

# **RECUPERACIÓN DE HIERRO DE RELAVES DE LA CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA DE PLANTA HUASCO, CHILE**

L. Valderrama<sup>1</sup>, M. Santander<sup>1</sup>, D. Díaz<sup>2</sup>, M. Meléndez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama. Av. Copayapu 485 Copiapó, Chile  
[luis.valderrama@uda.cl](mailto:luis.valderrama@uda.cl)

<sup>2</sup>Francisco Coloane 777, Villa El Manantial, Vallenar, Región de Atacama - Chile.

<sup>3</sup>Compañía Acero del Pacifico, Planta de Pellets Huasco, Brasil 1050, Región de Atacama - Chile

## **RESUMEN**

Se estudia recuperar el hierro que se pierde en los relaves de la concentración magnética de la Planta de Pellet Huasco. El estudio se inició analizando las leyes y las toneladas procesadas, datos a partir de los cuales se realiza una estimación de las utilidades a obtener del concentrado producido desde el tratamiento de estos relaves. La muestra para las pruebas fue tomada en la tubería de descarga del bajo flujo del espesador de colas, a esta muestra se le realizaron concentraciones magnéticas en equipos de baja y alta intensidad a nivel de laboratorio. Luego del estudio individual de cada equipo, se proponen esquemas de tratamiento pasando el material en el concentrador L-8 y realizando un repaso de las colas aquí obtenidas en los diferentes equipos de alta intensidad. Los resultados muestran que realizando varios repasos en baja intensidad se puede obtener concentrado de calidad en hierro (64,1% Fe) aunque con recuperaciones en peso y metalúrgica bajas (3,8% Rp y 23,6% RM), existiendo la posibilidad de aumentar estas leyes realizando flotación inversa del concentrado magnético. De esta forma se puede concluir que el proceso de concentración magnética al hierro contenido en los relaves es posible de ser aplicado a pesar de las bajas recuperaciones metalúrgicas obtenidas.

**PALABRAS CLAVES:** Relave, hierro, recuperación, concentración magnética.

## 1. INTRODUCCIÓN

La separación magnética ha sido usada por casi 200 años en la concentración de menas de hierro, utilizando para ello una amplia variedad de equipos. Desde comienzos de este siglo ha existido una constante expansión tanto en los equipos disponibles como en el rango de minerales en los que es aplicable la separación magnética. La remoción de pequeñas cantidades de minerales de hierro de la industria minera se ha transformado en un importante campo de aplicación, tal como en la concentración de minerales ferrosos y no ferrosos, Kelly and Spottiswood (1982), Svoboda, (1987).

El desarrollo de los separadores de alta intensidad magnética en húmedo ha permitido su utilización en minerales paramagnéticos. En las minas Wabush (Canadá) se instaló un separador magnético para recuperar hematita fina desde las colas. El mineral corresponde a hematita especular promediando 36% Fe. Se encontró que la separación magnética era satisfactoria para el tratamiento de las colas por lo que se instalaron dos máquinas de alta intensidad para limpieza secundaria de alrededor de 52,8 kgs<sup>-1</sup> de colas del espiral, y al mismo tiempo entregar una limpieza secundaria a algo de 13,9 kgs<sup>-1</sup> de concentrado primario. El separador fue operado a 0,95 Tesla, según Beech-Jones et al., (1979).

Un separador magnético de alto gradiente fue usado en las minas de Strassa (Suecia) para recuperar hierro oxidado desde las colas de la planta. Las colas son espesadas y el bajo flujo del espesador, con un contenido de hierro sobre 10%, es procesado en un separador magnético de alta intensidad (Ande'n, et. al., 1982). La máxima inducción magnética empleada fue 0,55 Tesla. Se produce un concentrado que contiene 50% Fe y 42% de recuperación la cual puede ser incluida en la alimentación a la planta de pelletización existente.

Planta de Pellets ubicada en la Región de Atacama, tiene una capacidad de producción de 4.000.000.000 kg anuales, de las cuales un 25% es pellets para reducción directa y el 75% pellets básicos para altos hornos. Fue instalada una planta de flotación inversa de hierro para eliminar impurezas. Dentro de su proceso de formación de pellet de hierro, cuenta con etapas de concentración magnética vía húmeda, en las que el concentrado obtenido se envía a las etapas de pelletización y tratamiento térmico para la obtención del pellet final, y las colas se envían al espesador de relaves, eliminando al mar el sólido a través del emisario submarino. Estas colas finales, son enviadas a un emisario submarino con un porcentaje de sólidos que fluctúa entre 40 y 60% (Morel, 2002).

El objetivo del presente trabajo es estudiar la concentración magnéticamente para recuperar el hierro que se pierde en los relaves del proceso de concentración magnética de Planta de Pellet, para lo cual fueron realizadas pruebas que permiten concluir que es posible recuperar magnéticamente este hierro (Díaz, 2003).

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1. Toma de Muestra y Caracterización

La muestra fue tomada en la descarga del espesador de cola, luego fue decantada y se extrajo el agua, secándola a una temperatura de 70°C. La muestra secada fue disgregada y roleada para homogenización, y preparada para análisis químico, mineralógico, granulométrico y para la realización de las pruebas.

### 2.2. Pruebas de Concentración Magnética

Fueron realizadas pruebas de concentración magnética en una batería de 0,4 Tesla, para conocer el porcentaje de material que es posible recuperar mediante concentración magnética. La metodología consistió en hacer pruebas de concentración a diferentes tiempos, para lo cual se puso en una fuente de vidrio 2,5 x 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> de pulpa, la que se mantenía en constante agitación introduciendo en ella la batería durante el tiempo de la prueba, retirándola, limpiándola e introduciéndola nuevamente, esto se repetía 10 veces en cada tiempo. Los tiempos en que se realizaron las medidas fueron 10, 15, 20, 25 y 30 segundos.

También fueron realizadas pruebas de concentración magnética en un tambor de alta intensidad de campo magnético de 0,6 Tesla. Las variables usadas fueron rpm, 30 y 50, y flujo entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $1,7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . La metodología de trabajo fue realizar pruebas de concentración magnética simulando una etapa rougher (contra-rotación). El porcentaje de sólidos fue mantenido constante en 40% para todas las pruebas y la pulpa fue alimentada desde un agitador. Se hizo solo una pasada en cada prueba, con el objetivo de obtener valores de leyes y recuperaciones.

Además se realizaron pruebas en un separador electromagnético de laboratorio, modelo L-8, esta unidad consiste en un electroimán estacionario montado en un eje con carcasa externa de acero inoxidable que encierra completamente el elemento magnético. Tiene una capacidad de  $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  pudiendo ser usado en operaciones concurrentes y contra-rotación.

Se realizaron pruebas de concentración magnética a 0,1 Tesla, para limpieza de los materiales magnéticos, simulando etapas de concentración rougher (contra-rotación) y finisher (concurrente), con dos pasadas cada una. Estas pruebas se realizaron primero con colas sin deslamado, y también con una etapa previa de deslamado, el que fue alimentado con 16% de sólidos, y que se denominaron con deslamado, teniendo en cuenta que para ambas se utilizaron las mismas condiciones.

A los concentrados magnéticos obtenidos se le aplicó flotación inversa con y sin deslamado, para conocer la calidad de concentrado que se puede obtener. También se realizaron cinéticas con el concentrado de las pruebas sin deslamado y luego se realizó la flotación de ambos concentrados. Los reactivos y las dosificaciones utilizados en la flotación fueron determinados por Rojas (2002). De acuerdo con los resultados obtenidos de la cinética, se procedió a realizar las flotaciones de los concentrados con las muestras con y sin deslamado, en un tiempo de 600 min.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Selección y Caracterización de la Muestra

Las leyes determinadas para la muestra de colas se muestran en la Tabla I

Tabla I. Análisis químico de la muestra de colas en porcentaje

Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P
8,82	40,5	8,31	9,83	15,60	1,22	1,09	0,696

En la Tabla II se observa que un 82,6% de material se encuentra bajo la malla 400 Ty.

Tabla II. Distribución granulométrica en muestras finales tomadas

Malla (Tyler)	% Parcial	% Pasante Acumulado
150	1,1	98,9
200	3,0	95,8
270	5,9	90,0
325	4,2	85,7
400	3,1	82,6
-400	82,6	0,0

Los resultados de análisis microscópico mostró que la especie metálica predominante es la magnetita, que se encuentra liberada, el otro mineral de hierro presente es la hematita encontrándose en menor cantidad, como también limonita y pirita, libres y también asociadas e incluidas en los no metálicos. Al considerar todas las especies presentes las variedades no metálicas son las que

predominan, principalmente la actinolita, cuarzo, biotita y carbonato, encontrándose principalmente libres y puras.

### 3.2. Concentración Magnética

La Tabla III muestra los resultados obtenidos con intensidades de 0,4 Tesla. Se observa que la recuperación en peso y metalúrgica son de  $\pm 13$  y 40% respectivamente, con leyes de Fe de  $\pm 27\%$ , y las colas salen con  $\pm 6\%$  de Fe. De las pruebas en tubo Davis (DTT) realizados a los concentrados (Tabla IV) la recuperación en peso es  $\pm 34\%$  con leyes de  $\pm 65\%$  Fe lo que entrega un hierro magnético de  $\pm 22\%$ , correspondiendo éste a lo que se puede recuperar por concentración magnética. La cantidad de hierro que se observa en las colas, al no ser magnético correspondería principalmente a hierro hematítico

Tabla III. Resultados de pruebas con batería de 0,4 Tesla

Tiempo (s)	Concentrado		Cola		Rp	R <sub>M</sub>
	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe(%)	Fe(%)
10	28,26	28,45	6,17	42,14	12,0	38,5
15	27,86	28,75	6,13	42,16	12,4	39,1
20	27,77	28,72	5,98	42,27	13,0	41,1
25	27,32	29,45	5,92	42,23	13,5	42,0
30	26,71	28,88	5,90	42,39	14,0	42,6

Tabla IV. Resultados de pruebas en tubo Davis (DTT)

Tiempo (s)	Concentrado						Rp	Fe
	C-DTT			T-DTT			DTT	mag
	kg	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	kg	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	%	%
10	7,2x10 <sup>-3</sup>	64,96	5,14	12,8x10 <sup>-3</sup>	7,80	41,45	35,8	23,26
15	7,1x10 <sup>-3</sup>	64,32	5,34	12,9x10 <sup>-3</sup>	7,62	41,75	35,7	22,96
20	6,8x10 <sup>-3</sup>	65,63	4,32	13,2x10 <sup>-3</sup>	8,40	41,21	33,9	22,21
25	6,6x10 <sup>-3</sup>	65,66	5,03	13,4x10 <sup>-3</sup>	8,35	41,53	33,1	21,73
30	6,5x10 <sup>-3</sup>	65,27	4,49	13,5x10 <sup>-3</sup>	8,32	40,52	32,3	21,08

Tabla V. Resultados pruebas rougher realizadas en tambor de alta intensidad

Prueba	rpm	m <sup>3</sup> s	Concentrado				Alimentación		Cola	
			Fe	SiO <sub>2</sub>	Rp	R <sub>M</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>
			%	%	%	%	%	%	%	%
1	40	1,3x10 <sup>-4</sup>	37,08	24,60	8,8	36,4	8,98	37,46	6,27	38,70
2	50	1,7x10 <sup>-4</sup>	32,48	25,70	10,0	37,0	9,02	38,93	6,41	40,40
3	50	1,0x10 <sup>-4</sup>	30,97	26,40	10,4	36,3	8,96	38,86	6,41	40,30
4	30	1,7x10 <sup>-4</sup>	38,49	22,30	8,6	37,2	9,16	38,12	6,41	39,60
5	40	1,3x10 <sup>-4</sup>	44,35	17,90	6,8	34,5	8,98	38,22	6,41	39,70
6	40	1,3x10 <sup>-4</sup>	41,08	20,30	7,6	34,9	8,76	36,94	6,12	38,30
7	30	1,0x10 <sup>-4</sup>	28,42	28,10	12,7	41,9	9,08	39,27	6,26	40,90

	DTT a los concentrados	Rp	Fe	R <sub>M</sub>
--	------------------------	----	----	----------------

Prueba	C-DTT			T-DTT		DTT	mag	mag
	kg	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	kg	% Fe	%	%	%
1	10,4 x10 <sup>-3</sup>	63,45	6,06	9,6 x10 <sup>-3</sup>	8,45	52,1	33,03	89,1
2	8,8 x10 <sup>-3</sup>	63,62	6,10	11,2 x10 <sup>-3</sup>	7,86	44,2	28,09	86,5
3	8,2 x10 <sup>-3</sup>	64,03	6,04	11,8 x10 <sup>-3</sup>	7,85	41,2	26,35	85,1
4	10,8 x10 <sup>-3</sup>	63,67	6,15	9,2 x10 <sup>-3</sup>	8,75	54,2	34,48	89,6
5	12,7 x10 <sup>-3</sup>	64,74	5,15	7,3 x10 <sup>-3</sup>	9,19	63,3	40,98	92,4
6	11,7 x10 <sup>-3</sup>	64,11	6,04	8,3 x10 <sup>-3</sup>	8,75	58,4	37,44	91,1
7	7,4 x10 <sup>-3</sup>	63,82	5,70	12,7 x10 <sup>-3</sup>	7,85	36,8	23,45	82,5

Tabla VI. Resultados pruebas rougher realizadas en tambor de alta intensidad

Prueba	rpm	m <sup>3</sup> s	Concentrado				Alimentación		Cola	
			Fe	SiO <sub>2</sub>	Rp	R <sub>M</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>	Fe	SiO <sub>2</sub>
			%	%	%	%	%	%	%	%
8	50	1,3 x 10 <sup>-4</sup>	25,56	29,50	12,3	34,7	8,89	38,80	6,56	40,10
9	30	3,3 x 10 <sup>-5</sup>	40,08	20,60	8,3	37,0	8,84	36,92	6,01	38,40
10	30	6,7 x 10 <sup>-5</sup>	40,76	20,60	8,3	37,0	8,89	38,76	6,01	40,40
11	50	3,3 x 10 <sup>-5</sup>	29,07	27,80	14,2	45,6	9,35	38,69	6,08	40,50
12	50	6,7 x 10 <sup>-5</sup>	34,84	24,00	9,6	36,4	8,92	37,92	6,16	39,40

Prueba	DTT a los concentrados					Rp	Fe	R <sub>M</sub>
	Kg	C-DTT	% SiO <sub>2</sub>	T-DTT	DTT	mag	mag	
		% Fe		% Fe	%	%	%	
8	6,4 x10 <sup>-3</sup>	63,74	6,00	13,6 x10 <sup>-3</sup>	7,55	32,1	20,43	79,9
9	10,9 x10 <sup>-3</sup>	65,02	6,06	9,1 x10 <sup>-3</sup>	9,96	54,7	35,57	88,7
10	11,2 x10 <sup>-3</sup>	65,05	5,72	8,8 x10 <sup>-3</sup>	9,59	56,2	36,56	89,7
11	7,4 x 10 <sup>-3</sup>	64,96	5,30	12,6 x10 <sup>-3</sup>	8,17	36,8	23,91	82,2
12	9,3 x10 <sup>-3</sup>	65,40	6,11	10,8 x10 <sup>-3</sup>	8,54	46,3	30,25	86,8

Los resultados obtenidos en las pruebas usando una intensidad de 0,6 Tesla se muestran en la Tabla V. Se observa que los mejores resultados para obtener una recuperación metalúrgica máxima es trabajar con una velocidad de giro del tambor de 30 rpm y un flujo de alimentación de  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Las Tablas V y VI, muestran que en las colas aun se encuentra hierro, si se analizan los datos de los DTT, no correspondería a hierro magnético, o sea, lo que se está perdiendo a la intensidad de campo utilizada es la hematita.

Los resultados de las pruebas de la flotación realizadas, para determinar el tiempo óptimo, son mostrados en las en las Figuras 1 y 2.

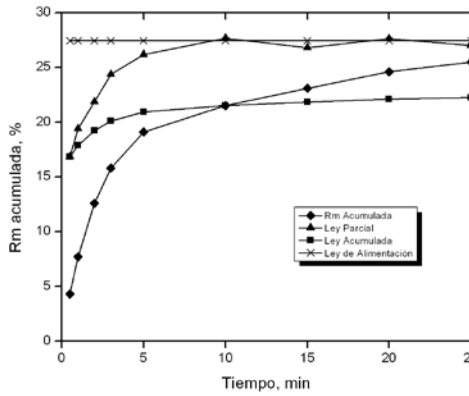


Figura 1. Cinética de flotación (espuma)

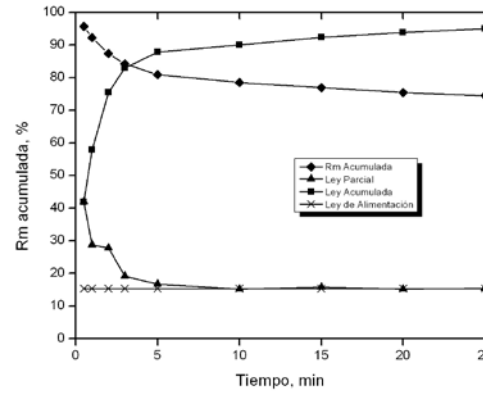


Figura 2. Cinética de flotación (Celda)

Luego de determinado el tiempo óptimo desde la cinética, se procede a realizar las flotaciones de los concentrados de las pruebas sin y con deslamado, en un tiempo de 600 segundo, cuyos resultados se muestran en las Tablas VII y VIII.

Tabla VII. Resultados de pruebas de flotación de muestra sin deslamado

	Peso (kg)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Rp (%)	R <sub>M</sub> (%)
Concentrado	0,201	54,1	12,7	36,6	30,9
Relave	0,347	69,8	2,1	63,4	69,1
C2F	0,548	64,1	6,0	100,0	100,0

Tabla VIII. Resultados de pruebas de flotación de muestra con deslamado

	Peso (kg)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Rp (%)	R <sub>M</sub> (%)
Concentrado	0,167	50,5	14,9	30,5	24,5
Relave	0,381	68,4	2,8	69,5	75,5
C2F	0,548	62,9	6,5	100,0	100,0

Los resultados completos de las pruebas con y sin deslamado, incluyendo concentración magnética de baja y alta intensidad y flotación inversa del concentrado magnético, se muestran en las Figuras 3 y 4 respectivamente.

En ambos casos es posible, realizando etapas de limpieza en baja intensidad (0,1 Tesla), la obtención de calidad en el concentrado magnético, teniendo como desventaja que la recuperación en peso (Rp) y recuperación metalúrgicas (R<sub>M</sub>), obtenidos son demasiado bajos, Rp 3,8% y 2,9%; y R<sub>M</sub> 25,9% y 19,5% en las pruebas sin y con deslamado respectivamente.

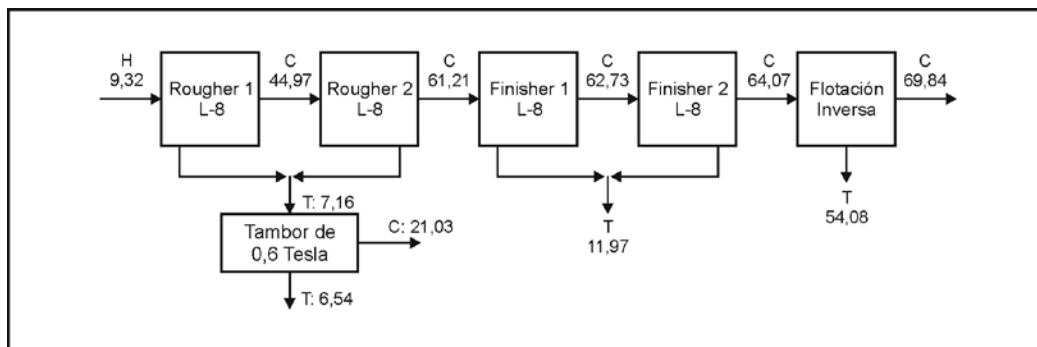


Figura 3. Resultados de las concentraciones magnéticas sin deslamado

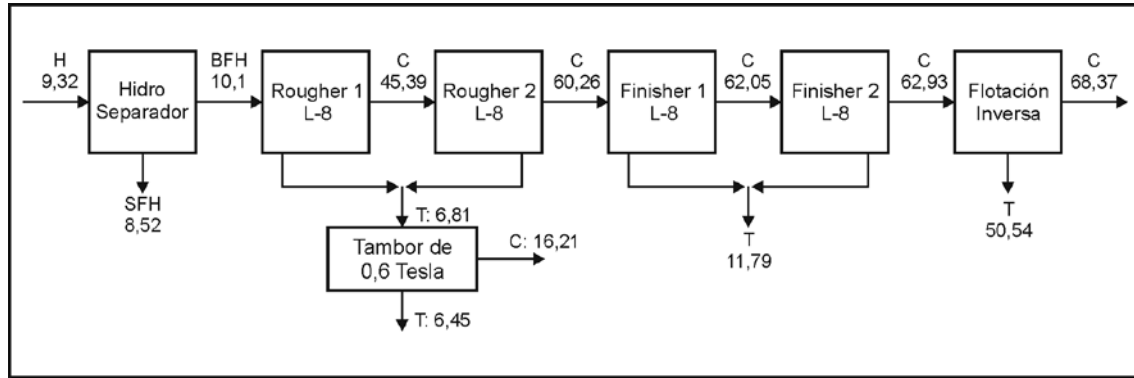


Figura 4. Resultados de las concentraciones magnéticas con deslamado

Si se realiza una comparación de las leyes obtenidas en la primera pasada rougher en el L-8 con las leyes que se obtienen en el tambor de alta intensidad, se ve que en baja intensidad la ley de hierro aumenta y la de sílice disminuye en mayor porcentaje que en el tambor de alta intensidad, si bien en éste las recuperaciones son más altas, la calidad del concentrado es menor, ya que al ser mayor la intensidad de campo, existe un mayor atrapamiento de partículas con ganga (sílice) que ensucian el concentrado obtenido.

Al repasar las colas de la concentración realizada a 0,1 Tesla por el tambor de alta intensidad, se observa que se logra concentrar parte del hierro que no se concentró en baja intensidad, las colas de esta etapa aún contienen hierro, lo que nuevamente muestra que a 0,1 Tesla no es posible concentrar la hematita, que es lo que principalmente contienen estas colas, para ello se necesita mayor intensidad de campo.

De la flotación inversa realizada al concentrado magnético en ambas pruebas, se obtienen mejores resultados de  $R_M$  tanto parcial como global en las pruebas con deslamado. En ésta la  $R_M$  parcial es de un 75,5% bajando la  $R_M$  global en 4,8%, en cambio en la prueba sin deslamado la  $R_M$  parcial es de 69,1% bajando la  $R_M$  global en 8,0%, efecto que se debe a la eliminación de partículas finas en el hidroseparador.

#### 4. CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos en las pruebas se concluye que:

La muestra de relave tiene una ley de hierro de 8,82%, la granulometría se encuentra 82,6 bajo la malla 400.

El hierro que no es recuperado corresponde principalmente a hierro hematítico, lo que se demuestra con los DTT realizados, y con la microscopía realizada a la cola del tambor.

Las pruebas en que se realizaron varios repastos al concentrado a baja intensidad se tienen que en las pruebas con deslamado al pasar el material por el hidroseparador éste aumenta en casi 1% la ley de hierro (de 9,32% a 10,1% Fe) y baja en 0,5% la de  $\text{SiO}_2$  (de 38,81% a 38,33%  $\text{SiO}_2$ ).

En las flotaciones inversas realizadas a ambos concentrados, se obtienen mejores resultados en las pruebas con deslamado, gracias a la eliminación de partículas finas en el hidroseparador. Además si se comparan los resultados de la prueba sin deslamado, se tiene que en ambas, con dos pasadas rougher (contra-rotación) se logra aumentar la ley, en la primera de 9,32% a 61,21% Fe y 26,2%  $R_M$ . Además si se realizan dos pasadas más como etapa finisher (concurrente) en las que la ley de concentrado mejora hasta 64,07% Fe bajando y la  $R_M$  a 25,9%, pudiendo aumentarse esta ley a 69,84% Fe con 2,11%  $\text{SiO}_2$ , y 17,9%  $R_M$  mediante flotación inversa.

En todas las pruebas realizadas se ve que es posible concentrar magnéticamente el hierro contenido en los relaves del proceso, obteniendo buena calidad, aunque con recuperación en peso y metalúrgicas bajas, menores a las consideradas dentro del análisis de datos.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ande'n, B., Lindgren, E., Moore, D., Nolan, J., Beneficiation of a Swedish Iron Ore Tailings With a SALA-HGMS, Min. Eng. 34, p. 694, 1982.

Beech-Jones, M., Eby, T., Muloin, W.H., The Development and Operation of a High-Intensity Wet Magnetic Separator Circuit for Hematite Recovery at Wabush Mines, CIM Bull., p. 109, 1979.

Díaz, D. Proyecto de Recuperación de Hierro desde Relaves de las Etapas de Concentración Magnética en Planta de Pellet. Trabajo de Titulación. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, 2003.

Kelly, E., Spottiswood, D., Introduction to Mineral Processing, A Wiley-Interscience Publication, p. 274 a 290, 1982.

Morel, C., Evaluación Técnica de la Flotación Catiónica Inversa de Fierro en Celda Neumática, Trabajo de Titulación. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, 2002.

Rojas, I., Obtención de Pellet Feed Mediante Flotación Neumática de un Mineral de Fierro de Baja Ley Proveniente de Concentración Magnética en CMP - Minas El Romeral, Trabajo de Titulación. Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, 2002.

Svoboda, J., Magnetic Methods for the Treatment of Minerals, Elsevier Science Publisher B.V., 1987.