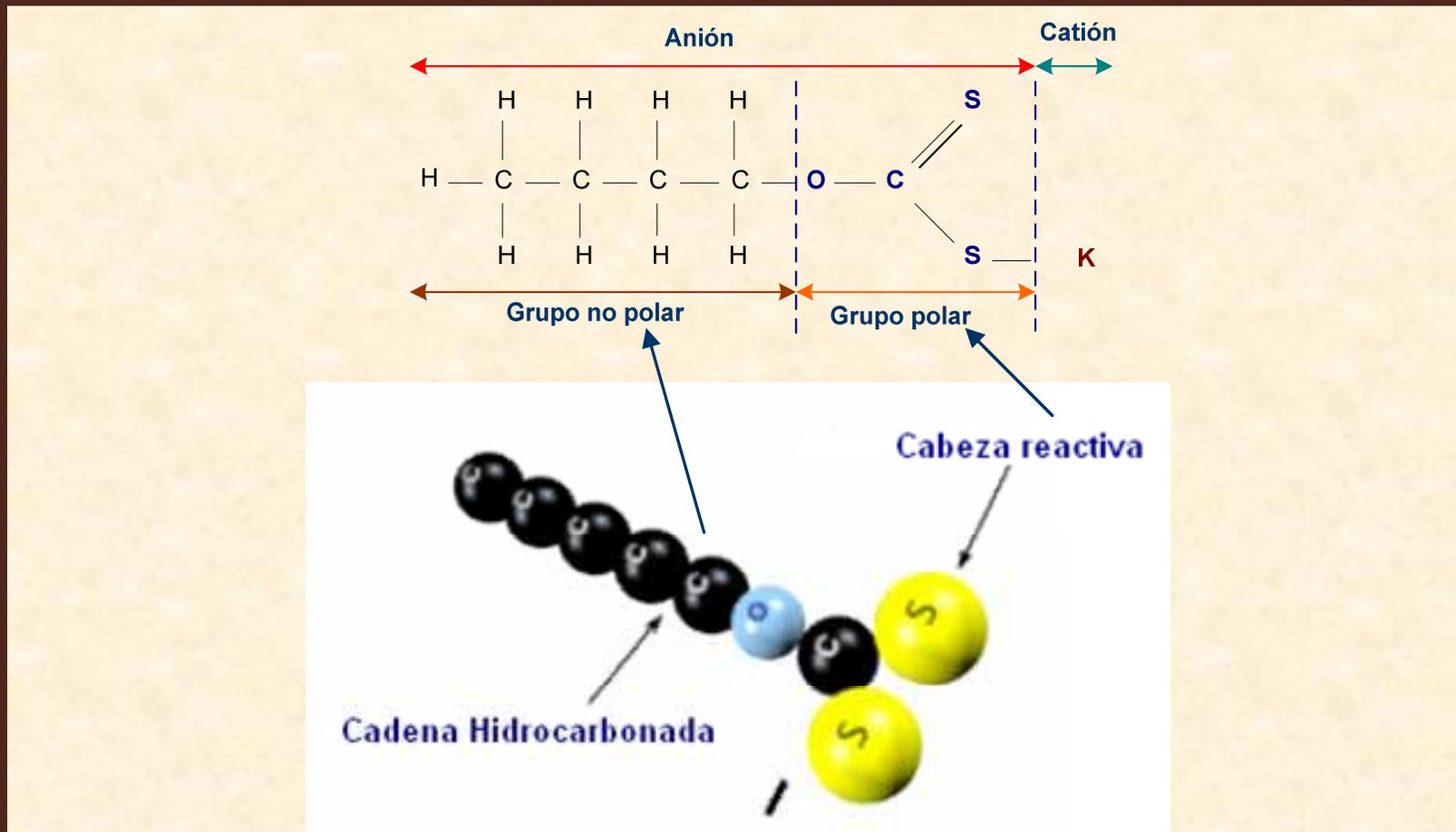


ADSORCIÓN DEL COLECTOR

- La parte **no polar** de la molécula es un **radical hidrocarburo**, el cual difícilmente reacciona con los dipolos del agua, por ende, tiene propiedades fuertes para repeler el agua, en consecuencia proporciona las **propiedades hidrofóbicas** al mineral, por estar este extremo funcional orientado al agua. La parte polar o iónica es la que puede adsorberse selectivamente en la superficie del mineral ya sea por reacción química con iones de la superficie del mineral (**quimisorción**) o por atracción electrostática a la superficie mineral (**adsorción física**).

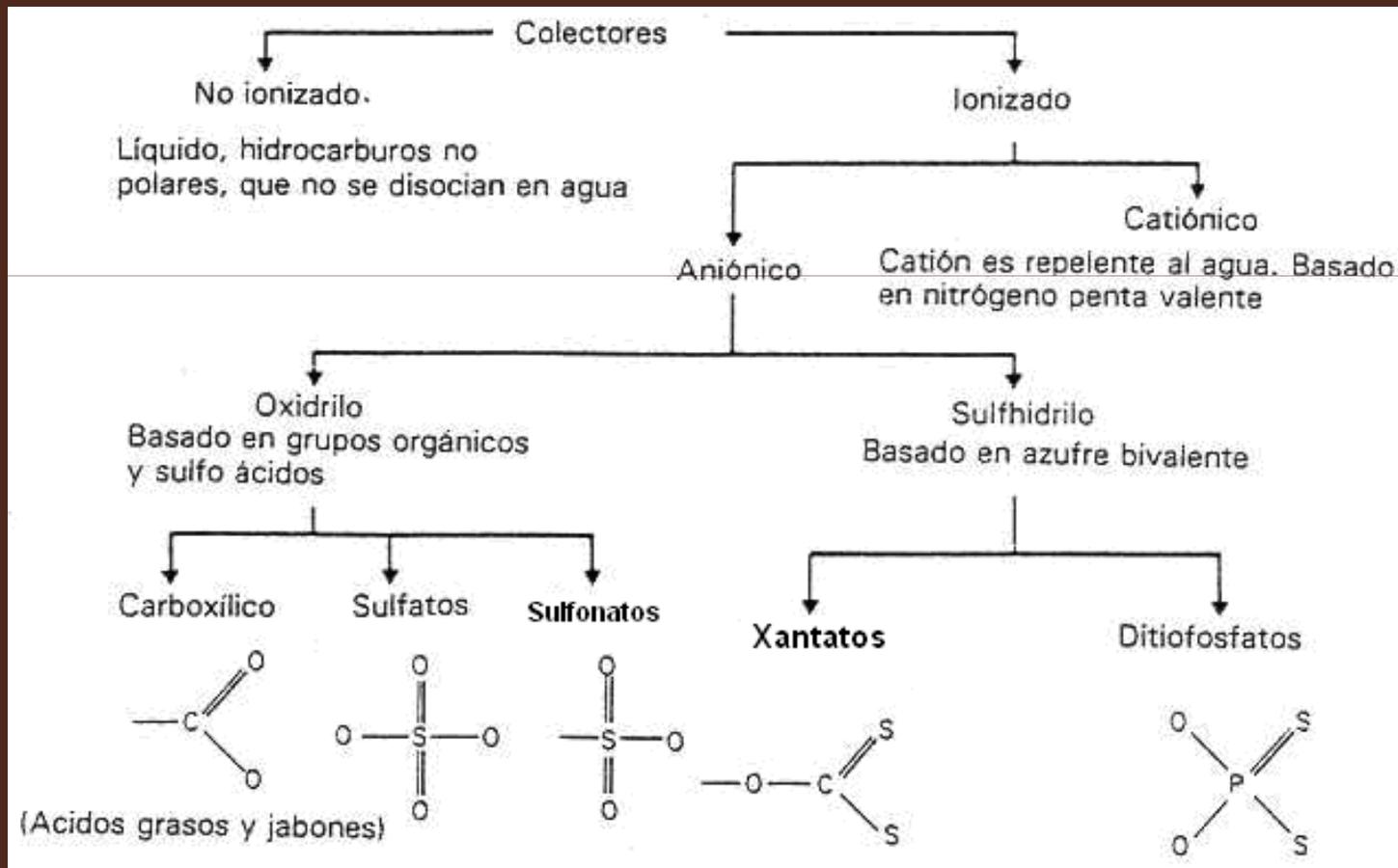


Esquema estructural de un colector



CLASIFICACIÓN DE LOS COLECTORES

- Una clasificación general se da a continuación , teniendo siempre en cuenta lo siguiente:
 - Su disociación iónica.
 - La actividad del anión y/o catión en relación a la superficie del mineral, y
 - La estructura del grupo solidofílico.

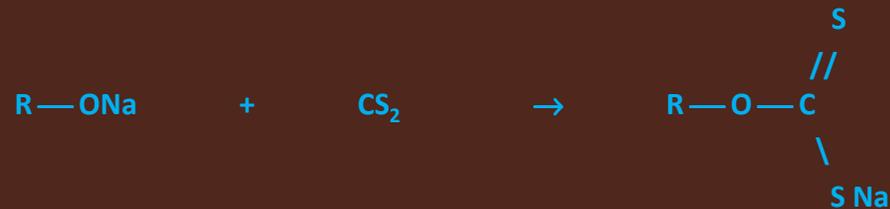
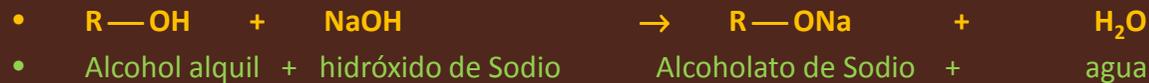


COLECTORES ANIONICOS

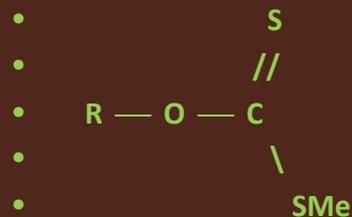
- Son los que más se usan en la flotación de minerales por su notable selectividad y su fuerte adherencia a la superficie mineral.
- Ellos se pueden clasificar de dos tipos y de acuerdo a la estructura de su grupo polar o solidofílico. Estos son:
 - Colectores aniónicos sulfhídricos o sulfhidrilos
 - Colectores aniónicos oxhidrilos
- Los **colectores sulfhídricos o tioles** son los reactivos que más se usan en la industria del procesamiento de minerales, por ser más efectivos para la flotación de minerales de metales pesados no ferrosos, principalmente los sulfuros.
- Se caracterizan porque en su grupo solidofílico contiene al sulfuro bivalente.
- Los más ampliamente usados de estos colectores aniónicos son :
 - los **xantogenatos**, técnicamente conocidos como **xantatos** y
 - los **ditiofosfatos** conocidos también como **Aerofloats**.
- También se viene utilizando en años recientes los dialquil tionocarbonatos, la tiocarbanilida y el mercaptobenzotiazol y en forma limitada los ditiocarbonatos y los alquil mercaptanos, del mismo modo los xantoformiatos o formiatos de xantógeno (Minerrec).

LOS XANTOGENATOS O XANTATOS

- El método de preparación del alquil xantato de sodio o potasio, consiste de la disolución de un hidróxido alcalino en el alcohol alquil, seguido de la adición del disulfuro de carbono a el alcoholato metálico. Debido a las reacciones altamente exotérmicas, la temperatura de la mezcla debe ser mantenida tan baja como sea posible para evitar la descomposición del xantato producido. Las reacciones son



- Alcoholato de sodio + disulfuro de carbono → Alquil xantato de sodio (sólido)
- En consecuencia el xantato tendrá la fórmula química general:



- Donde Me = Na⁺, K⁺, o H⁺ y R = Es el grupo o radical hidrocarburo (hasta 6 átomos) que puede ser variado para controlar su potencia y selectividad.

- Los xantatos son sustancias cristalinas duras con un olor característico, que le es propio debido a la existencia de una pequeñísima cantidad de mercaptanos.
- Los xantatos de metales alcalinos tienen generalmente tonos claros, desde blanco hasta amarillo claro.
- Los xantatos que más ampliamente se utilizan son:
 - Xantato etílico de potasio $C_2H_5OCS_2K$
 - Xantato etílico de sodio $C_2H_5OCS_2Na$
 - Xantato amílico de potasio $C_5H_{11}OCS_2K$
 - Xantato isopropílico de potasio $C_3H_7OCS_2K$
 - **Xantato isopropílico de sodio** $C_3H_7OCS_2Na$
 - Xantato hexílico de potasio $C_6H_{13}OCS_2K$
 - Xantato butílico sec. de sodio $C_4H_9OCS_2Na$
 - Xantato isobutílico de sodio $C_4H_9OCS_2Na$

En lo que respecta a la descomposición del ion xantato, de las numerosas reacciones que se han considerado por varios investigadores de la descomposición del xantato en soluciones acuosas, hay seis reacciones las cuales son reconocidas como pertinentes a los sistemas de flotación. A saber:

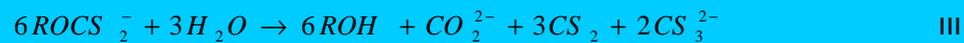
Hidrólisis del ion xantato.



Descomposición del ácido xántico.

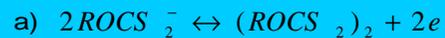


Descomposición hidrolítica.

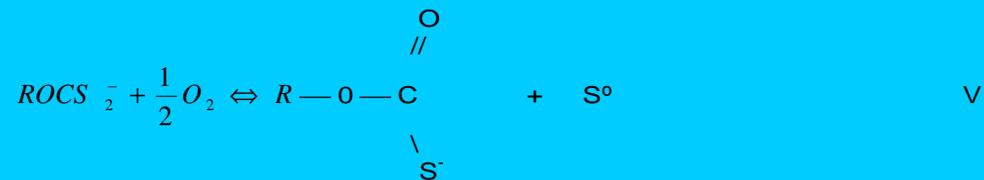


(El tritioarbonato puede descomponerse más adelante en CS_2 y S^{2-})

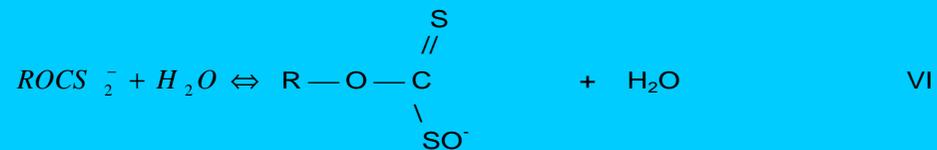
Oxidación a dixantógeno.



Oxidación del monotiocarbonato



Oxidación a perxantato.



Pellets de xantato

Embalaje del xantato



INFLUENCIA DEL OXÍGENO EN LA FLOTACIÓN CON XANTATO

- También se ha demostrado que el mineral sulfuro no se une a los aniones del colector sin la acción previa del oxígeno, donde el mecanismo de adsorción es de intercambio iónico entre el colector y el producto de oxidación, pero un exceso de oxígeno es también perjudicial.
- Al respecto, Plaksin ha determinado lo siguiente:
 - En ausencia de oxígeno las superficies frescas de los sulfuros se mojan, es decir, adsorben agua.
 - El oxígeno ayuda a la deshidratación de la superficie del mineral facilitando así la penetración de moléculas de colector, estableciendo el siguiente orden: **Primero se adsorbe el oxígeno y luego el colector.**
 - La cantidad requerida para la flotación completa con xantatos se incrementa en el siguiente orden: **Galena, pirita, esfalerita, calcopirita, pirrotita, arsenopirita, etc..**
 - La larga exposición con oxígeno (**envejecimiento**) impide la adsorción de los xantatos.

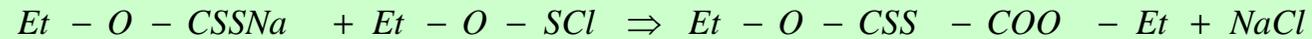
COLECTORES DERIVADOS DEL XANTATO

Entre los de mayor importancia tenemos los siguientes:

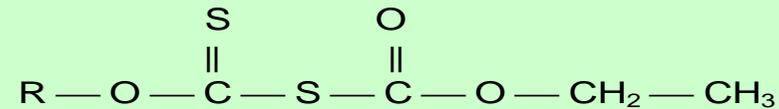
- Xantoformiatos.
- Tionocarbamatos
- Esteres xánticos.
- Mercaptanos.

LOS XANTOFORMIATOS.

Son derivados de los xantatos, en consecuencia, son el producto de la reacción del etil xantato de sodio, con etil cloroformato, esto es:



donde su formula estructural es:



Donde el R puede ser un radical etil, isopropil, butil, amil, etc..Son líquidos amarillos, aceitosos por ende insolubles en agua. Ejemplos más importantes son:

- Dietil xantoformiato
- Etil butil xantoformiato
- Etil isopropil xantoformiato
- Etil isobutil xantoformiato.
- Etil sec butil xantoformiato.
- Etil amil xantoformiato
- Etil metil amil xantoformiato

Los xantoformiatos son líquidos amarillos, aceitosos e insolubles en agua. El dietil xantoformiato fue utilizado como colector para cemento de cobre en procesos LPF (lixiviación, precipitación y flotación), pero actualmente solo es empleado en el circuito ácido de El Teniente (Chile) donde la mejor fórmula de reactivos utiliza 30% de gasolina y 10% de MIBC, mejorando así la colección de la molibdenita. Esta modificación redujo fuertemente el costo del colector a que las dosificaciones siendo las mismas que con xantoformiato puro y se mantiene las recuperaciones. En cuanto al aspecto operacional, los xantoformiatos pueden ser manipulados mediante tuberías de acero inoxidable de preferencia y PVC (plástico), pero no en presencia de cobre o sus aleaciones. Los plásticos deben ser usados con mucha cautela ya que son buenos solventes del PVC común, pero sucede así con el polietileno y el propileno, por lo tanto aceptables. Los xantoformiatos son inflamables. El producto puro tiene un alto grado de ignición. Este reactivo es tóxico a los peces e irritante para las personas, pudiendo provocar vómitos si no se manipula con la protección adecuada para uso y manipuleo de reactivos.

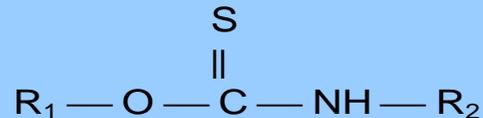
LOS TIONOCARBAMATOS.

Los Tionocarbamatos son también derivados de los xantatos, que consiste en hacer reaccionar un xantato con un alquil aluro que da lugar a un ester, el cual se hace reaccionar con una amina para dar lugar al tionocarbamato, proceso desarrollado por Harris, 1954.

Las reacciones son como sigue:



y su forma estructural general es:



Donde los radicales R_1 y R_2 son los que varían

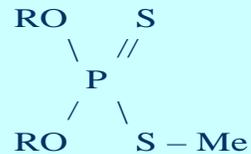
Ejemplos de ellos son los siguientes:

- Isopropil etil tionocarbamato (DOW – Z-200)
- Isopropil metil tionocarbamato.
- Butil metil tionocarbamato.
- Isobutil etil tionocarbamato.
- Isobutil metil tionocarbamato.
- Etil isopropil tionocarbamato.

Los tionocarbamatos son líquidos incoloros, insolubles en agua, pero muy solubles en solventes orgánicos de modo tal que su empleo en flotación puede estar mezclado con espumantes en cualquier proporción. Debido a su contenido de impurezas, tienen olor a compuestos de azufre. Los tionocarbamatos son colectores muy fuertes o enérgicos y también selectivos en circuitos ácidos de flotación. Sus aplicaciones no son generales en la mediana y pequeña minería por su alto costo, pero si en la gran minería previa evaluación de sus ventajas.

LOS DITIOFOSFATOS O AEROFLOATS

Los ditiofosfatos o aerofloats son también colectores de gran importancia en la flotación de sulfuros que se caracteriza por tener en su grupo solidofílico al fósforo pentavalente. La estructura de estos compuestos puede ser presentada con la fórmula general

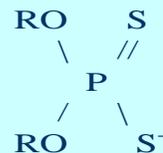


siendo R un radical hidrocarburo aromático o alifático y Me es el átomo de hidrógeno o metal alcalino.

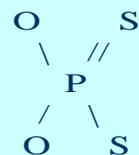
Los ditiofosfatos se obtienen por vía de la interacción del pentasulfuro de fósforo con fenoles y alcoholes por la reacción:



siendo R el radical alquilo del alcohol o el radical arilo del fenol. El anión es la parte activa y está representada por la siguiente fórmula



Es la parte aniónica



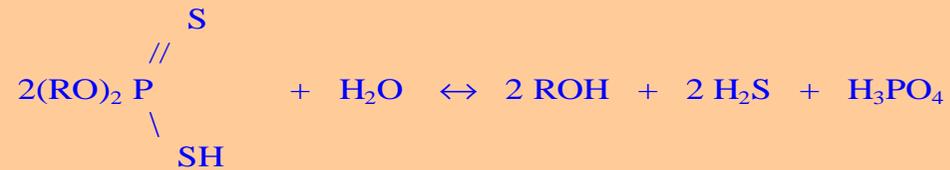
Es el grupo solidofílico

El catión es el Na^+ , H^+ o NH_4^+

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

- Son ésteres secundarios del ácido ditiofosfórico y se preparan haciendo reaccionar pentasulfuro de fósforo y alcoholes cuyas características principales son:
 - Líquidos.
 - Se recomienda agregarlos en la molienda o en el acondicionamiento. Diluidos (5 – 20%) o sin diluir dependiendo de cual se trate (en general tienen poca solubilidad en agua).
 - Algunos tienen propiedades espumantes (Aerofloat 25, 31 y 33).
 - Son colectores de menor potencia que los xantatos.
 - Son **más selectivos** que los xantatos.
 - Se usan en la flotación de sulfuros (Cu, Pb, Zn), algunos de ellos en la flotación de sulfuros de Fe, metales preciosos y óxidos no metálicos.
 - Dosificación usual 25 – 100 g/t.
 - Ejemplo, nombre comercial: Aerofloats 25, 31, 33, .., 238, 242, etc. de la Cyanamid (Cytec).
 - La Cyanamid (Cytec) les llama promotor + el nombre comercial, ejm.: Promotor Aerofloat 238.

Sutherland ha establecido que bajo la acción del agua los ditiofosfatos se descomponen de acuerdo a la reacción:

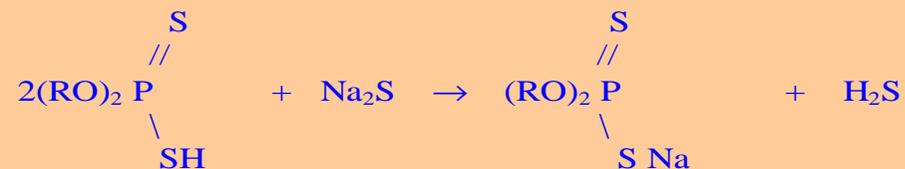
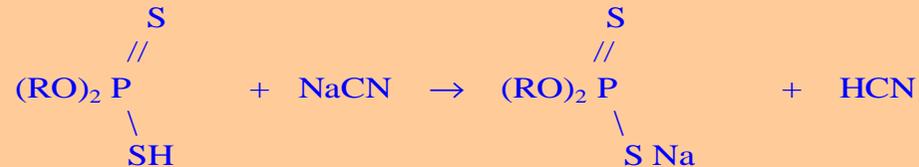


En un medio alcalino, este proceso transcurre tan lento que no influye en los resultados de la flotación. Bajo la acción del ácido sulfúrico puede tener lugar la siguiente reacción:



Durante la interacción de los ditiofosfatos con cianuro de sodio o sulfuro de sodio, se desprenden el ácido cianhídrico y el sulfuro de hidrógeno que son tóxicos.

La reacción es:



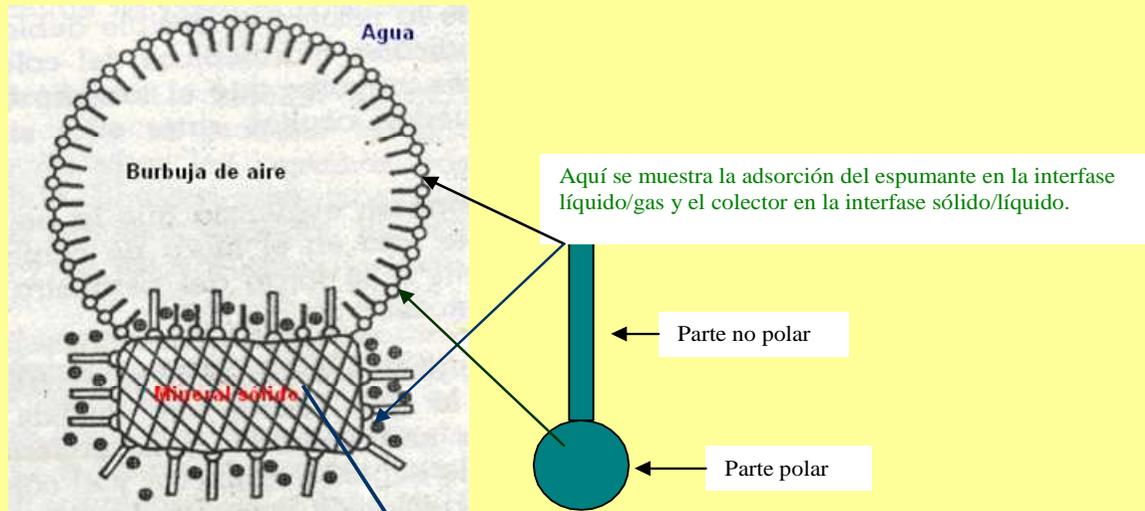
Con los iones de metales pesados, los ácidos ditiofosfóricos son capaces de formar precipitados hidrofóbicos difíciles de disolver en agua.

Los ditiofosfatos son colectores comparativamente débiles pero dan buenos resultados en combinación con los xantatos. Tienen alguna propiedad espumante. La mayoría se adiciona en concentraciones al 100% (puros) y por lo general se los adiciona en molienda, para lograr un mejor contacto con los minerales valiosos. Sólo los solubles se pueden añadir en soluciones no menor de 10% P/V.

- Los ditiofosfatos más comunes son:
 - Di sec butil ditiofosfato de sodio (AF-238).
 - Di isobutil ditiofosfato de sodio
 - Di butil ditiofosfato de sodio.
 - Di isopropil ditiofosfato de sodio. (AF-211).
 - Dietil ditiofosfato de sodio. (Aerofloat sódico).
 - Mezcla di etil y di butil ditiofosfato de sodio. (AF-208)
 - Di cresil ditiofosfato de sodio + ácido cresílico + tiocarbanilida(6%) (AF-242 y AF-31).
 - Ácido cresílico + 15% di amil ditiofosfato de sodio. (AF-15)
 - Ácido cresílico + 25% di amil ditiofosfato de sodio. (AF-25)

ESPUMANTES

Los espumantes son sustancias orgánicas tensoactivas (superficies activas) heteropolares que pueden adsorberse en la superficie de la interfase aire-agua. Su función principal es proporcionar una adecuada resistencia mecánica de las burbujas de aire, manteniéndolas dispersas y previniendo su coalescencia o unión, de modo que puedan presentar superficies de adherencia adecuada de las partículas de mineral flotante, y por consiguiente logra la estabilidad de la espuma de flotación, la cual a reducido su energía libre superficial y la tensión superficial del agua. De este modo la estructura polar de la molécula del espumante se adsorbe en la superficie de interfase agua-aire con su grupo no polar orientado hacia el aire y los grupos polares hacia el agua, debido a que estos grupos liofílicos tienen gran afinidad por el agua. La eficiencia del empleo de los espumantes depende en gran medida del pH de la pulpa, donde su capacidad para la formación de la espuma es máxima cuando el reactivo se halla en forma molecular. En la figura se muestra la adsorción de un espumante



CLASIFICACIÓN DE LOS ESPUMANTES

Se clasifican de la siguiente manera:

- Espumantes ácidos
 - Alquilarilsulfonatos.
 - Fenoles.
- Espumantes neutros.
 - Alcoholes alifáticos.
 - Sustancias con enlaces éter
 - Polialcohalcanos.
 - Monoéteres poliglicólicos.
 - Dialquiltalatos.
 - Alcoholes aromáticos y alicíclicos.
- Básicos.
- Modificadores de espuma o antiespumantes.



FUNCIÓN DE LOS ESPUMANTES

La función más importante de un espumante es formar una espuma estable, que permite extraer el concentrado, por ende, tiene también valiosos efectos en un circuito de flotación tales como:

- **Estabilizar la espuma**
- **Disminuir la tensión superficial del agua**
- **Mejorar la cinética de interacción burbuja - partícula**
- **Disminuir el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia)**
- **Origina la formación de burbujas más finas, es decir, mejora la dispersión del aire en la celda de flotación.**
- **Regula la velocidad a la cual las burbujas suben hacia la superficie de la pulpa.**
- **Afectan la acción del colector.**
- **Incrementa la resistencia de la película de la burbuja mineralizada de la espuma formada.**

SELECCIÓN DE LOS ESPUMANTES

- Para seleccionar un espumante se debe tener en cuenta ciertas condiciones tales como:
 - Debe actuar a bajas concentraciones y producir una espuma de volumen y estabilidad adecuada.
 - Las espumas deben destruirse fácilmente al salir de la celda.
 - Las espumas deben permitir el drenaje o desaguado o lavado de las partículas finas arrastradas pero no colectadas.
 - El espumante debe ser de bajo precio y efectivo.
 - De nulo poder colector.
 - El espumante debe ser poco sensible a las variaciones del pH y a las sales disueltas en la pulpa.
 - La cantidad utilizada debe oscilar entre 5 y 150 g/t.

MODIFICADORES O REGULADORES

Los reactivos modificadores son utilizados en flotación para modificar y controlar la acción del colector, ya sea intensificando o reduciendo el efecto repelente al agua sobre la superficie mineral, haciendo de este modo más selectiva la acción del colector hacia ciertos minerales, asegurando una mejor precisión en la separación eficiente, razonable y económica de ellos.

- La función del modificador implica tanto la reacción con el mineral, como con los iones presentes en la pulpa, siendo en muchos casos esta reacción de naturaleza química. Los modificadores o regulares según su acción y uso en flotación, es variada, reciben este nombre porque no tienen tareas específicas de colección o espumación.
- Estos se clasifican como siguen:
 - Activadores.
 - Modificadores de pH.
 - Depresores.

ACTIVADORES

Son sales solubles cuyos iones alteran la naturaleza química de las superficies de los minerales valiosos, de tal modo que mejoran o ayudan a la adsorción de un colector, haciéndolos hidrofóbicos y flotables, es decir, hacen la acción del colector más selectiva.

Entre los principales activadores tenemos los siguientes:

- Sales solubles de metales pesados no ferrosos, que activan al esfalerita (Cu,Pb), pirita (Cu), cuarzo (Cu, Ca, etc) y ciertos no sulfuros.
- El sulfuro de sodio y otros sulfuros solubles en agua, se utilizan en la activación de minerales metálicos no ferrosos oxidados tales como la cerusita, malaquita, etc..
- El oxígeno atmosférico, que activa la flotación de sulfuros y a algunos minerales no sulfuros.

DEPRESORES

- Son reactivos que inhiben o evitan la adsorción de un colector por un mineral volviéndolo hidrofílico, por tanto, no flotable. Esto permite una flotación diferencial o selectiva. Una forma de depresión natural es por las lamas presentes en la pulpa que recubren a los minerales haciéndolos hidrofílicos.
- Entre los reactivos que podemos utilizar en flotación de minerales son:
 - El sulfuro de sodio (Na_2S) y otros sulfuros solubles en agua, se utiliza para deprimir los sulfuros.
 - El cianuro (Na^+ o K^+) se usa en la flotación selectiva de sulfuros, utilizado para deprimir la esfalerita, minerales de cobre y pirita.
 - Los sulfitos, bisulfitos, hiposulfitos y ciertos sulfatos (Zn , Fe), se emplean para la flotación selectiva de menas sulfurosas, deprimiendo principalmente a la esfalerita.
 - El silicato de sodio, se le emplea para deprimir el cuarzo, calcita y otras gangas y para la separación selectiva de no sulfuros.
 - El cromato y el dicromato de potasio (K_2CrO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), para deprimir la galena.
 - Reguladores orgánicos no ionizantes tales como el almidón, dextrina, ácido tánico, quebracho, etc., para minerales no sulfuros.
 - La cal (CaO o $\text{Ca}(\text{OH})_2$) se le emplea como depresor especial para los iones unidos a los sulfuros en la flotación de menas sulfurosas.

DEPRESORES

- El **complejo cianuro-zinc** deprime a sulfuros de cobre (calcosita)
- El **ferrocianuro y reactivos Nokes - hidróxido de sodio** más pentasulfuro de fósforo- deprime sulfuros de cobre.
- El **Fluorosilicato** y ion fluoruro para deprimir cuarzo y silicatos.
- Los **depresores orgánicos** son comúnmente empleados en la flotación de minerales no metálicos y pueden ser categorizados como poliglicol éter, polisacaridos (almidón, carboximetilcelulosa, dextrina y goma) y polifenoles (tanino, quebracho, mimosa y extracto de zarzo). La mayor aplicación está en la depresión de calcita, dolomita, talco y pirofilita, aunque el almidón y la dextrina son usados para deprimir galena, pirita y molibdenita.
- El proceso principal de adsorción es de enlace hidrógeno aunque los polisacáridos parecen reaccionar especialmente con los minerales de hierro, favoreciendo así su uso para floculación y depresión de estos minerales.

Agente Activo	Adicionado como	Uso Común	Colector
Catiónico			
Cu ⁺⁺	CuSO ₄	Activador de sulfuros de Zn, Fe, Co, Ni.	Xantato
Pb ⁺⁺	Acetato de plomo	Activador de la Estibinita	Xantato
Pb ⁺⁺	Acetato de plomo	Activador de la halita	Acido graso
Ca ⁺⁺	CaO o Ca(OH) ₂	Depresor de la pirita	Xantato
		Activador de la sílica	Acido graso
Zn ⁺⁺	ZnSO ₄	Depresor de la esfalerita y marmatita	Xantato
Aniónico			
O ⁻	Aire	Depresor de la pirrotita	Xantato
SO ₃ ⁻	Na ₂ SO ₃	Depresor de esfalerita	Xantato
S ⁻	Na ₂ S	Activador de mineral oxidado de Pb y Cu.	Xantato
		Depresor de todos los sulfuros	Xantato
CN ⁻	NaCN	Depresor de sulfuros de Cu, Zn y Fe.	Xantato
SiO ₃ ⁻	Silicato de sodio	Depresor de gangas limosas	Xantato
		Activador de silicatos	Catiónico
CO ₃ ⁻	Na ₂ CO ₃	Activador de sulfuro de plomo	Xantato
		Depresor de ganga	Ácido graso
Coloide orgánico			
Dextrina, almidón		Depresores de ganga limosa	Xantato
Sulfonato de lignina		Depresor de limos carbonáceos	Ácido graso

MODIFICADORES DE pH

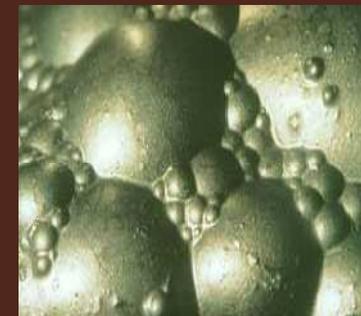
La efectividad de todos los reactivos o agentes de flotación dependen grandemente del grado de alcalinidad (OH^-) o acidez (H^+) de la pulpa. Por lo tanto, un objetivo primario de una prueba de flotación es encontrar el valor óptimo del pH para una combinación dada de reactivos y mena. El pH es uno de los pocos factores que se pueden medir fácilmente en una pulpa de flotación.

- La mayoría de Plantas Concentradoras que tratan sulfuros operan con una pulpa alcalina, debido a que produce resultados metalúrgicos óptimos y previene la corrosión de los equipos metálicos. Pocas Plantas usan todavía pulpas ácidas, localizadas donde la mena es muy ácida y la cal es difícil de conseguir o donde los minerales son flotados después de haber lixiviado la pulpa con ácido. Los reguladores de alcalinidad más comúnmente utilizados en flotación son la cal (CaO o $\text{Ca}(\text{OH})_2$) y el hidróxido de sodio (NaOH), siendo la cal la más económica, pero cuando el ion calcio causa problemas se utiliza el hidróxido.
- El control del pH ácido es generalmente con ácido sulfúrico (H_2SO_4) por ser de más bajo costo. Moderadamente concentrado el ácido sulfúrico es también utilizado para destruir los colectores adsorbidos, principalmente xantatos y ácidos grasos, con el fin de hacer hidrofílicos a los minerales flotados.

ESPUMAS DE FLOTACIÓN

Las espumas de flotación deben contar con las siguientes condiciones:

- Las partículas de mineral a flotarse deben adherirse fuertemente en las espumas.
- La separación suplementaria máxima posible, debido a la separación selectiva de las partículas de ganga, deben producirse en las espumas.
- Las espumas no deben ser excesivamente estables y deben romperse rápidamente después de salir de la celda de flotación, de no ser así, causarán dificultades en las canaletas de recepción, en el espesamiento y en el filtrado.



PROPIEDADES DE LAS ESPUMAS

Las propiedades de las espumas de flotación son de muy fácil control, si las condiciones físicas y físico-químicas del medio se alteran conjuntamente.

- Los factores físicos que determinan las propiedades de las espumas son:
 - El espesor del lecho (colchón) de espumas.
 - La velocidad y método de la eliminación de las espumas.
 - La cantidad de burbujas y partículas minerales presentes.
 - La dispersión de las espumas.
 - La intensidad del movimiento de la pulpa en la capa inmediata inferior de la espuma.
- Los factores físico-químicos incluyen los cambios en la alimentación de reactivos que afectan la estabilidad del lecho líquido que separa la burbuja.



ESTRUCTURA DE LAS ESPUMAS DE FLOTACIÓN

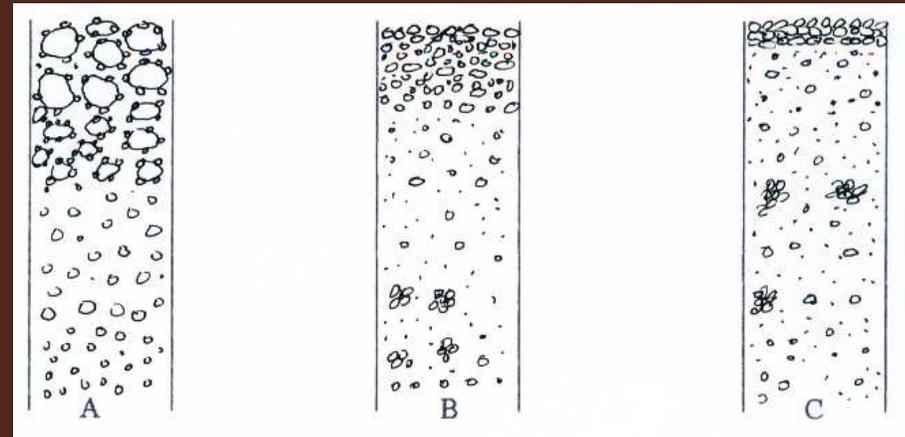
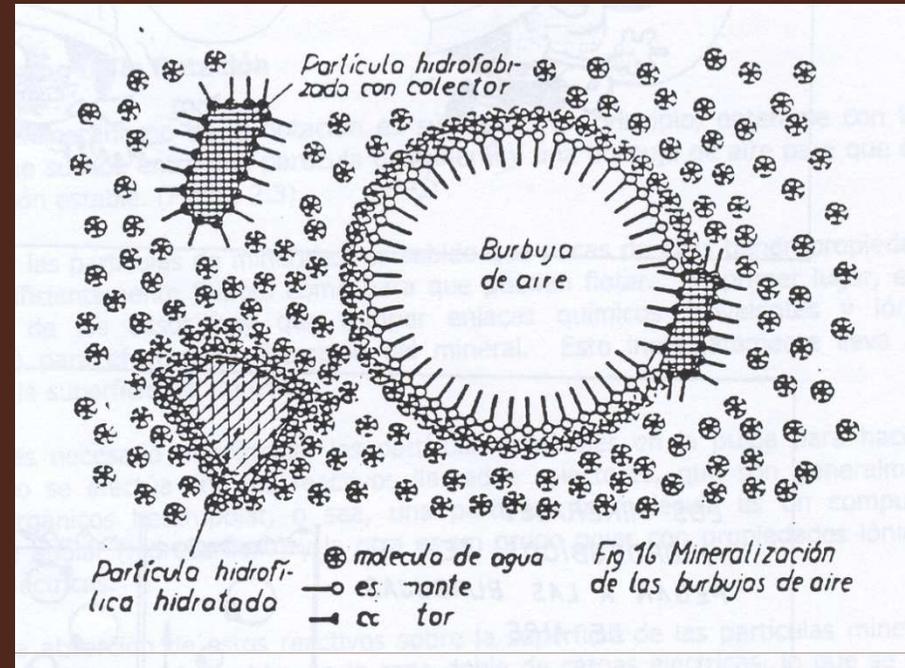
- Las estructuras de flotación consisten de burbujas de aire separadas por lechos de agua, que pueden dividirse en tres tipos básicos, a saber:
 - Estructura columnar.
 - Agregados de espuma.
 - Películas de espuma.
- Las **espumas de tipo de estructura columnar** son muy frecuentes en flotación de minerales, generalmente en la concentración de partículas con tamaños normales.
-
- Sus características son:
 - Las burbujas de aire de la capa superior son más grandes que las de las capas inferiores.
 - Los lechos de agua que separan a las burbujas de aire en las espumas disminuyen en espesor conforme se aproximan a la superficie superior de las espumas.
 - El colchón de espumas es relativamente grueso y varía de 5 a 20 cm.
 - Las burbujas más grandes generalmente son deformadas.
 -
 - Las espumas de este tipo contienen relativamente más agua que las espumas de los otros tipos, particularmente en las capas más inferiores, su estabilidad varía en un rango muy amplio y son extremadamente móviles.

- Los **agregados de espumas** consisten de espumas relativamente grandes que se adhieren entre ellas por las numerosas burbujas de aire. Son más pequeñas que las anteriores aunque la distribución de las burbujas de diversos tamaños a diferentes niveles en las espumas es similar.

- Entre las principales características de este tipo de espumas son:

- ❖ Contienen relativamente poca agua.
- ❖ Son completamente estables.
- ❖ Se rompen rápidamente al salir de la celda.

- Las **espumas peliculares** de flotación son muy similares a los agregados de espumas pero son más delgadas. Las partículas minerales que suben en las espumas de este tipo son muy grandes, tienen una baja gravedad específica y generalmente son fuertemente repelentes al agua.



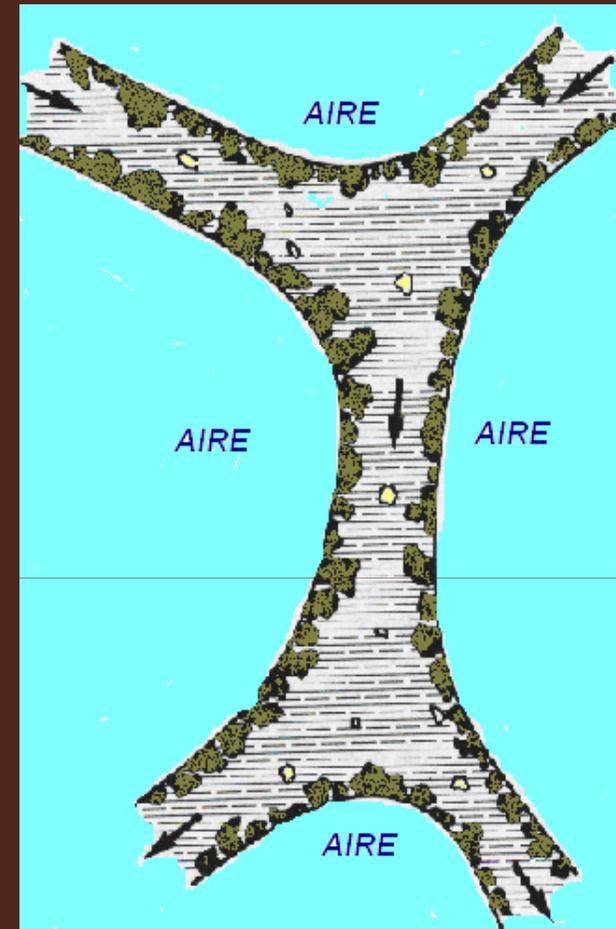
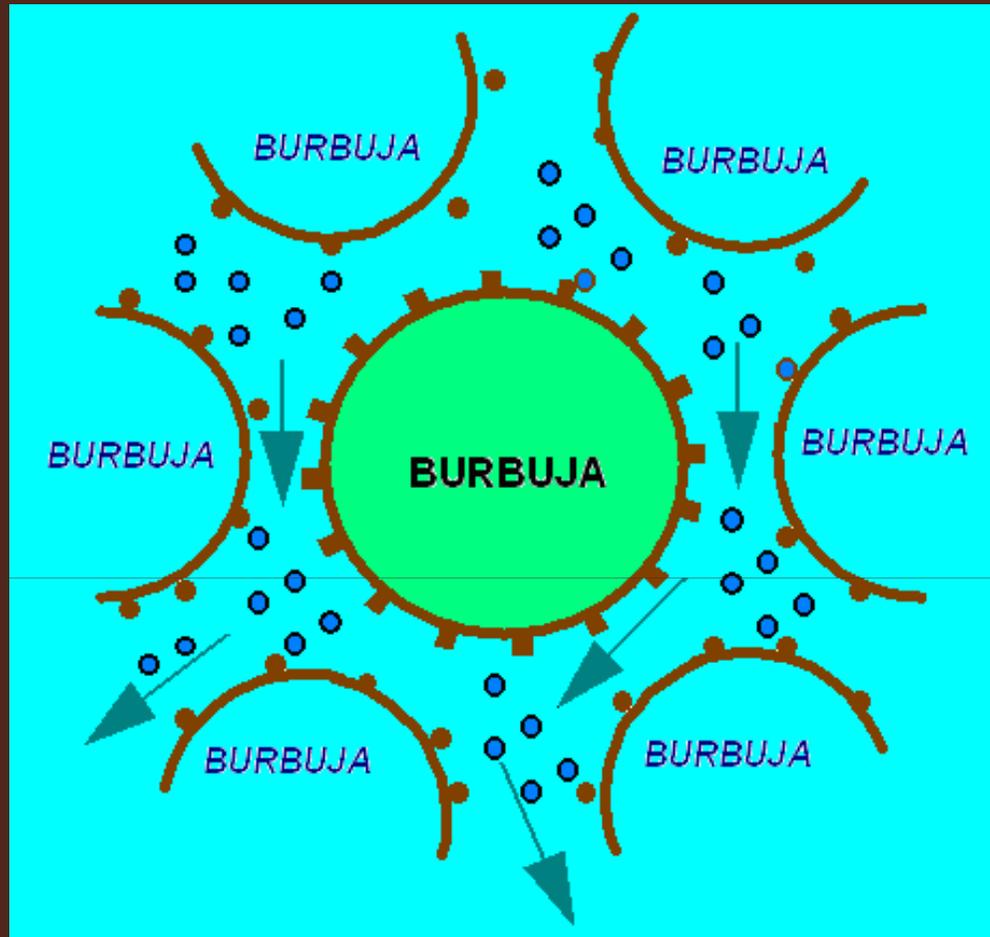
ESTABILIDAD DE LAS ESPUMAS

La estabilidad de las espumas de flotación determina una propiedad básica que es el tiempo de retención, donde también el factor básico en la ruptura de las espumas es la coalescencia de las burbujas, que tiene lugar cuando es considerable la reducción del espesor del lecho de agua que separa a las burbujas, cuando no hay suficiente estabilidad de dichas burbujas.

- Este lecho de agua se hace más delgado por las siguientes razones:
 - ❖ El agua que separa a las burbujas corre hacia abajo por acción de la gravedad.
 - ❖ El agua de los lechos se evapora de la superficie de las espumas.
 - ❖ La presión de capilaridad P se produce cuando la reducción del lecho de agua a alcanzado un cierto punto y el agua pasa al "triángulo de Gibbs", tiende a tirar la cubierta de la burbuja hacia adentro y está dada por la ecuación

$$P = \frac{2\gamma_{wa}}{r}$$

- Donde:
- r = Es el radio de curvatura de la superficie de la burbuja.



- Flujo de agua en una sección plana del lecho de espumas dentro del triángulo de Gibbs

EFFECTO DE LOS REACTIVOS EN LA ESTABILIDAD DE LAS ESPUMAS

Los reactivos de flotación afectan la estabilidad de las espumas de flotación por alteración de:

- **La estructura y composición del lecho de adsorción sobre la superficie de la burbuja.**
- **La naturaleza de la cubierta del mineral sobre estas superficies.**

De acuerdo a P.A. Rebinder, todos los estabilizadores del lecho de agua pueden dividirse en tres grupos principales:

- **Sustancias de superficie activa que forman soluciones coloidales o semi-coloidales en el agua, estas sustancias se concentran en el lecho de adsorción y forman una estructura semejante a la gelatina.**
- **Sustancias solubles en agua formando una solución real (moléculas dispersas).**
- **Sustancias no polares que son prácticamente insolubles en agua (kerosene).**

CONSUMO Y DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS PARA FLOTACIÓN

Los cálculos de consumo de reactivos se realizan para dos circunstancias de empleo y son:

- Consumo a nivel industrial (piloto y a gran escala).
- Consumo a nivel experimental (laboratorio).

A. Consumo de reactivos a nivel industrial.

- ◆ Para reactivos líquidos (en solución)

$$\frac{lb}{ton} = \frac{\frac{cc}{min} * GS * \% P}{31,7 * Q}$$

Donde:

GS. = Es la gravedad específica de la solución.

% P = Es la potencia o la concentración de la solución P/V.

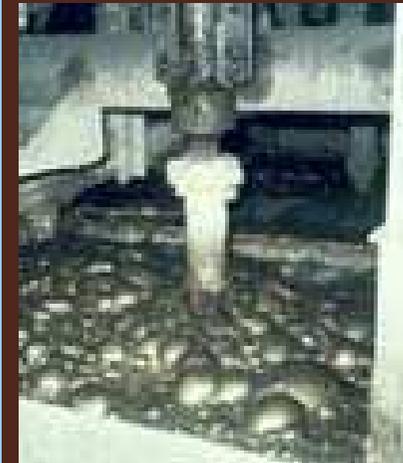
Q = Son las toneladas de mineral tratadas por día.

Para expresar en kg/t , solo se multiplica por 0,5; así:

$$\frac{Kg}{t} = \frac{lb}{ton} * 0,5$$

- ◆ Para reactivos sólidos o líquidos puros:

$$\frac{lb}{ton} = \frac{\frac{g}{min}}{0,317 * Q}$$



CONSUMO Y DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS PARA FLOTACIÓN

B. Consumo de reactivos a nivel experimental (laboratorio).

Se puede determinar utilizando las siguientes fórmulas:

- ◆ Gramos de reactivos por 1 t de mineral.

$$\frac{g}{t} = \frac{cc * 1000 * 1000}{P} * \frac{S}{100}$$

- ◆ Kilogramos de reactivos por 1 t de mineral

$$\frac{kg}{t} = \frac{10 * cc * S}{P}$$

- ◆ Libras de reactivos por 1 ton de mineral

$$\frac{lb}{ton} = \frac{19,958 * cc * S}{P}$$

Donde:

P = Peso de la prueba en gramos.

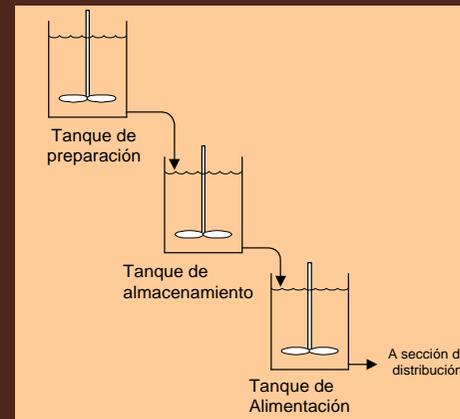
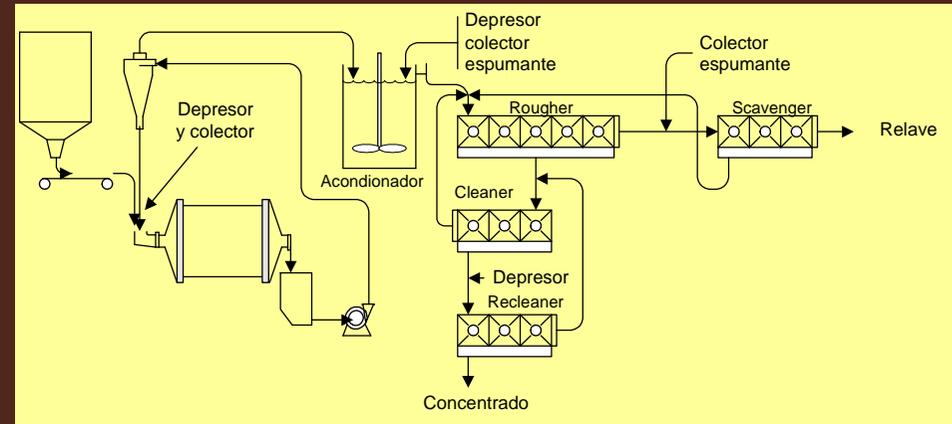
S = Porcentaje de concentración de la solución.

cc = N° de centímetros cúbicos utilizados en la prueba.

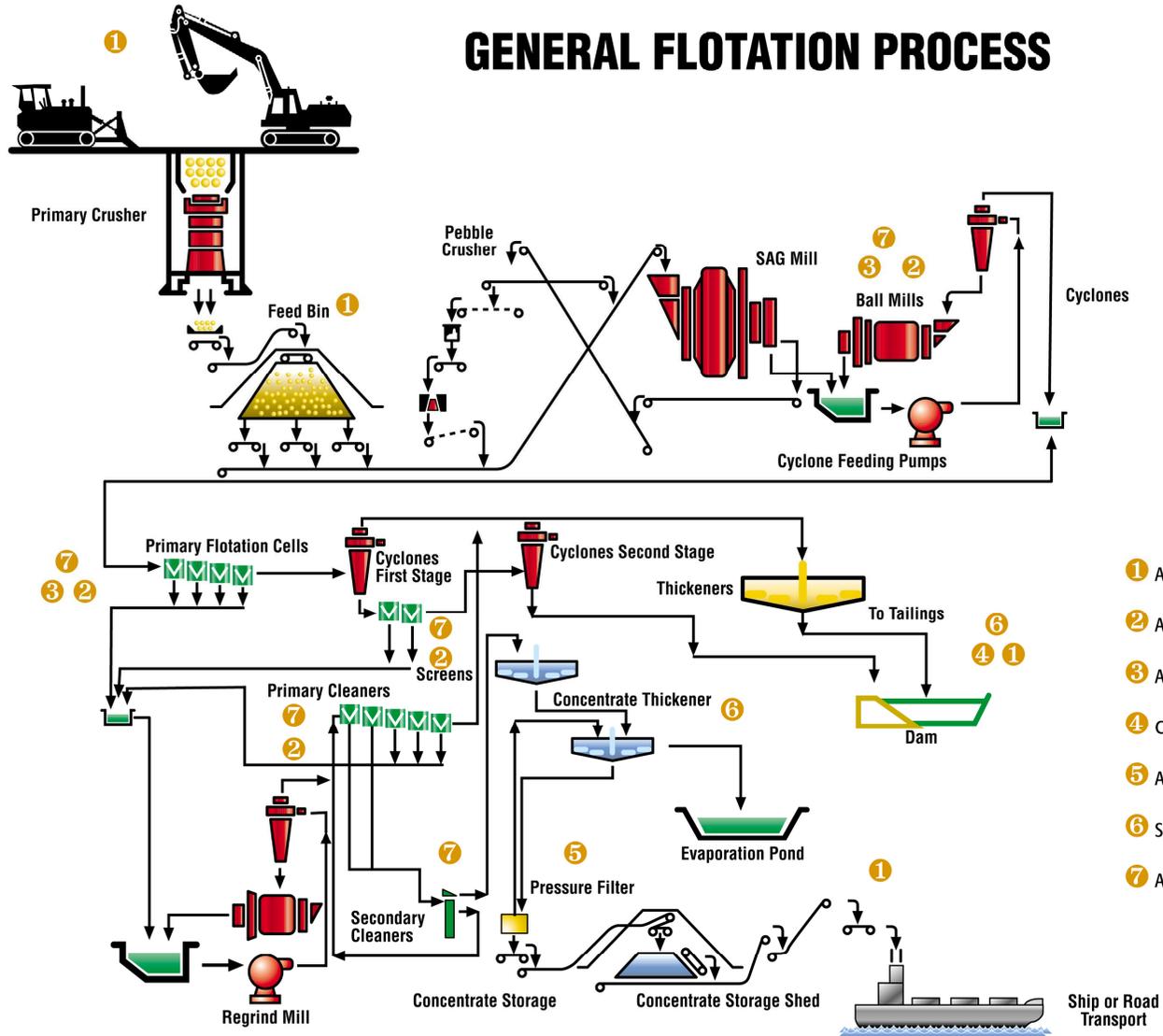
Tipo	Clasificación y Composición	Forma usual de adición	Aplicaciones típicas y algunas propiedades
Colector	Xantato		
	1. Etil Na Etil K	Solución al 10% Solución al 10%	Para flotación selectiva de menas sulfuro de Cu-Zn, Cu-Pb-Zn
	2. Isopropil sodio Isopropil K	Solución al 10 % Solución al 10 %	Colector más potente que el etil para menas de Cu, Pb y Zn, Au, Co, Ni, y FeS ₂ .
	3. Secundario amil K Amil-K	Solución al 10 % Solución al 10 %	Colectivo más activo pero no muy selectivo; utilizado para sulfuros activados (con Na ₂ S), sulfuros Co-Ni.
	Ditiofosfatos, Aerofloats		
	1. Dietil-Na	Solución al 5 – 10%	Para menas sulfuro de Cu y Zn(pero no para Pb); es selectivo, no espumante.
	2. Dicresil, 15 % P ₂ S ₅ Dicresil, 25 % P ₂ S ₅ Dicresil, 31 % P ₂ S ₅	Sin diluir Sin diluir Sin diluir	Sulfuros de Ag-Cu-Pb-Zn, selectivo, espumante Sulfuros de Ag-Cu-Pb-Zn, selectivo, espumante
	3. Di-sec-butil-Na	Solución al 5 – 10%	Utilizado principalmente para menas de PbS y Ag ₂ S Sulfuros Ag(Au)-Cu-Zn; no es bueno para Pb.
	Tionocarbamato, etil iso propil (Z-200)	Emulsión líquida	Colector selectivo para sulfuros de Cu (o para ZnS activada con Cu) en presencia de FeS ₂ .
	Mercaptobenzotiasol	Sólido	Para flotar FeS ₂ en circuito ácido (pH 4-5).
	Ácido grasos		
	1. Tall oil (principalmente ácido oleico) 2. Ácido oleico refinado 3. Jabón Na de ácido graso	Emulsión líquida Emulsión líquida Solución al 5 – 10 %	Colector para fluorita, mena de hierro, Cromita, Cheelita, CaCO ₃ , MgCO ₃ , Apatita, Ilmenita, precipitados de aguas duras (Ca ⁺⁺ y Mg ⁺⁺)
	Alquil sulfatos y C ₁₂ – C ₁₄ (dodecil a cetil) sulfonatos	Solución al 5 – 10 %	Colectores para menas de Fe, granate, cromita, barita, carbonato de cobre, CaCO ₃ , CaF ₂ , BaSO ₄ , CaWO ₄ .
Reactivos catiónicos			
1. Aminas primarias y secundarias. 2. Acetato amina 3. Sales amonio cuaternarias	En kerosén Solución al 5 – 10 % Solución al 5 – 10 %	Usado para separa KCl del NaCl y para flotar SiO ₃ . Usado para flotar cuarzo, silicatos, calcopirita. Iden	
Espumantes	Aceite de pino (α - terpinol) Ácido Cresílico (cresoles)	Sin diluir Sin diluir	Proporciona espuma más viscosa y estable. Espumas menos biscoas pero estables; alguna acción colectora.
	Polipropilen glicoles	Soluciones en agua Soluciones en agua Soluciones en agua	Espuma fina, frágil; inerte al plástico. Espumas ligeramente más estables que con D-200.
	▪ MW = 200 (D-200). ▪ MW = 250 (D-250) ▪ MW = 450 (D-450)	Si diluir	Espumas ligeramente más estables que con D-450.
	Polioxietileno (nonil fenol).	Sin diluir	Usado como dispersante de calcita en flotación de apatita.
	Alcoholes alifáticos: p.e., MIBC, 2-etylil hexanol	Sin diluir	
	Reguladores	Ésteres (TEB, etc.)	Sin diluir
Cal (CaO) o lechada de cal (Ca(OH) ₂).		Pulpa Seco	
Soda ash, Na ₂ CO ₃ .		Solución al 5 – 10 %	Regulador de pH, depresor de pirita y pirrotita.
Soda cáustica		Solución al 10%	Regulador de pH dispersor de gangas lamosas.
Ácido sulfúrico, H ₂ SO ₄		Solución al 10 %	Regulador de pH; dispersor de gangas lamosas.
Cu ⁺⁺ (CuSO ₄ . 5H ₂ O) Pb ²⁺ (acetato o nitrato de Pb) Zn ²⁺ (ZnSO ₄)		Solución al 5 – 10 % Solución al 10 % Solución al 5 %	Reg Activador de ZnS, Feas, Fe _{1-x} S, Sb ₂ S ₃
S ²⁻ o HS ⁻ (Na ₂ S o NaHS)		Solución al 5 %	Activador de Sb ₂ S ₃ Depresor del ZnS.
CN ⁻ (NaCN o Ca(CN) ₂)		Solución al 10 %	En sulfidización activador de óxidos y carbonatos, depresor de todos los sulfuros a mayor conc.

LUGAR DE ADICIÓN DE LOS REACTIVOS DE FLOTACIÓN

- Los reactivos de flotación para ser adicionados a la pulpa que contiene el o los minerales valiosos a separar deben necesariamente un orden y es:
 1. Los modificadores de pH o de superficie según convenga.
 2. Los colectores que por su acción se los denomina primarios o principales y secundarios.
 3. Los espumantes.
- Los lugares de adición generalmente se determinan experimentalmente en el Laboratorio Metalúrgico en función de las características mineralógicas de la mena y la característica de si es o no soluble en agua el reactivo, es decir, en función del tiempo que necesita para adsorberse en el mineral valioso.
- Generalmente la adición de los modificadores y colectores empieza en la molienda



GENERAL FLOTATION PROCESS



- ① AEROSPRAY® dust suppressants
- ② AERO® and AEROPHINE® collectors
- ③ AEROFROTH® frothing reagents
- ④ CYQUEST® scale inhibitors and dispersants
- ⑤ AEROSOL® and AERODRI® dewatering aids
- ⑥ SUPERFLOC® flocculants and coagulants
- ⑦ AERO® gangue control reagents

IMPACTO AMBIENTAL

- La flotación, no se caracteriza por ser un contaminante, pero si contaminan sus gangas y desechos del proceso.
- Los desechos obtenidos del proceso corresponden a sólidos (colas) y líquidos (agua con agentes colectores).
- Los desechos eliminados sin ningún tratamiento químico de flotación, pueden contaminar fuentes de agua como ríos, esteros y el océano.
- La tecnología actual y la permanente innovación de los ingenieros metalurgistas han logrado minimizar estos impactos ambientales aún por debajo de los límites permisibles por ley.

MUCHAS GRACIAS



- MSc. ING. **CARLOS VILLACHICA LEÓN**, PRECLARO INVESTIGADOR PERUANO QUE TODO METALURGISTA DEBE EMULAR POR SU GRANDEZA PERSONAL, SU PERSEVERANTE TRABAJO DE INVESTIGADOR-INNOVADOR Y DIGNO MAESTRO QUE TODO EL PERÚ DEBE RECONOCER.