

# FLOTACIÓN DE MINERALES OXIDADOS DE PLOMO\*

Ing. Angel Azañero Ortiz<sup>1</sup>, Ing. Pablo Antonio Núñez Jara<sup>2</sup>, Ing. Aquiles Figueroa Loli<sup>2</sup>, Ing. Elard León Delgado<sup>2</sup>, Ing. Sósimo Fernández Salinas<sup>2</sup>; Ing. Roberto Orihuela Salazar<sup>2</sup>, Ing. Manuel Caballero Ríos<sup>2</sup>; Robinson Bazán Reyes<sup>3</sup> y Sergio Yi Choy Aragón<sup>3</sup>

## RESUMEN

Los principales minerales oxidados de plomo son: cerusita y anglesita, los que debido a su cristalografía y mojabilidad no deberían ser flotables, por esta razón es necesario estudiar las propiedades de flotación para estos minerales, las principales son: solubilidad, físico-química de superficie, termodinámica, contenido de finos y otros, se concluye que la anglesita es menos flotable que la cerusita, ambas se pueden flotar directamente con xantato amílico: colector de cadena larga de hidrocarburo y colectores catiónicos como el alamine 26-D. La flotación de óxidos mejora cuando se sulfurizan previamente antes de adicionar colector tipo xantato, obteniéndose resultados económicamente aceptables.

Lo anteriormente expuesto lo aplicamos a un mineral polimetálico de galena, esfalerita y cerusita; se discute hasta cuatro diagramas de flujo, se experimenta dos, y con el esquema de flotación bulk Pb-Zn, seguida de flotación de óxidos, previa sulfurización con sulfuro de sodio se obtienen excelentes resultados, teniendo en cuenta la complejidad del mineral.

## ABSTRACT

The principal oxidized minerals of lead are: cerusite and anglesite, due to their crystallography and wetness one would not think they would be floatable, for this reason it is necessary to study the flotation properties of these minerals. The main properties are: solubility, physical-chemistry of the surface, thermodynamics, content of fines (slime) and other parts. From these one concludes that the anglesite is less floatable than cerucite, and both can float with amylic xanthate: a collector of large chain hydrocarbons and cationic collectors like "alamine" 26-D.

Oxide flotation improves when one sulfurizes previously before adding a collector like xanthate, obtaining economically acceptable results.

We apply the aforementioned to a polymetallic mineral of galena, sphalerite and cerucite; four diagrams of fluxation are discussed, two are experimental, and with the bulk Pb-Zn flotation model/scheme, followed by oxide flotation, prior sulfurization using sodium sulfur obtains excellent results, keeping in mind the complexity of the mineral.

## 1. INTRODUCCIÓN

Posiblemente los primeros metalurgistas empezaron a elaborar sus herramientas a partir de metales nativos y minerales oxidados de alta ley, debido a su facilidad de encontrarlo en la superficie terrestre.

La pirometalurgia fue usada para extraer metales, alcanzando un alto grado de desarrollo, como lo demuestran algunos restos encontrados en las diferentes culturas antiguas, por aquella época cuando se beneficiaba minerales oxidados y se encontraba sulfuros, éstos eran considerados un veneno para el proceso.

1 Calle Sta. Susana N.º 338-Urb. Pando, 3.ª Etapa-Lima 1, teléfono 563-3921, casa 452-1521. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. E-mail: aazaneroo@unsm.edu.pe

2 Miembros del Proyecto de investigación.

3 Alumnos, colaboradores

No fue sino hasta mediados del siglo XIX con el descubrimiento de la flotación aplicada convenientemente a los sulfuros, que éstos responden con muy buenos resultados; por el contrario los óxidos metálicos no flotan, entonces los mineros pierden interés por beneficiar minerales oxidados y se da un fuerte impulso a los sulfuros.

Recién por el año 1924, Sullman y Edsor<sup>15</sup>, inscribieron la patente USA: N.º 1.492.902 para usar jabones en la flotación de minerales oxidados; en 1935, introdujeron colectores catiónicos a base de aminas para flotar minerales no metálicos, no hay data cuando se empezó a usar sulfuro de sodio para reactivar minerales oxidados, pero a mediados del siglo XX, ya habían algunas plantas operando en diversos países del mundo; en lo fundamental se había logrado disminuir el consumo de reactivos, principalmente colectores de varios kilogramos a unos cientos de gramos, con resultados solo parcialmente satisfactorios por los motivos explicados anteriormente, el conocimiento de la flotación de minerales oxidados es muy importante. En general, los métodos de flotación para óxidos los podemos dividir en dos: flotación directa con colectores de cadena larga de carbón y la otra flotar con colectores tipo xantato previa sulfurización. En nuestro trabajo de investigación se analizan los factores físico-químicos y termodinámicos del proceso con aplicación práctica a un mineral complejo que contiene galena, esfalerita y cerusita.

## II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El método de investigación ha tenido dos fases principales, la primera ha consistido en la búsqueda de información actualizada sobre minerales oxidados de plomo: cerusita y anglesita, mineralogía, complejidad de la mena en presencia de otras especies, cristalografía, físico-química de superficie, mojabilidad, adsorción, reactivos y reacciones químicas involucradas, métodos de flotación, diagramas de flujo y factores que afectan el proceso de flotación de minerales oxidados.

La segunda parte está relacionada con el método experimental, aplicado a un mineral de composición mineralógica compleja que contiene: galena, esfalerita y cerusita, se empezó caracterizando la muestra, cálculo del work index (Wi) parámetro que relacionará la cantidad de energía necesaria para las operaciones de reducción de tamaño; composición química del mineral y con esta información son posibles cuatro esquemas de tratamiento metalúrgico; se experimentó dos: una flotación diferencial y la segunda, flotación bulk; en esta última se obtuvo

buenas leyes y recuperaciones en el concentrado Bulk Pb-Zn, dicho concentrado cumple con las condiciones críticas de comercialización de concentrados bulk<sup>1</sup> como son: relación en peso Pb/Zn y leyes mínimas en el concentrado: Pb > 20% y Zn > 30% del relave bulk, mediante sulfurización de cerusita se obtuvo un concentrado de óxidos que igualmente tienen buenas leyes y recuperaciones.

### 2.1 Máquinas, Equipos y Materiales

- Chancadora de quijada.
- Chancadora de rodillos.
- Molino de bolas.
- Celdas de flotación.
- Rot-up.
- Balanzas electrónicas.
- Potenciómetro digital.
- Reactivos: colectores, reguladores, espumantes y principalmente, sulfuro de sodio.

### 2.2 Minerales Oxidados de Plomo

Cerusita	: Pb CO <sub>3</sub>
Anglesita	: PbSO <sub>4</sub>
Hidrocerusita	: 2 PbCO <sub>3</sub> .Pb (OH) <sub>2</sub>
Minio	: 2 PbO.PbO <sub>2</sub>
Minto	: Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Plumbojarosita	: PbFe <sub>6</sub> (OH) <sub>12</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>

#### 2.2.1 Minerales que acompañan al Óxido de Plomo(8)

##### Sulfuros

- Galena : PbS
- Esfalerita : ZnS
- Wurtzita : ZnS
- Marmatita : ZnSFe<sub>2</sub>
- Pirita : FeS<sub>2</sub>
- Jamesonita : 2PbS.Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>
- Geocronita : 5PbS.Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

##### Óxidos

- Smithsonita : ZnCO<sub>3</sub>
- Zincosita : ZnSO<sub>4</sub>
- Zincita : ZnO
- Wilemita : Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>
- Calamina : H<sub>3</sub>ZnSiO<sub>5</sub>

Entre los minerales sulfurados y oxidados de plomo y zinc de mayor interés metalúrgico son: Gale-

na, Jamensonita, Esfalerita, Marmatita, Cerusita, Anglesita, y Smithsonita. Los minerales oxidados de plomo económicamente importantes son: cerusita y anglesita.

Propiedades

- Cerusita: P.E.= 6,5; dureza= 3,35; color= blanco; composición química: dióxido de carbono 16,5; óxido de plomo: 85,3.

- Anglesita: P.E.= 6,3-6,4; dureza= 2,7-3; color=blanco; composición química: Trióxido de azufre: 26,4; óxido de plomo: 73,6.

2.3 Físico-química y Termodinámica de Flotación de Cerusita y Anglesita

2.3.1 Cristalografía

Los carbonatos y sulfatos metálicos tienen una estructura cristalina compleja en la que el anión tiene enlace covalente, mientras que la unión entre el catión y el anión es de tipo iónico.

Cuando el radio iónico del catión es relativamente grande como es el caso del ión plúmbico (1.2 Å) su carbonato y sulfato cristalizan en el sistema ortorrómbico, a este sistema pertenece la cerusita y anglesita<sup>(6)</sup>.

2.3.2 Físico-Química de Superficie

Es por todos conocido que los minerales oxidados de plomo son más difíciles de flotar que sus correspondientes sulfuros, esta dificultad está íntimamente asociada a la gran hidratación de carbonatos, sulfatos y silicatos, lo que a su vez se debe a la interacción de las moléculas de agua con los sitios polares que se crean en las superficies de estos minerales durante su fractura; como resultado de la adsorción de moléculas de agua en la superficie se forman grupos hidróxilo, siendo la superficie mucho más hidrofílica comparada con la superficie de los sulfuros.

Las superficies hidrofílicas tienen una gran tendencia a reaccionar con las moléculas de agua y las burbujas de aire no se adhieren a estas superficies.

Por otro lado la concentración de grupos hidróxilo en la superficie de minerales oxidados tienen particular importancia ya que estas especies favorecen el inicio y crecimiento de capas de moléculas de agua adsorbidas<sup>(9)</sup> (Figuras N.º 1, N.º 2).

Estas capas de agua tienen un efecto significativo en la humectación físico-química de la superficie

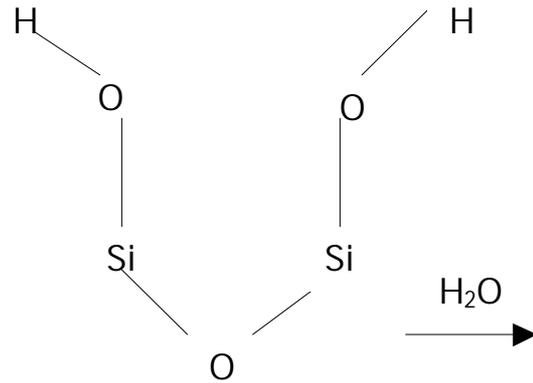


Figura N.º 1. Superficie hidrofílica después de haber sido hidratada estequiométricamente con agua.

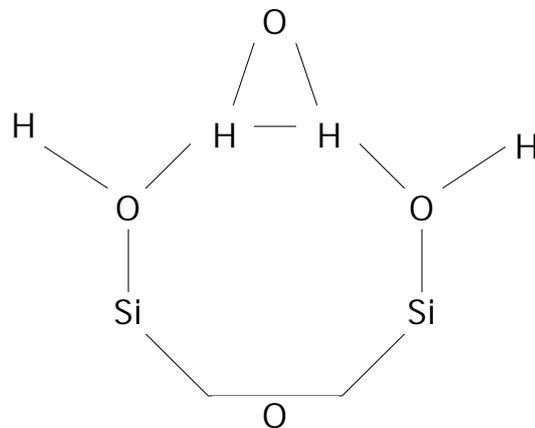


Figura N.º 2. Adsorción de moléculas de agua sobre la superficie hidrofílica.

del sólido y en la naturaleza de la adsorción, creando condiciones desfavorables para la flotación ya que la adsorción en la interfase mineral/agua de colectores para pasar de una situación hidrofílica a hidrofóbica es fundamental para que flote un mineral, en consecuencia cambiar las condiciones de esta interfase es muy importante y algunas veces es difícil de lograr en minerales oxidados.

2.3.3 Termodinámica

Los principios termodinámicos, aplicados a flotación de sulfuros y óxidos metálicos insolubles, podrían aplicarse para definir sistemas de flotación de carbonatos, sulfatos y silicatos, sin embargo esta simplicidad se ve afectada por su estructura cristalina, origen secundario, complejidad y textura fina, convirtiéndose estos minerales a veces en problemas difíciles de analizar, afectados aún más por su alta solubilidad, la cual agrava severamente la flotación.

Por ejemplo, si comparamos el producto de solubilidad (Kps) del sulfuro, carbonato y sulfato de plomo, podemos observar que a medida que este valor aumenta, la flotabilidad del mineral disminuye:

Mineral	Kps (latimer 1952)
Galena	$7 \times 10^{-29}$
Cerusita	$1,5 \times 10^{-13}$
Anglesita	$1,3 \times 10^{-8}$

Otro factor importante en la solubilidad de los minerales oxidados es su estructura cristalina y los planos de clivaje que se forman durante su reducción de tamaño; Glembovsky (1,964)<sup>(9)</sup> en sus estudios con minerales oxidados de plomo encontró que la solubilidad de una superficie de anglesita es 300 veces más alta que la superficie de la cerusita, lo cual se distingue por la presencia de un número significativo de cationes de plomo en los niveles superiores de su superficie, la anglesita por el contrario se caracteriza por la ausencia de iones de plomo en los niveles superiores de su superficie de clivaje lo que determina su carácter más hidrofílico.

También en la solubilidad y en la activación de los minerales es el pH de la solución y el tiempo de acondicionamiento lo que influye en su comportamiento hidrofílico/hidrofóbico, por ejemplo algunos minerales se activan en medios ácidos y alcalinos, por eso Lekr y colaboradores (1977) propusieron un modelo para estudiar las propiedades de flotación de minerales semisolubles, basados en diagramas termodinámicos de solubilidad de las especies que constituye el mineral.

## 2.4 Concentración y Flotación

Los principales minerales oxidados de plomo son cerusita y anglesita, ambos sumamente blandos y en las operaciones de reducción de tamaño se transforman en productos de muy alto porcentaje de lamas<sup>(7)</sup>, quedando casi intratables por métodos gravitacionales que serían los más adecuados para su concentración debido a su alto peso específico. Para su flotación se pueden seguir dos alternativas: una con ácidos grasos y otra con colectores sulfhídricos, aminas primarias, etc., después de una sulfurización con sulfuro de sodio.

En el primer caso existe un riesgo de la ganga alcalina que flota con el concentrado y lo diluye, además consume fuertes cantidades de reactivos; en la segunda, la sulfurización es un método que requiere estudios profundos para el uso de este reactivo porque usarlo en exceso causa efectos depresivos sobre la cerusita y anglesita sulfurizada, por esta razón mientras algunos tratadistas recomiendan

usarlo en un solo punto del circuito, otros opinan que se obtienen mejores resultados cuando se agrega por etapas.

### 2.4.1 Flotación Directa

La flotación directa en forma industrial no se practica, sin embargo algunos estudios de laboratorio han revelado resultados satisfactorios, por ejemplo: ácidos fáticos con una cadena larga de hidrocarburo han demostrado ser buenos colectores de cerusita y anglesita, la efectividad de colectores se debe a la larga cadena de su hidrocarburo y a la presencia de los componentes insolubles que forma con el ion plomo. Rinelli y Marabini (1973)<sup>(9)</sup> desarrollaron una nueva técnica para flotar cerusita utilizando un quelato (óxima) y aceite combustible.

R. Herrera Urbina (1980) demostró que la anglesita y cerusita pueden flotarse en medio ácido empleando un colector catiónico comercialmente conocido como Alamine 26-D, la composición química de este colector consiste de aminas primarias con diferente longitud de la cadena del hidrocarburo.

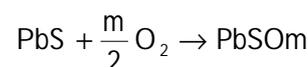
En flotación directa con xantatos, el colector amilico fue empleado para flotar anglesita y cerusita, este sistema de flotación se lleva a cabo después que el plomo disuelto es precipitado por el xantato amilico, como la anglesita es más soluble que la cerusita en medio básico la concentración de colector que se requiere para flotar anglesita son mayores que para la cerusita.

Lamentablemente el alto costo y elevado consumo del reactivo hace que su aplicación a nivel industrial sea muy escasa o nula.

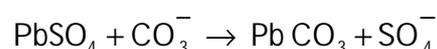
### 2.4.2 Flotación con Sulfurización

Los hidrofobización de la galena considerando la influencia del oxígeno en la superficie mineral (metales nativos y sulfuros puros son hidrofílicos) es de acuerdo a las siguientes reacciones<sup>(4)</sup>:

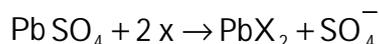
1. Oxidación superficial de la galena a sulfatos, sulfitos o Thiosulfatos:



2. Reemplazo de los sulfatos, sulfitos a carbonatos en el sistema abierto al aire:



3. Reemplazo del sulfato, sulfito o carbonato de plomo superficial por xantato, formando xantato de plomo que es más estable que los carbonatos, sulfatos, sulfitos de plomo:



La adsorción química del xantato sobre la galena es originada por monocapas de xantatos y precipitados de xantato de plomo en multicapas.

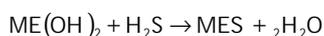
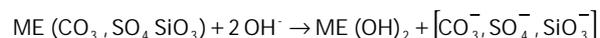
En flotación de minerales oxidados de plomo: cerusita y anglesita que tienen una oxidación profunda, el procedimiento más ampliamente usado es la sulfurización de sus superficies; después de este tratamiento, colectores tipo xantatos: amil, isopropil, isobutil, pueden emplearse satisfactoriamente.

El objetivo principal del proceso de sulfurización es convertir la superficie de los minerales oxidados en sulfuro de plomo, dando como resultado una superficie menos hidrofílica, mediante la adsorción química del ion sulfuro.

Como el ion sulfuro tiene un radio relativamente grande, no presenta enlace hidrógeno y la superficie sulfurizada se hidrata menos que los carbonatos y sulfatos, además el agente sulfurizante precipita como sulfuro los iones metálicos en solución<sup>(13)</sup>, reduciendo el consumo de colector durante la flotación.

Las reacciones de sulfurización comúnmente se llevan a cabo en medio alcalino, donde la especie predominante del ion sulfuro es el ion bisulfuro (HS<sup>-</sup>), puesto que en soluciones alcalinas, las superficies minerales presentan un alto grado de hidratación.

La reacción general de sulfurización<sup>(9)</sup> de carbonatos sulfatos y silicatos puede ser representada por:



Se ha encontrado que la velocidad de sulfurización de la cerusita es mayor que la anglesita, este fenómeno determina la mayor flotabilidad de la cerusita frente a la anglesita en las mismas condiciones.

El efecto benéfico que se obtiene con la sulfurización puede volverse totalmente adverso, cuando el ion sulfuro no se agrega en óptimas cantidades: un exceso actuará como depresor, como lo hace con los sulfuros durante la flotación, en consecuencia la adición de sulfuro es muy crítica cuando se flota cerusita y anglesita.

La adsorción química de la especie activa del ion sulfuro (HS<sup>-</sup>) da como resultado una superficie más negativa, evitando así la adsorción del ion xantato mediante repulsión electrostática (López Valdiviezo, 1983).

En procesos prácticos cuando se agrega sulfuro en exceso<sup>(3)</sup>, hay que esperar que el sulfuro reaccione con el oxígeno hasta el equilibrio y que el oxígeno gobierne el sistema para restituir las propiedades de flotación.

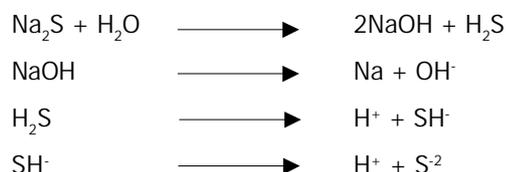
Fleming demostró que la sulfurización ocurre por formación del PbS en la superficie de la cerusita y anglesita, Marabini reportó que esta cobertura de PbS era de unos 15 lechos moleculares de espesor y que la cinética de la reacción duraba unos 30 segundos.

### 2.4.3 Reactivos y Reacciones Químicas

Los reactivos que se usan para sulfurizar son:

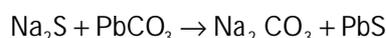
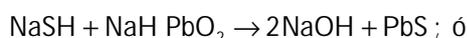
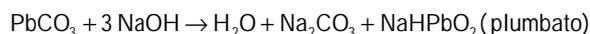
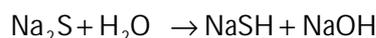
Sulfuro de Sodio	: Na <sub>2</sub> S
Sulfuro Ácido de Sodio (Hidrosulfuro)	: NaHS
Sulfuro de Bario	: BaS

El reactivo más usado es el sulfuro de sodio, en contacto con el agua se hidroliza por ser una sal que proviene de una base fuerte y ácido fuerte:



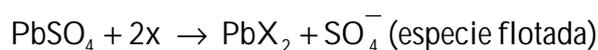
Como se puede ver, la reacción de disociación del Na<sub>2</sub>S introduce iones OH<sup>-</sup> produciendo alcalinidad, por otro lado los iones hidrosulfuro SH<sup>-</sup> y sulfuro S<sup>2-</sup> son los agentes activos que actúan sobre los minerales oxidados<sup>(11)</sup>.

Si la concentración del sulfuro de sodio es suficiente, se formará, rápidamente un lecho grueso sobre el óxido, produciendo las siguientes reacciones para el caso de la cerusita:

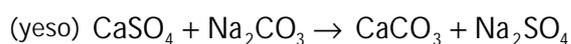
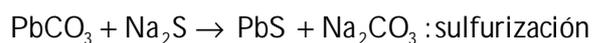


El cambio de color claro de la cerusita que se ennegrece conforme se forman los sulfuros de plomo, es muy marcado, también se ha comprobado que para flotar cerusita no tiene que estar totalmente sulfurizada y de color negro<sup>(4)</sup>, siendo suficiente una sulfurización parcial que se manifiesta por el color café, además el sulfurizante debe agregarse significativamente al inicio y el resto hacerlo por etapas en los diferentes puntos del circuito de flotación.

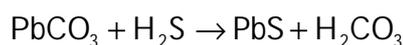
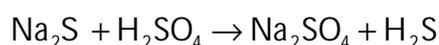
Como explicamos al inicio, los sulfuros no adsorben xantatos si es que no hay oxígeno en su superficie por esta razón los minerales oxidados y sulfurizados no pueden reaccionar con los xantatos luego de la sulfurización; por lo tanto, no flotan mientras los iones S-2 y S están libres, los cuales deben oxidarse y desaparecer de la pulpa, produciéndose la flotación cuando el oxígeno desplaza a los iones sulfurizantes de la solución.



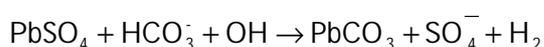
Estudios recientes sobre sulfidización indican que la presencia de sales de metales alcalinotérreos son perjudiciales para la flotación, porque reacciona con los productos provenientes de la sulfurización, pasivando los sulfuros o minerales sulfurizados con una capa de carbonato de calcio de acuerdo a la siguiente reacción:



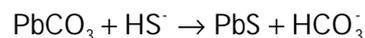
El uso de hidrosulfuro de sodio: NaHS o ácido sulfhídrico: H<sub>2</sub>S en vez del sulfuro de sodio es recomendable para evitar este efecto, formando bicarbonato de calcio soluble en vez de carbonato de calcio insoluble de acuerdo a las siguientes reacciones en medio ácido o ligeramente ácido.



La flotación de la anglesita<sup>(9)</sup> se puede realizar agregando bicarbonato de sodio, transformando la superficie de este mineral en carbonato de acuerdo a la reacción:



Luego la reacción de sulfurización de la anglesita carbonatada es:



La adsorción del xantato es similar a lo explicado para galena y cerusita, con esto se consigue flotar anglesita

## 2.5 Parte Experimental

### 2.5.1 Composición Mineralógica

Al microscopio binocular en la mena se puede apreciar un interesante contenido de óxidos principalmente de plomo, seguida de pocos sulfuros especialmente: esfalerita y galena con escasos contenidos de pirita, la ganga no metálica está constituida por cuarzo y sericita; los valores minerales en orden descendente de abundancia son: cerusita, esfalerita y galena, la plata está asociada mayormente a la galena y la cerusita es portadora de menores contenidos de plata debido a que parte de la misma ha sido lixiviada por acción de la oxidación e interperismo, alrededor del 62% del plomo total está oxidado.

### 2.5.2 Composición Química

Leyes en %, Ag y Au en OZ/TC						
Pb	PbOx	Cu	Zn	ZnOx	Fe	Stotal
8.10	5.05	0.10	3.64	0.19	0.42	2.60
As	Sb	Ag	Au			
0.07	0.23	14.3	0.02			

### 2.5.3 Esquemas de Tratamiento

Para el caso del mineral estudiado que está constituido por galena, esfalerita y cerusita se tienen las siguientes alternativas<sup>(3)</sup> y orden de flotación:

1. Flotación de galena, esfalerita, cerusita, o
2. Flotación de galena, cerusita, esfalerita,
3. Flotación de sulfuros bulk: plomo y zinc seguida de flotación de cerusita.
4. Flotación de sulfuros bulk: plomo y zinc seguida de flotación diferencial de PbS/ZnS y luego flotación de cerusita del relave bulk.

Como se puede observar la flotación de minerales oxidados es difícil y compleja y se agrava cuando tiene además minerales sulfurados; por ejemplo, en el caso 1 para activar la esfalerita es necesario sulfato de cobre que deprime a la cerusita y en el segundo caso hay que usar sulfurizante para la cerusita, que deprime a la esfalerita, además si el mineral contiene pirita, marcasita o pirrotita, estas se activan con el sulfato de cobre y sulfuro de sodio

por lo que se tiene que deprimir con cianuro o flotarlas antes de recuperar la esfalerita opción 1 o antes de flotar la cerusita opción 2 y al inicio cuando se opta por las alternativas 3 ó 4.

Por las características químicas y mineralógicas, para este mineral, las opciones que más se ajustan para beneficiarlo son: 1 y 3. Los diagramas de flujo, puntos de adición de reactivos y resultados obtenidos se reportan enseguida

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- El problema de los minerales óxidados de plomo es que son muy solubles, suaves, contienen un alto contenido de finos, aumentando el porcentaje de lamas durante las operaciones de reducción de tamaño, lo que implica un alto consumo de reactivos de flotación y bajos resultados en leyes y recuperaciones.
- A medida que aumenta el producto de solubilidad de los minerales la flotabilidad disminuye, los

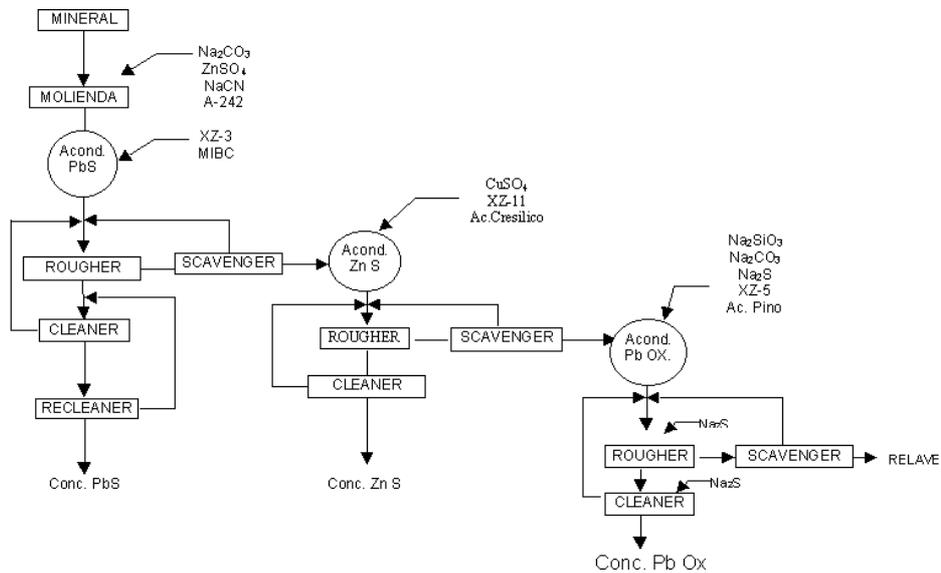


Figura N.º 1. Diagrama de Flujo de Flotación Selectiva de Sulfuros Pb-Zn y Flotación de Pb Oxidado.

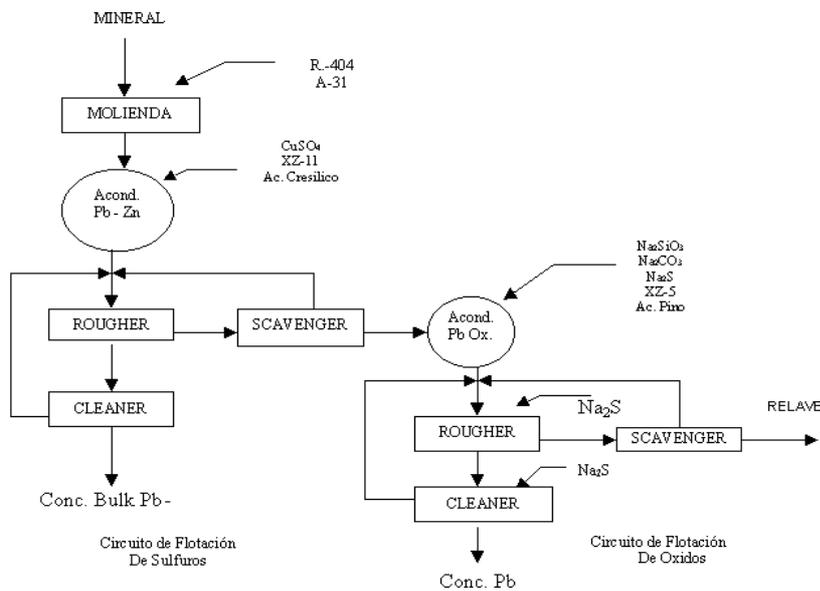


Figura N.º 2. Diagrama de Flujo de Flotación Bulk: Plomo-Zinc y Flotación de Plomo Oxidado.

CUADRO N.º 1: FLOTACIÓN SELECTIVA: PBS/ZNS/PBOX\*

PRODUCTO	PESO	LEYES %, Ag y Au: oz/TC									RECUPERACION %			
	%	Pb	Cu	Zn	As	Sb	Ag	Au	Hg	Fe	Pb	Zn	Ag	R.C.
Conc. PbS	2.18	69.66	0.66	9.10	0.31	1.03	110.2	0.10	86	0.81	18.82	5.36	16.82	45.9
2° Midd "	0.92	37.30		25.10			118.4				4.24	6.25	7.63	
1° Midd "	2.74	18.50		23.70			73.0				6.29	17.56	14.00	
Conc. ZnS	3.12	3.57	0.16	61.35	0.01	0.15	20.9				1.38	51.79	4.57	32.1
Midd "	1.87	10.50		18.30			33.1				2.44	9.20	4.33	
Conc. PbOx.	7.97	46.20		1.10	0.12	0.38	37.6		49		45.67	2.38	20.98	12.5
Midd "	5.96	9.55		0.72			11.5				7.07	1.16	4.80	
Relave	75.24	1.51		0.31			5.1				14.09	6.30	26.87	
Cab. Calc.	100.00	8.06		3.69			14.3				100.00	100.00	100.00	
Cab. Exp.		8.10		3.64			14.3							
Hg:ppm														

CUADRO N.º 2: FLOTACIÓN BULK Pb-Zn/PbOx\*

PRODUCTO	PESO	LEYES %, Ag y Au: oz/TC								RECUPERACION %			
	%	Pb	Zn	Cu	Hg	Ag	Au	As	Sb	Pb	Zn	Ag	R.C.
Conc. Bulk	8.72	26.80	34.90	0.44	232	68.7	0.03	0.32	0.50	28.22	83.76	43.60	11.47
Medios "	4.35	17.25	5.14			41.8				9.30	6.17	13.23	
Conc. Pb Ox	7.39	48.00	1.08		83	39.7				43.97	2.20	21.35	13.53
Medios "	6.69	10.45	0.90			14.3				8.67	1.65	6.97	
Relave Gral.	72.85	1.09	0.31			2.8				9.84	6.22	14.85	
Cab. Calc	100.00	8.06	3.63			13.7				100.00	100.00	100.00	6.20
Cab. Expl		8.10	3.64			14.3							
Hg:ppm													

CUADRO N.º 3: RESUMEN DE FLOTACIÓN SELECTIVA (BATH)\*

Producto	Peso	Leyes % , Ag : oz/TC			Recuperación %			Radb
	%	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	Conc.
Conc. PbS	2.18	69.66	9.10	110.2	18.82	5.36	16.82	45.9
Conc. ZnS	3.12	3.57	61.35	20.90	1.38	51.79	4.57	32.1
Conc. PbOx	7.97	46.20	1.10	37.6	45.67	2.38	20.98	17.5
<b>Total</b>					<b>65.87</b>	<b>59.53</b>	<b>42.37</b>	<b>18.8</b>

CUADRO N.º 4: RESUMEN DE FLOTACIÓN BULK (BATCH)\*

Producto	Peso	Leyes % , Ag : oz/TC			Recuperación %			Radio
	%	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	Conc.
Conc. Bulk Pb-Zn	8.72	26.10	34.90	68.7	28.22	83.76	43.60	11.47
Conc. PbOx	7.39	48.00	1.08	39.7	43.97	2.20	21.35	13.53
<b>Total</b>					<b>72.19</b>	<b>85.96</b>	<b>64.95</b>	<b>6.20</b>

\* Cuadros elaborados por el autor

CUADRO N.º 5: RESUMEN DE FLOTACIÓN SELECTIVA (PLANTA CONCENTRADORA)\*

Producto	Peso	Leyes %, Ag : oz/TC			Recuperación %			Radio
	%	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	Conc.
Conc. PbS	3.10	61.23	12.10	98.7	24.90	8.90	29.80	32.2
Conc. ZnS	5.42	4.57	55.80	22,3	3.20	68.70	6.30	18.4
Conc. PbOx	8.90	48.00	1.02	40.1	45.4	2.90	23.40	11.2
Total					73.50	80.50	59.50	5.70

CUADRO N.º 6: RESUMEN DE FLOTACIÓN BULK (PLANTA CONCENTRADORA)\*

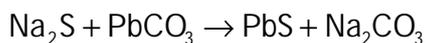
Producto	Peso	Leyes % : Ag : oz/TC			Recuperación %			Radio
	%	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag	Conc.
Conc. Bulk Pb-Zn	9.14	27.45	35.46	75.5	31.11	89.20	50.25	10.9
Conc. Pb Ox	7.65	59.36	1.35	44.2	56.29	2.82	24.60	13.1
Total					87.40	92.02	74.85	5.9

minerales oxidados de plomo tienen productos de solubilidad mayor que sus correspondientes sulfuros.

- La solubilidad de la anglesita es varios cientos de veces más alta que la cerusita, esto se debe a la presencia de un número significativo de cationes de plomo en los niveles superiores de superficie durante su fractura, por el contrario la anglesita se caracteriza por la ausencia de estos iones de plomo; por este motivo la anglesita es menos flotable que la cerusita.

#### IV. CONCLUSIONES

- La cerusita tiene buen comportamiento al flotar con colectores sulfuohídricos previa sulfurización; la reacción principal:



- El mineral investigado tiene buena ley de plomo, plata y zinc, estando el plomo mayormente oxidado lo que implica que será necesario considerar circuitos de flotación de sulfuros y óxidos.
- El método de flotación selectiva produce concentrados de: plomo, zinc y plomo oxidado con leyes comerciales pero son necesarios tres circuitos de

flotación, con alto consumo de reactivos para controlar parcialmente el exceso de finos y el zinc que se encuentra fuertemente activado, el circuito de flotación es complicado y las recuperaciones se ven severamente afectadas.

- Flotar los sulfuros en un bulk Pb-Zn, seguida de flotación de óxidos, representa un diagrama de flujo sencillo, con adición de reactivos convencionales, sólo son necesarios dos circuitos de flotación, producen los mejores resultados en leyes y recuperaciones y los concentrados obtenidos se pueden vender fácilmente, en consecuencia es el esquema de flotación más adecuado para este mineral, como lo demuestra el Cuadro N.º 6.

#### AGRADECIMIENTO

Debo expresar mi agradecimiento al Consejo Superior de Investigaciones de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por su valiosa ayuda financiera, así como a todos los que de una forma u otra colaboraron con el desarrollo del Proyecto de Investigación N.º 021601051.

#### V. BIBLIOGRAFÍA

1. Almonacid Reiterer Harry y Barrios de la Flor Luis. "Condiciones generales de compra a pequeña

\* Escalamiento industrial por método de Split Factor<sup>(5)</sup>\* . Cuadros elaborados por el autor

- minería-concentrados de plomo-zinc". En *Mimpeco*, p.1,2. Lima,1983.
2. Arthur F. Taggart. *Handbook of Mineral Dressing*. Fourth Printing Sec. 12-Flotation. New York, September, 1950, pp. 1-140.
  3. Azañero Ortiz, Ángel. Flotación del mineral de Mina San Gregorio. Informe Técnico N.º1643-lmc. Banco Minero del Perú-Laboratorio de Investigaciones Minero-metalúrgicas. Junio, 1984, pp. 2-4.
  4. Azañero Ortiz, Ángel. Curso: "Concentración y flotación de minerales", Capítulo: Flotación de Sulfuros, UNMSM, Lima, 2002, pp. 7-8.
  5. Azañero Ortiz, Ángel. "Modelos matemáticos para simular flotación industrial a partir de pruebas de laboratorio". En *Revista del Instituto de Investigación de la FGMMCG-UNMSM*, vol. 2, N.º3, Lima, junio 1999; pp. 69-83.
  6. Dana Edwar S. y W.E. Ford. *Tratado de mineralogía*. 8.ª edic., Edit. Continental S. A. México, 1981, pp. 571-577, 814.
  7. Denver Equipment Company. Mineral Processing Flowsheets. 1<sup>th</sup> edc., Denver-Colorado (USA), 1962, pp. 90,91,96-99.
  8. Gil Rivera Plaza. "Mineralogía Descriptiva". Facultad de Ingeniería Química, UNMSM,1960, pp. 278-280
  9. Herrera Urbina R. y Douglas W. Fuerstenau. "Aspectos termodinámicos de la flotación de anglesita, cerusita, malaquita y crisocola". Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería de Minerales. Universidad de California, Berkeley-California 94720, octubre de 1983, pp.11-20.
  10. Ozano y Ponce de León D. Eduardo. *Elementos de Química*. 6.ª edic. Madrid, 1911, pp. 275-280.
  11. Medina Beltrán, Oscar. *Tecnología de la Flotación*. Cap. IV. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1976, pp.325-335.
  12. Mosquera Santos, Edilberto Antonio. *Ampliación y optimización metalúrgica de la planta de concentración sociedad minera El Brocal*. Tesis EAP Ingeniería Metalúrgica, FGMMCG. UNMSM, Lima 1981, pp. 13-20.
  13. Río Württole, Justo Felipe. *Método de producción y análisis químico y físico del plomo y sus óxidos*. Tesis Facultad de Ingeniería Química. UNMSM, Lima,1982, pp.10-30.
  14. Sotillo Zevallos, Francisco. "Sulfurización y flotación de cerusita y galena". Tercer Simposium de Metalurgia, Universidad Nacional de Ingeniería, 1985, pp. 73-93.
  15. Sutulov Alexander. *Flotación de Minerales*. Cap. IX. Universidad de Concepción (Chile), 1963, pp. 315-332.
  16. Trujillo Barra, Wilfredo Alex. Estudio termodinámico del proceso de cloruración para la recuperación de pb-ag de minerales oxidados. Tesis Facultad de Ingeniería Química-UNMSM, Lima, 1991, pp. 2-30.