

RECUPERACIÓN DE APATITA DE RELAVE PRODUCIDOS EN LA CONCENTRACIÓN MAGNETICA DE HIERRO

L. VALDERRAMA¹, J. OLIVA², O. GÓMEZ³, B. ZAZALI⁴

Departamento de Ingeniería en Metalurgia, Universidad de Atacama, Copiapó – Chile^{1,2,4}

Unidad de Geología, Compañía de Acero del pacífico, La Serena – Chile³

luis.valderrama@uda.cl¹

Artigo submetido em 06/11/2018 e aceito em 10/03/2019

DOI: 10.15628/holos.2019.7906

RESUMEN

La apatita es el mineral de fosfato más común, además de ser un recurso no renovable es la única fuente económicamente viable de fósforo para los fertilizantes y productos químicos fosfatados. Chile en el año 2016 produjo 6.205 toneladas de recurso fosfórico y en el mismo año importó 230.738 toneladas. Esto hace necesario estudiar tecnología para concentrar los minerales de fosfato presentes en los relaves de hierro, promoviendo la diversificación productiva y disminuyendo los volúmenes de pasivos ambientales. Se analizó la efectividad de un colector en un relave generado de la concentración magnética de hierro, el cual contiene cuarzo, óxidos de hierro, feldespato, carbonatos y anfíboles. Estos minerales de fosfatos

fueron concentrados por flotación, usando oleato de sodio y un reactivo sintético como colector. Este trabajo presenta los resultados obtenidos con el colector de la AkzoNobel, llamado Atrac 2600 y muestra que bajo condiciones de flotación de 500 g/t de colector, 400 g/t de Na_2SiO_3 como dispersor de ganga, se alcanza una ley de 20,1% de P_2O_5 con una recuperación de 88,4%. Estos resultados obtenidos al ser comparados con los de oleato de sodio presentan mejores resultados metalúrgicos; lo permitiría retratar los grandes volúmenes de relave de hierro, lo que se traducirá en una minería más sustentable.

PALAVRAS-CHAVE: flotación, nuevo colector, apatita, selectividad.

RECOVERY OF TAILINGS APATITE PRODUCED IN THE MAGNETIC CONCENTRATION OF IRON

ABSTRACT

Apatite is the most common phosphate mineral, in addition to being a non-renewable resource it is the only economically viable source of phosphorus for fertilizers and phosphate chemicals. Chile in 2016 produced 6,205 tons of phosphoric resource and in the same year it imported 230,738 tons. This makes it necessary to study technology to concentrate the phosphate minerals present in iron tailings, promoting productive diversification and decreasing the volumes of environmental liabilities. The effectiveness of a collector was analyzed in a tailings generated from the magnetic concentration of iron, which contains quartz, iron oxides,

feldspar, carbonates and amphiboles. These phosphate minerals were concentrated by flotation, using sodium oleate and a synthetic reagent as a collector. This paper presents the results obtained with the AkzoNobel collector, called Atrac 2600 and shows that under conditions of flotation of 500 g/t of collector, 400 g/t of Na_2SiO_3 as disperser of gangue, a law of 20.1 is reached % of P_2O_5 with a recovery of 88.4%. These results obtained when compared with those of sodium oleate present better metallurgical results; it would allow it to portray the large volumes of iron tailings, which will result in a more sustainable mining

KEYWORDS: flotation, new collector, apatite, selectivity.

1 INTRODUCCIÓN

Chile es el primer productor mundial de cobre, primer productor de yodo, segundo productor mundial de litio y tercer productor mundial de molibdeno (USGS, 2016). Esta gran producción de commodity hace que se estén generando grandes cantidades de relave, lo que provoca un gran impacto en lo social, en el paisaje y en el medio ambiente en general. Los principales problemas que producen estos relaves, son la contaminación del agua, contaminación del aire, contaminación acústica, alteración del terreno y presencia de relaves radioactivos por Ripley et al., (1996); Gray, (1997); Benzaazoua, and Bussière (1999).

En los últimos años el tratamiento de relave ha sido considerado una alternativa rentable cuando éstos contienen altas cantidades de minerales de valor. Por otra parte, dado que los relaves no implican costos de extracción, chancado, molienda y procesamiento, su retratamiento permite generar un flujo de caja positivo. A pesar de ello, su aprovechamiento económico todavía no se ha desarrollado ampliamente (Suttill, 1988; Oliveira et al., 2011).

En el año 2016 nuestro país generó 6.205 toneladas de fosfatos, que corresponden a apatita, fosforita y guano, mientras que en ese mismo año fueron importadas 230.738 toneladas de guano, fosfato de calcio, amonio y superfosfatos. Este mineral industrial es la tercera sustancia mineral del total de las importaciones (COCHILCO, 2016).

Varias investigaciones han sido realizadas en relación a la caracterización, ángulo de contacto, potencial zeta, micro flotabilidad y flotación a nivel de laboratorio con apatitas, los cuales han mostrado que la presencia de sustituciones de hierro, titanio y silicio en la estructura cristalina y el grado de impregnación de la apatita reducen su flotabilidad y la selectividad, por lo que sus propiedades superficiales varían mucho de un mineral a otro, por lo cual existen diferentes respuestas a la flotación (Brandão y Rodrigues 1993; Guimarães et al., 2005; Barros et al. 2008).

Sis y Chander (2003), realizaron una revisión de la flotación de los minerales de fosfato, en función de los colectores, depresores, reactivos auxiliares y mezclas utilizadas comúnmente en la flotación de estos minerales. Indican las ventajas y desventajas del tipo y estructura de los reactivos iónico y no iónico sobre la flotación, concluyen que el uso de mezclas de tenso activo tienen ciertas ventajas sobre un reactivo único ya que los efectos sinérgicos entre las mezclas de éstos tienen mayor efecto sobre la tensión superficial, ángulo de contacto, adsorción y flotación. También Cao et al., (2015) coinciden pero usando colectores mixtos como ácido oleico, ácido linoleico y ácido linolénico mejorando la recuperación de fosfato.

Varios métodos han sido informados como la calcinación y la lixiviación selectiva con ácidos orgánicos con el objetivo de mejorar la recuperación de los minerales de fosfato difíciles de beneficiar; sin embargo, estos métodos tienen un alto consumo de energía (Abouzeid, 2008; Gharabaghi et al., 2010). Ninguno de estos procesos han mostrado ser económicamente y más eficiente que la flotación convencional para tratar a los minerales de baja ley. En los últimos años se han desarrollado nuevos equipos de flotación, el trabajo a altas temperaturas para mejorar la solubilidad del colector o el uso de reactivos de flotación alternativos; una nueva tecnología es el

uso de burbujas de aire aceitosas reactiva para procesar los minerales de fosfatos con alto contenido de dolomita, ya que éstas aumentan las propiedades superficiales y producen una mejor concentración de la apatita Liu, et al., (2002); Zhou et al., (2015); El-Shall, et al., (2004).

En los últimos tiempos han sido investigados colectores sintéticos en la flotación de apatitas, cuando el ácido grasoso no tiene buenas recuperaciones y selectividad. La empresa AkzoNobel ha desarrollado diferentes colectores basados en ésteres y amidas, y su rendimiento fue evaluado con mineral de fosfato problemático. Los resultados obtenidos mostraron que con estos colectores se obtiene mejor recuperación y selectividad que con el ácido grasoso Gorochoveva, et al., 2014; Albino, et al., 2015.

La Compañía de Acero del Pacífico (CAP), produce concentrados y pellets de hierro y éstos provienen del procesamiento de los minerales de hierro los cuales se encuentran asociados a minerales de fosfato. Esta empresa dentro de sus proyectos pretende concentrar los minerales de fósforo de los relaves generados en la concentración magnética. La ley de P_2O_5 de estos relaves fluctúa entre 1,6% a 1,8%. Considerando estos antecedentes, este trabajo estudia la alternativa de reprocesar estos relaves y obtener concentrados de apatita mediante flotación, con un nuevo colector, pudiendo con esto generar ventajas económicas, sumada a una producción más sustentable.

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material utilizado en este trabajo fue una muestra de relave obtenido del tranque El Trigo, perteneciente a la Compañía de Acero del Pacífico. La muestra de relave fue clasificada en un tamiz de abertura de 210 micrómetros, donde la fracción retenida fue eliminada. La fracción pasante fue homogeneizada y cuarteada, obteniéndose muestras representativas para la caracterización granulométrica, química y mineralógica. El material restante fue para las pruebas de flotación a nivel de laboratorio.

2.2. Mineralogía

El estudio mineralógico fue realizado mediante microscopía óptica tradicional con tecnología de rayos X y de imágenes de electrones retrodispersados mediante Qemscan. Se determinó la mineralogía modal, el tamaño de grano promedio de las partículas y las asociaciones minerales que presentan las especies reconocidas.

2.3. Reactivos

Los reactivos colectores usados fueron el Atrac 2600, el cual es un reactivo sintético producido por la empresa multinacional holandesa AkzoNobel, y el oleato de sodio, espumante MIBC Metil isobutil carbinol, dispersante de ganga silicato de sodio y como modificador de pH carbonato de sodio.

El criterio de selección de estos reactivos se basó según indicaciones de la literatura técnica o por su actual uso en alguna planta de tratamiento de mineral de fosfato y por último por su disponibilidad en el mercado.

2.4. Pruebas de flotación de laboratorio

Las pruebas de flotación fueron realizadas en una celda de flotación Denver modelo D-12 de laboratorio y tuvieron como objetivo seleccionar el tipo y dosis de colector y dispersante para flotar la apatita contenidas en los minerales. El material flotado fue retirado de la celda mediante un raspador de acrílico de la cuba de un volumen útil de 2,6 litros.

Para cuantificar las pruebas y realizar los balances de masa y metalúrgico fueron realizadas determinaciones químicas de P_2O_5 de las fracciones flotada y relave. También fueron determinados los contenidos de CaO y SiO_2 .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis químico

La tabla 1 presenta la composición química de la muestra de relave que será la alimentación a las pruebas de flotación. Los análisis químicos fueron realizado usando la técnica colorimétrica para el fósforo, volumétrica del dicromato de potasio para el hierro y para la sílice, aluminio, calcio, magnesio y sodio por espectroscopia de absorción atómica vía fusión directa.

Tabla 1. Composición química de la muestra de relave

Especies	P_2O_5	SiO_2	Fe_T	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O
Composición (%)	1,8	46,4	25,9	6,8	6,1	4,9	2,7

En la figura 1 se muestra el análisis granulométrico y la distribución de P_2O_5 por malla. Se observa en figura que el 46,7% de las partículas contenidas en el relave tiene un tamaño menor a 400 mallas, y que el 42,2% del P_2O_5 que contiene la muestra se encuentra bajo este tamaño.

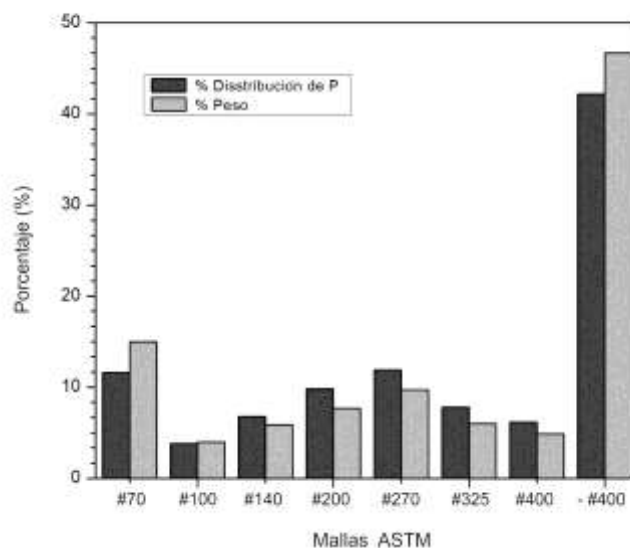


Figura 1. Distribución granulométrica y fósforo en el relave de hierro

3.2. Análisis mineralógico

El análisis mineralógico mostró que es un relave complejo debido a la gran variedad de ganga y minerales que contiene y además la fuerte erosión que presenta. Se identificaron varios minerales de ganga como cuarzo, diópsido, micáceo (hidrobiotita, vermiculita, clinocloro, antigorita, alevardita), carbonatos y anfíboles.

La mineralización metálica consta de magnetita, hematita, goetita, pirita y rutilo, titanita y pseudorutilo reconocidos principalmente como disseminaciones en fragmentos líticos, presentes en un volumen menor como impregnaciones en ganga no metálica. En algunos casos es posible apreciar un contacto simple entre rutilo y magnetita. En la tabla 2 se presenta la composición mineralógica del relave.

Tabla 2. Porcentaje en peso de los principales minerales y ganga de la muestra de relave

Mineral	FexOy	Anfibola	Feldespato	Clorita	Apatita	Cuarzo	Epidota	Pirita	Mica
(%)	30,7	19,9	18,5	6,8	4,3	3,1	3,0	2,6	2,3

El tamaño promedio de las partículas de apatita es de 34,4 micrómetros, y a este tamaño el 94,3% se encuentra liberada y 5,7% se encuentra asociado y ocluido a la magnetita, óxido e hidróxido de hierro, calcopirita, pirita y otros minerales no metálicos.

En la figura 2 se presentan fotografías de la caracterización mineralógica, mediante microscopía de rayos X disperso, del relave El Trigo, que fueron estudiadas mediante mineralogía automatizada de algunos granos minerales seleccionados.

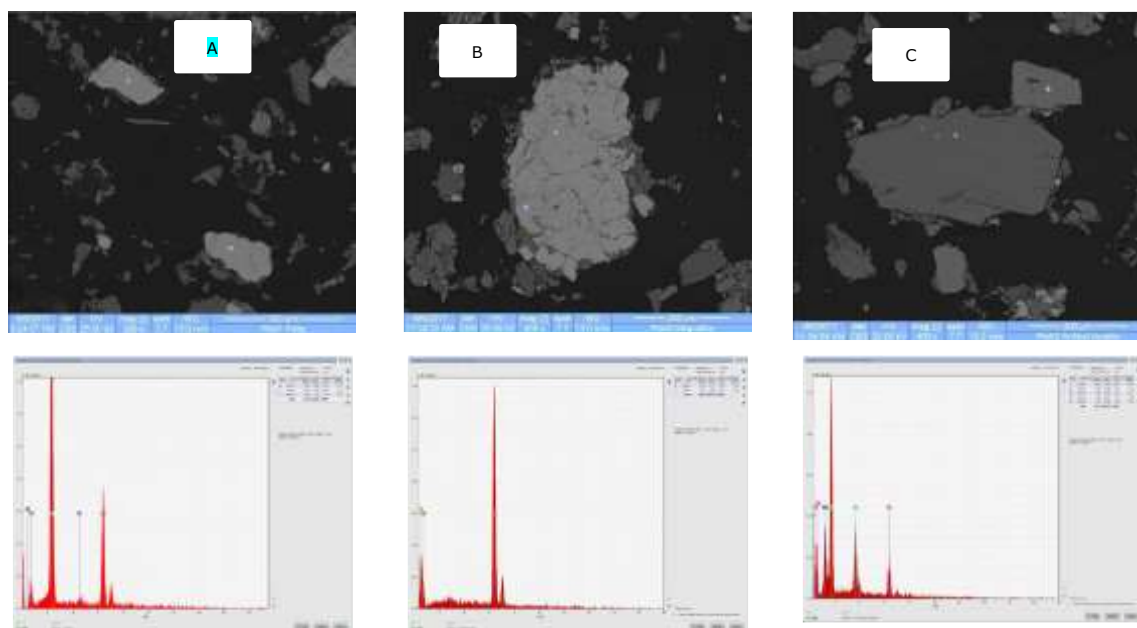


Figura 2. (A) La pirita presenta contenido levemente más bajos en Fe y S que el teórico. También se observa una pequeña señal del Zn, La y Ti. (B) La magnetita presenta contenidos de Fe levemente superiores al teórico, (C) El apatita presenta algún contenido de cloro y flúor.

3.3. Pruebas de flotación rougher de apatita

La figura 3 muestra los efectos en la ley de P_2O_5 en el concentrado y su recuperación, de los diferentes colectores y sus correspondientes dosificaciones. Todas las pruebas de flotación se realizaron manteniendo constante las siguientes condiciones: concentración de sólidos 35%; pH 9; tiempo de acondicionamiento de 10 minutos; tiempo de flotación de 10 minutos, dosis de dispersante (silicato de sodio) 400 g/t, además se indicará que estas pruebas fueron desarrolladas sin la adición de espumante.

Se observa en la figura que al aumentar la dosis de oleato de sodio y de Atrac 2600; la ley y la recuperación de P_2O_5 se incrementan levemente al usar oleato de sodio, a pesar de usar altas dosis de este reactivo. Cuando fue usado el colector Atrac 2600, en dosis menores, se obtienen leyes y recuperaciones de fosfato muy superiores a las alcanzadas con oleato de sodio. Usando una dosis de 500 g/t de colector y 400 g/t de silicato de sodio se obtienen concentrados con leyes de 20,1% de P_2O_5 y con recuperaciones de 88,4%, con una alta razón de enriquecimiento de 11,4; indicando con esto una alta selectividad con respecto a la SiO_2 y Fe_2O_3 ; la que se favorece con la presencia de silicato de sodio, que cumple la función de dispersar la ganga, aumentando con esto la hidrofiliidad inhibiendo su flotación. En este estudio, se seleccionó el silicato de sodio como dispersante por ser considerado como uno de los dispersantes más efectivos para minerales de silicato Gong, et al., 1993; Fengxiang et al., 2015.

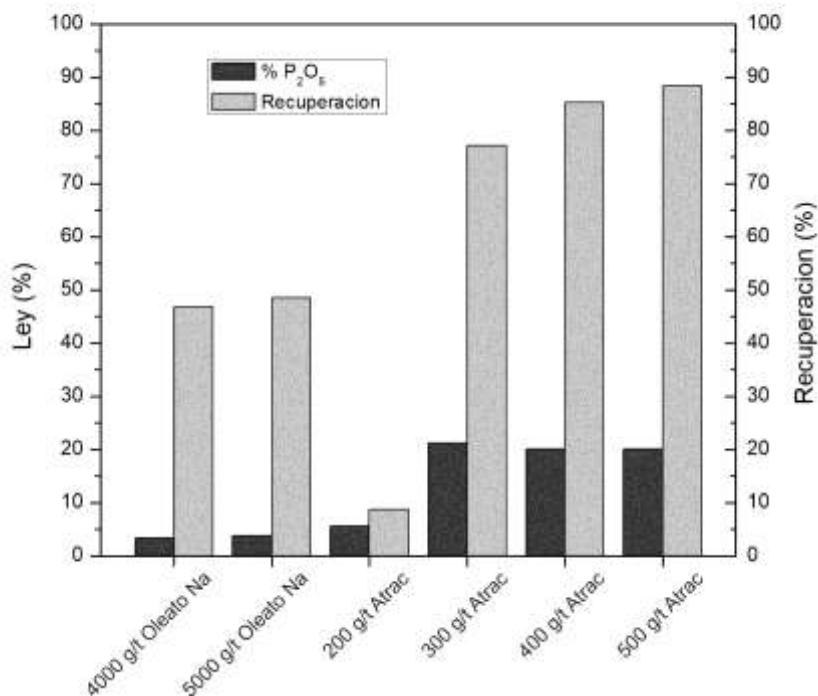


Figura 3. Efecto de la dosis de oleato de sodio y Atrac 2600 en la ley y recuperación P₂O₅

La figura 4 muestra la ley de P₂O₅ y la recuperación metalúrgica en función de la dosis de espumante entre 10, 20, 30 y 50 g/t, manteniendo constante la dosis del colector Atrac 2600 en 400 g/t y el silicato de sodio en 400 g/t, porcentaje de sólido de 35%, pH 9 y tiempo de acondicionamiento y flotación de 10 minutos.

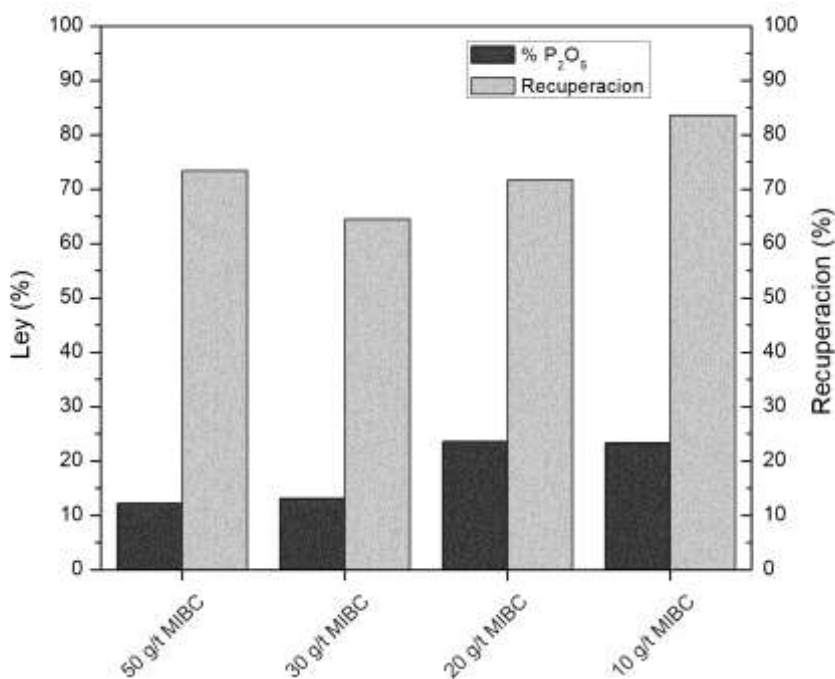


Figura 4. Efecto de la dosis de espumante MIBC en función de la ley y recuperación de fosfato

Se observa que al aumentar la dosis de MIBC, la ley de P_2O_5 en el concentrado y la recuperación metalúrgica disminuyen, alcanzando su mejor respuesta para una dosis de 10 g/t donde se obtiene una ley de 23,4% de P_2O_5 y una recuperación de 83,6%; para dosis superiores de espumantes la recuperación y la ley de fosfato disminuyen. Esto concuerda con lo que reporta Miller et al. (2002), que basta una pequeña dosis de espumante para estabilizar la película líquida que rodea la burbuja de aire, inhibiendo la coalescencia de burbujas y ayudando a la adhesión burbujas/partículas en la fase líquida y retardando además el drenaje del líquido de la burbuja en la fase espuma.

Se realizaron pruebas de flotación para analizar la influencia del tiempo de flotación entre 1 a 10 minutos. La figura 5 muestra los resultados de la cinética de flotación rougher realizada al relave usando 400 g/t de Atrac 2600 como colector y 400 g/t de silicato de sodio como dispersante, manteniéndose las mismas condiciones de operación de las pruebas realizadas previamente en este estudio.

Se observa en dicha cinética que la ley instantánea de P_2O_5 al cabo del primer minuto de flotación es de 37,2%, con una recuperación de 26,6 %. El aumento del tiempo de flotación genera un incremento en la recuperación llegando a niveles de 76,2% a lo cinco minutos y de 87,3% a los 10 minutos, cuyas leyes de P_2O_5 fueron iguales a 18,0% y 4,1% respectivamente, sin llegar alcanzar en este tiempos leyes instantáneas de P_2O_5 iguales o inferiores a la ley de alimentación.

El tiempo óptimo de flotación determinado según el polinomio de Lagrange, es igual a 12 minutos 29 segundos. Este tiempo es considerado muy alto, por lo cual se considerará un tiempo de flotación de 5 minutos donde se obtiene una ley de concentrado de 18,0% de P_2O_5 con una recuperación de 76,2%, por lo que es necesario considerar etapas de limpieza y scavenger para el relave rougher, mejorando de esta manera la calidad química del concentrado.

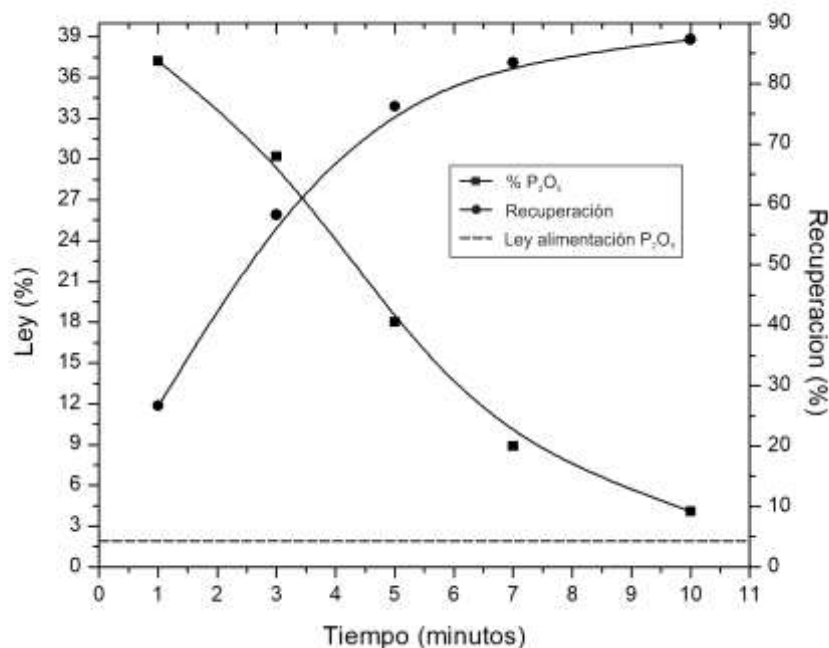


Figura 5. Cinética de flotación rougher de la apatita usando Atrac 2600 sin espumante

Por otra parte, se realizó una nueva cinética de flotación rougher considerando en ésta 4000 g/t de oleato de sodio, 500 g/t de silicato de sodio, manteniéndose las mismas condiciones de pH 9, porcentaje de sólido y tiempo de acondicionamiento y flotación empleados en la cinética previa, los resultados se muestran en la figura 6.

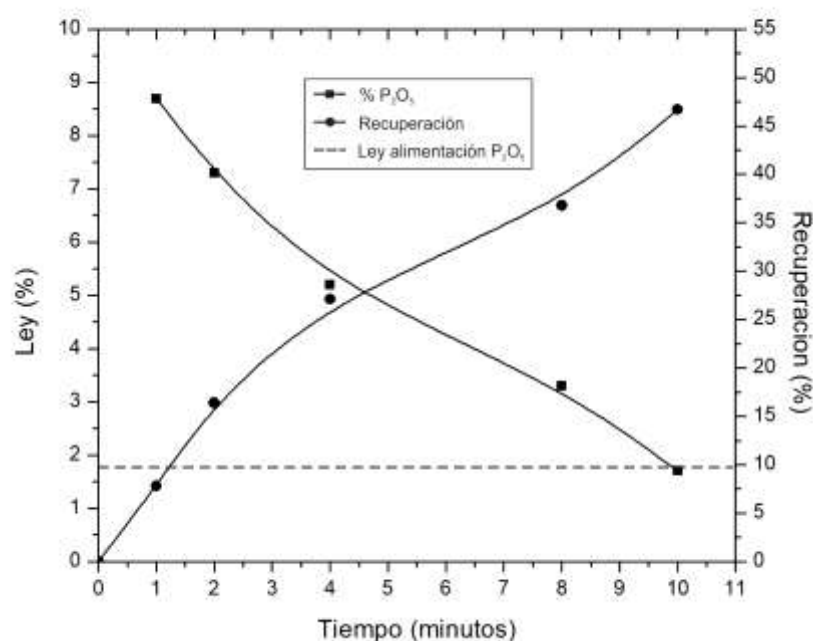


Figura 6. Cinética de flotación rougher de la apatita relave de hierro usando oleato de sodio

Al observar la figura 6, se aprecia una lenta cinética de recuperación de la apatita, donde a los 10 minutos ésta alcanza un valor igual a 46,8%, valor muy similar a lo obtenido en la prueba de flotación preliminar con dosis 10 veces más alta a la empleada en esta cinética, donde la recuperación es a la vez demasiado baja respecto a la obtenida al usar el reactivo Atrac 2600, con el cual se supera el 85% en la recuperación.

De acuerdo estos resultados que indican un enriquecimiento poco significativo de la ley de fosfato y la recuperación a los 10 minutos y la cercanía del valor de la ley de P₂O₅ a la ley de fosfato alimentada, se determina un tiempo de flotación de 8 minutos, como tiempo de flotación para la etapa scavenger.

4 CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- Las pruebas de flotación realizadas al relave usando como colector el Atrac 2600, muestran que no requiere dosis muy elevadas para lograr resultados prometedores en la flotación directa de apatita;
- Este colector mostró una eficiencia superior al compararlo con el oleato de sodio. Con espumante y silicato de sodio presenta una mejor selectividad y recuperación como las principales ventajas de usar éste en relación a los colectores tradicionales;

- De acuerdo a las pruebas de flotación efectuadas con dosis similares de Atrac 2600 (400 g/t), éstas reportaron recuperaciones del orden del 85%, por lo que no se justifica el uso del MIBC como espumante en el proceso.

5 AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería en Metalurgia de la Universidad de Atacama, a la Compañía Minera del Pacífico por el aporte económico y a Odair Lima de la empresa Akzo Novel de Brasil por la muestra del colector Atrac 2600.

6 BIBLIOGRAFÍAS

- Abouzeid, A.-Z.M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores—an overview. *Int. J. Miner. Process.* 85 (4), 59–84.
- Albino, K.I.P.; Gorochoveva, N.; Klingberg, A.; Lima, O.A. 2015. New synthetic collector for the direct flotation of apatite from complex ore. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Poços de Caldas-MG, 18 a 22 de Outubro 2015
- Barros, L.A.F., Ferreira, E.E., Peres, A.E.C. (2008). Floatability of apatites and gangue minerals of an igneous phosphate ore. *Minerals Engineering*, v. 21, p. 994-999, 2008.
- Benzaazoua, M. and Bussière, B. 1999. Desulphurization of tailings with low neutralizing potential: kinetic study and flotation modeling. *Sudbury'99, Mining and the Environment II*. D. Goldsack, N. Belzile, P. Yearwood and G. Hall Eds. Vol. 1 Sudbury :29 – 38.
- Brandão, P. R. G., Rodrigues, A. J. (1993). The influence of chemistry on the flotability of apatites with sodium oleate. *Minerals Engineering*, vol. 6, n. 6, p. 643-653.
- Cao, Q., Cheng, J., Wena, S., Li, Ch., Bai, S. Liu, D. (2015). Mixed collector system for phosphate flotation. *Minerals Engineering* 78, 114–121.
- Corporación Chilena del Cobre (COCHILCO), Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016.
- El-Shall, H., Zhang, P., Khalek, N.A., El-Mofty, S. (2004). Beneficiation technology of phosphates: challenges and solutions. *Minerals and Metallurgical Processing* 21 (1), 117–126.
- Fengxiang J., Yanhai S., Shuan X. and Mingming L. 2015. Study on separation of phosphate from phosphate ore by flotation. *International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics (AMEII 2015)*.
- Gharabaghi, M., Irannajad, M., Noaparast, M. (2010). A review of the beneficiation of calcareous phosphate ore using organic acid leaching. *Hydrometallurgy* 103 (1–4), 96–107.
- Gong, W. Q., Klauber, C., Warren, L. J. (1993). Mechanism of action of sodium silicate in the flotation of apatite from hematite. *International Journal of Mineral Processing*, 39, 251-273

- Gorochovceva, N., Klingberg, A., Lannefors, J. 2014. Development of anionic collectors for direct flotation of apatite from complex siliceous ores with a focus on sustainability. International Mineral Processing Congress. Proceedings: XXVII International Mineral Processing. Santiago, Chile. (IMPC, Charper 3) p. 68-78
- Gray, N. F. 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem, *Environmental Geology*, 30 : 62-71.
- Guimaraes, R.C., Araujo, A.C., Peres, A.E.C. (2005). Reagents in igneous phosphate ores flotation. *Miner. Eng.* 18 (2), 199–204.
- Liu, J., Mak, T., Zhou, Z., Xu, Z. (2002). Fundamental study of reactive oily-bubble flotation. *Miner. Eng.* 15 (9), 667–676.
- Miller, J.D.; Wang, X.; Li, M. A. (2002). Selective Collector for Phosphate Flotation; Florida Institute of Phosphate Research: Bartow, FL, USA.
- Mineral Commodity Summaries. 2017. Consultado el 17 de enero 2018 <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2017-coppe.pdf>
- Oliveira, M.S., Santana, R.C., Ataíde, C.H., Barrozo, M.A.S. (2011). Recovery of apatite from flotation tailings. 79, 79-84.
- Ripley, E.A., Redmann, R.E. and Crowder, A. A. 1996. Environmental Effects of Mining, St. Lucie Press.
- Sis, H., Chander, S., (2003). Reagents used in the flotation of phosphate ores, a critical review. *Minerals Engineering* 16 (7), 577–585.
- Suttill, K. (1988). Tailing retreatment in Northern Ontario. *Engineering and Mining Journal*, p. 58 – 62.
- Zhou, F., Wang, L., Xu, Z., Liu, Q., Chi, R. (2015). Reactive oily bubble technology for flotation of apatite, dolomite and quartz. *International Journal of Mineral Processing* 134, 74–81.