

ESTUDIO DE REACTIVO INHIBIDOR - COLECTOR PARA MINERALES DE COBRE

L. Valderrama^{*1}; Z. Petkovic²; I. Rajevic².¹Departamento de Ingeniería en Metalurgia, Universidad de Atacama²PETKOM S.A. - Chile

luis.valderramal@uda.cl*

Artículo presentado en 29/09/2016 - aceptado en 12/12/2016

DOI: 10.15628/holos.2016.5126

RESUMEN

En los últimos años los elevados costos en la molienda han focalizado la atención en el aumento de la eficiencia y en la disminución del consumo de medios de molienda. En esta línea han aparecido en el mercado una nueva serie de inhibidores para la corrosión y colectores para la flotación, bajo el nombre comercial de PETKOM. Estos reactivos son interesantes de estudiar porque disminuyen el consumo de acero y actúan como colectores selectivos, entregando concentrados de mayor pureza en el caso de cobre. En este estudio se realizaron pruebas de laboratorio en paralelo, con y sin el uso de inhibidor, para determinar el consumo de

acero. La densidad de pulpa usada en la prueba estándar fue de 70%, y con inhibidor de 76%, agregando una dosis de SKIK de 30 g/t en el molino. Los resultados mostraron un ahorro en el consumo de bolas de 1,9 % para el mismo tiempo de molienda y gasto en energía; además el inhibidor permitió moler un 6% más de mineral por trabajar con un mayor porcentaje de sólido. La eficiencia del SKIK como colector se puso a prueba en flotación, donde se comparó con el reactivo MATCOL (20 g/t) en dosis de 10 (g/t) y a pH 10. Este nuevo reactivo mostró un aumento en la recuperación de 2,3% en cobre, 15,9% en oro y 6,9% en plata.

PALABRAS-CLAVE: inhibidor - colector, molienda, consumo, flotación.

STUDY OF REACTIVE COLLECTOR - INHIBITOR FOR COPPER MINERAL

ABSTRACT

In recent years the high costs in grinding have focused the attention on increasing efficiency and reducing consumption of grinding media. By this way have appeared on the market a new series of inhibitors for corrosion and collectors for flotation, under the trade name PETKOM. These reagents are interesting to study because they decrease steel consumption and act as selective collector, giving concentrates of higher purity in the case of copper. In this study laboratory tests were conducted in parallel, with and without the use of inhibitor to determine steel consumption. The pulp

density used in the standard test was 70%, and 76% inhibitor, SKIK adding a dose of 30 g/t in the mill. The results showed a saving of 1.9% in the consumption of balls for the same milling time and energy costs; inhibitor also allowed the grinding of an additional percentage of a 6%. SKIK efficiency as a collector was tested in flotation, where it was compared with the reagent MATCOL (20 g/t), at doses of 10 g/t at pH 10. This new reagent showed an increase in recovery of 2,3% copper, 15.9% gold and 6.9% silver.

KEYWORDS: inhibitor - collector, grinding, consumption, flotation.

1. INTRODUCCIÓN

La molienda del mineral es la operación de mayor costo en las plantas de procesamiento de minerales, principalmente debido al consumo de barras, bolas y revestimientos de los molinos. En los últimos tiempos, la molienda de minerales ha recibido una mayor atención pues se pretende aumentar la eficiencia y disminuir el consumo de los medios moledores (Sepúlveda 2004; Zhong, Wu, Zhang, Fang y He 2005).

Varios autores Radziszewski (2002) y Greet, Small, Steinier y Grano (2004) proponen que los mecanismos que explican el desgaste en los medios de molienda se deben a la corrosión, abrasión e impacto del medio moledor.

Bond (1964); Sobering y Carlson (1971) y Aldrich (2013) mostraron que la molienda en húmedo tiene un mayor consumo de bolas respecto a la molienda en seco, mediante la realización de pruebas donde los resultados obtenidos indicaron consumos de 3,15 a 1,25 kg/t; reducción atribuida solo a la corrosión.

En los procesos de concentración de minerales, la molienda gasta aproximadamente entre 40 a 50% de la energía necesaria en el beneficio de minerales metálicos e industriales. Fuerstenau y Abouzeid (2002) indican que este consumo está determinado principalmente por las pérdidas de energía y el desgaste de los medios moledores.

Un factor importante en el consumo de los medios de molienda es el contenido de carbono, los elementos de aleación y el tratamiento térmico realizados a los aceros y hierro fundido. Meulendyke y Purdue (1989); Chenje, Simbi y Navara (2003); Greet, Obeng, Kinal y Bosscher (2013) analizaron el consumo de bolas en la molienda en función del tratamiento térmico y los micros constituyentes que se forman en este tratamiento. Estudios sobre tasa de desgaste y modelos de molienda fueron realizados mediante pruebas de molienda a nivel de laboratorio y han sido informados por Jensen Fundal, Moller y Jespersen (2010); Cleary y Morrison (2011); King, Li, Wang, He, Zhou, Deng y Xu (2015).

La composición química del mineral, la adición de reactivos tales como colector, espumante, cal, el contenido de oxígeno, la formación de hidróxidos de hierro y las interacciones galvánicas entre los minerales sulfurados sobre los medios de molienda han sido analizados y discutidos en relación a la flotación de minerales sulfurados de cobre por Bruckard, Sparrow y Woodcock (2011); Aldrich (2013).

El uso de inhibidores, aplicados a pulpas de pH más elevados, mejora la resistencia al desgaste durante la molienda. Investigadores como Hoey, Dingley y Freeman (1975); Jones (1985) realizaron estudios usando inhibidores de corrosión (nitrito de sodio, cromato sodio y meta silicato de sodio) para reducir el desgaste total de bolas en un molino de laboratorio en la cual lograron reducir hasta un 49% su consumo. Tales reactivos, para uso de la planta, el costo debe cubrir no solo el ahorro de los medios de molienda, sino también el efecto adverso que podría producir en la flotación.

El objetivo del presente trabajo es evaluar un nuevo reactivo a nivel de laboratorio, conocido bajo el nombre comercial de PETKOM-SKIK, patentado por Rajic y Petkovic (2005), que

se caracteriza por su efecto inhibitor de la corrosión en la molienda y como colector selectivo en la flotación de minerales de cobre.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Mineral

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas en el Instituto de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Atacama utilizando un mineral de cobre proveniente de Planta M. A. Matta de la Empresa Nacional de Minería.

La mena mineral utilizada en este estudio corresponde a una muestra representativa con un peso de 120 kilogramo a un tamaño de 100% menor a 3". La reducción de tamaño fue realizada en un chancador de mandíbula y posteriormente en un rodillo para obtener un producto 100% bajo 10 mallas Tyler.

Esta muestra se secó, disgregó, homogenizó y cuarteó con el fin de tener diferentes fracciones para realizar análisis químico, peso específico real y para las pruebas de molienda y flotación.

2.2. Procedimiento experimental

Las pruebas de molienda en húmedo se realizaron en dos molinos (A y B) de acero inoxidable marca Hebro de laboratorio de 22,5 cm de largo y 17,5 cm de diámetro, montados sobre una mesa, equipada con cuatro rodillos de 11,25 cm de diámetro por 63,8 cm de largo. La rotación de los rodillos se produce mediante la transmisión con piñones y cadenas de paso 1,25 cm, accionados con un motor reductor, siendo la velocidad de rotación de 74 rpm.

La carga de bolas usada fue de 10.038,9 gramos, distribuida en 20 bolas de 3,75 cm con un peso de 5.228,6 gramos y 74 bolas de 2,54 cm de peso 4.810,3 gramos. La molienda en el molino sin inhibidor fue realizada con un 70% de sólidos, mientras que en el otro molino, se pudo trabajar con un porcentaje de sólidos mayor de 76%, por el agregado del reactivo inhibitor; donde se agregó una dosis en el molino de 30 g/t.

La metodología utilizada para medir el desgaste de bolas a nivel de laboratorio; en primer lugar se determinó el tiempo de molienda a la granulometría (70% bajo la malla 200) a los dos porcentajes de sólidos (70% de sólido y 76% de sólido), mediante pruebas de cinética de molienda.

Las cinéticas de molienda fueron realizadas a diferentes tiempos, fueron correlacionados en función del porcentaje bajo la malla 200 y mediante interpolación polinómica de Lagrange se determinó el tiempo para obtener la granulometría deseada, el que fue verificado mediante la realización de una prueba de molienda adicional.

El consumo de bolas fue determinado mediante la realización de 82 pruebas de molienda, usando un molino sin el uso del reactivo inhibitor y al otro molino se le adicionó el reactivo inhibitor, también fueron realizadas 82 pruebas de molienda. Las dos pruebas de molienda se ejecutaron en forma simultánea sobre la mesa de rodillos con el propósito de disminuir cualquier error experimental.

El consumo de bolas se determinó a través de las siguientes formulas:

$$\text{Estándar} \quad G_0 = G_1 - G_2 \quad (1)$$

$$\text{Con inhibidor} \quad G_{SKIK} = G_3 - G_4 \quad (2)$$

$$\text{Porcentaje de ahorro} \quad \% = \frac{G_0 - G_{SKIK}}{G_0} \times 100 \quad (3)$$

Donde $G_0 =$ consumo sin inhibidor; $G_1 =$ peso inicial; $G_2 =$ peso final

$G_{SKIK} =$ consumo con inhibidor; $G_3 =$ peso inicial; $G_4 =$ peso final

Tanto las pruebas de flotación de cobre, plata y oro como las pruebas de molienda se realizaron con el mismo mineral. En las pruebas de flotación se utilizó una celda Denver D -12 de volumen: 2.600 cm³. Las pruebas consideraron un porcentaje de sólidos de 35% y se aplicó cal como regulador de pH. El tiempo de acondicionamiento fue de 5 min y el tiempo de flotación de 10 minutos, variando el pH entre 9, 10 y 11. En prueba estándar fue usado el colector MATCOL (ditio carbamato modificado) en una dosis de 25 g/t y MIBK (metil iso butil carbinol), en la flotación con SKIK se usó 25 g/t (mercapto benzo tiazol), en dosis de 10, 20 y 30 g/t.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las pruebas de molienda se utilizaron bolas de acero, cuya composición química se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química del acero usado en las bolas del molino

Elemento	C	Mn	Cr	Si	S	P
Porcentaje	0,7	0,7	0,3	0,2	0,003	0,003

Las pruebas cinéticas de molienda permitieron determinar el tiempo requerido para obtener el material a una granulometría de 70% bajo la 200 malla Tyler. Las pruebas de molienda sin el uso de inhibidor emplearon un porcentaje de sólido en el molino de 70%, determinándose un tiempo de 25 minutos 41 segundos. Las cinéticas de molienda en las que se aplicó el inhibidor SKIK, para la misma granulometría anterior, se realizaron con un porcentaje de 76% en el molino, y en las que se obtuvo un tiempo de molienda de 26 minutos 00 segundos.

La tabla 2 presenta el análisis granulométrico de las pruebas realizadas en el molino A y B. En ella se deduce que los porcentajes de material retenidos en cada malla son similares y para alcanzar el 70% - 200 # el tiempo es de solo 19 segundo; sin embargo, en el molino B se está moliendo con un porcentaje de sólido mayor (6%).

Tabla 2. Análisis granulométrico del material para cada molino

Malla ASTM	Molino A			Molino B	
	Abertura (mm)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Retenido (%)	Acumulado (%)
50	0,297	0,1	99,9	0,1	99,9
70	0,210	0,7	99,3	0,5	99,5
100	0,149	4,9	95,1	4,5	95,5
140	0,105	15,9	84,1	15,6	84,4
200	0,074	30,0	70,0	30,0	70,0
- 200	0,037	70,0	30,0	70,0	30,0
Total		100,0	0,0	100,0	0,0

Para la determinación del consumo de bolas se realizaron 82 pruebas de molienda sin el inhibidor, con un porcentaje de sólido de 70% y un peso inicial de bolas G_1 de 10.026,3 gramos, obteniéndose un peso final de bolas G_2 de 9.916,0 gramos, lo cual entregó un consumo bolas de 110,3 gramos. En tales condiciones se calcula un tiempo de molienda de 25 minutos 41 segundos para alcanzar 70 % bajo 200 mallas Tyler. El consumo de bolas expresado en gramos x toneladas fue de 1.122,8.

En las pruebas de molienda con inhibidor SKIK, se usó un porcentaje de sólido de 76% y un peso inicial de bolas G_3 de 10.026,8 gramos, obteniendo un peso final de bolas de G_4 9.918,6 gramos, lo que entregó un consumo bolas de 108,2 gramos. Dichas condiciones permitieron determinar un tiempo de molienda de 26 minutos 00 segundos para alcanzar 70 % menor a 200 mallas Tyler. El consumo de bolas usando el inhibidor en gramos x toneladas fue de 1.101,4.

Los resultados de las pruebas antes descritas permitieron determinar que se logra un 1,9% de porcentaje de ahorro de bolas cuando se usa el inhibidor SKIK. Este valor puede ser considerado pequeño, pero se requiere realizar más pruebas a nivel de laboratorio, o a nivel industrial para confirmar que la disminución de consumo de bolas es significativa.

Una vez concluidas las pruebas de molienda, y utilizando el mismo mineral, se realizaron pruebas de flotación con el objetivo de analizar el efecto del mismo reactivo como colector en función de la recuperación de cobre, plata y oro.

La composición química de la muestra de mineral usada en las pruebas de flotación se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis químicos del mineral de planta M. A. Matta

Elemento	Cu _T (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)
Muestra	1,15	0,21	4,0

En la tabla 4 se presentan los resultados de la flotación del mineral de cobre, oro y plata usando como colector MATCOL de 25 g/t. Se puede observar que si se produce un aumento del pH se incrementa la recuperación de cobre, oro y plata.

Tabla 4. Recuperación de cobre total, oro y plata con los reactivos estándar

pH	Recuperación (%)			
	Masa	Cu _T	Au	Ag
9	11,0	93,3	74,6	49,1
10	10,7	94,1	79,5	47,5
11	8,4	95,3	82,7	49,8

En la tabla 5 se presentan los resultados de las pruebas de flotación realizadas con SKIK en dosificaciones de 10, 20 y 30 g/t a pH 10. Se observa que la recuperación de cobre, oro y plata se incrementa significativamente con respecto al colector MATCOL, en dosis menores del colector SKIK.

Tabla 5. Recuperación de cobre total, oro y plata a pH 10

Dosis SKIK	Recuperación (%)			
	Masa	Cu _T	Au	Ag
10 g/t	10,0	96,2	95,4	54,4
20 g/t	10,0	96,4	91,4	50,5

30 g/t	11,4	96,4	91,9	54,7
--------	------	------	------	------

La tabla 6 presenta los resultados de las pruebas de flotación con SKIK en las mismas dosis anteriores a pH 11. Se observa de nuevo que la recuperación de cobre, oro y plata aumenta significativamente con respecto al colector MATCOL.

Tabla 6. Recuperación de cobre total, oro y plata a pH 11

Dosis SKIK	Recuperación (%)			
	Masa	Cu _T	Au	Ag
10 g/t	9,4	96,2	92,1	50,9
20 g/t	10,0	96,3	81,6	51,5
30 g/t	9,8	96,2	90,8	52,5

4. CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos en las pruebas con la adición del reactivo inhibidor SKIK – PETKOM en la molienda, indican que se produce un incremento en la cantidad de mineral molido.
2. El inhibidor SKIK incrementó en un 6% la cantidad de mineral en el molino, producto que mejora la reología de la pulpa, permitiendo trabajar con un mayor porcentaje de sólidos que mejora la eficiencia de molienda.
3. En las pruebas de flotación, el reactivo SKIK - PETKOM permitió aumentar la recuperación de cobre, oro y plata en todas las pruebas realizadas. La mejor recuperación se obtuvo a pH 10 usando una dosis de 10 g/t de 96,2 % para cobre, 95,4% de oro y 54,4% de plata.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. ALDRICH, C. (2013). Consumption of steel grinding media in mills – A review. *Minerals Engineering* 49, 77–91.
2. BLICKENS DERFER, R. A., TYLCZAK, J. H. (1989). Evaluation of commercial U. S. grinding balls by laboratory impact and abrasion tests. *Miner. Metall. Process.* 6: 60-66.
3. BOND, F. C. (1964). Metal wear in crushing and grinding. *Chem. Eng. Prog.* 60, 90 - 100.
4. BRUCKARD, W.J., SPARROW, G.J. AND WOODCOCK J.T. (2011). A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides. *International Journal of Mineral Processing* 100, 1–13.
5. CHENJE, T., SIMBI, D., NAVARA, E. (2003). Wear performance and cost effectiveness—a criterion for the selection of grinding media for wet milling in mineral processing operations. *Minerals Engineering* 16, 1387–1390.
6. CLEARY, P. W., MORRISON, R. D. (2011). Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM. *Minerals Engineering* 24, 352 -366.
7. FUERSTENAU, D.W. and ABOUZEID, Z. M. (2002). The energy efficiency of ball milling in comminution, *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 67, 161-185.
8. GREET, C., OBENG, D., KINAL, J., BOSSCHER, P. (07, 2013). The Application of High-Chrome Grinding Media at MMG Century Mine for Improved Grinding Media Consumption and

- Metallurgy Performance, Metallurgical Plant Design and Operating Strategies (MetPlant 2013), Perth WA.
9. GREET, G.L. SMALL, P. STEINIER AND GRANO, S.R. (2004). The Magotteaux Mill®: investigating the effect of grinding media on pulp chemistry and flotation performance, *Minerals Engineering* 17, 891–896.
 10. HOEY, G. R., DINGLEY, W. AND FREEMAN, C. (1975). Corrosion inhibitors reduce ball wear in grinding sulphide ore, *CIM Bull.*, Mar.120-123.
 11. JENSEN, L., FUNDAL, E., MOLLER, P., JESPERSEN, M. (2010). Prediction of wear rates in comminution equipment, *Wear* 269, 525–533.
 12. JONES, D. A. (1985). Corrosive wear in wet ore grinding systems. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society (TMS)* 37: 20.
 13. KING, J., LI, Q., WANG, A., CATHY HE, C., ZHOU, J., DENG, H., XU, R. (2015). Evaluation of grinding media wear-rate by a combined grinding method, *Minerals Engineering* 73, 39–43.
 14. MEULENDYKE, M.J., PURDUE, J.D. (1989), Wear of grinding media in the mineral processing industry: an overview. *Minerals & Metallurgical Processing*, 6 (4), 167–172.
 15. RADZISZEWSKI, P. (2002). Exploring total media wear. *Minerals Engineering*, 15 (12), 1073–1087.
 16. RAJIC, V. PETKOVIC, Z. (2005). Selective flotation agent and flotation method. US 20050150330 A1.
 17. SEPÚLVEDA .E. J. (2004). Methodologies for the evaluation of grinding media consumption rates at full plant scale. *Minerals Engineering*, 17, 1269–1279
 18. SOBERING, A. AND D. N. CARLSON. (1971). Dry grinding at the Wabush mines pellet plant. *CIM Bull*, 64, 254 - 258.
 19. ZHONG, L., WU, B., ZHANG L., FANG, F., AND HE, X. (2005). Prediction and Experimental Testing of Spherical Milling Media Wear Rate. *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 9, 2036–2040.