

Flotación de partículas gruesas aplicada a minerales sulfurados de cobre

Por:

M.Sc José Concha, *Deputy Managing Director, Eriez Flotation Division Peru.*

PhD, PEng Eric Wasmund, *Global Managing Director, Eriez Flotation Division Canada.*

Ph.D Michael J. Mankosa, *Vice-President Operations, Eriez Corp. USA.*

Resumen

En los últimos años la innovación en la industria minera viene tomando cada vez mayor importancia puesto que será una necesidad para desarrollar proyectos económicamente atractivos. Dentro de ella un nuevo tipo de flotación viene ganando cada vez mayor importancia, nos referimos a la Flotación de Partículas Gruesas (FPG), mayores a 150 μm y hasta 850 μm . Se estima que para proyectos *brownfield* este tipo de flotación podría permitir ampliar la capacidad de planta hasta en un 25%, con la sola implementación del sistema de FPG, y sin la necesidad de instalar más molinos. Para proyectos *greenfield* se estima que este tipo de tecnología podría ayudar a reducir los costos operativos de todo el proyecto en más de 10%, y además contribuir a optimizar la recuperación de agua y la disposición de relaves, puesto que una porción de estos se dispondrían en fracciones gruesas en seco.

Sin embargo, se sabe que, para minerales sulfurados, las mejores recuperaciones usualmente se obtienen cuando las celdas de flotación convencionales procesan tamaños de partículas en los rangos de 30 μm a 150 μm . En las operaciones industriales, las partículas que se encuentran fuera de este rango generalmente son reportadas en los relaves, debido a las restricciones

inherentes asociadas con las interacciones físicas que se producen en las fases pulpa y espuma de los equipos de flotación convencional. Para superar estas limitaciones, recientemente se ha desarrollado un nuevo tipo de celda de flotación que trabaja bajo el principio de lecho fluidizado. Con este nuevo tipo ha sido posible obtener recuperaciones hasta 93% Cu y 89% Mo cuando se ha flotado un mineral en el rango de 600 μm x 150 μm .

Introducción

La mayor fuente de abastecimiento de cobre a nivel mundial proviene de los procesos de flotación, se estima que más del

82% de la producción primaria proviene de mecanismos de concentración por flotación. En Perú los últimos megaproyectos mineros han sido plantas concentradoras (Cerro Verde, Las Bambas, Constancia, Antapaccay, etc.). Otra característica de los proyectos de cobre es que la ley de los depósitos ha ido decreciendo, y a medida que ha aumentado la demanda por este metal, el tamaño de las plantas concentradoras también ha necesitado crecer. En el país las últimas plantas fueron diseñadas para tener capacidades de procesamiento mayores a las 70 ktpd, y hasta 240 ktpd. Proyectos de estas magnitudes, también han traído a discusión si existen nuevos

Abstract

During the last few years, innovation in mining industry has become more and more important as it is necessary to develop economically attractive projects. A new flotation type is gaining more importance; we refer to Coarse Particle Flotation (CPF), above 150 μm and up to 850 μm . We estimate that for brownfield projects this type of flotation may allow to increase plant capacity up to 25%, just by implementing the CPF system, and without needing additional mills. For greenfield projects, we estimate that this type of technology may help reduce the operating costs of the entire project by more than 10%, and would also contribute to optimizing water recovery and tailings disposal, since a portion of these would be disposed of in dry coarse fractions.

However, it is well known that, for sulphide ores, the best recoveries are usually obtained when conventional flotation cells process particle sizes ranging between 30 μm and 150 μm . In industrial operations, particles falling outside this range are generally reported in tailings due to the inherent constraints related to physical interactions occurring in the pulp and foam phases of conventional flotation equipment. To overcome these limitations, a new type of flotation cell has recently been developed, which works under the fluidized bed principle. With this new type, recoveries of up to 93% Cu and 89% Mo were possible when minerals ranging between 600 μm x 150 μm were floated.

procesos, y/o tecnologías, etc. que permitan optimizar su rentabilidad. En este sentido, uno de los procesos que ha venido despertando cada vez mayor interés es la Flotación de Partículas Gruesas (FPG). Flotar grueso traería muchas ventajas para un proyecto u operación minera, como:

- Se estima que un aumento en el P80 del alimento a flotación de 200 a 300 μm por ejemplo, podría permitir incrementar la capacidad de planta hasta en un 25% (Mankosa et al., 2016). Estudios han mostrado que la celda HydroFloat® puede flotar eficientemente rangos de partículas mayores a 150 μm . Para minerales de cobre, se han reportado recuperaciones entre 85% a 93% Cu, cuando se ha flotado minerales en fracciones de 600 μm x 150 μm .

- Flotar más grueso, significa moler más grueso también, y esto trae consigo importantes ahorros energéticos, ayudando a reducir el Opex, y finalmente impactar positivamente en la rentabilidad de la operación. Algunos estudios (Jameson et al. 2013) muestran que flotar grueso podría traer ahorros en los costos operativos en más de 12% (estudio realizado para un proyecto a cielo abierto de 50 ktpd).

- Otros beneficios estarían asociados con la disposición de relaves, y la recuperación de agua. Para un proyecto *green-field*, se estima que alrededor del 30% de los sólidos totales procesados, podrían depositarse como relaves en fracciones gruesas (ej. 600 μm x 150 μm). Estos relaves gruesos tienen una velocidad de sedimentación mayor en más de diez veces en comparación a un relave convencional, permitiendo recuperar más eficientemente el agua, y además reducir las pérdidas por evaporación que usualmente ocurren en las relaveras. La disposición de estos relaves gruesos podría ayudar a aumentar la vida útil de la relavera y hacerla más segura, o en el caso de las minas subterráneas ser usados para relleno en pasta.

Los beneficios de flotar gruesos son diversos, entonces la pregunta es ¿por qué en la actualidad no se aplica? La razón principal, tal vez sea que las tecnologías convencionales de flotación no son eficientes para flotar partículas gruesas. La Figura 1 muestra la relación de tamaño de partícula vs recuperación del mineral valioso para diversas operaciones que utilizan cel-

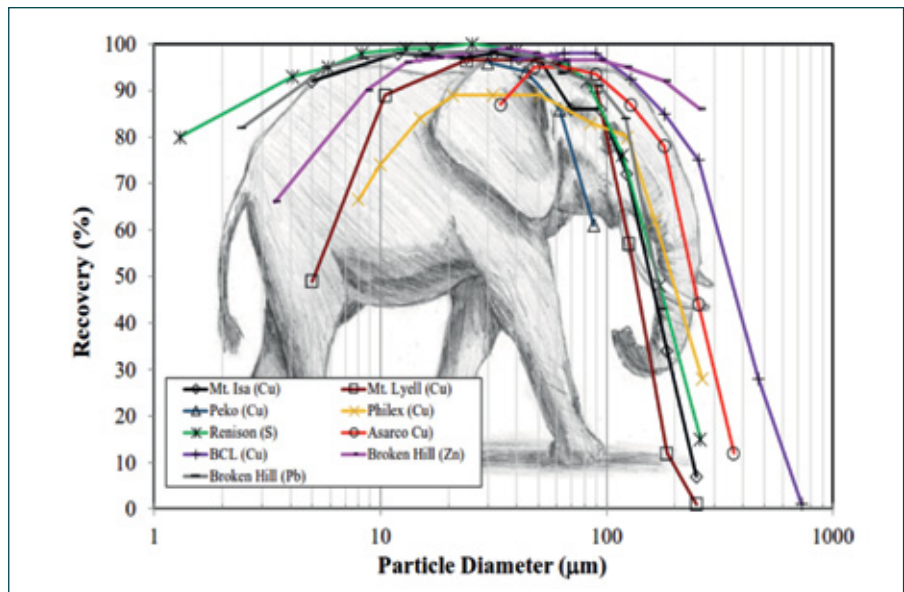


Figura 1. Datos de flotación convencional utilizada en circuitos industriales de procesamiento de sulfuros (adaptada de Lynch et al., 1981).

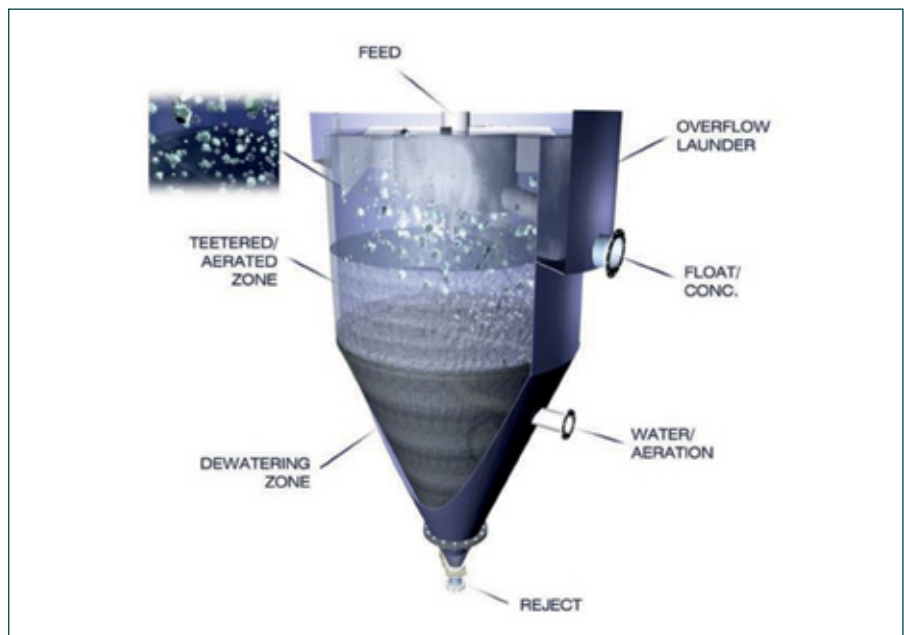


Figura 2. Diagrama esquemático de la celda HydroFloat®.

das convencionales. En esta curva se puede observar, que en todos los casos, para las partículas mayores a 150 μm la recuperación del elemento valioso cae fuertemente. Usualmente se atribuye la baja recuperación en las fracciones gruesas únicamente a un tema de liberación, sin embargo, diversos estudios han demostrado que en ciertos casos a pesar de tener un grado de liberación adecuado en las fracciones gruesas (>150 μm) los minerales de interés no pueden ser recuperados en las celdas convencionales, donde la pér-

didada de estas partículas obedece a fenómenos físicos e hidrodinámicos inherentes a la tecnologías convencionales (Concha and Christodoulou, 2014). Factores como la turbulencia dentro de las celdas, o el transporte desde la fase pulpa-espuma-canaleta del agregado partícula-burbuja, entre otros, son fenómenos que afectan la recuperación de las partículas gruesas. Para superar estas limitaciones, el 2002 Eriez desarrolló un nuevo tipo de celda de flotación llamada HydroFloat®, que trabaja bajo un principio de lecho fluidizado, y la

descripción de su operación y características se presentarán en la siguiente sección.

Tecnología de flotación de partículas gruesas

La celda HydroFloat® cuenta con un tanque el cual tiene tres secciones: Free-board, zona fluidizada-aireada, y el cono de desaguado.

Durante la operación, la pulpa deslamada se alimenta en la parte superior del tanque de la celda. Al mismo tiempo, un caudal controlado de agua de proceso se adiciona exactamente encima de la sección cónica de la parte inferior del tanque, esta agua se adiciona a través de una red de tuberías de distribución. El flujo ascendente crea un lecho fluidizado de partículas suspendidas, las cuales son principalmente ganga hidrofílica (relaves).

Burbujas de aire finamente dispersas generadas por un sistema de inyectores, son transportadas por el agua hacia el lecho fluidizado, donde dichas burbujas son forzadas a entrar en contacto con la cama densa de partículas sólidas. Luego de la adherencia de las burbujas en la superficie de las partículas hidrofóbicas, el agregado resultante partícula-burbuja es transportado por el flujo ascendente del agua de fluidización, hasta ser colectado en la canaleta de la celda. Mientras que los sólidos hidrofílicos continúan pasando a través del lecho fluidizado y acumulándose en el cono de desaguado, localizado justo abajo del anillo de tuberías de distribución de agua de fluidización, para posteriormente ser descargados.

Este tipo de celda cuenta con las siguientes características:

- Capacidad de procesamiento: >18 t/h-m².
- Consumo de aire de flotación: es alrededor del 10% del aire consumido por celdas convencionales de área de flotación semejante.
- Consumo de reactivos: en algunas aplicaciones, después de la instalación, se ha conseguido reducir el consumo de reactivos (colector) hasta 10%.
- Repuestos: La celda al no contar con partes móviles internas no tiene el problema de desgaste prematuro por abrasión.
- Tamaño de partícula en la alimentación: esta celda está siendo utilizada industrialmente para flotar partículas de hasta 6,000 µm (fosfatos). En el caso de sulfuros de cobre, los rangos varían usualmente entre 600 µm x 150 µm, y en algunos casos hasta 850 µm x 150 µm.
- Para optimizar su performance se recomienda trabajar dentro de una distribución de tamaños de partículas de 1:6.
- Porcentaje de sólidos: la celda puede trabajar con pulpas con porcentajes de sólidos entre 40% a 80%. Los relaves producidos en esta celda salen con porcentaje de sólidos semejantes al alimento, esto debido a la zona de desaguado que posee.

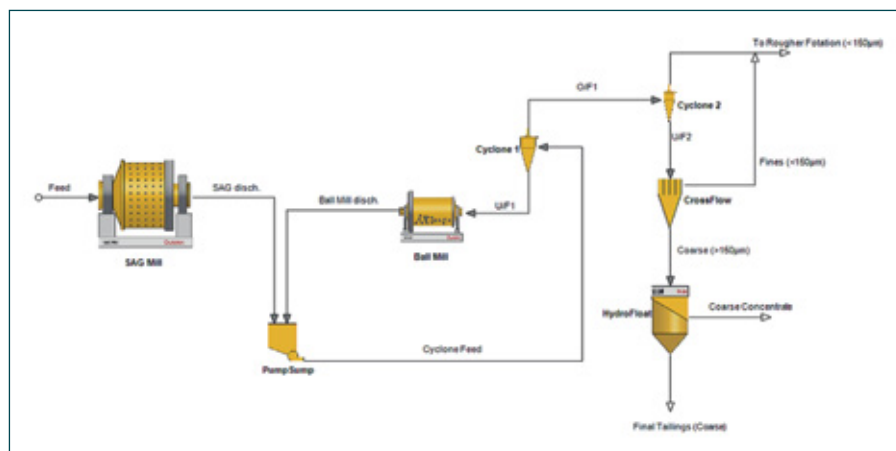


Figura 3. Flowsheet para flotación de partículas gruesas como preconcentración.

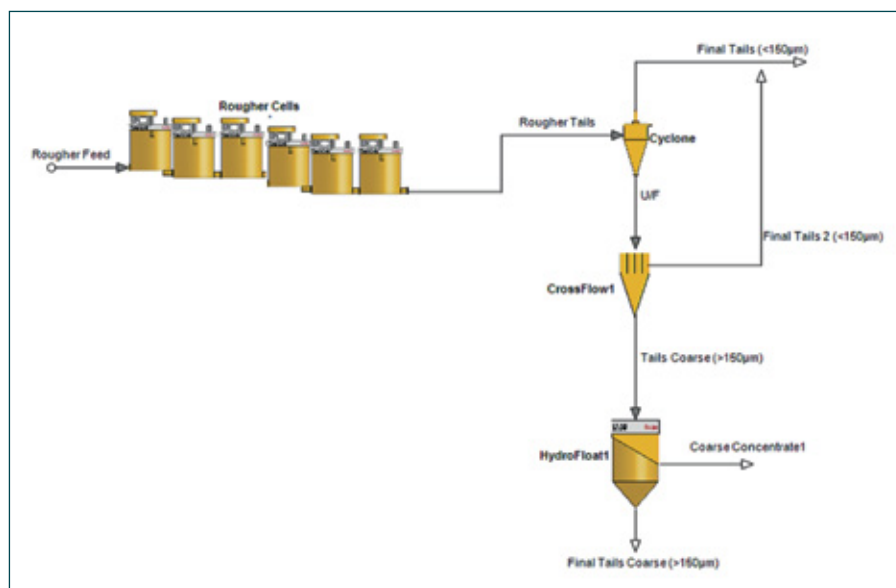


Figura 4. Flowsheet para flotación de partículas gruesas para recuperación de relaves rougher.

- Liberación: estudios de tomografía 3D y MLA, reportan que esta celda requeriría muy poca superficie hidrofóbica expuesta para recuperar el mineral de interés. Según estos estudios bastaría entre > 1% - 10% de superficie hidrofóbica expuesta, para que una partícula pueda ser recuperada (Miller et. Al. 2016, Mehrfert, 2017).
- La celda trabaja como una sola etapa de flotación, es decir, no se necesita de celdas en serie.

La celda HydroFloat® viene siendo empleado industrialmente desde el 2004. A la fecha existen más de 50 unidades en operación, en plantas de flotación de fosfatos, potasio, carbón, y diamante. La primera instalación industrial para procesar minerales sulfurados de cobre será este año.

Usos potenciales de la flotación de partículas gruesas

Como se mencionó anteriormente, la flotación de partículas gruesas viene tomando cada vez mayor interés dentro de la industria minera, por todas las potenciales ventajas que pueden ayudar a desarrollar proyectos más rentables. Algunas de las posibles aplicaciones que se han estudiado son utilizar la FPG como una etapa de preconcentración, y una segunda opción es utilizar esta celda para recuperar los elementos valiosos contenidos en las fracciones gruesas de los relaves rougher de las plantas en operación.

Preconcentración

Esta aplicación se piensa que será importante sobre todo para los depósitos marginales. La Figura 3 muestra un flowsheet simplificado de la aplicación como preconcentración. Esta permitirá tener una molienda más gruesa, por ejemplo el Overflow del primer ciclón podría tener un P80 entre 400 a 500 μm , luego en la segunda etapa de cicloneado, se haría la clasificación para dividir la carga que irá a flotación convencional (partículas menores a 150 μm), y la fracción gruesa que irá a la celda HydroFloat® (partículas mayores a 150 μm). Sin embargo, como el proceso de clasificación en un ciclón no es eficiente y existe un *by pass* de partículas finas en el U/F, entonces se requiere realizar una etapa de clasificación adicional, la cual podría hacerse en un clasificador hidráulico (ej. CrossFlow), el cual presenta mayor eficiencia que un hidrociclón, de tal forma que se asegure que la carga que se alimenta al nuevo sistema contenga una mínima cantidad de partículas finas (<150 μm). Dependiendo del P80 con el que se trabaje, se estima que aproximadamente el 35% a 50% del tonelaje total procesado podrá ser tratado con la tecnología de FPG.

Este tipo de aplicación busca que el relave generado en la nueva celda sea un relave final, por este motivo se apunta a tener recuperaciones mayores al 85% Cu en esta etapa.

El concentrado de la celda HydroFloat® será un preconcentrado. En promedio el ratio de enriquecimiento para minerales sulfurados de cobre está alrededor de 4. Por ejemplo, si se tuviera un mineral marginal cuya ley de cabeza en la fracción gruesa es de 0.25% Cu, el preconcentrado tendrá una ley alrededor de 1%

Cu. Este preconcentrado, necesitará ser desaguado, y luego pasar a remolienda gruesa para liberar mejor, para luego unirse con el concentrado rougher convencional y luego ser enviado a remolienda, para posteriormente ser limpiados en las etapas cleaner.

Con este tipo de aplicación se estima que alrededor del 30% de los sólidos procesados podrían ser dispuestos como

relaves en fracción gruesa, facilitando la recuperación del agua, y optimizando su disposición final en la relavera.

Recuperación de relaves rougher

Tal como se mostró en la Figura 1, gran parte de las pérdidas que ocurren en una planta concentradora están en las partículas gruesas (>150 μm). Dependiendo del P80 con el cual opere, se estima que alrededor del 30% al 50% del Cu

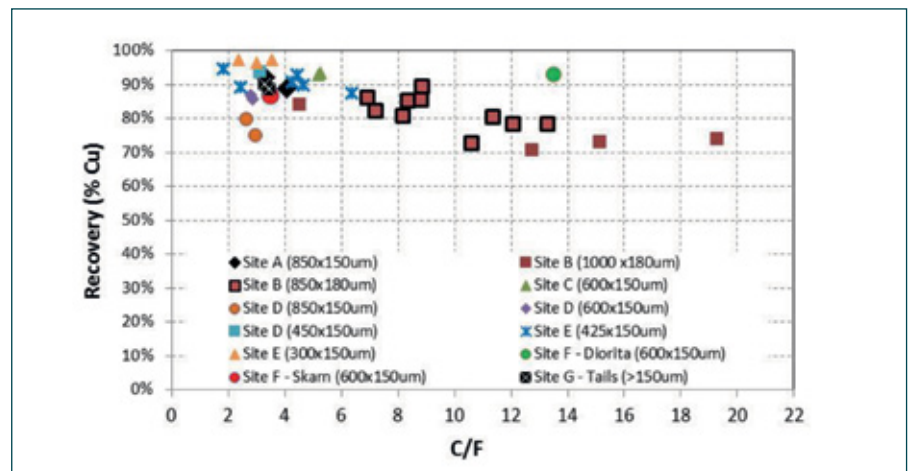


Figura 5. Relación ratio de enriquecimiento vs recuperación. Datos obtenidos en pruebas escala laboratorio realizadas con minerales de Cu de depósitos ubicados en Perú.

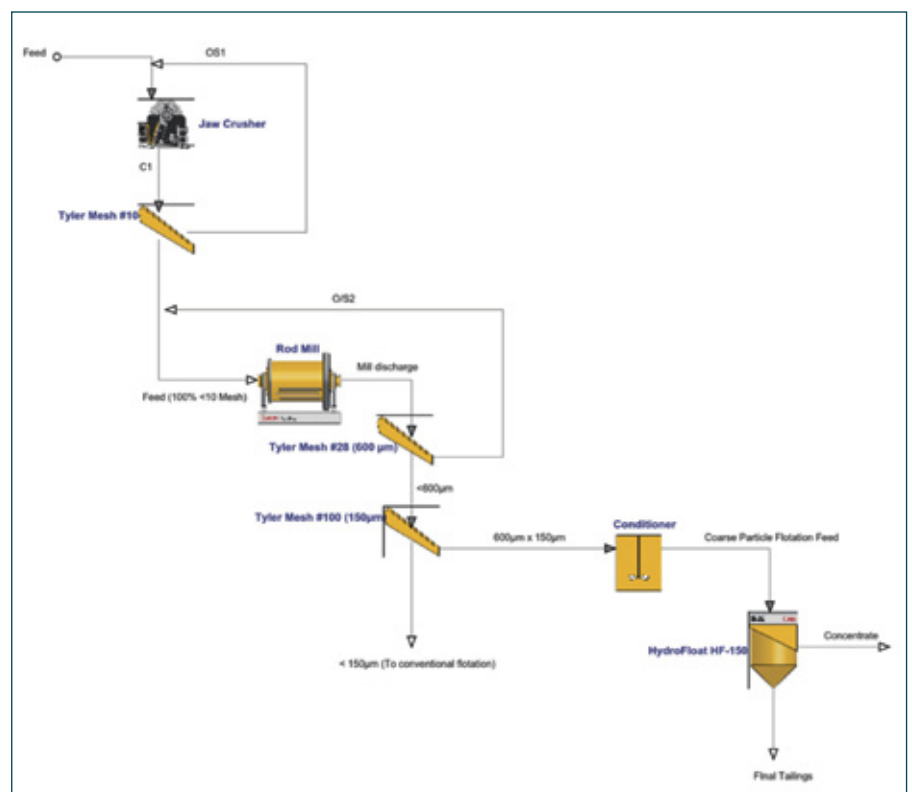


Figura 6. Esquema del procedimiento de preparación de muestra para realizar las pruebas de flotación de partículas gruesas como etapa de preconcentración.

que se pierde en los relaves rougher estaría contenido en las fracciones gruesas. Entonces recuperar los elementos valiosos contenidos en estas fracciones puede representar una buena oportunidad para que las compañías mineras optimicen el performance de sus plantas, y por ende su rentabilidad.

Estudios a escala laboratorio y piloto han mostrado que a través de la FPG es posible recuperar entre 60% a 90% del Cu contenido en las fracciones gruesas de los relaves rougher. Esto permitiría incrementar

la recuperación global de la planta en un 2 a 5 puntos porcentuales de Cu.

Este tipo de arreglo ha resultado ser atractivo para las plantas que se encuentran en operación, puesto que no requiere de realizar cambios en el flowsheet existente. La construcción, comisionamiento y operación de la nueva planta para la recuperación de las partículas gruesas a partir de los relaves, podría ejecutarse sin interferir en el normal funcionamiento de la planta existente. Tal como se muestra en la Figura 4, el relave rougher necesitará

ser clasificado para remover las partículas finas (<150 μm) y esta fracción fina ser dispuesta como relave final, mientras que la fracción gruesa (>150μm) se alimentará a la nueva celda.

El concentrado producido en esta aplicación usualmente tienen leyes semejantes a la de una cabeza fresca. Como el concentrado HydroFloat contiene una gran cantidad de partículas mixtas gruesas, necesitará de una molienda, para mejorar la liberación y luego será alimentado a las celdas rougher convencionales, o podrá desarrollarse un nuevo circuito de flotación solamente para limpiar este concentrado.

Tabla 1. Análisis Químicos de la Muestra Estudiada

Size Fraction Description	Weight (%)	Grades		
		Cu (%)	Au (g/t)	Fe (g/t)
Fraction 600 μm x 150 μm (HF Feed)	60%	0.202	0.011	5.345
Fraction <150 μm (Storage for Conventional Flotation)	40%	0.336	0.019	6.220
TOTAL (Bulk Sample)	100%	0.255	0.014	5.693

Resultados experimentales

Actualmente la FPG está siendo estudiada por las principales compañías mineras productoras de cobre, como también por los departamentos de procesamiento de minerales de las principales universidades. Eriez lleva estudiando este proceso por más de 18 años, y para el caso de minerales sulfurados de cobre se han venido realizando estudios desde 2013. En la actualidad, se han desarrollado ensayos en más de nueve países, y se ha estudiado más de 20 tipos de minerales diferentes.

En Perú se han desarrollado gran número de estos estudios y el resumen de estos se presenta en la Figura 5, donde se podrá observar que para la mayoría de casos, para ratios de enriquecimiento de 4, la recuperación de cobre varió entre 85% hasta recuperaciones mayores al 90%. Se han obtenido ratios de enriquecimientos mayores, sin embargo, estos han sido casos puntuales y, sobre todo, se ha debido a la presencia de cobre nativo, u otro tipo de minerales ricos en este metal.

A continuación discutiremos pruebas realizadas con mineral fresco donde se ha utilizado la FPG como una etapa de preconcentración, y también pruebas realizadas para recuperar elementos valiosos de los relaves rougher.

Equipo

Las pruebas de laboratorio desarrolladas en Perú se realizaron en una celda modelo HF-150, que es automatizada y cuyo control del lecho se realiza a través de un lazo que cuenta con un transmisor de presión, un controlador local, y una válvula tipo pinch. El control del aire de flotación y agua de fluidización se hace de forma manual. Esta celda permite realizar

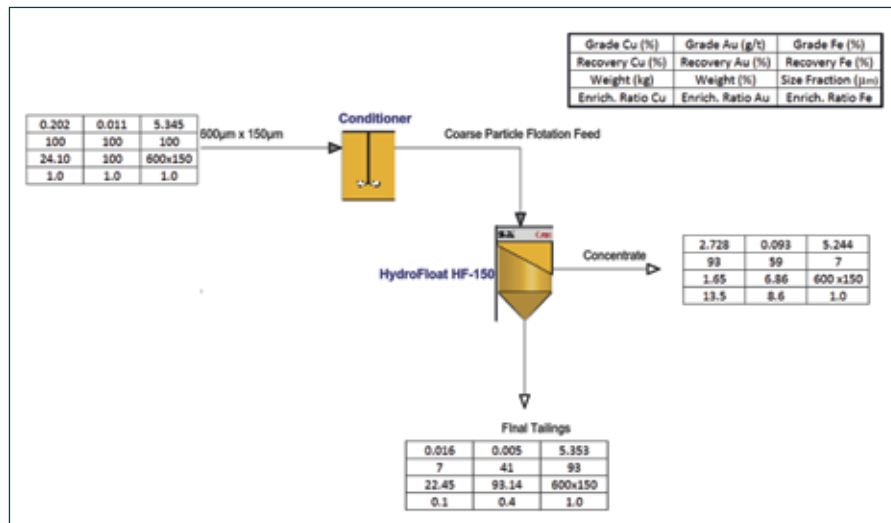


Figura 7. Resultados de las pruebas de FPG – preconcentración.

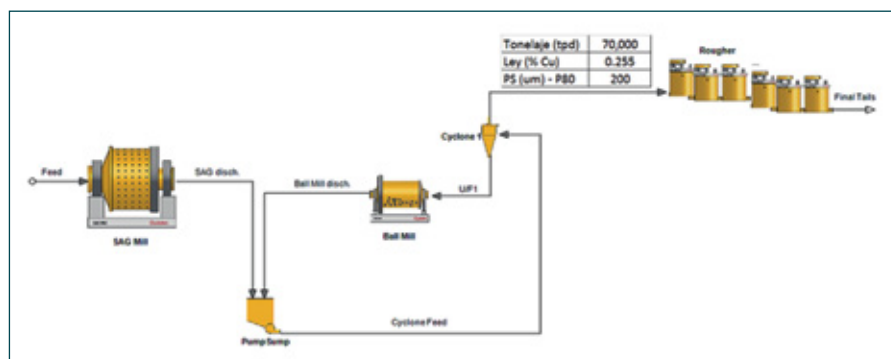


Figura 8. Esquema simplificado de etapa de molienda y flotación rougher sin preconcentración.

pruebas en continuo, es decir la alimentación, obtención de concentrado y relave es en forma continua. Este tipo de equipo permite simular la mayoría de los parámetros con los que se espera trabajar a escala industrial, además posibilita obtener resultados semejantes a los esperados en una instalación promedio.

Pruebas de preconcentración

Este estudio se realizó para un proyecto *greenfield* ubicado en el sur del Perú. La muestra recibida paso por etapas de preparación que se describen en la Figura 6.

La muestra de cabeza como las fracciones finas y gruesas generadas durante la preparación fueron analizadas y los resultados se muestran en la Tabla 1. Como se puede observar es una muestra con una ley de cabeza baja, 0.255% Cu, que podría considerarse marginal. En este sentido, el objetivo fue determinar si la FPG podría utilizarse como una etapa de preconcentración, de tal forma que permita obtener una ley de cabeza para la flotación convencional, con una ley mayor a 0.5% Cu. La preparación de la muestra consistió en la clasificación en dos fracciones:

- Fracción gruesa (600 μm x 150 μm) para realizar las pruebas de FPG en la nueva celda.
- Fracción fina (< 150 μm), muestra almacenada para realizar pruebas de flotación convencional en celda Denver.

Los análisis químicos mostraron que ocurre una concentración natural en la clasificación de la fracción fina, pasando de una ley bulk de 0.255% Cu a una ley de 0.336% Cu. Mientras que la ley de la fracción gruesa fue de 0.202% Cu. También se observó que aproximadamente el 60% de la masa estuvo en la fracción gruesa. Los resultados de las pruebas se presentan en la Figura 7.

Los resultados alcanzados para este tipo de mineral fueron alentadores, la recuperación de Cu fue de 93%, y se obtuvo un ratio de enriquecimiento de 13.5, es decir, se pasó de una ley de alimento de 0.202% Cu a producir un concentrado de 2.728% Cu. Además, el *mass pull*, fue de solamente 0.8%, estando por debajo del promedio obtenido en estudios con otros minerales. Es decir, desde etapas tempranas, y en fracciones gruesas se podría desear como relave final aproximadamente

55% del alimento total a la planta, lo cual significaría ahorros importantes tanto en el Capex, como en el Opex del proyecto.

Finalmente evaluando en términos de leyes y flujos lo que significaría implementar una etapa de FPG como preconcentración de un proyecto cuya capacidad de procesamiento sería de 70,000 tpd,

se obtuvo los resultados mostrados en la Figura 9.

La Figura 8 muestra la implementación de un proyecto sin preconcentración vs la Figura 9 que muestra el mismo proyecto incluyendo una etapa de pre-concentración. Una de las principales diferencias es la ley de alimento y el tonelaje que entra-

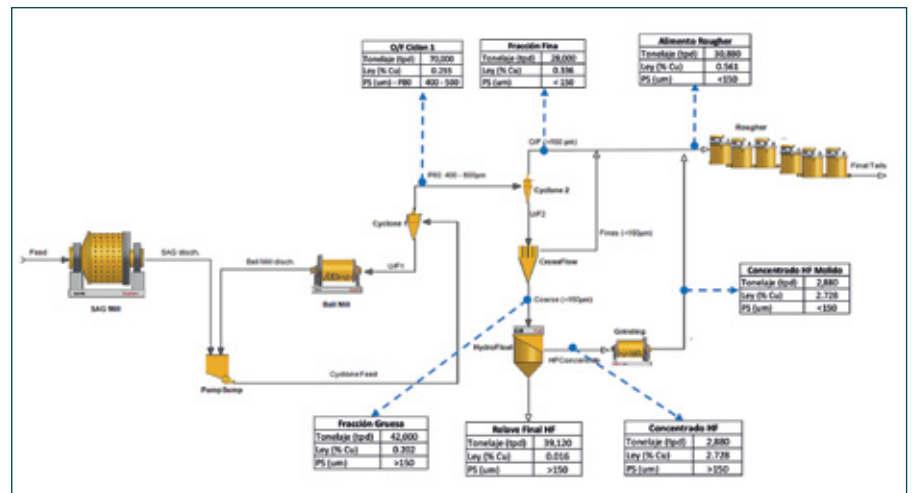


Figura 9. Esquema simplificado de etapa de molienda y flotación rougher con preconcentración.

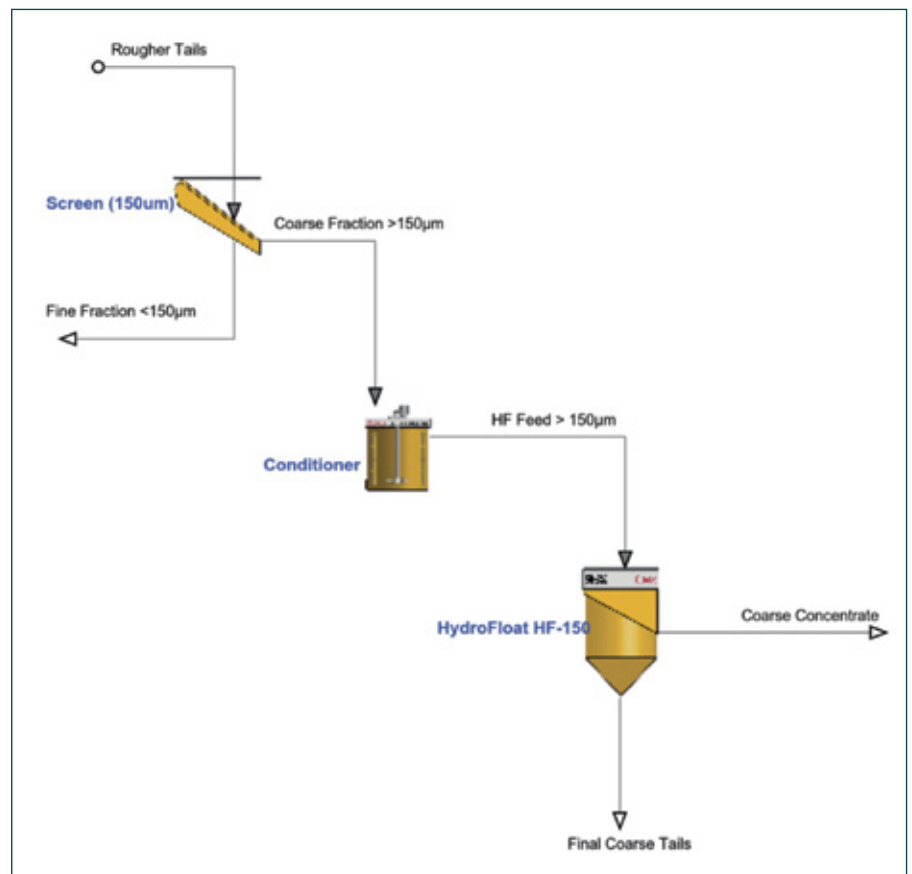


Figura 10. Esquema del procedimiento de las pruebas de FPG para la recuperación de relaves.

ría a la flotación rougher convencional. Sin preconcentración se alimentaría 70,000 tpd con una ley de 0.255% Cu, mientras que en una planta con preconcentración se alimentaría solamente 30,880 tpd con una ley de 0.561% Cu. Además, una planta con preconcentración permitiría disponer desde etapas tempranas alrededor de 39,120 tpd de relaves gruesos, los cuales podrían ser fácilmente desaguados e inclusive podría evaluarse la posibilidad de disponerlos en forma seca.

Pruebas para recuperación de relaves rougher

Uno de los problemas recurrentes en la mayoría de las plantas concentradoras es la importante pérdida de elementos valiosos en las fracciones mayores a 150 µm. Tal como se mencionó al inicio de este artículo, esta situación se debe tanto a temas relacionados a la liberación necesaria para ser recuperadas en celdas convencionales como al propio principio de operación de las celdas convencionales, las cuales debido a la turbulencia generada por sus rotores promueven la

desadherencia de las partículas gruesas que fueron colectadas en las burbujas de aire. A pesar de esto, las plantas concentradoras de cobre han ido incrementando el P80 con el que flotan, y actualmente en Perú la mayoría viene trabajando con P80 (en etapas rougher) mayores a los 150 µm, inclusive hasta 300 µm.

Este problema fue percibido en una de las plantas concentradoras de Cu/Mo de la gran minería del sur del Perú. Un muestreo permitió identificar que aproximadamente 47% del cobre y 43% del molibdeno que se pierde en los relaves rougher está contenido en tamaños de partícula mayores a 150 µm. Conociendo esto, se decidió tomar una muestra del relave rougher, y realizar pruebas de FPG para tratar de recuperar los minerales valiosos contenidos en esta fracción del relave. La Figura 10, muestra el esquema del procedimiento como se realizaron las pruebas, y la Tabla 2 presenta las leyes del relave rougher, y de cada una de sus fracciones, gruesa (> 150 µm) y fina (<150 µm).

Tabla 2. Caracterización del Relave Rougher Estudiado

Size Fraction Description	Weight (%)	Grades		
		Cu (%)	Mo (ppm)	Ag (g/t)
Coarse fraction - HydroFloat® Feed (>150 µm)	24%	0.162	107	1.1
Fine fraction (<150 µm)	76%	0.087	98	1.5
TOTAL ROUGHER TAILS	100%	0.105	100	1.4

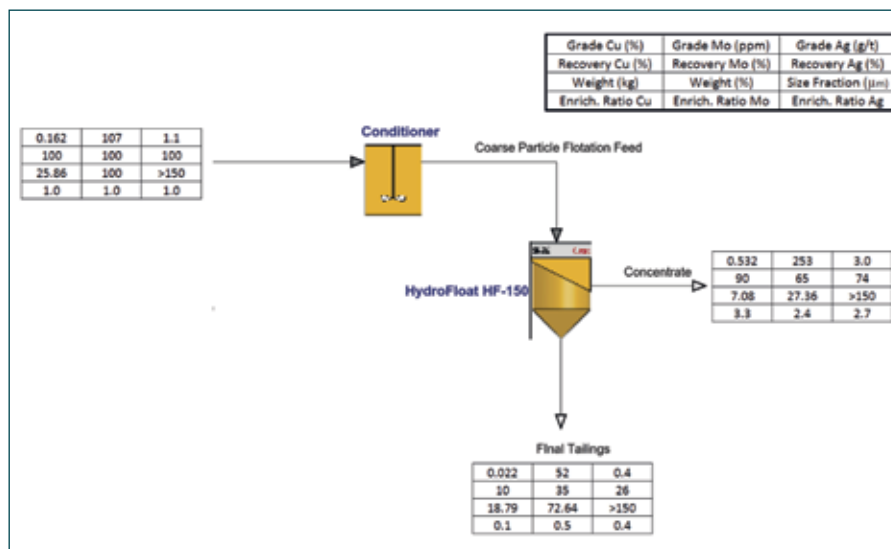


Figura 11. Resultados de las pruebas de FPG para la recuperación de relaves.

La ley del relave rougher fue de 0.105% Cu, sin embargo luego de hacer la clasificación, la ley en la fracción gruesa (> 150 µm) de este relave fue de 0.162% Cu, y con esta fracción gruesa fue con la que se realizó las pruebas de FPG. Los resultados de las pruebas se presentan en la Figura 11.

La recuperación alcanzada en la etapa de FPG fue del 90% Cu, 65% Mo y 74% Ag. El ratio de enriquecimiento 3.3 Cu, 2.4 Mo y 2.7 Ag. El *mass pull* fue 27%. La ley del concentrado producido fue de 0.532% Cu que es semejante a la ley de la cabeza fresca de esta planta. Estos resultados son alentadores, y han con llevado a realizar estudios adicionales para evaluar las diferentes mineralogías de esta planta, y en base a esto desarrollar un caso de negocio que permita evaluar la factibilidad y rentabilidad de aplicar este tipo de proceso. Con el fin de determinar cuál sería el efecto en la recuperación global de una etapa de FPG, se realizó el balance general de la flotación de relaves, lo que se presenta en la Figura 12.

La Figura 12 muestra que a través de la FPG podría ser posible recuperar el 33% del cobre que actualmente se está perdiendo en el relave rougher en esta planta. Además de recuperar el 16% del molibdeno y 14% de la plata. La flotación de partículas gruesas permitiría generar un nuevo relave rougher cuya ley de Cu sería 0.075%, en comparación a la condición actual que produce relaves con leyes de 0.105% Cu. En términos de recuperación global de la planta, esto significaría incrementar la recuperación total de cobre en más de 3 puntos porcentuales, que para una planta de la magnitud de la del estudio, significaría ventas adicionales de aproximadamente 37 millones de dólares americanos al año, considerando los precios actuales del cobre.

Conclusiones

1. La FPG presenta una serie de potenciales ventajas para optimizar y volver más rentables los proyectos y operaciones mineras. Si bien es una nueva tecnología para la flotación de minerales sulfurados de cobre, está ya se viene aplicando con éxito por más de 14 años en otras industrias (fosfatos, potasio, etc.), habiéndose validado sus diseños mecánicos, estructurales y de control.
2. Como se ha visto esta nueva celda puede ser usada en una etapa de preconcentra-

ción permitiendo obtener recuperaciones hasta de 93% Cu flotando fracciones de 600 µm x 150 µm para el caso evaluado. Para esta misma aplicación se obtuvo ratios de enriquecimiento mayores a 10. La aplicación de esta tecnología para el proyecto estudiado permitiría aumentar la ley de cabeza que se alimentaría a la flotación rougher convencional desde 0.255% Cu (sin preconcentración), a una ley después de la preconcentración de 0.561% Cu, y reducir el tonelaje alimentado a la flotación convencional de 70,000 tpd (sin preconcentración) a 30,880 tpd (con preconcentración). Además, aproximadamente 39,000 tpd de relaves se podrían disponer desde las etapas tempranas del proceso, y en una fracción gruesa (600 µm x 150 µm) que permitirá mejorar el proceso de recuperación de agua y disposición más segura de dichos relaves.

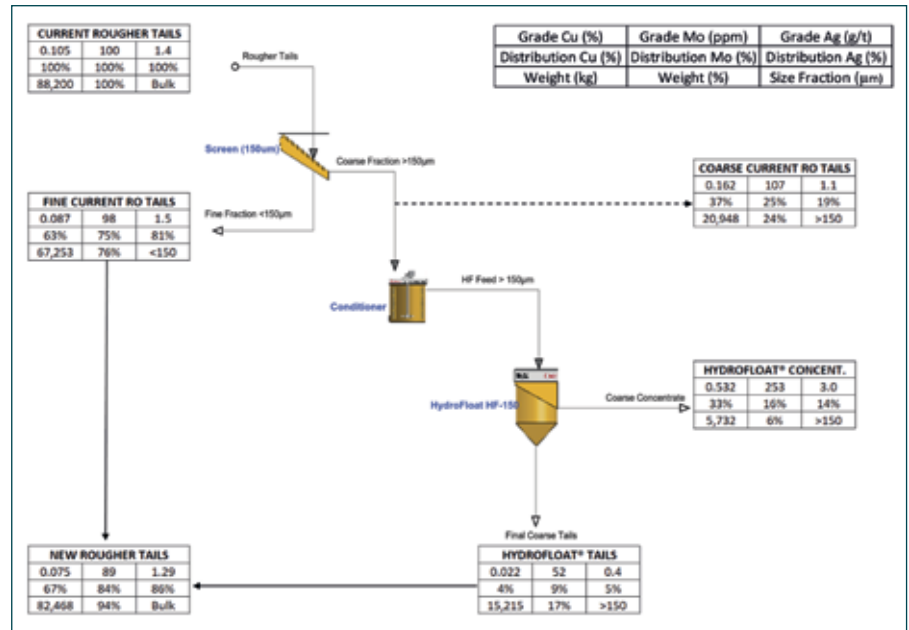


Figura 12. Balance global de la recuperación de relaves a través de un proceso de FPG.

3. Para la aplicación de recuperación de relaves, se vio que para la planta estudiada es posible recuperar el 33% del cobre que se está perdiendo en el relave rougher. Después de la clasificación del relave en fracciones mayores y menores a 150 µm, la fracción gruesa (>150 µm) tuvo una ley de 0.162% Cu, y a partir de esta se produjo un concentrado de 0.532% Cu. Se estima que una aplicación de esta tecnología posibilitaría incrementar la recuperación global de cobre en la planta en más de 3 puntos porcentuales, permitiendo obtener ventas adicionales para la compañía en aproximadamente 37 millones de dólares anuales, considerando los precios actuales del cobre.

4. La aplicación de esta tecnología deberá ser evaluada caso por caso, puesto que sus resultados dependerán del grado de liberación que tenga cada tipo de mineral, como se mencionó anteriormente, estudios indican que necesita de al menos 1% de superficie hidrofóbica expuesta para que una partícula pueda ser recuperada.

Bibliografía

Awateya, H. Thanasekaran, J. N. Kohmuench, W. Skinnera, M. Zanina. September 2013. Optimization of operating parameters for coarse sphalerite flotation in the HydroFloat fluidised-bed separator. *Minerals Engineering*, Volumes 50–51, Pages 99–105.

Barbery, G. 1984. *Engineering Aspects of Flotation in the Minerals Industry: Flotation*

Machines, Circuits and Their Simulation, in *The Scientific Basis of Flotation* (Ed: K. J. Ives), NATO Advanced Institute Services, Series E, No. 25, Martinus Nijhoff, Boston, Massachusetts, pp. 289–348.

Bulatovic, S. M. 2007. *Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: volume 1: flotation of sulfide ores*. Elsevier.

Concha, J. and Wasmund E. *Flotación de Finos y Gruesos Aplicada a la Recuperación de Minerales de Cobre*. II Congreso Internacional de Flotación de Minerales

Concha, J. June 22 – 24, 2016. *Coarse Particle Flotation: Advance towards the new flotation age*. II International Congress of Mineral Flotation. Lima, Peru.

Carmona, J.; Castillo, M.; Concha, J.; Christodoulou, L.; Wasmund, E. January 20 to 22, 2015. *Coarse gold recovery using flotation in a bed fluidized*, paper to be presented in the 47th Annual Canadian Mineral Processors Conference. Ottawa - Canada.

Concha, J.; Wasmund, E. 13 – 17 octubre, 2014. *Avances en la Flotación de Gruesos Aplicada a Minerales Sulfurados*, X Congreso Nacional de Minería. Trujillo – Peru.

Gaudin, J. Grob and H. Henderson. 1931. "Effect of Particle Size in Flotation", Technical Publication No. 414, AIME, New York, NY, USA.

Gontijo, C., Fornasiero, D., & Ralston, J. 2007. The limits of fine and coarse particle flotation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87, 739–747.

Jameson, G. 2013. *Size matter Coarse and quick flotation can reduce costs*. The AusIMM

Guillaume Delprat Distinguished Lecture Series.

Kohmuench, J.N., Mankosa, M.J., Yan, E.S., Wyslouzil, H., & Christodoulou, L. 2010. *Advances in coarse particle flotation – Industrial minerals*. Proceedings 25th International Mineral Processing Congress, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Victoria, Australia, pp. 2065–2076.

Kohmuench, J.N., Thanasekaran, H., & Seaman, B. 2013. *Advances in coarse particle flotation: Copper and gold*. Proceedings AusIMM MetPlant Conference, Perth, Western Australia, 11 pp.

Laskowski, J. 1989. *Frothing in Flotation*, Gordon and Breach Publishers, New York, N.Y. 337 pp.

Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V., & Thorne, C.G. 1981. *Mineral and Coal Flotation Circuits: Their Simulation and Control*. Elsevier Publishing, Amsterdam, 291 pp.

Mankosa, M. J., & Kohmuench, J. N. 2003. *Applications of the HydroFloat air-assisted gravity separator*. In *Advances in Gravity Concentration* (Honaker, R.Q. and Forrester, W.R., Eds.). Littleton, CO: SME, pp. 165–178.

Mankosa, M.J., Kohmuench, J.N., Christodoulou, L., & Luttrell, G.H. 2016. *Recovery of values from a porphyry copper tailings stream*. Proceedings XXVIII International Mineral Processing Congress, Québec City, QC, Paper 457, 10 pp. (in press).

Miller, J.D., Lin, C.L., Wang, Y., Mankosa, M.J., Kohmuench, J.N., & Luttrell, G.H. 2016. *The significance of exposed grain surface area in coarse particle flotation of low-grade gold ore with the HydroFloat technology*. Proceedings XXVIII International Mineral Processing Congress, Québec City, QC, Paper 455, 10 pp. (in press).