



Sobre el costo y el valor de la geometalurgia

Peter Amelunxen

Aminpro Perú, Av. Luis Carranza 1921, Lima, Perú

1. Introducción

La geometalurgia ha existido por más de 20 años, pero el término "geometalurgia" es una palabra relativamente nueva. Está de moda para describir la integración de la geología, ingeniería de minas, e ingeniería metalúrgica, en un enfoque más estructurado y global para la optimización de la minería y el procesamiento de minerales. Cuando se habla de geometalurgia, es importante prestar atención a la palabra "optimización", porque "optimizar" algo es un criterio relativo y por lo tanto el marco de referencia — ese estado de cosas subóptimo, pre-geometalúrgico — debe estar claramente definido. Lamentablemente esto rara vez ocurre en nuestro negocio y por esta razón siempre uno debe hacerse de abogado del diablo cuando oye que algo está "optimizado". ¿Qué cosa fue optimizada? ¿Cómo fue optimizada? ¿Cómo sabemos que fue optimizada? ¿Cuáles fueron los criterios y restricciones de la optimización?

Otro término para prestarle atención es "bancabilidad". En 2013, AMIRA Internacional emprendió una investigación sobre la geometalurgia y, entre otras, llegó a la conclusión que el término "bancable" parece significar algo diferente para cada empresa minera. En el sentido estricto, la palabra significa que algo es "aceptable para o por un banco", y es de uso frecuente en la industria del arte y el entretenimiento para dar a entender que ciertas estrellas, artistas, o intérpretes garantizan ganancias y éxito. En la minería, sin embargo, el éxito de una planta concentradora es dependiente no de los caprichos del público, sino de las propiedades de un cuerpo mineral — propiedades que son fácilmente medibles por una variedad de medios científicos.

El estándar canadiense NI 43-101, en sus normas y políticas, proporciona ciertas pautas acerca de lo que se requiere para las entidades que cotizan en bolsa. Sin embargo, en ninguna parte se proporciona una orientación muy explícita de lo que es la "bancabilidad" con respecto a los programas o metodologías de pruebas,

la elección de laboratorio o de la empresa de ingeniería, o al enfoque del modelamiento. Pero aunque la norma NI 43-101 implícitamente provee flexibilidad, la geometalurgia aún no es arte. Es ciencia aplicada y, como tal, los geometalúrgicos deberían acostumbrarse a esos términos y frases estadísticos, como la *validación de modelos*, la *precisión*, el *sesgo*, y el *error estándar*, para describir la calidad de su trabajo. El prestar atención a estos términos y principios ayudaría en gran medida a que un proyecto en general, y no sólo su parte geometalúrgica, sea "bancable".

Así que si no podemos definir claramente el problema a ser optimizado, porque ignoramos lo que no sabemos y no podemos adoptar — listo para su uso — un ámbito de trabajo arbitrariamente bancable, ¿cómo podemos determinar el adecuado alcance o calcular el valor de un programa geometalúrgico propuesto? Una forma de hacer esto es a través de estudios de casos — ejemplos de valor que se han creado y que se midieron después de haber completado (o no completado) un programa de geometalurgia. Resulta que el valor creado por los programas de geometalurgia es muchísimo más alto que el costo del propio programa de geometalurgia.

En este trabajo se examinan cuatro estudios de caso.

2. Caso 1: Separación de molibdeno

Las figuras 1 y 2 muestran dos tipos de molibdenita. La primera (Fig. 1) proviene de un pórfido de Cu-Mo con una ley promedio de ~0.02% de Mo, donde la molibdenita ocurre en vetillas con cristales de tamaño mediano a grande. La segunda (Fig. 2) proviene de un pórfido de Cu-Mo con una ley promedio de ~0.1 % de Mo — cinco veces más alta —, pero con una molibdenita extremadamente fina y diseminada, invisible a simple vista.



Figura 1. Muestra con molibdenita de un yacimiento de tipo pórfido de Cu-Mo en el suroeste de los Estados Unidos. La ley promedio del depósito es de $\sim 0.02\%$ Mo, que se produce principalmente en vetillas que contienen molibdenita con tamaño de grano de cristal de mediano a grande.



Figura 2. Pedazo de núcleo de perforación (testigo) de un yacimiento de tipo pórfido de Cu-Mo en el Norte de Chile. Esta muestra contiene $\sim 0.1\%$ Mo, pero el molibdeno es tan extremadamente fino y diseminado que es invisible a simple vista.

Estas diferencias mineralógicas juegan un papel profundo en el diseño del circuito de separación del molibdeno. La molibdenita norteamericana de grano grueso (Fig. 1) es fácilmente flotable en tamaños de remolienda muy gruesos y a niveles elevados de pH. La molibdenita de grano fino de Chile (Fig. 2) requiere tamaños de molienda muy finos, tiempos de residencia de flotación extremadamente largos, control activo de pH con un sistema de inyección de CO₂, y múltiples etapas de acondicionado de alta intensidad/energía.

Para el diseño de la planta de molibdeno, el tamaño de grano de la molibdenita no es el único desafío. Minerales naturalmente hidrofóbicos tales como talco, azufre, carbón, pirofilita y demás arcillas, han presentado problemas para muchos proyectos de plantas de molibdeno reales y potenciales, incluyendo a las de Boddington, Grasberg, Collahuasi, Kennecott, Chino, y otras. El problema se agrava por las dificultades para obtener suficientes muestras para pruebas metalúrgicas, sobre todo en la etapa *greenfields*, y con frecuencia hay una escasez crónica de información geometalúrgica disponible para el diseño de plantas de molibdeno. Como resultado, la mayoría de las plantas de molibdeno, a lo largo de la historia, han sido diseñadas sin ningún tipo de pruebas metalúrgicas.

Esto ha comenzado a cambiar en los últimos años. Los nuevos desarrollos en la mineralogía cuantitativa han reducido los costos de QEMSCAN y DRX al punto en que ahora es económico revisar, de manera rutinaria, y detectar cantidades de trazas de talco, carbón, y filosilicatos en los concentrados de sulfuros de grado intermedio y bajo, concentrados como los producidos utilizando algunas de las tecnologías nuevas de bajo costo que están emergiendo. El método se está probando actualmente para un proyecto de pórfidos grandes en Chile, y si tiene éxito, el largo y difícil arranque de una planta de molibdeno, y los esfuerzos de puesta en marcha que conocemos actualmente, probablemente sean pronto cosa del pasado.

Costo: \$ 1 millón para análisis mineralógicos, pruebas de flotación *rougher* con análisis DRX de concentrados, y pruebas cinéticas de separación de molibdeno (incluyendo pruebas piloto para producir concentrados).

Valor: Mínimo 1 año de producción de una planta de molibdeno (~ \$ 100 millones para 100 k TPD @ 0.02 % Mo).

3. Caso 2: Estudio comparativo HPGR

El modo de ruptura de partículas que ocurre en un molino SAG es significativamente distinto al que ocurre en un molino de bolas, y por esta razón necesitamos pruebas de dureza distintas para la molienda de bolas y para la molienda SAG. Este fenómeno, a escala de planta, produce variabilidad del cuello de botella en el proceso, dependiendo de las propiedades de la partícula mineral. Por ejemplo, si el mineral es duro o grueso, se pueden crear cuellos de botella a nivel de los molinos SAG, y si son minerales más finos y/o suaves se pueden crear cuellos de botella en los molinos de bolas. Debido a que el consumo de energía en un molino de bolas es constante

(comparado con el del molino SAG), los cuellos de botella a nivel de los molinos SAG pueden llevar a que el molino de bolas tenga un excesivo consumo de energía, consumo de metal, sobre-molienda, y otras formas de pérdida de eficiencia.

Los circuitos HPGR, por otro lado, son menos sensibles a cambios en la dureza del mineral, ya que los molinos de bolas son disociados del circuito superior por el uso de grandes tolvas de almacenamiento de mineral (sin mencionar la estabilidad de rendimiento del equipo de trituración). Como resultado, la variabilidad de la dureza de los minerales constituye un costo de penalidad significativo que deberá ser aplicado a los circuitos de molienda SAG cuando se evalúe la economía relativa de diferentes configuraciones de circuitos de molienda. Sin embargo, los problemas son usualmente ignorados, ya que la mayor parte de estudios comparativos de HPGR se basan en parámetros promedio de dureza de los minerales.

En un documento anterior (Amelunxen, 2011), ofrecimos la magnitud estimada de la penalidad por una operación típica usando métodos de simulación Monte Carlo y datos de los circuitos de comunicación de HPGR, molienda autógena y molienda semi-autógena de las plantas de Freeport-McMoRan. El estudio de un caso reciente de un proyecto de sulfuro de 96 k t/d se presentó para ilustrar el concepto [2]. Se descubrió que usando un enfoque geometalúrgico para cuantificar el efecto de la variabilidad de la dureza de los minerales en el rendimiento de los circuitos, el valor actual neto (VAN) de circuitos HPGR sobre los de circuitos de molinos SAG incrementaba de \$ 33 millones a favor del proceso SAG a \$ 84 millones a favor del proceso HPGR, revirtiendo efectivamente la decisión original de elegir los circuitos de molino SAG para el caso de dureza fija.

Costo: \$ 500,000 para perfiles de dureza.

Valor: \$ 84 millones de incremento en el valor presente actual.

4. Caso 3: Método de ensayo de plata

Seleccionamos este caso no porque sea un buen ejemplo de costo y valor de programas geometalúrgicos, sino porque nos ofrece una visión sobre cómo algunos problemas técnicos menores y algunas decisiones relacionadas con métodos geometalúrgicos pueden impactar significativamente en el pronóstico económico de una concentradora.

La plata es un subproducto común de crédito en varios depósitos de pórfido en las Américas. Normalmente tiene valor solo si se puede concentrarla en más de 25 ppm en los concentrados de sulfuros. La ley de plata en el mineral es normalmente medida a través de espectroscopía de absorción atómica al mismo tiempo que el cobre, hierro, molibdeno, y otros metales bases. El límite de detección y precisión de la mayor parte de los métodos de ensayo está normalmente alrededor de 1 ppm para procedimientos de ensayos estándares, así que una cabeza de plata de 2 ppm debería tener un grado de error de medición de ~1 ppm. Esto crea un problema — imagínense reportar una cabeza de cobre con una precisión de ± 50 %... El problema se

vuelve especialmente fuerte cuando se analiza el relave en las pruebas de flotación, el cual con suerte tendrá un contenido de plata mucho menor que la cabeza.

Para un proyecto reciente de pórfido de Cu-Mo en Sudamérica, había suficiente plata presente como para que el valor de la plata en el depósito fuese aproximadamente igual al del molibdeno, pero como los procedimientos estándares del ensayo en plata se usaron en el programa geometalúrgico, la resolución del pronóstico de recuperación de plata fue cuestionada. Después de discutirlo con el equipo del dueño, se tomó el acuerdo de repetir los ensayos de plata para todas las pruebas de flotación usando una técnica de digestión de plata de 5 gramos, la cual incrementaría la precisión y reduciría el límite de detección a 0.1 ppm. ¿El resultado? La recuperación de plata incrementó de 6 a 10 % debido a la corrección de errores de redondeo de los ensayos de cabeza y relaves.

Costo: El costo total del programa de re-ensayos fue menos de \$ 5 mil dólares.

Valor: Para el proyecto, el impacto resultó en un incremento en el modelo de producción de plata de más de 15 millones de onzas a lo largo de la vida de la mina, equivalente a un incremento VAN de más de \$ 150 millones.

5. Caso 4: Programa no geometalúrgico

Este caso bien documentado se refiere a una operación de pórfidos de Cu-Mo que fue diseñada y construida únicamente sobre la base de estudios de plantas piloto. Los estudios en planta piloto fueron basados en grandes muestras puntuales recogidas de porciones que se estimaba representar la dureza promedio de mineral para cada litología principal. Desafortunadamente, el depósito fue más variable que lo que se creyó inicialmente, y la dureza del mineral fue mayor durante los primeros años de operación. El molino SAG se convirtió en el cuello de

botella del proceso (véase el Caso 2 más arriba), haciendo que los molinos de bolas muelan en exceso. El producto más fino creaba graves problemas en los circuitos de relaves y sedimentación. Como resultado, el propietario estuvo obligado a comprometer una suma adicional de \$ 180 millones para mejorar el circuito de molienda a fin de lograr los objetivos de diseño, y un adicional de \$ 140 millones en inversiones de capital para mejoras de los circuitos de relaves y sedimentación.

Costo: El costo total de geometalurgia para este proyecto fue de cero, debido a que la planta fue diseñada sobre la base de estudios de plantas piloto "bancables".

Valor: La pérdida de valor para los accionistas debido a inversiones de capital fue de aproximadamente \$ 320 millones. Se podría argumentar que estos gastos de capital sólo se aplazaron por varios años, ya que debieron haber tenido lugar durante la fase de diseño si se hubiera emprendido un programa de geometalurgia adecuado. Esto es cierto, pero no toma en cuenta la posibilidad de que el tamaño o la selección de otros componentes de la planta de procesos podrían haber sido ajustados para reducir al mínimo el impacto del mineral más duro de los primeros años, y en todo caso no considera el costo de la pérdida de ingresos.

Referencias

- Amelunxen, P., Meadows, D. 2011. Not another HPGR trade-off study!. *Minerals and Metallurgical Processing*, v. 28 (1: February).
- Amelunxen, P., Mular, M.A., Vanderbeek, J., Hill, L., Herrera, E. 2011. The effects of ore variability on HPGR trade-off economics. *Proceedings, Conference on International Autogenous and Semi-autogenous Grinding Technology (SAG 2011)*, Vancouver, British Columbia, Canada.