

# Resúmenes

Revista Metalúrgica incluye a partir de este número, esta sección en la que se publicarán los resúmenes de los trabajos de graduación defendidos en la Carrera de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, en todas las modalidades de graduación vigentes para obtener el grado de Licenciado en Ingeniería Metalúrgica, con el fin de difundir parte de la investigación que se desarrolla en esta institución.

En la Revista Metalúrgica 32, se publicaron los resúmenes de los trabajos defendidos hasta el año 1973. En el presente número, publicamos los trabajos defendidos entre los años **1975 y 1979**.

## Recuperación de óxidos de bismuto por flotación y extracción líquido-líquido

**Ángel Pinaya Fuentes**

Docente Tutor: Dr. Grover Gutiérrez Blanco

1975

Inicialmente, tomado óxido y carbonato de bismuto (bismita y bismutita) sintéticos, se efectuó un estudio básico sobre las propiedades electrocinéticas, superficiales y otras.

Las primeras, se llevaron a cabo por mediciones de movilidad electroforética de las partículas sólidas en suspensión acuosa, estableciéndose así los puntos de carga cero de la bismita y la bismutita en valores de pH de 4.8 y 3.5, respectivamente. También por éste método, se pudo determinar la influencia ejercida por los iones plumbosos y el sulfuro de sodio sobre las cargas superficiales de aquellos minerales.

Las propiedades superficiales, se estudiaron principalmente a través de pruebas de adsorción de xantato Z-6 sobre la superficie de minerales oxidados de bismuto. La interacción de los colectores de tipo xantatos sobre la superficie de los minerales de hierro, fue corroborado.

## La estabilidad e inhibición de corrosión del ferrosilicio en medios densos usados en sink and float

Oscar Salazar Castellón

La utilización del proceso de preconcentración mediante el método de sink and float, requiere del control de ciertos parámetros que definen la correcta separación de los materiales pesados de los livianos. Sin comentar la importancia de este método por evidente, podemos decir que, los parámetros que presentan problemas con mayor intensidad y

de hecho los más importantes, son la viscosidad y la estabilidad que tienen los medios pesados durante su funcionamiento.

Los medios pesados que presenten uniformidad de densidad en su cuerpo, se mostrarán como instrumentos adecuados para lograr una eficiencia en el proceso. Sin embargo, para obtener una buena estabilidad, se deben añadir ciertas sustancias que si bien logran sus propósitos para los que se usaron, imparten efectos nocivos al baño, en cuanto se refiere al aumento de viscosidad.

Este incremento descontrolado de la viscosidad – aun existiendo homogeneidad de densidad en la pulpa acuosa- da lugar a una separación ineficiente, inexacta de los materiales. En cambio si se propone bajar la viscosidad, se lo tendrá que efectuar a costa de la disminución de la estabilidad y, una baja estabilidad, como ya se dijo, no es una propiedad conveniente en los baños de sink and float.

En síntesis, al mejorar la estabilidad se aumenta la viscosidad, al bajar la viscosidad se empeora la estabilidad; estos efectos son perniciosos para un perfecto funcionamiento del proceso.

Este trabajo se lo efectuó con el fin básico de averiguar cuánto es el acrecentamiento de la viscosidad frente a la estabilidad, cuando se añaden agentes estabilizadores como lama y kelzan, (kelzan es un reactivo preparado en laboratorio). En base a estos resultados, indicamos las dosificaciones que presenten las mejores condiciones.

Al mismo tiempo, hicimos un estudio tendente al conocimiento de los efectos que tienen algunos reactivos sobre la corrosión del ferrosilicio usado en los medios densos, a efecto de impedir fuertes pérdidas de éste.

## Flotación selectiva de sulfuros por oxidación diferencial usando peróxido de sodio

**Carlos Salas Casado**

1976

Dentro de la investigación de la flotación selectiva de algunos sulfuros, se han desarrollado en el presente trabajo, los

lineamientos que permiten la flotación selectiva de bismutina, antimonita y galena de calcopirita y/o blenda.

Con la idea de que esta meta puede alcanzarse explotando convenientemente varias propiedades generales y particulares de los minerales considerados, así como de los reactivos empleados, es que se ha pensado en la oxidación diferencial como un eficaz sistema de flotación selectiva para los sistemas indicados, los que ya sea por su cotización, por su relativa importancia como minerales acompañantes, ó por su difusión en nuestros yacimientos, justifican la investigación en este campo.

Se inicia este estudio estudiando las estructuras cristalinas de los sulfuros en consideración para obtener la información necesaria respecto a la disposición de los átomos en la red, ocupación de los sitios activos, planos de fractura, etc. Con este análisis se estableció que las propiedades superficiales de la calcopirita están ampliamente influenciadas por el azufre que por poseer gran electronegatividad domina las reacciones de superficie de la calcopirita en la que, por no existir suficientes orbitales libres, la oxidación y adsorción de oxígeno es incipiente a diferencia de otros sulfuros como la galena, bismutina y antimonita presentan estructuras más favorables para la oxidación en presencia de peróxido de sodio.

La consideración de las propiedades electrocinéticas fue categórica, confirmando lo anteriormente expuesto, al registrar una considerable modificación de las curvas de potencial zeta de la bismutina, galena y antimonita por efecto del  $\text{Na}_2\text{O}_2$  y no así para la calcopirita en análogas condiciones. La alteración registrada marca su principal efecto en la localización de los puntos de carga cero antes y después de la oxidación, como se puede apreciar en el siguiente cuadro:

Míneral	Potencial de carga cero antes de la oxidación	Potencial de carga cero después de la oxidación
Bismutina	A pH 5.1	A pH 6.5
Galena	A pH 3.9	A pH 6.9
Antimonita	A pH 2.3	A pH ----
Calcopirita	A pH 4.7	A pH 4.8

Este comportamiento ha tenido que deberse necesariamente para los tres primeros minerales del cuadro anterior, a una fuerte alteración de sus propiedades físicas, químicas y electrocinéticas debido al peróxido de sodio de conocido poder oxidante. En efecto, mediante difractogramas de rayos X se ha establecido que la bismutina ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), cambia a otra forma identificada como bismita ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ), y sulfato de bismuto. La antimonita ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ), es oxidada a hidroxiantimoniato de sodio  $\text{NaSb}(\text{OH})_6$ , de manera que el  $\text{Sb}^{+3}$  de la antimonita pasa a  $\text{Sb}^{+5}$  en la forma oxidada.

Los difractogramas de rayos X de la calcopirita, se manifiestan de acuerdo con las mediciones electrocinéticas en sentido de no registrar ninguna modificación.

El proceso de flotación selectiva por oxidación diferencial que se propone, está regulado termodinámicamente por el potencial de óxido-reducción expresado en términos de su relación con el consumo del agente oxidante, del pH de la pulpa y de la energía libre.

Las pruebas de microflotación en tubo Hallimond con sistemas puros, permitieron establecer que no existe un límite crítico para el cual la flotación selectiva sea eficiente, sino que ella es posible en un rango de pH de 8 a 11. Los valores de pH ácidos carecen de mayor interés en razón de que el  $\text{Na}_2\text{O}_2$ , al intervenir en el sistema, da a la solución una marcada basicidad y el consumo de ácido debe controlarse para operar dentro del rango establecido.

La experimentación en celda unitaria fue realizada con carga ya activada, como correspondía a una flotación colectiva de sulfuros, para luego ser sometida a una flotación selectiva. Los resultados obtenidos están a favor del método propuesto, permitiendo la observación de una satisfactoria conducta de los minerales estudiados en conformidad con las pruebas de investigación básica.

Para el sistema bismutina-calcopirita, se trabajó con carga que constituye el concentrado de bismuto que la Empresa Minera Quechisla obtiene de su ingenio de Tasna (Comibol), y que son entregados a la fundición de bismuto de Telamayu. El común de estos concentrados tiene el siguiente contenido de Bi y Cu:

Producto	% Bi	% Cu
Común concentrado de Tasna	12.09	13.45

Luego del tratamiento metalúrgico en las condiciones indicadas en el capítulo correspondiente, se obtuvieron dos tipos de concentrados: uno de bismuto y otro de cobre logrado por la flotación inversa de la bismutina sin alterar la flotabilidad de la calcopirita empleando como oxidante  $\text{Na}_2\text{O}_2$  en una cantidad de 2 kg/t a un pH de 10. Los siguientes fueron los resultados obtenidos en una de las pruebas:

Producto	% Bi	% Recupera- ción	% Cu	% Recupe- ración
Concentrado de Bi	29.44	89.95	6.75	21.56
Concentrado de Cu	2.74	10.05	20.43	78.44

La observación de los resultados, permite afirmar que es posible la obtención de dos tipos de concentrados en este sistema, lo cual da paso a una serie de alternativas además de tener un K de Bi y un K de Cu, determinaría que una mayor cantidad de los concentrados de Bi de la E. M. Caracoles puedan ser tratados en la fundición de Telamayu no obstante su alta ley de plomo (14% Pb), al ser mejoradas las cualidades del concentrado de Tasna, con el cual es mezclado para estar dentro de los límites de máximo contenido de Pb admisible en la fundición (3% Pb).

El procedimiento aplicado a otros sistemas que se estudiaron en la investigación básica, permitió la obtención de resultados satisfactorios especialmente en los siguientes casos:

- Sistema galena - calcopirita
- Sistema bismutina - calcopirita
- Sistema antimonita – calcopirita
- Sistema galena – blenda
- Sistema antimonita – blenda
- Sistema bismutina – blenda

Aunque es evidente que para algunos de los sistemas mencionados existe una tecnología conocida, las conclusiones son significativas como aplicables a la limpieza de concentrados, etc. En todos los casos se trabajó con carga previamente activada para asemejar aún más las cualidades de un concentrado obtenido por flotación colectiva.

Finalmente, si las pruebas fueron desarrolladas empleando peróxido de sodio como agente oxidante, no se descarta la posibilidad del uso de otros agentes similares recomendables por razones de costo, además, existen razones que permiten suponer que el proceso podría ser ventajosamente aplicado a otros sistemas no considerados en el presente trabajo.

## **Pre-concentración de menas estañíferas en campos centrífugos cilíndricos mediante pulpas pesadas de ferrosilicio**

**Teodoro Iriarte Rojas**

Catedrático asesor: Antonio Salas Casado

1976

Una mena de estaño de baja ley procedente de la Planta Sink and Float de Siglo XX, perteneciente a la Empresa Minera Catavi – COMIBOL, ha sido sometida a un proceso de preconcentración en centrifugadores cilíndricos utilizando ferrosilicio como medio pesado de separación.

Se han estudiado como variables: la influencia del diámetro del ápex, inclinación del centrifugador, densidad de alimentación, presión de alimentación y el tamaño de grano, determinándose las condiciones óptimas de tratamiento en escala de laboratorio.

Se obtuvieron pre-concentrados de mineral de estaño desde 1.18 hasta 5.78% Sn, con recuperaciones de 48.82 a 73.99%, eficiencias de 45.37 a 72.18%, eliminando colas con leyes de 0.12 hasta 0.25% Sn para tamaño de grano de -20 +28 mallas Tyler de 0.42% Sn en la alimentación.

Para granos más finos el proceso es aún más eficiente, ya que si se alimentan fracciones de -35 +48 mallas con ley de cabeza de 1.43% Sn o de -65 +100 mallas con 3.5% Sn, las leyes de los pre-concentrados son de 10.74% Sn y 18.45% Sn, respectivamente.

## **Estudio de las variables de un ciclón cilíndrico de dos pulgadas**

**Eddy Nisttahuz Guisbert**

Catedrático consejero: Antonio Salas Casado

1976

Se realiza un estudio del dimensionamiento y la influencia de las cinco principales variables de un ciclón cilíndrico de 2 pulgadas, sobre el diámetro de separación, caudal de tratamiento y distribución del agua de alimentación, obteniéndose algunas relaciones matemáticas empíricas.

Se toman como base de este estudio los trabajos realizados por Burt R. O. , Lynch A. I. y Rao T. C., Alfredo Cuadros.

Con las diferentes pruebas realizadas, se comprobó que el ciclón cilíndrico de dos pulgadas, trabajando con:

- 7% sólidos alimentación.
- 15 lb/pulg<sup>2</sup> presión de alimentación.
- 3/16 pulgadas diámetro de descarga.
- ¾ pulgada diámetro rebalse.

Realiza operaciones de clasificación (deslame) con una eficiencia del 90%. Siendo su construcción sencilla y su costo económico, hacen que esta herramienta sea utilizable a corto plazo.

## **Cementación de cobre con chatarra de hierro en tambor rotatorio**

**Saúl Cabrera Briggs**

1976

En el presente trabajo, se estudia el proceso continuo de cementación de cobre con chatarra de hierro en tambor rotatorio, a partir de soluciones de sulfato de cobre obtenidas por lixiviación de minerales oxidados de cobre con ácido sulfúrico diluido.

Se efectuaron pruebas batch a varias concentraciones iniciales de iones cúpricos, para determinar la cinética de la reacción de cementación.

Por otra parte se realizaron pruebas en forma continua, para establecer la influencia de las variables más importantes como: tiempo de residencia de la solución en el reactor, velocidad de rotación del tambor, tipo de precipitante empleado y concentración inicial de iones hidrógeno.

Finalmente, con los índices metalúrgicos obtenidos en el presente estudio, se realizó el dimensionamiento del equipo para la instalación de una planta regional hidrometalúrgica de cobre y su respectivo análisis económico preliminar, que desde luego serán de gran utilidad para futuros proyectos.

## Volatilización de zinc en horno ciclón a partir de residuos de lixiviación

Jorge Campuzano Valdez

Catedrático Consejero: Juan E. Joffré Encinas

1977

El proceso de volatilización en horno ciclón, para la recuperación de zinc y otros valores metálicos como estaño, plata, indio, galio, germanio, etc., a partir de los residuos de volatilización de calcinas de zinc, es bastante satisfactorio y promete ser más ventajoso técnica y económicamente que los procesos convencionales como el jarosita, hematita, goethita, etc.

Se obtuvieron polvos con 68% Zn (aprox. 85% ZnO), escorias con 4% Zn, alcanzando un grado de volatilización del 94%.

Se requieren temperaturas elevadas (1,250 – 1,350 °C) y altas concentraciones de CO en la atmósfera del horno (CO ≈ 4.0 – 6.0%).

La volatilización de zinc que pasa a disolverse en la escoria será efectiva con elevadas temperaturas, condiciones aún más reductoras y estimulando la agitación del baño en la cámara de retención, (horno reverbero), de esta manera el contenido de zinc final en las escorias será mínimo.

Las pruebas para la recuperación de indio, galio, germanio y otros elementos valiosos que acompañan a los polvos de volatilización, son muy preliminares y requiere mayor investigación.

El proceso ya ha sido probado a escala industrial y patentado internacionalmente por ENAF-KHD.

## Solubilidades de cobre, hierro y azufre en antimonio líquido

Salustio Guzmán Soliz

Catedrático Consejero: Juan E. Joffré Encinas

1977

La práctica de refinación pirometalúrgica de antimonio, requiere de una información termodinámica detallada de los sistemas binarios o ternarios con los que se tenga que operar, y de un estudio termodinámico básico como criterio de decisión en el método operativa a emplearse.

Las solubilidades de cobre, hierro y azufre en antimonio líquido, fueron determinadas utilizando el método relativamente sencillo de licuación y toma de muestras por enfriamiento brusco.

Las solubilidades de cobre, hierro y azufre en antimonio líquido están representadas respectivamente por:

$$\log X_{\text{Cu}} = -4.461 + \frac{3,228}{T}$$

$$\log Y_{\text{Cu}} = \left( -2.955 + \frac{2,413}{T} \right) X_{\text{Sb}} X_{\text{Cu}} + 0.482 - \frac{393}{T}$$

(526 °C – 631 °C, 0.63 ≤ X<sub>Sb</sub> ≤ 1)

$$\log X_{\text{Fe}} = 4.679 - \frac{5,779}{T}$$

$$\log Y_{\text{Fe}} = \left( 12.551 - \frac{13,473}{T} \right) (1 - X_{\text{Fe}})^2$$

(626.4 °C – 742 °C, 0.663 ≤ X<sub>Sb</sub> ≤ 0.892)

$$\log X_{\text{S}} = 0.132 - \frac{1,227}{T}$$

(618 °C – 821 °C, 0.8978 ≤ X<sub>Sb</sub> ≤ 0.9454)

En los límites estudiados, las soluciones líquidas antimonio-cobre tienen comportamiento ideal; el comportamiento de las soluciones líquidas antimonio-hierro, se aproxima al modelo sub-regular y las soluciones líquidas antimonio-azufre tienen desviaciones negativas de la ley de Raoult.

La remoción pirometalúrgica de cobre no es efectiva, siendo sulfuración el método más ventajoso. En cambio la remoción pirometalúrgica de hierro es muy efectiva y se alcanzan bajos contenidos residuales de hierro en antimonio por licuación, oxidación o sulfuración. La adición de azufre es comparativamente más ventajosa, el límite teórico de hierro a 800 °C es 1.9 x 10<sup>-4</sup>%, cuando se llega a equilibrio.

## Segregación de estaño

Serafín Guzmán Soliz

Catedrático consejero: Juan E. Joffré E.

1978

El presente trabajo analiza una alternativa pirometalúrgica para el tratamiento de minerales oxidados de estaño, refractarios a los métodos convencionales de concentración, basada en el desarrollo de la nueva tecnología de “segregación” de minerales refractarios de cobre. Éste proceso se realiza calentando el mineral de estaño molido, en mezcla con cantidades determinadas de reductores carbonáceos, cloruro de sodio y humedad. Durante el calentamiento, el estaño pasa a su fase metálica condensándose sobre las partículas de carbón, a través de una secuencia de reacciones químicas que tienen lugar dentro la cámara de segregación.

En el proceso de segregación de estaño intervienen los siguientes parámetros: a) temperatura, b) % agente clorurante, c) % agente reductor, d) % humedad, e) granulometría del mineral y f) tiempo de tratamiento; los mismos que fueron estudiados para determinar las condiciones más favorables de tratamiento y tener una óptima eficiencia del proceso, obteniéndose que las mejores condiciones de operación del proceso de segregación de estaño son las siguientes:

- Temperatura de tratamiento 930 – 950 °C
- Carbón 4 – 4.5%
- Agente clorurante 5%

- Humedad	2%
- Granulometría del mineral	- 14 #
- Granulometría del NaCl	- 14 #
- Tiempo de tratamiento	60 minutos
- Presión de trabajo	Atmosférica

Las cantidades de agente clorurante, carbón y humedad, están expresadas en por ciento peso del mineral.

Los resultados de cada prueba de segregación fueron evaluados por lixiviación del estaño metálico de la carga segregada con ácido clorhídrico, y establecen que es posible obtener una segregación del 92%, demostrando que la aplicación del proceso a los minerales oxidados de baja ley, es técnicamente factible, con resultados satisfactorios.

La separación del estaño segregado del resto del mineral es un problema complejo. Se recomienda un programa de trabajo para estudiar algunas alternativas que en pruebas preliminares dieron resultados atractivos.

## Estudio de la refinación electrolítica del antimonio

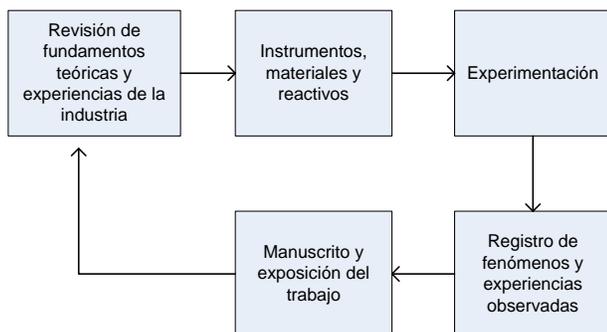
Valentin Pecho Torrico

1979

Se ha puesto atención, previamente, a los fundamentos teóricos que nos dan la base para la experimentación en laboratorio, después será posible ir a la práctica industrial.

La exposición de este trabajo es descriptiva y analítica. Se pone de manifiesto la interrelación de los fenómenos caloríficos, eléctricos, los cambios químicos que produce el flujo de electrones, los aspectos microscópicos en el electrolito y otras observaciones.

La secuencia en este trabajo de investigación, ha sido hecha por etapas, y se ha realizado de la siguiente manera:



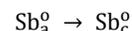
Después de un periodo de experimentación, se ha logrado refinar antimonio electrolíticamente. El antimonio metálico a

refinarse, procedía de la obtención de este metal a partir de sulfuros y óxidos de antimonio.

El electrolito empleado fue de ambiente ácido, compuesto fundamentalmente por las siguientes especies moleculares:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HF,  $\text{H}_2\text{O}$ ; además, las especies iónicas  $\text{Sb}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y según (9),  $\text{Sn}^{+2}$  y  $\text{Sn}^{+4}$ . Estos elementos se presentan tanto iónicamente como en forma de sulfatos, incluso antes de la electrólisis. Las moléculas al paso de la corriente eléctrica formaran iones y radicales  $\text{H}_3\text{SO}_4^+$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ , provenientes de la disociación del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y las sales metálicas (8). Se han tenido, también, los hidroxiliones  $\text{OH}^-$  e hidrogeniones  $\text{H}^+$ , provenientes especialmente de la disociación del agua en concentraciones muy pequeñas, puesto que su grado de disociación es muy bajo. Para el agua pura la concentración de  $\text{H}^+$  es  $1.0 \cdot 10^{-7}$  y la concentración de  $\text{OH}^-$  es la misma.

En las pruebas se estudió el efecto que tiene, durante la refinación electrolítica del antimonio, la concentración de los ácidos  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y HF por separado. De igual manera, se han hecho variar la concentración de los iones:  $\text{Sn}^{+2}$ ,  $\text{Sn}^{+4}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Sb}^{+3}$ , desde cero hasta un valor previamente establecido. De estas variables se han obtenido diagramas de dispersión en sistemas de coordenadas rectangulares, las cuales han permitido encontrar las correspondientes curvas de ajuste por el método de los mínimos cuadrados. Análogamente, en la serie de experimentaciones se ha hecho variar la densidad de corriente, la distancia entre placas, la temperatura, cuyos resultados han sido registrados debidamente.

En esta refinación, la transferencia del antimonio del ánodo al cátodo se expresa por la siguiente reacción química:



Cuyo significado se ha de explicar, detalladamente, en el apartado correspondiente.

Resumiendo, el propósito ha sido efectuar grupos de pruebas, de manera que en cada una de ellas exista variabilidad en una de sus condiciones de operación o en la naturaleza del electrolito; manteniendo el resto de esos factores, en lo posible, constantes. Se ha tomado como condición tipo para los siguientes grupos de pruebas, la condición o factor que mejores resultados revele dentro del grupo de experimentación, por la calidad de sus depósitos catódicos. Esta modalidad de experimentación permite estudiar el efecto en la electrólisis del factor en estudio y hacer normales, paulatinamente, las condiciones de separación y composición de la solución electrolítica.