

## FLOTACIÓN EN CELDA NEUMÁTICA DE UN MINERAL DE HIERRO DE BAJA LEY

O. Pavez<sup>1</sup>, I. Rojas<sup>2</sup>, M. Meléndez<sup>2</sup>, F. Parra<sup>2</sup>, J. Palacios<sup>1</sup>

(1) Departamento de Metalurgia - Universidad de Atacama - Av. Copayapu 485 - Copiapó - Chile.

Teléfono : (56-52) 206646 Fax : (56-52) 206621

E-mail : [osvaldo.pavez@uda.cl](mailto:osvaldo.pavez@uda.cl)

(2) Unidad de Investigación de Procesos Metalúrgicos - Compañía de Acero del Pacífico (CMP) - Huasco - Chile.

### RESUMEN

Se estudia la evaluación técnica de la obtención de "pellet feed" a partir de un mineral de hierro de baja ley proveniente del yacimiento El Romeral, de Compañía Minera del Pacífico (CMP), Huasco-Chile. El mineral de hierro pertenece a un yacimiento anexo al cuerpo de alta ley de la mina El Romeral, con recursos estimados en 152 millones de toneladas métricas. En este trabajo se desarrollaron tres esquemas de tratamiento, que incluyeron principalmente etapas de reducción de tamaño, concentración magnética y flotación en celda neumática. Pruebas de flotación batch iniciales fueron realizadas en una celda mecánica de laboratorio para seleccionar el reactivo colector, obteniéndose los mejores resultados con el colector Lilaflot D 817 M, no siendo necesario el uso de un reactivo depresor. Un segundo set de pruebas se efectuó en una celda de flotación neumática para definir las variables operacionales del proceso. Posteriormente, se estudiaron los tres esquemas de tratamiento para la mena de hierro, seleccionándose el esquema que no incluía etapa de preconcentración magnética y que consideraba etapas de chancado, molienda/clasificación, tres etapas de concentración magnética en húmedo y tres etapas de concentración por flotación en celda neumática. El concentrado final obtenido contenía 70,18 %Fe y 1,07 %SiO<sub>2</sub>, alcanzándose una recuperación final de 83,87 %Fe y un una remoción de SiO<sub>2</sub> del 87,79 %. En este esquema, la etapa de flotación neumática resultó fundamental para alcanzar un concentrado final de alta ley de hierro con un contenido mínimo de SiO<sub>2</sub>, ya que al aplicar las tres etapas de concentración magnética en húmedo, sin incluir las etapas de flotación en celda neumática, las leyes alcanzadas no fueron satisfactorias.

PALABRAS-CLAVES: flotación neumática, "pellet feed", Lilaflot D 817 M.

## 1. INTRODUCCIÓN

Minas El Romeral, de propiedad de Compañía Minera del Pacífico - CMP, situada a 300 metros sobre el nivel del mar, a 25 km al Noreste de la ciudad de La Serena, Cuarta Región, Chile, produce minerales de hierro del tipo finos, granzas y "pellet feed", tanto para el mercado nacional chileno como para la exportación. Sus reservas medidas alcanzan a 38,9 millones de toneladas con una ley media de 48% de hierro y una ley de corte de 30% de hierro.

El distrito de minas de El Romeral, consistente en una sucesión de cuerpos mineralizados de magnetita de 3,5 km de largo y 0,5 km de ancho, está ubicado en un cinturón de rocas volcánicas y cataclásticas, alteradas hidrotermalmente, que han sufrido posteriormente metamorfismo dinámico de carácter regional debido a la megafalla de Atacama. La explotación del yacimiento, se concentra en el cuerpo mineralizado de alta ley denominado Cerro Principal, mediante el método de cielo abierto, con un rajo alargado en el sentido Norte - Sur, de acuerdo a la forma del cuerpo mineralizado. La capacidad nominal de producción alcanza a los 3,9 millones de toneladas métricas anuales, las cuales están compuestas de 800.000 ton métricas de granzas, 2.000.000 ton métricas de finos y 1.100.000 ton métricas de "pellet feed".

Debido a que minas El Romeral presenta un inminente agotamiento de sus reservas ferríferas de alta ley, se torna necesario evaluar la posibilidad de obtener un producto comercial a partir del procesamiento de un mineral de baja ley. Esta opción surge de la posibilidad de mejorar los concentrados magnéticos mediante una concentración por flotación inversa, la cual permitiría llegar a obtener concentrados de alta calidad que a través del proceso tradicional sería difícil de obtener (Richard, 2000). Por otra parte, se ha mostrado en estudios preliminares realizados en CMP que los mejores resultados para la flotación inversa de hierro se consiguen con celdas del tipo neumáticas, en comparación con celdas convencionales y celdas columnares (Sánchez et al., 2005).

El objetivo de este estudio está orientado a la obtención de concentrados de hierro de alta ley que cumplan con las especificaciones químicas y físico-metalúrgicas requeridas para el proceso de peletización. Por lo cual, en este trabajo se evalúa técnica y metalúrgicamente la obtención de "pellet feed" de calidad comercial a partir del procesamiento de un mineral de hierro de baja ley proveniente del yacimiento El Romeral, basándose en el desarrollo de tres esquemas diferentes de proceso, compuestos principalmente por etapas de cominución, concentración magnética y concentración por flotación en celda del tipo neumática.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1. Características de la Muestra

En este estudio se utilizó una muestra de mena de hierro de baja ley de aproximadamente 6.000 kg proveniente del yacimiento El Romeral, la cual presentó una granulometría 100% inferior a 2 pulgadas. El análisis químico de la muestra indicó un contenido de hierro y sílice del orden de 28% y 30%, respectivamente, tal como se aprecia en la tabla I.

Tabla I. Análisis químico de la muestra de hierro del yacimiento El Romeral (%)

Fe	SiO <sub>2</sub>	P	S	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	V	Cu	Mn	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
28,41	30,20	0,702	1,896	6,20	6,40	5,90	0,50	0,10	0,092	0,05	1,58	0,40

### 2.2. Desarrollo del Estudio

Se desarrollaron tres tipos diferentes de esquemas para el tratamiento de la mena, los que incluían principalmente etapas de reducción de tamaño, separación magnética y flotación en celda neumática.

**Esquema 1:** Este esquema corresponde a un proceso de concentración estándar de la empresa CMP. En este proceso, en el cual se utilizaron aproximadamente 3.000 kg de mena, se realizó inicialmente una clasificación del material en un harnero vibratorio de tamaño de corte ¼ pulgada. El material sobretamaño (+ ¼ pulgada) es sometido a una separación en polea magnética de baja intensidad (primera preconcentración magnética), cuyo concentrado se reduce de tamaño en un chancador de mandíbula, dispuesto en circuito cerrado con un harnero vibratorio de tamaño de corte ¼ pulgada. Los productos inferiores a ¼ pulgada obtenidos hasta ese momento se someten a una separación magnética vía seca en un tambor magnético (segunda preconcentración magnética), obteniéndose un concentrado y un material de descarte. A

continuación, el concentrado de esta segunda preconcentración magnética es molido en un molino de bolas a un tamaño 80% - 325 mallas Tyler, deslamándose el producto de descarga del molino mediante un hidroseparador. Posteriormente, el material molido es sometido a una etapa de concentración magnética húmeda en una batería de tres tambores Finisher de 36 pulgadas de diámetro dispuestos en serie, en los cuales se aplica una intensidad de campo magnético de 750 Gauss, y se trabaja con una pulpa de 35% de sólidos y un flujo volumétrico de 200 L/min. El concentrado magnético final es limpiado mediante concentración por flotación en celda neumática, bajo las siguientes condiciones operacionales : colector Lilaflot D 817 M, 120 g/ton; espumante MIBC, 50 g/ton; depresor Amidex 182, 200 g/ton; pH 8; etapas de flotación, 3; flujo de pulpa, 4600 cm<sup>3</sup>/min; presión de aire, 1,5 bar; porcentaje de sólidos, 35%.

**Esquema 2:** Para el desarrollo de este esquema, una cantidad aproximada de 1.500 kg es reducida de tamaño en un chancador de mandíbula que opera en circuito cerrado con un harnero vibratorio, obteniéndose una granulometría 100% inferior a ¼ pulgada. A continuación el material es molido en un molino de bolas, alcanzándose un tamaño 80% -325 mallas Tyler, el cual es sometido a una concentración magnética húmeda en tres tambores Finisher conectados en serie. El concentrado magnético obtenido se somete a flotación en celda neumática.

**Esquema 3:** En este esquema, aproximadamente 1.500 kg de mena se reducen de tamaño en un circuito cerrado chancador de mandíbula / harnero vibratorio, alcanzándose un tamaño 100% menor a ¼ pulgada. Todo el material reducido de tamaño se somete a una preconcentración magnética en tambor magnético de baja intensidad, obteniéndose un concentrado magnético y un material de descarte. El preconcentrado es reducido de tamaño en un molino de bolas hasta obtener una granulometría 100% -325 mallas Tyler. Posteriormente, el material molido se somete a una concentración magnética en tambores magnéticos Finisher. El producto obtenido es limpiado mediante proceso de flotación en celda neumática, de acuerdo a las condiciones operacionales determinadas para la flotación en el esquema 2.

### 2.3. Pruebas de Flotación

**Pruebas de flotación estándar:** Estas pruebas se realizaron en una celda de laboratorio marca Galigher, modelo LA – 500, la cual presentaba un volumen útil de 2700 cm<sup>3</sup>. Las condiciones operacionales de estas pruebas fueron las siguientes : velocidad del rotor, 900 r.p.m.; flujo de aire, 4.000 cm<sup>3</sup>/min; tiempo de flotación, 10 min; extracción de concentrado desde la celda, cada 15 segundos. Los reactivos de flotación testeados en estas pruebas fueron los siguientes : Flotigam EDA y Lilaflot D 817 M, ambos colectores catiónicos; MIBC, como espumante; Amidex 182, empleado como depresor; e hidróxido de sodio, como modificador de pH.

**Pruebas de flotación en celda neumática:** Estas pruebas de flotación se realizaron en una celda neumática diseñada y desarrollada por el Dr. Imhof, la cual presentaba las siguientes características : diámetro, 20 cm; altura, 55 cm; y volumen útil, 10.000 cm<sup>3</sup> hasta el nivel de espuma. La pulpa se agitaba y acondicionaba en un dispositivo externo, alimentándose a la celda mediante una bomba peristáltica, mientras que el aire provenía de un compresor y se inyectaba tangencialmente al flujo de pulpa, tal como se muestra en la figura 1. Los reactivos de flotación empleados en la celda neumática y las dosificaciones de estos, fueron aquellos seleccionados previamente en las pruebas de flotación estándar realizadas en la celda de flotación Galigher. Los procedimientos experimentales fueron reportados por Rojas (2002).

## 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos al aplicar el esquema 1 se muestran en la tabla II, en ella se presentan la variación de los contenidos de sílice y hierro después de las etapas de flotación aplicadas al concentrado magnético. Se aprecia que al final de la tercera etapa de flotación el porcentaje de hierro había variado desde 64,94 % a 69,31 %, mientras que el contenido de sílice había disminuido de 5,10% a 1,75%. Debido al alto contenido de sílice obtenido en el concentrado final de la tercera etapa de flotación se aplicó una cuarta etapa de flotación neumática, en la cual se adicionó una cantidad extra de reactivo de 30 g/ton de colector y 10 g/ton de espumante, con lo cual se consiguió disminuir la ley de sílice a 1,31% SiO<sub>2</sub> y aumentar la ley de hierro a 70,14%.

Los resultados obtenidos indicaron que las condiciones operacionales aplicadas a la flotación no eran las más adecuadas, haciéndose necesario redefinir y estudiar nuevas condiciones para la flotación utilizando el concentrado magnético final obtenido con el esquema 2.

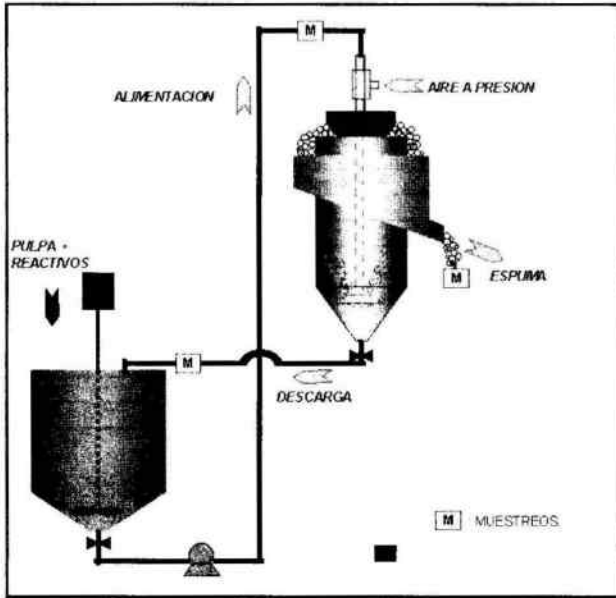


Figura 1. Representación esquemática del sistema de flotación neumática.

Tabla II. Variación de los contenidos de hierro y sílice en el concentrado después de aplicar las etapas de flotación en el esquema 1.

Número de etapas de flotación	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
0	64,94	5,10
1	65,85	4,40
2	67,53	3,00
3	69,31	1,75
4	70,14	1,31

El estudio mineralógico realizado al concentrado magnético final obtenido a partir del desarrollo del esquema 2 mostró la presencia de las siguientes especies: magnetita, pirita, calcopirita, digenita, limonita, hematita y no metálicos (actinolita, cuarzo, feldespato plagioclasa, biotita y carbonato). La magnetita es la especie metálica que predomina en la muestra, la mayoría se presenta en especies puras, sin embargo, también se observa magnetita asociada e incluida en otras especies, de preferencia en los no metálicos, y en menor escala en pirita, calcopirita, limonita y hematita. El análisis granulométrico realizado a la muestra de concentrado magnético indicó una granulometría 100% -100 mallas, con un 84% -325 mallas. En la tabla III se presenta el análisis químico de este concentrado.

Tabla III. Análisis químico del concentrado magnético final del esquema 2.

Componente (%)	Fe	SiO <sub>2</sub>	P	S	Cu	V	TiO <sub>2</sub>
	63,02	6,60	0,067	0,112	0,015	0,21	0,27

En las pruebas de flotación inversa de hierro efectuadas en una celda mecánica de laboratorio fueron testeados los colectores Flotigam EDA y Lilafлот D 817 M a través de diseños experimentales realizados con ambos reactivos. Un resumen de los resultados alcanzados en estas pruebas de flotación con ambos colectores se muestra en la tabla IV, apreciándose que los mejores resultados fueron obtenidos con el Lilafлот D 817 M. En dicha tabla se observa que con el reactivo Lilafлот D 817 M se alcanza una ley de 68,29% de Fe y de 2,82% de SiO<sub>2</sub>, eliminándose +/- 76% de sílice, mientras que, con Flotigam EDA se obtiene un 67,22% de Fe y un 3,43% de SiO<sub>2</sub>, eliminándose +/- 55% de sílice. Por

otra parte, debe señalarse que al emplear Lilafлот D 817 M se utiliza menos dosificación de colector y no se requiere el uso de un depresor.

Tabla IV. Condiciones y resultados de las pruebas de flotación realizadas en una celda mecánica de laboratorio con los colectores Flotigam EDA y Lilafлот D 817 M.

Condiciones	Flotigam EDA	Lilafлот D 817 M
Dosificación (g/ton)	200,0	180,0
Espumante (g/ton)	50,0	50,0
Depresante (g/ton)	400,0	0,0
PH	Natural (8)	Natural (8)
Porcentaje de sólidos (%)	30,0	40,0
Tiempo de flotación (min)	7,5	7,5
Fe (%)	67,22	68,29
SiO <sub>2</sub> (%)	3,43	2,82
Remoción de sílice (%)	+/- 55,00	+/- 76,00

Posteriormente, las pruebas de flotación realizadas en celda neumática indicaron que las mejores condiciones operacionales para este tipo de flotación aplicando el esquema 2, eran las siguientes: flujo de pulpa de alimentación de 2800 cm<sup>3</sup>/min, flujo de aire de 2,5 bar de presión, 30 % de sólidos, 180 g/ton de Lilafлот D 817 M y 50 g/ton de MIBC. Por otra parte, la pulpa se sometió a un tiempo de acondicionamiento de 3 minutos en pH 8 durante todas las etapas de flotación, las cuales tuvieron una duración 7 minutos cada una. Las pruebas en celdas neumáticas usando el esquema 3 se efectuaron bajo las mismas condiciones operacionales, con excepción de la cantidad de espumante adicionada que fue de 40 g/ton de MIBC.

Los resultados finales obtenidos al aplicar los esquemas 2 y 3 se presentan en la tabla V, en ella se observa que el contenido de sílice en el concentrado final disminuye a valores del orden de 1 % después de 21 minutos de flotación neumática (3 etapas de flotación). El detalle de los resultados obtenidos en cada etapa de la flotación neumática se muestra en la tabla VI.

Tabla V. Análisis químico y condiciones del concentrado final obtenido en la tercera etapa de la flotación neumática, al aplicar los esquemas 2 y 3.

Esquema	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Recuperación de Fe (%)	Remoción de SiO <sub>2</sub> (%)
2	70,18	1,07	83,87	87,79
3	70,24	1,02	79,98	88,68

Los mejores resultados fueron alcanzados con el esquema 2. El análisis de la tabla V y la tabla VI muestran que al aplicar ese esquema la recuperación de hierro fue de 83,87 % y el contenido de hierro en el concentrado aumentó desde 63,02 % para 70,18 %, mientras que la sílice disminuyó desde 6,60 % para 1,07 %, con un 87,79 % de remoción de SiO<sub>2</sub>.

Tabla VI. Variación de los contenidos de hierro y sílice en los concentrados obtenidos en las diferentes etapas de la flotación neumática, al aplicar los esquemas 2 y 3.

Número de etapas de flotación	Esquema 2		Número de etapas de flotación	Esquema 3	
	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)		Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
0	63,02	6,60	0	63,66	6,20
1	68,72	2,19	1	67,72	2,80
2	69,90	1,29	2	69,28	1,68
3	70,18	1,07	3	70,24	1,02

#### **4. CONCLUSIONES**

La flotación neumática permitió aumentar los contenidos de hierro y reducir la sílice a la cantidad requerida, al ser aplicada a un concentrado magnético obtenido del tratamiento de una mena de hierro de baja ley. Los mejores resultados fueron obtenidos con la utilización del colector Lilaflot D 817 M, el cual no requirió el uso de un reactivo depresor. En relación a los esquemas de tratamiento aplicados en este estudio, el esquema 2 permitió alcanzar los mejores resultados, obteniéndose un concentrado final de 70,18 % de Fe, 1,02 % de SiO<sub>2</sub>, con una recuperación de hierro de 83,87 % y una remoción de SiO<sub>2</sub> de 87,79 %.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a la Compañía Minera del Pacífico - CMP por el financiamiento y el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

#### **5. REFERENCIAS**

Richard, P. Mejoramiento de la calidad del concentrado magnético mediante flotación inversa de hierro. Trabajo de Titulación de Ingeniero, Universidad de Atacama, 2000.

Rojas, I. Obtención de pellet feed mediante flotación neumática de un mineral de hierro de baja ley proveniente de concentración magnética en Cía. Minera del Pacífico mina El Romeral. Trabajo de Titulación de Ingeniero, Universidad de Atacama, 2002.

Sánchez, S., Sánchez, S., Rojas, F. y Contreras, A. Flotación neumática, una alternativa tecnológica a la flotación convencional. *Minerales*, 60:261, p. 29-38, 2005.