

Producción de Concentrados de Hierro de Alta Ley, Haciendo Uso de Columnas de Flotación

Ing. Gonzalo O. Dávila Poblete

Canadian Process Technologies Inc.
Unit 1- 7168 Honeyman St.
Delta, B.C.
CANADA V4G 1G1
gonzalod@cpti.bc.ca

Resumen

Para muchos productores de minerales de hierro en el mundo, la venta de “pellets” en el altamente competitivo mercado internacional, como también la habilidad de producir un producto de alta calidad a un bajo costo, es de la mayor importancia. La alta y creciente demanda de “pellets” apropiados para reducción directa de éstos, ha dado espacio al incremento masivo de numerosas plantas de concentración de hierro haciendo uso de flotación inversa, con el fin de reducir al máximo los contenidos de sílice en los concentrados finales. La tecnología de flotación en celdas columna es la preferida para lograr éste objetivo debido a los bajos costos de capital y de operación, como también la alta eficiencia metalúrgica cuando se comparan éstas a la flotación mecánica convencional. Canadian Process Technologies Inc. CPT ha desarrollado un proceso de flotación para la producción de concentrados con las especificaciones de contenidos apropiados de los “pellets” de hierro para la Reducción Directa como también para los Altos Hornos, haciendo uso de la Tecnología de Celdas Columnas de Flotación Inversa. Este proceso ha sido adoptado por las principales productoras de concentrados de hierro en el mundo, y aproximadamente en este momento, la producción agregada es de 150 TMPA de concentrados para Reducción Directa haciendo uso de columnas de flotación diseñadas y puestas en marcha por CPT.

Este trabajo describe los beneficios de la flotación en columnas, y analiza algunos de los puntos más importantes con respecto al diseño del circuito para el tratamiento de minerales de hierro.

Palabras Clave: Celdas columna de flotación, minerales de hierro, columnas de experimentación, pellets, sílice, flotación de espumas.

Abstracts

For many producers of iron minerals in the world, it is more important to sell pellets in a highly competitive international market, and also the ability of producing a high-quality product to a low cost. The high and growing demand of pellets that are suitable for direct reduction, has given space to the increment of many ore dressing inverse flotation plants in order to reduce as much as possible the silica content in the final concentrates.

The technology of flotation in columns is preferred to reach this objective due to low capital and operational costs as well as the high metallurgical efficiency when it is compared with the conventional flotation process. The Canadian Process Technology Inc. CPT, has developed an inverse flotation process in column cells, for the concentrates production with the specifications of the contents for iron pellets which are suitable for direct reduction or for the blast furnace production. This process has been adopted for most of the iron concentrate producers in the world and actually the iron concentrates production for the direct reduction using column flotation designed and carried out by CPT is about 150 MTPY.

This work describes the advantages of the flotation in columns and analyses some of the most important facts involved in the design of the circuit for the treatment of iron minerals.

Key works: Flotation columns, iron ores, pellets, silica, foam flotation.

Resumo

Para muitos produtores de minerais de ferro no mundo, a venda de “pellets” no altamente competitivo mercado internacional, como também a habilidade de produzir um produto de alta qualidade a baixo custo, é da maior importância. A alta e crescente demanda de “pellets” apropriadas para redução direta tem aberto espaço ao incremento massivo de numerosas plantas de concentração de ferro empregando flotação inversa, a fim de reduzir ao máximo os conteúdos de sílice nos concentrados finais. A tecnologia de flotação em células coluna é a preferida para atingir esse objetivo devido aos baixos custos de capital e de operação, como também à alta eficiência metalúrgica quando se a compara à flotação mecânica convencional. Canadian Process Technologies Inc., CPT, tem desenvolvido um processo de flotação para a produção de concentrados com especificações de conteúdo apropriados dos “pellets” de ferro para Redução Direta, como também para os Altos Fornos, utilizando Tecnologia de Células Colunas de Flotação Inversa. Este proceso tem sido adotado pelas principais produtoras de concentrados de ferro no mundo e neste momento a produção agregada é de cerca de 150 TMPA de concentrados para Redução Direta utilizando columnas de flotação projetadas e executadas por CPT.

Este trabalho descreve os benefícios da flotação em columnas e analisa alguns dos pontos mais importantes relativos ao projeto do circuito para o tratamento de minerais de ferro.

Palavras-chave células columnas de flotação, minerais de ferro, columnas de experimentação, pellets, sílice, flotação de espumas.

Introducción

El agotamiento de reservas importantes de minerales de hierro de alta ley junto con el aumento en demanda del mercado para mejorar la calidad de los concentrados de hierro, ha obligado a los productores de minerales de hierro a examinar sus procesos y flujogramas de operación y de este modo evaluar procesos alternativos y medios suplementarios de proceso.

Los requerimientos de una mejor calidad de pellets, demanda que los contenidos de sílice bajen de 2,0% SiO₂ a contenidos de sílice en el orden de 0,8% SiO₂.

La aplicación flotação inversa, lo cual significa que la sílice es flotada de los concentrados de hierro, ha probado ser un método económico y eficiente para reducir los contenidos de sílice en los concentrados de hierro a niveles muy bajos. Pruebas a escala laboratorio como también a escala industrial, han demostrado significantes mejoras metalúrgicas y ventajas económicas cuando se usan celdas columnas de flotación para esta aplicación.

El excelente rendimiento metalúrgico [1, 2, 3], como también los bajos costos de capital y de operación [3], han permitido que la tecnología de flotación en columnas sea norma en las nuevas y modernas plantas industriales de concentración de minerales.

Para la aplicación de minerales de hierro, la opción de poder lavar las espumas ha permitido un medio de como obtener concentrados de hierro con bajos contenidos de sílice con una bajísima pérdida de hierro en el proceso. Recientes costos comparativos [4], han demostrado que el costo de instalar celdas columna en los circuitos de flotación, es típicamente 20% - 30% más económico que instalar un circuito equivalente haciendo uso de celdas convencionales de flotación mecánica, y existen casos donde esta diferencia puede llegar hasta diferencias de 50%, dependiendo en el tipo de circuito y ubicación de las plantas de concentración.

La industria brasileña de tratamiento de minerales de hierro,

actualmente lidera la tecnología y producción de pellets en el mundo al adoptar a inicios de los años 90 la tecnología de flotación en columnas, con el objeto de reducir los contenidos de sílice en los pellets de hierro [5]. Las más importantes compañías han instalado, o están en el proceso de instalar, columnas de flotación en sus diversos flujogramas de operación. La compañía Samarco Mineração S.A., fue la primera en hacer uso de columnas de flotación en una de sus plantas de concentración en el circuito de limpieza de hierro para incrementar la capacidad de la planta y como parte de un programa de expansión el año 1990 [4]. Desde ese entonces ellos al igual que otras compañías, han instalado columnas de flotación adicionales o nuevas para la recuperación de hierro fino en tamaño, proveniente de los circuitos de deslame. La tabla 1, muestra a los principales productores de hierro en el mundo que hacen uso de columnas de flotación.

La aplicación de columnas de flotación en la eficiente eliminación de sílice de los concentrados de hierro es intensamente investigado en países como Brasil, Canadá, Estados Unidos, Venezuela, Rusia e India.

El propósito de este trabajo, es describir algunos de los beneficios de la flotación en columna, como también analizar algunos de los aspectos importantes en el diseño de los circuitos de flotación.

Beneficios de la Tecnología de Flotación en Columnas

La flotación en columnas ha sido ampliamente aceptada en la industria de concentración de minerales en general e instaladas en sus diversos flujos de proceso [6].

Los mayores beneficios de la flotación en columnas pueden ser sintetizados en los siguientes puntos:

- Mejora en la eficiencia metalúrgica del proceso.
- Bajos costos de capital.

TABLA 1. Lista de las principales compañías que hacen uso de Columnas de Flotación en la industria del hierro

PAIS	AÑO	CLIENTE	SERVICIO	DUTY	QTY	DIA(M)	HT(M)
Brasil	1991	SAMARCO	Remoción de sílice	CLEANER	4	3,67	13
Brasil	1991	SAMARCO	Remoción de sílice	SCAVENGER	1	2,44	11
USA	1992	USS MINNTAC	Remoción de sílice	SCAVENGER	1	1,52	13
Brasil	1993	CSN (Casa do Pedra)	Remoción de sílice	CLEANER	1	4	10
Brasil	1993	CSN (Casa do Pedra)	Remoción de sílice	ROUGHER	3	4	10
India	1993	KUDREMUKH IRON ORE	Remoción de sílice	CLEANER	1	4	12
Brasil	1994	CVRD CONCEICAO	Remoción de sílice	CLEANER	3	3 X 5	14
Brasil	1994	CVRD TIMBOPEBA	Remoción de sílice	ROUGHER	2	4	15
Brasil	1994	CVRD TIMBOPEBA	Remoción de sílice	CLEANER	1	4	15
Brasil	1994	MBR(Pico)	Remoción de sílice	ROUGHER	1	3,67	14
Brasil	1994	MBR(Pico)	Remoción de sílice	CLEANER	1	3,67	14
Brasil	1994	SAMITRI	Remoción de sílice	ROUGHER	1	2,44	12
Brasil	1994	CVRD CONCEICAO	Remoción de sílice	ROUGHER	6	3 X 5	14
Brasil	1994	SAMITRI	Remoción de sílice	CLEANER	1	2,44	12
México	1994	MINERA DEL NORTE	Remoción de fósforo	CLEANER	2	3,67	12
Brasil	1995	SAMARCO	Remoción de sílice	CLEANER	1	3 x 2	12
Brasil	1995	SAMARCO	Remoción de sílice	ROUGHER	1	3 X 4	12
India	1995	KUDREMUHK IRON ORE	Remoción de sílice	ROUGHER	1	4	12
Brasil	1996	MBR(Pico)	Remoción de sílice	ROUGHER	1	3,67	14
India	1996	KUDREMUHK IRON ORE	Remoción de sílice	CLEANER	6	4	12
Brasil	1997	SAMARCO	Remoción de sílice	SCAVENGER	2	5 X 3	13.6
Brasil	1997	SAMARCO	Remoción de sílice	CLEANER	3	6 X 3	13.6
Brasil	1999	MBR(Pico)	Remoción de sílice	SCAVENGER	1	4	10
Brasil	1999	MBR(VARGEM GRANDE)	Remoción de sílice	SCAVENGER	1	3.67	10
Brasil	1999	MBR(VARGEM GRANDE)	Remoción de sílice	ROUGHER	1	3,67	14
Brasil	1999	MBR(VARGEM GRANDE)	Remoción de sílice	CLEANER	1	3,67	14
Brasil	2004	MBR(Pico)	Remoción de sílice	SCAVENGER	2	3,66	9
Brasil	2004	MBR(Pico)	Remoción de sílice	ROUGHER	3	4,27	12
Brasil	2004	MBR(Pico)	Remoción de sílice	CLEANER	3	4,27	12
Rusia	2004	MIKHAILOVSKY GOK	Remoción de sílice	CLEANER	2	4,27	12
Rusia	2004	MIKHAILOVSKY GOK	Remoción de sílice	SCAVENGER	2	4,27	8
Rusia	2004	MIKHAILOVSKY GOK	Remoción de sílice	ROUGHER	4	4,27	12
Brasil	2005	CSN (Casa do Pedra)	Remoción de sílice	CLEANER	1	4	10
Brasil	2005	CSN (Casa do Pedra)	Remoción de sílice	ROUGHER	1	4	10
Brasil	2006	SAMARCO	Remoción de sílice	ROUGHER	2	4,5	14
Brasil	2006	SAMARCO	Remoción de sílice	CLEANER	2	4,5	14

- Bajos costos de operación.
- Bajos costos de mantención (no existen partes móviles dentro de la columna).
- Un mejor control operativo y de estabilidad del proceso debido a la fácil adaptabilidad de las columnas a los controladores automáticos existentes hoy en el mercado.

Un ejemplo de los beneficios metalúrgicos al hacer uso de columnas de flotación puede ser observado en la tabla 2.

TABLA 2. Resultados de pruebas a escala piloto para la producción de concentrados de hierro a ser usados en Reducción Directa.

	Celdas mecánicas	Celdas columna
Ley de Alimentación (% Fe)	56,87	55,40
Ley de Alimentación (% SiO ₂)	15,07	18,30
Ley de Concentrado (% Fe)	67,84	66,95
Ley de Concentrado (% SiO ₂)	0,76	0,82
Recuperación en masa (%)	66	71
Recuperación en hierro (% Fe)	79,5	87,5

Esta tabla compara resultados a escala piloto haciendo uso de celdas mecánicas y celdas columnas de flotación, para la producción de concentrados de hierro para uso en reducción directa.

En un reciente estudio comparando los costos de capital para la instalación de una planta industrial para tratar 620 tph de minerales finos de hierro, el siguiente equipo fue diseñado considerando un Circuito de Flotación Mecánica y otro de Flotación en Columnas.

CIRCUITO DE FLOTACIÓN MECÁNICA

Configuración del circuito: Un Circuito Rougher con dos etapas de scavengers

Número de Celdas Wemco 500 ft ³		
	Altos Hornos	Reducción Directa
Rougher	16	16
Scavenger 1	10	16
Scavenger 2	9	12
Total	35	44

CIRCUITO DE FLOTACIÓN EN COLUMNAS

Configuración del Circuito: Un Circuito Rougher y Una Etapa de Limpieza

Número de Celdas Columna (4 m diámetro x 10 m altura)		
	BF	DR
Rougher	3	3
Limpieza	0	1
Total	3	4

Basados en estos requisitos de flotación, fueron determinados los costos de capital para el equipo (incluyendo necesidades eléctricas), estructuras metálicas y de concreto. Estos costos han sido resumidos en la tabla 3. Se debe resaltar que estos costos se refieren solamente a los circuitos de flotación y no toma en cuenta los costos en los circuitos de acondicionamiento y bombeo, los cuales son comunes para ambos sistemas.

TABLA 3. Requerimientos de Inversión: Celdas Mecánicas y Celdas Columna

Descripción		Celdas Mecánicas		Celdas de Columna	
		Cantidad	Costo (\$US)	Cantidad.	Costo (\$US)
Equipos	Celdas de Flotación	44	1.760.000	4	380.000
	Compresor	-	-	3	240.000
Estructura Metálica (Fabricación y Montaje)		200 t	500.000	65 t	162.000
Obras Civiles	Concreto	416 m ³	232.000	240 m ³	133.000
	Cimentación	144 t		83 t	
Total			2.492.000		915.000

Existe una variedad de características en las celdas columnas de flotación, los cuales permiten una más alta eficiencia en el proceso de separación de minerales. Algunas de estas características son las siguientes:

- Geometría de las Celdas de Flotación en Columna,
- Sistema de lavado de espumas y
- Un eficiente control del sistema de inyección de aire.

Geometría de las Celdas de Flotación en Columna

La geometría de las celdas de columna ofrece algunas ventajas sobre las celdas convencionales mecánicas de flotación. Las celdas columna tienen un área de superficie considerablemente menor por unidad de volumen de capacidad que las celdas convencionales, lo cual promueve a tener a una más eficiente aglomeración de espumas en la

celda. Esto hace que la densidad de las espumas sea mayor, lo cual en conjunción con la estabilidad de la adición de agua de lavado, permite la estabilidad y permanencia de una camada de espuma entre 1.0 – 2.0 m. El poder obtener una camada de espuma profunda y estable, permite un drenaje más eficiente de la misma y también permite al operador una mayor flexibilidad en el control operativo de la columna lo cual se refleja en la relación metalúrgica requerida de ley vs. recuperación.

Otra de las ventajas de la geometría de las celdas columna, es que la pulpa fluye a través de la columna mediante gravedad, lo cual permite que las columnas operen a densidades mayores en la alimentación que aquellas permitidas en las celdas mecánicas convencionales y por lo tanto, la celda columna provee una mayor tolerancia a la presencia de partículas gruesas.

El diseño de las canaletas circulares internas, permite incrementar la longitud del labio de rebose y reduce la distancia de recorrido que debe hacer una burbuja cargada de mineral colectado a través de la cama de espuma de la columna, lo cual permite un mayor aprovechamiento del material flotado y depositado en las canaletas de la columna y se minimiza la reducción de área libre de superficie de la columna.

El diseño de canaletas circulares ha permitido tener columnas más livianas y por lo tanto, el costo de fabricación de las mismas ha sido reducido considerablemente.

Sistema de Lavado de Espumas

El sistema de lavado de espumas, que es único en las celdas columna, tiene dos propósitos. El primero es proveer agua en la columna con el objeto de estabilizar la espuma, y el segundo es con el objeto de desplazar el agua de proceso, el cual normalmente se descarga con la espuma.

Al mantener el flujo de agua de lavado un poco por encima de la cantidad de agua requerida para remover la espuma de la columna (condición "bias" positivo), el agua de proceso y las partículas hidrofílicas atrapadas por arrastre mecánico en la camada de espuma, pueden ser apropiadamente lavadas y serán transportadas a la zona de colección de la columna.

Esta característica de la flotación en columna talvez sea la razón principal por la cual la tecnología de flotación en columnas sea un éxito y haya mejorado notablemente la eficiencia y el rendimiento metalúrgico allí donde se han instalado celdas columnas de flotación.

Sistemas de Inyección de Aire

Los sistemas de inyección de aire en las celdas columna han tenido una serie de cambios y mejoras en diseño e ingeniería en los últimos años, lo cual permite hoy tener los medios necesarios para regular el tamaño de burbujas, como también los flujos requeridos de inyección de aire para diversas aplicaciones y requerimientos. La habilidad de poder regular el tamaño de burbuja, permite una otra ventaja de celda columna de flotación sobre la celda mecánica convencional, al permitir la optimización de la distribución de tamaño de burbuja para el material a ser flotado.

Consideraciones del Diseño de Circuitos de Flotación

La incorporación de celdas columna de flotación, en plantas existentes y nuevas de concentración de minerales de hierro, puede ser efectuada de diferente manera dependiendo de los objetivos metalúrgicos y económicos. Algunos de objetivos comunes son:

- La incorporación de tecnología de flotación en plantas de concentración que estén usando otros métodos de

concentración, para de este modo obtener la producción de "pellets" con bajos contenidos de sílice.

- Incrementar la capacidad de flotación en plantas existentes.
- Mejorar los valores de recuperación de la planta en general al retratar las colas de la planta.
- Diseñar e instalar un circuito de flotación flexible que permita obtener mas de un producto con una ley diferente de concentrado final.

Muchas plantas requieren de flexibilidad operativa con el objeto de obtener mas de un producto final (por ejemplo, material para altos hornos y otro de reducción directa) haciendo uso del mismo equipo de concentración. Por lo general cuando los concentrados con contenidos más altos de sílice son producidos para ser usados en altos hornos, los requisitos de liberación en la etapa de molienda disminuyen y por lo tanto las plantas pueden operar con capacidades mayores de tratamiento. Capacidades mayores en la alimentación afectarán directamente en la distribución del tamaño en la alimentación, lo cual debe ser tomado en cuenta en el diseño del circuito de operación.

Los siguientes ejemplos demuestran algunas de las configuraciones del flujograma de proceso, que han sido adoptados por algunos de los productores de concentrados de hierro.

Ejemplo 1: Circuito Scavenger – Limpieza

En esta planta de flotación en Brasil, el circuito original consistía de cuatro baterías paralelas de flotación mecánica convencional para operar en las etapas rougher, limpieza y dos etapas de scavenger. El agotamiento de reservas en dicha mina y el eventual desarrollo de nuevas reservas mineralizadas, impusieron la modificación del flujograma de proceso [6], debido a que el mineral de la nueva zona mineralizada a ser minada es de mayor dureza, por ende de más difícil molienda y también requiere un tiempo mayor de flotación.

Un número de circuitos alternativos fueron considerados:

- 1) Instalar una batería adicional de celdas mecánicas de flotación convencional
- 2) Incrementar la capacidad de flotación instalando una línea de celdas columna de flotación
- 3) Adicionar celdas columnas de flotación a las baterías existentes de flotación convencional, para que operen como circuito de re-limpieza

Resultados obtenidos de pruebas a escala planta piloto, revelan que la tercera opción es la que demostró ser la mejor combinación de capacidad de tratamiento de la planta y la eficiente recuperación de hierro. La figura muestra el flujograma para éste circuito modificado.

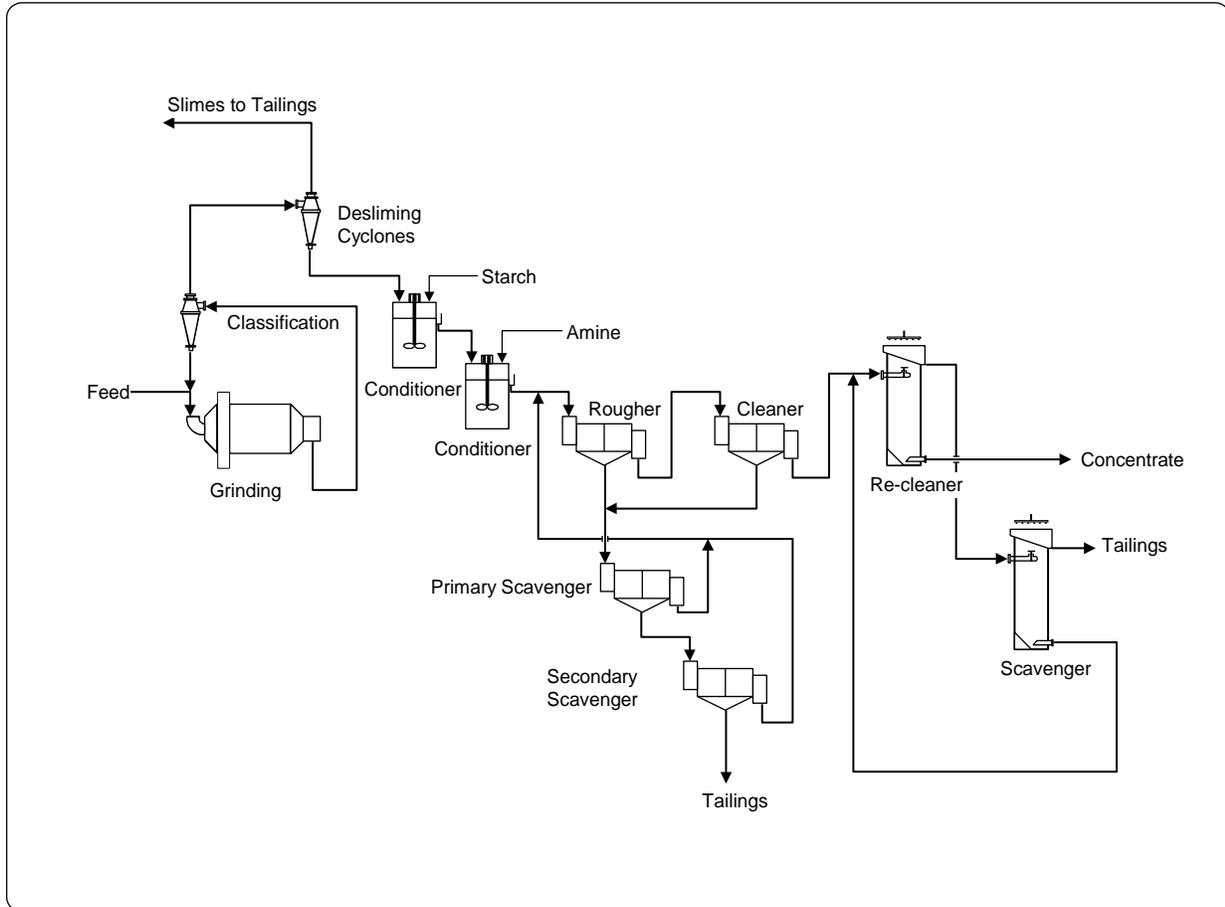


Figura 1. Columnas adicionadas a un circuito existente

Una columna de flotación ha sido adicionada como etapa de re-limpieza a cada una de las baterías del circuito, para de este modo preservar la flexibilidad del circuito. La ley de alimentación en columna de re-limpieza oscila entre 1% y 6% de sílice, por lo tanto, el hacer uso de una columna en esta etapa es suficiente para producir tanto el concentrado de alimentación para altos hornos, como también para reducción directa.

Se ha instalado una columna adicional en la etapa scavenger del flujograma para maximizar la recuperación de hierro fino, particularmente durante los periodos que es necesaria la producción de concentrados a ser utilizados en reducción directa. Debido a que estas columnas han sido adicionadas como etapas de re-limpieza en una planta existente de flotación de sílice, se debe prestar especial consideración a los efectos de variación en los circuitos rougher y el circuito de primera limpieza. Por lo general, la sílice fina de fácil flotabilidad es removida en la etapa roughing y por lo tanto, la alimentación a la columna de flotación se enriquece de partículas gruesas de sílice; además, cualquier problema operacional en la planta existente fluye a través del circuito de columnas lo cual resulta en una variabilidad de condiciones en la alimentación de las mismas.

La eficiente flotabilidad de partículas de sílice es directamente relacionada a la ley de alimentación y tamaño de partículas. Muchas concentradoras de hierro trabajan con una alimentación en la flotación de + 0,15 mm (100 #), como una medida de optimización y control del circuito de molienda. Este tamaño de partícula, está perfectamente encuadrado dentro de los parámetros normales de flotación y no presenta problemas mayores. Partículas mayores que 0,30 mm (48#), son muy difíciles de flotar y de mantener dichas partículas en la fase de espumas.

Para aquellas plantas que utilizan hidrociclones como medios de clasificación, la distribución de sílice no es uniforme a través del rango de tamaño de partículas. La sílice tiende a concentrarse en las fracciones gruesas. En la medida en que la cantidad de partículas de +0,15 mm (100#), incrementa en la alimentación, la cantidad de fracciones +0,30 mm (48#), tiende a incrementar exponencialmente, lo cual hace que el problema de flotabilidad se agudice enormemente. La relación de cantidades de las fracciones + 0,15 mm (100#), y +0,30 mm (# 48), en la alimentación de la columna es demostrada en la figura 2. Las partículas que se encuentran en el de rango de fracción mayor a + 0,30 mm (# 48),

demuestran una pobre respuesta a la flotación y por lo general con recuperaciones por debajo de 50%.

En la flotación en columnas, la pulpa se desplaza por gravedad a través de la zona de colección. Por lo tanto las partículas gruesas sedimentan más rápidamente que el tamaño promedio de partículas en la pulpa. Por ejemplo, si el tiempo promedio de residencia de la pulpa dentro de la columna es de 12 minutos, el tiempo de residencia de las partículas mayores a + 0,30 mm puede ser de 6 – 8 minutos dependiendo de la reología de la pulpa dentro de la zona de colección de la columna. Por lo tanto, cuando se considera la aplicación de columnas para este tipo de mineral, es de mayor importancia el tener un buen entendimiento de los grados de variabilidad del tamaño de partículas en los circuitos existentes, para poder de esta manera hacer un correcto diseño y dimensionamiento del circuito de las columnas de flotación.

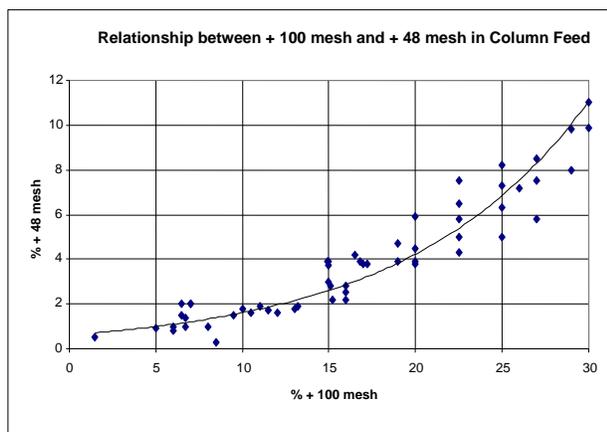


Figura 2. Relación de las partículas de alimentación + 0,15 mm (# 100), y + 0,30 mm (# 48).

Ejemplo 2: Circuitos Rougher –Limpieza

Para un otro productor de concentrados de hierro, se diseñó un circuito de flotación de columnas, como ampliación a una planta existente, para la eficiente recuperación de partículas finas de hierro provenientes de una línea de colas de la propia planta.

Dicha planta actualmente produce un concentrado de alimentación para reducción directa con partículas en el rango de -25 mm y + 6 mm, y en el rango de - 6 mm y + 0,10 mm para alimentación de altos hornos. El objetivo de las modificaciones en esta nueva planta, es el de tratar las colas de la planta (fracción - 0,10 mm) y de este modo poder producir un material de alimentación apropiado tanto para la producción de pellets para altos hornos como también de

reducción directa. Las especificaciones de la planta requieren que los concentrados para los altos hornos tengan contenidos de sílice de 1,7 – 2,0% SiO₂ y los concentrados para reducción directa tengan contenidos de sílice de 0,8 – 1,0% SiO₂ y ambos concentrados se producirán a partir de una alimentación en hierro de 13 - 20% SiO₂.

Originalmente, el flujograma de la planta estaba basado en celdas mecánicas de flotación convencional. Sin embargo, después de un extenso programa de trabajo y pruebas en columnas de escala piloto, se determinó que se obtenía en forma constante una más alta recuperación de hierro en las columnas que en las celdas convencionales; y por lo tanto, se resolvió la instalación de columnas de flotación en el flujograma y diseño final de proceso.

La columnas de flotación son diseñadas y dimensionadas para que trabajen dentro de un rango específico de flujos en la columna, los cuales, deben estar balanceados con las limitaciones de tiempo de residencia cuando se observen flujos mayores de los esperados y el problema de la estabilidad de espumas asociada cuando los flujos son menores de lo esperado. Además, para aquellas situaciones donde se requiera una alta recuperación de masa en la fase de espumas; las limitaciones de capacidad de carga de la columna, capacidad de carga de la burbuja, y capacidad de carga de los labios de rebose de la columna pueden también superar los importantes requisitos de tiempo de residencia de la columna. En este caso, se diseñaron dos columnas rougher en paralelo, para que puedan operar con cualquiera de los tres o cualquiera de los dos circuitos de deslame paralelos, los cuales alimentan a las columnas de limpieza. Inclusive una columna puede ser desactivada cuando el proceso considere una sola línea de alimentación.

La mezcla interna en la columna y las ineficiencias operativas por lo general van en desmedro y limitan la práctica correcta de recuperación de minerales de una columna. Por lo tanto, para garantizar la obtención de concentrados que cumplan con los requisitos en leyes de hierro y sílice, independientemente de las leyes de alimentación a la columna, se recomendó y diseñó un circuito cerrado rougher/limpieza. Esta configuración permitió que el circuito rougher operara de tal manera que se asegurase la mínima pérdida posible de hierro fino en las colas; y el circuito de limpieza se encargaría en asegurar que la calidad del concentrado esté dentro de las especificaciones requeridas. Las espumas de la etapa de limpieza son recicladas al circuito rougher y de este modo, se pueden recuperar partículas de hierro encontradas en dicha espuma por causa de arrastre mecánico. La figura 3 demuestra un flujograma simplificado. Esta configuración permite la posibilidad de producir cualquiera de los concentrados requeridos provenientes de cualquier combinación de los flujos, y la flexibilidad de poder agregar un circuito de remolienda en el futuro en caso de que se requiera un mayor grado de liberación, esto hace que este diseño tenga muchas posibilidades de aplicación.

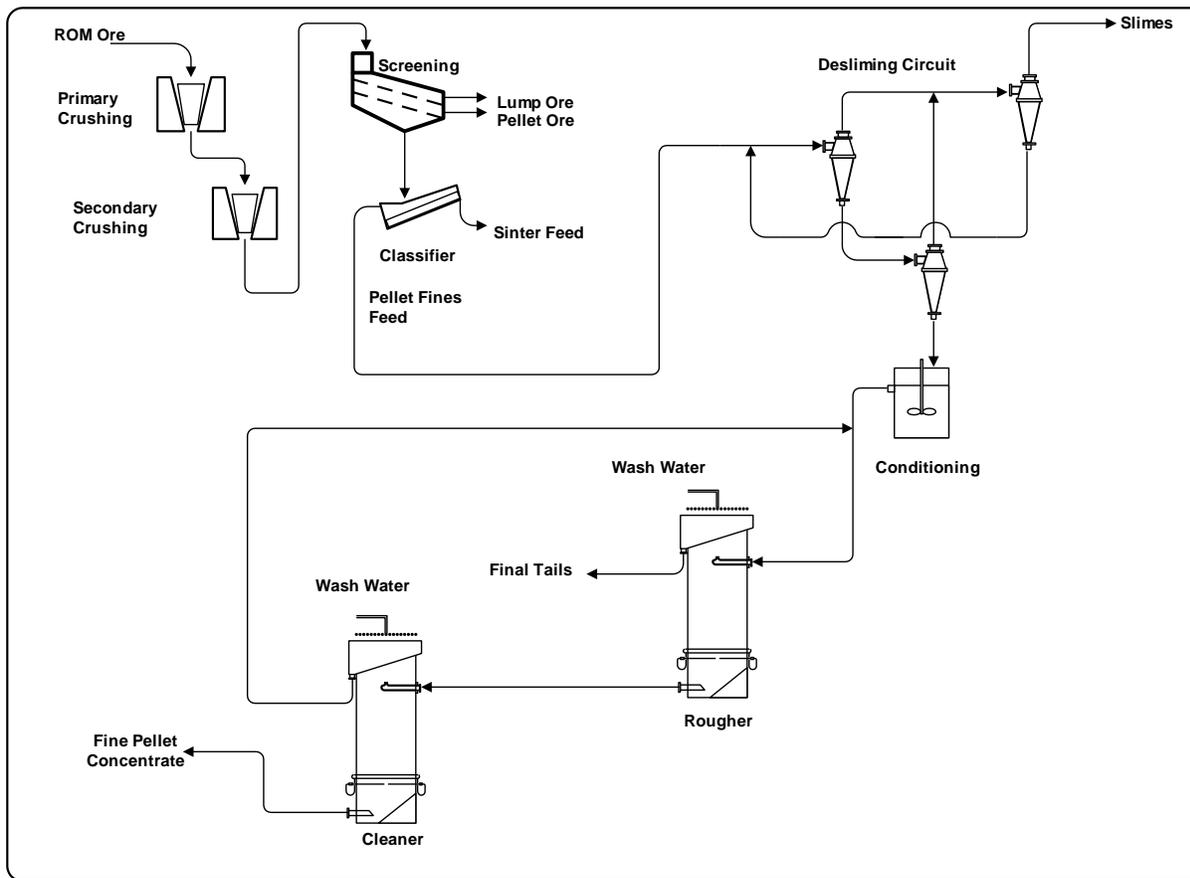


Figura 3. Flujograma del circuito Rougher-Limpieza.

Ejemplo 3: Reducción de Contenidos de Sílice en Concentrados de Magnetita

Recientemente Canadian Process Technologies Inc. (CPT) ha completado un estudio de ingeniería básica para una planta de flotación de 1.180 TPH, con el objeto de reducir los contenidos de sílice en los concentrados de magnetita de 7% - 9% SiO_2 para 2,2% SiO_2 . La figura 4, muestra el flujograma básico de este caso. La nueva alimentación ha sido molida a 80% pasando 0,15 mm (# 100), la cual es tratada en los separadores magnéticos primarios.

El concentrado magnético es remolido para que aproximadamente 75% pase - 0,045 mm (# 325), y es re-tratado en los separadores magnéticos secundarios, los cuales producen un concentrado que contienen entre 7% - 9% SiO_2 . El concentrado magnético es primeramente acondicionado con una solución cáustica de almidón y luego se acondiciona con aminas, previamente a la alimentación de la etapa primaria de flotación en columna, donde el

contenido de sílice es reducido a leyes menores a 2,2% SiO_2 .

El mineral es altamente variable en su contenido magnético y por lo tanto fue necesario diseñar un flujograma de proceso que permitiese tratar eficientemente leyes de alimentación sumamente fluctuantes. Del mismo modo, se consideró para este caso un alto nivel de instrumentación de control y operabilidad de las columnas, como ser: sistema de muestreo en línea, dosificación automática de reactivos, y tener la flexibilidad de poder intercambiar la operabilidad y montaje de líneas de las columnas en forma casi inmediata. Durante los periodos de bajas leyes de alimentación en las columnas, la alimentación a las mismas será suspendida al igual que la adición de reactivos y las columnas serán ajustadas para que trabajen bajo un régimen de reciclaje. Cuando se normalizan las leyes de alimentación, el proceso es revertido y las columnas operan bajo condiciones normales.

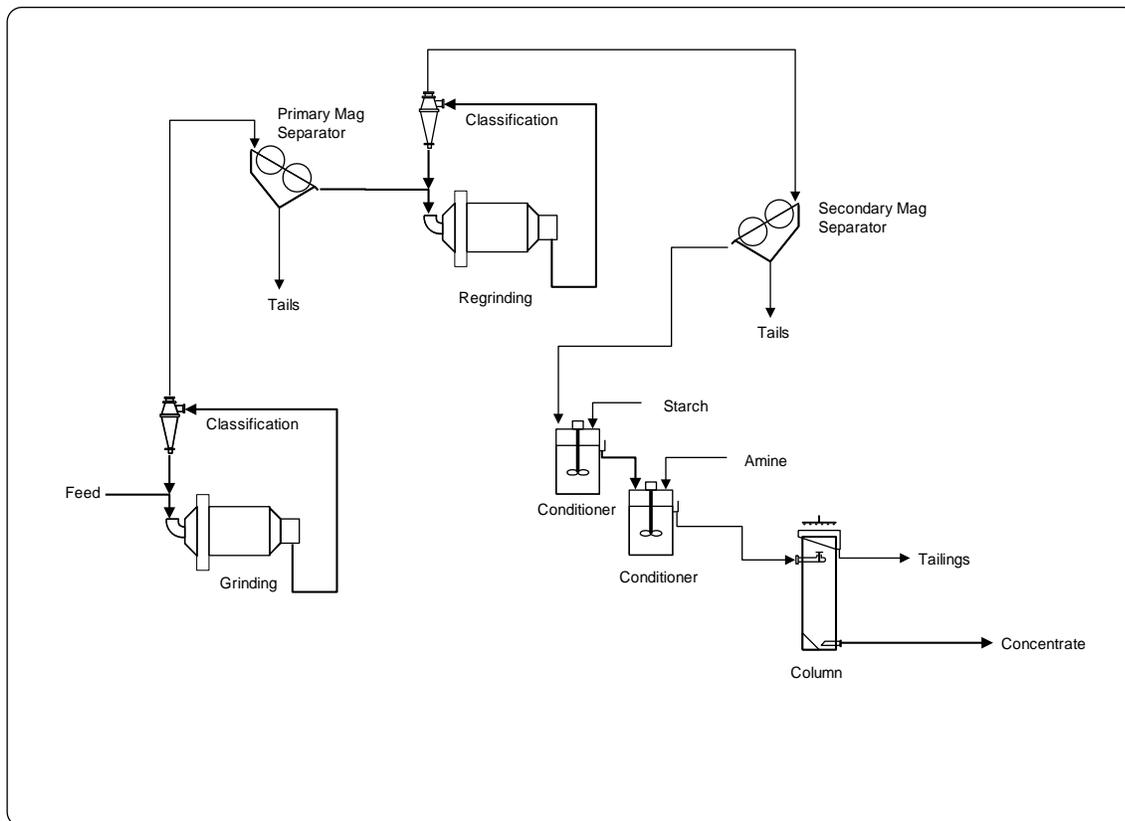


Figura 4. Tratamiento de magnetitas mediante un Circuito de Flotación en Columnas

Conclusiones

Muchos productores de hierro a escala mundial han revisado y modificado sus procesos de operación substituyendo o incluyendo columnas de flotación en sus flujogramas de proceso, para de este modo optimizar el proceso y reducir el contenido de sílice en los concentrados de hierro que más tarde serán convertidos en pellets.

La posibilidad de poder operar las celdas de flotación con un sistema de agua de lavado de espumas en conjunción con camadas profundas de espuma ha permitido a la metalurgia del hierro, obtener recuperaciones óptimas de concentrados de este metal, en particular cuando se requiere obtener concentrados destinados a la utilización para reducción directa.

El circuito o proceso a ser diseñado, dependerá de la variedad de flujos que las columnas de flotación deberán responder eficientemente y satisfacer los requisitos metalúrgicos esperados.

Una enorme variedad de rango de flujos, tonelajes, leyes de alimentación y concentrados podrán requerir múltiples columnas en paralelo en vez de tener una sola columna e ineficiente columna de flotación o una ineficiente batería de

celdas mecánicas convencionales. Dependiendo de los objetivos metalúrgicos y los requisitos de ley de concentrados a ser obtenidos, los circuitos de flotación pueden ser diseñados de tal forma que las columnas puedan ser instaladas en los circuitos rougher y limpieza, o pueden ser instaladas como columnas de limpieza y scavenger.

La dificultad de trabajar en un sistema de tres fases como es el caso de las columnas de flotación, la gran variabilidad que puede existir en las leyes de alimentación del material a ser tratado, y las múltiples opciones de operabilidad, obligan que sea indispensable un buen entendimiento y experiencia del proceso como también del equipo de flotación, para de este modo lograr un óptimo diseño y dimensionamiento de las columnas de flotación.

Bibliografía

- 1) CIENSKI, T.; COFFIN, V. "Column Flotation Operation at Mines Gaspé Molybdenum Circuit". En: *13th Annual CMP Conference*, Ottawa: Jan., 1981, 20-22.
- 2) COLEMAN, R.; KILGOUR, I. "The Installation of a Final Cleaning Column at Ok Tedi". En: *Fourth Mill Operators' Conference*, Burnie: March, 1991, 10-14.

- 3) SMITHSON, E.P.; JOHN, C.I.A.; REA, T.H.; MWENYA, W.M. "Improving Concentrate Quality in the Concentrators of Zambia Consolidated Copper Mines Limited Using Column Cells." *Column 91, Int. Conf. on Column Flotation*. Sudbury: June 2-6, 1991.
- 4) VIANA, P.R.M.; SILVA, J.P.; RABELO, P.J.B.; COELHO, A.G.; SILVA, V.C. "Column Flotation for the Expansion of the Flotation Circuit at Samarco Mineracao". Brazil. *Column 91, Int. Conf. on Column Flotation*. Sudbury: June 2-6, 1991.
- 5) MURDOCK, D.J.; TUCKER, R.J.; JACOBI, H.P. "Column Cells VS. Conventional Flotation, A Cost Comparison". *Column 91, Int. Conf. on Column Flotation*. Sudbury: June 2-6, 1991.
- 6) SANDVIK, K.L.; NYBO, A.S.; RUSHFELDT, O., "Reverse Flotation to Low Impurity Levels by Column Flotation". *Column 91, Int. Conf. on Column Flotation*. Sudbury: June 2-6, 1991.
- 7) LEVENSPIEL, O. *Chemical Reaction Engineering*. Wiley, N.Y.: Chap. 9, 1972.
- 8) FINCH, J.A.; DOBBY, G.S. *Column Flotation*. Pergamon Press. Toronto: Chap. 4, 1990.
- 9) XU, M.; URIBE-SALAS, A.; FINCH, J.A.; GOMEZ, C.O. "Gas Rate Limitations in Column Flotation". En: *Processing of Complex Ores*. (Ed. G.S. Dobby S.R. Rao). Toronto: Pergamon Press, , 1989.
- 10) FLINT, I.M., "Bubble Generation in Flotation Columns". M.A.Sc. Thesis. Toronto: University of Toronto, 1989.
- 11) YIANATOS, J.B.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R., "Apparent Hindered Settling in a Gas-Liquid-Solid Countercurrent Column". *Int. J. of Min. Proc.*, vol 18, No ¾, Nov, 1986.
- 12) ITYOKUMBUL, M.T. "A New Modelling Approach to Flotation Column Design". *Minerals Engng*, Vol. 5., no. 5/6, 1992.
- 13) AMELUNXEN, R.L. "Column Flotation: New Carrying Capacity Considerations for Scale-up". *Expomineria 90'*, Santiago, Chile: May 14-18, 1990.
- 14) RASEMANN, W. "On the Attachment Probability of Bubble/Particle Contacts in Solid/Liquid Suspensions". *Int. J. of Mineral Processing*, Vol. 24, 247-267, 1988.
- 15) SZATKOWSKI, M.; FREYBERGER, W.L. "The Effect of Bubble Size Distribution on Selectivity of Iron Ore Flotation". *Int. J. of Mineral Processing*, Vol. 23, 213-227, 1988.
- 16) AHMED, N.; JAMESON, G.J. "The Effect of Bubbles size on the Rate of Flotation of Fine Particles". *Int. J. of Mineral Processing*. Vol. 14, 195-215, 1985.
- 17) BACH, H.F.; PILHOFER, T. "Variation of Gas Holdup in Bubble Columns with Physical Properties of Liquids and Operating Parameters of Columns". *Ger. Chem. Eng.* Vol. 1, 270-275, 1978.
- 18) YIANATOS, J.B.; ESPINOSA, R.G.; FINCH, J.A.; LAPLANTE, A.R., "Effect of Column Height on Flotation Performance". *AIME Denver Colorado*, Feb. 24-27, 1987.