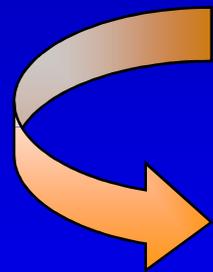




Estudio de casos



Mina → Planta

Fundamentación

- Las operaciones mineras y de proceso involucran varias etapas, cada una con sus propios requerimientos de eficiencia y gestionadas como centros de costos separados, a pesar de su interdependencia. Sin embargo, en algunos casos las condiciones requeridas para optimizar algunas de estas etapas puede ser contraproducentes para la optimización de otras y por lo tanto, los óptimos locales no necesariamente conducen al óptimo global de la faena que es el verdadero objetivo. Cada área tiene un presupuesto y un objetivo de producción y su eficiencia es considerada satisfactoria si se está dentro de presupuesto y se alcanza los objetivos de producción, en vez de orientarse a maximizar la rentabilidad global de todo el negocio.
- La planificación minera y el procesamiento de minerales son usualmente vistas como dos áreas desconectadas. El área minera construye sus modelos económicos considerando la planta como un parámetro constante (tonelaje, recuperación promedio y costo unitario). El área de proceso planifica sus rendimientos asumiendo un plan minero dado (leyes, mineralogía, moliendabilidad, etc.). La alternativa más rentable maximizará el valor presente neto, por medio de un plan minero – metalúrgico que defina producciones y recuperaciones por períodos, cambiando límites de la mina redefiniendo secuencias mineras, con la finalidad de alcanzar leyes, moliendabilidades, mineralogía y costos requeridos respaldando los valores presentes netos comprometidos.

Fundamentación

- La tronadura tiene un gran impacto en el rendimiento del complejo mina – planta, que va mucho más allá de la eficiencia en el carguío y transporte de minerales, ya que incide significativamente en las etapas posteriores de reducción de tamaño (chancado y molienda), tanto en la capacidad de tratamiento como en el rendimiento económico de dichas operaciones. El primer efecto y más evidente es el de la distribución de tamaños producida y enviada a la planta de procesamiento. El segundo, menos evidente pero igualmente importante, es la generación de fallas y grietas en el mineral que redundan en su debilitamiento y mayor facilidad de fragmentación en las etapas siguientes.
- Los procesos de conminución son altamente intensivos en energía e inciden significativamente en los costos de capital y operacional de la faena, por lo que cualquier acción que optimice su operación tiene un fuerte impacto en la economía global. Además de los efectos que la tronadura provoque en ellos, dichos procesos se combinan de una manera y en una secuencia no necesariamente óptima. Hasta qué tamaño llegar con el chancado y empezar la molienda no es un problema totalmente resuelto hasta ahora. En la actualidad la combinación: chancado primario – prechancado – molienda SAG – chancado de pebbles – molienda de bolas, no está cien por ciento definida sino que, por el contrario, está en permanente análisis.

Fundamentación

- En la secuencia de fragmentación de minerales, cada etapa tiene sus propios atributos y requerimientos de eficiencia. Sin embargo, en algunos casos optimizar una etapa puede ser contraproducente para otra, por lo que el ideal es encontrar aquellas condiciones para cada etapa que permitirían alcanzar un óptimo global. Este enfoque holístico para el complejo mina – planta en la industria minera, debería conducir a maximizar beneficios ya sea por aumento de la capacidad de tratamiento y/o por la reducción en los costos. El número de etapas, su complejidad e interacciones hacen que cualquier intento por optimizar su operación basado en un análisis en terreno y por intento y error sea muy complejo y caro.
- Existe significativa evidencia que la tronadura afecta los resultados de las operaciones de chancado y molienda y que permite alcanzar importantes ahorros en dichas operaciones. En la mayoría de los casos se trata de estudios sobre los efectos causados en molienda SAG debidos a variaciones en los parámetros de la tronadura, pero existe también estudios que relacionan a la tronadura con el chancado primario y al chancado primario con la molienda SAG.

Fundamentación

- En diversos estudios se ha comparado los consumos y costos asociados a la conminución realizada en las 3 formas usuales: tronadura, chancado y molienda. El escenario global es el siguiente:

Operación	Consumo [kWh/t]	Costo [US\$/t]
Tronadura	0,2 – 0,3	0,1 – 0,2
Chancado	0,6 – 2,0	0,1 – 0,8
Molienda	13,6 – 20,0	1,0 – 4,0

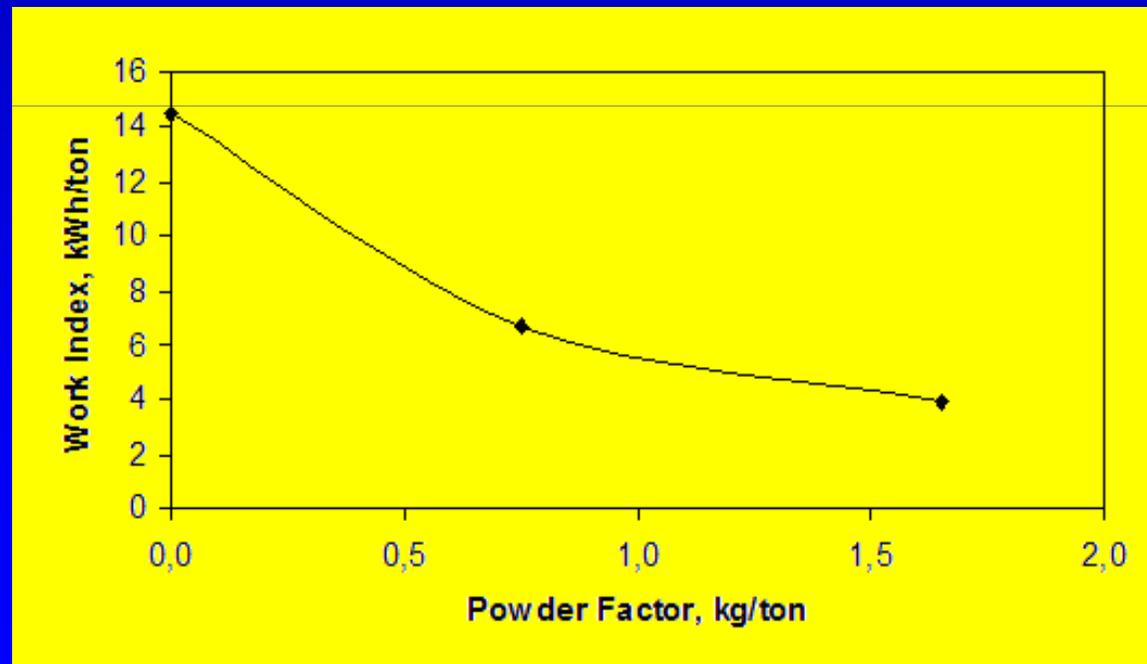
Fundamentación

• Considerando estos datos de consumo y costos, en un estudio se incrementa el factor de potencia de los explosivos, reevaluando los consumos y costos parciales y globales:

Operación	Consumo [kWh/t]		Costo Energía [US\$/t]	
	Base	Modificado	Base	Modificado
Tronadura	0,2	0,3	0,09	0,12
Chancado	0,8	0,6	0,06	0,04
Molienda	19,4	13,6	1,35	0,95
Total	20,4	14,5	1,50	1,11

Fundamentación

Los fragmentos van siendo cada vez más resistentes en la medida que avanza su fragmentación, debido a que contienen menos grietas naturales o inducidas por la tronadura. Hay evidencia que los índices de reducción de tamaño (W_i) se reducen en forma significativa por tronaduras más intensas. Sin embargo, hay trabajos que sugieren que el debilitamiento del mineral se aprovecha en la etapa de chancado mientras que hay poco cambio a nivel de la molienda.



Fundamentación

- Un factor de efectividad en la conminución es la liberación de minerales. Un tema no resuelto es si la creación de microfracturas con la tronadura, alrededor o a través de los granos de mineral, podría incrementar la liberación y por ende la recuperación.
- Uno de los enfoques más desarrollados hasta ahora es el del Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), de la Universidad de Queensland, Australia. Este enfoque denominado Mine to Mill se basa principalmente en el uso de simuladores, los que necesitan como parámetros de entrada las características del mineral y de la operación. En general se basa en la zonificación del yacimiento en estudio, la determinación de la granulometría óptima de alimentación a molienda, el tamaño de bolas y el nivel de llenado óptimo de los molinos; buscando optimizar el proceso completo mina – planta.

Fundamentación

❖ *Estudios en faenas mineras*

Se ha realizado numerosos estudios en diferentes faenas mineras en el mundo, algunos de los cuales serán analizados en profundidad en los estudios de casos de este curso. De entre aquellos efectuados en Chile en los últimos años, disponibles públicamente, se destacan los siguientes:

- En la División Chuquicamata de CODELCO – Chile se logró el aumento en la productividad tanto del carguío como de la molienda, mediante la disminución de la granulometría del mineral entregado por la mina con la aplicación de tronadura de alta energía. En este estudio se encontró que al usar explosivos de alta velocidad de detonación, aunque se aumente el costo de perforación y tronadura, se produce un mejoramiento global mucho más significativo al lograr incrementar la capacidad de chancado y molienda de la planta en 2 millones de toneladas al año y disminuir el consumo de energía específico en 1 kWh/t.

Fundamentación

- En la mina de la empresa Doña Inés de Collahuasi, se evaluó el efecto del factor de carga de explosivos en la capacidad de molienda en la planta concentradora. Se encontró que un aumento del factor de carga de hasta un 18% por sobre el estándar genera, para determinados tipos de alteración del mineral, un aumento en la capacidad de molienda de entre un 5 y un 11%.
- En Minera Los Pelambres se analizó también estrategias del tipo de la mina al molino buscando aumentar el rendimiento de la planta. La principal conclusión del estudio es que el rendimiento de la molienda SAG aumenta entre 6 y 8% con respecto a la capacidad de diseño, cuando se recibe una granulometría de alimentación más fina, lo que paga con creces el aumento marginal de los costos mina que la fragmentación más fina demanda. La mayor fragmentación se logra en la tronadura (factor de carga, malla de disparo) y en el chancado primario (ajuste del setting y operación a cámara llena).

Fundamentación

- En minera Escondida también se ha trabajado buscando relacionar las características de los minerales y los índices de la operación minera con la molienda y su consumo de energía específica. En este estudio, se ha encontrado que el factor de carga en la tronadura es la variable más relevante, junto con los índices de moliendabilidad del mineral (W_i y SPI) y la fracción $-4'' + 3''$ del mineral de alimentación, en determinar la energía específica requerida en molienda SAG.
- En trabajos de naturaleza semejante al anteriormente citado, se ha modelado los índices de trabajo en molienda en función de características litológicas o mineras, en las Divisiones Andina y Chuquicamata de CODELCO – Chile, respectivamente.

Fundamentación

- En la División Los Bronces de Anglo American Chile, se desarrolló un trabajo en que se estableció aquellos parámetros que afectan la capacidad de tratamiento de los molinos SAG, generando planes de acción para controlarlos y aumentar así la producción de la planta. En este estudio se encontró que la granulometría de alimentación es la variable más importante, por sobre incluso que la dureza del mineral. Dicha granulometría es controlada por dos sistemas de conminución: la tronadura y el chancado primario, siendo en la primera donde se genera la mayor cantidad de finos ($< \frac{3}{4}$ ”), que aumentan la capacidad en molienda SAG. Otros factores que también inciden son: el tipo de roca, los patrones estructurales, el factor de carga, la malla de perforación, la secuencia de salida y el tipo de explosivo. Como resultado del trabajo se propuso cambios de malla en la tronadura para las zonas minerales y un aumento en el factor de carga. Con esto se produce un mayor costo en la mina pero con un aumento global de ganancias por mayor producción en molienda que lo supera en varias veces.

Estudio de caso Mina → Planta

- ☺ **Highland Valley Copper (HVC)** es una operación a rajo abierto, de cobre porfídico, ubicada en British Columbia, Canadá. La mina consta de dos rajos con 3 chancadores primarios y la molienda comprende 3 molinos SAG y 2 molinos autógenos en paralelo.
- ☺ Desde 1977 HVC ha estado midiendo la dureza de la roca, relacionándola con la molienda y geología la ha modelado generando un mapa de contorno.
- ☺ En 1996 se incrementó el diámetro de perforación para reducir costos de perforación y tronadura, cambiando la granulometría de la fragmentación y causando una lenta y sostenida declinación en la molienda. Mina y planta operaban como unidades separadas. Aunque el problema no era evidente, perder cerca del 10% de la capacidad de molienda fue muy significativo.
- ☺ En 1997 HVC integró la gestión, creando las condiciones para el estudio de las propiedades del mineral desde la geología hasta la molienda. Los resultados se presentan en el trabajo adjunto y sus conclusiones permiten plantear algunas interrogantes:

- (a) **¿Gastar más dinero en la mina para una mejor fragmentación incrementa los beneficios para HVC como un todo?.**
- (b) **¿Conviene saber cuándo cambiará el mineral y por cuánto tiempo?.**
- (c) **¿Prefiere cada molino una distribución de tamaños en especial?.**

Caso I

Estudio de caso Mina → Planta

☺ **Marandoo** es una operación a rajo abierto, de mineral de hierro, ubicada en Western Australia. El mineral es altamente heterogéneo y se le clasifica en dos tipos: “duro” y “blando”, ya que responden distinto tanto en la tronadura como en la planta.

☺ En 1997 se desarrolló una campaña en Marandoo para investigar la influencia del tipo de mineral y de la granulometría de alimentación, y en particular el efecto de la tronadura, sobre la razón gruesos / finos (< 1 mm) del producto de la planta. Se monitoreó 3 tronaduras de diferentes zonas del yacimiento, así como el tratamiento de sus productos a través de la planta. Muestras de rocas de cada tronadura y de cada campaña en la planta fueron seleccionadas y caracterizadas en una serie de pruebas.

☺ Con los resultados de la campaña, se simuló con modelos los efectos causados por la tronadura y el tipo de mineral sobre la razón gruesos / finos. Los detalles se presentan en el trabajo adjunto, del que se desprenden las siguientes interrogantes:

(a) ¿Se puede predecir mejor la fragmentación del mineral por tronadura y chancado, al separarlo por tipos según su dureza?.

(b) ¿Es posible deducir modificaciones a la tronadura a partir de análisis vía simulación con modelos?.

(c) ¿Afectará positivamente el uso de explosivos de baja densidad y baja velocidad de detonación a la razón gruesos / finos?.

Caso II

Estudio de caso Mina → Planta

- ☺ **Mina Los Bronces** es una operación a rajo abierto, de cobre porfídico, ubicada a 70 km al noreste de Santiago. El mineral de alta ley, una vez chancado, es enviado a la planta de molienda que consta de 2 molinos SAG y 3 molinos de bolas, en 2 líneas.
- ☺ En este trabajo se buscó determinar los parámetros que afectan la capacidad de la molienda SAG y proponer planes de acción para controlarlos y aumentar la producción.
- ☺ Se determinó que a la capacidad de molienda SAG la afectan principalmente 2 variables: la granulometría (en especial) y la dureza; siendo la primera de ellas producto de la interacción de: tipo de roca, patrones estructurales, frecuencia de fracturas, malla de perforación, tipo de explosivo, factor de carga y secuencia de salida de la tronadura.
- ☺ Se propuso cambios de malla para las diferentes zonas, uso de detonadores electrónicos y un mayor factor de carga del 22 %. Aunque aumenta el costo mina, se incrementa las ganancias por mayor producción. El trabajo adjunto plantea algunas preguntas:

- (a) **¿El aumento de beneficios para Los Bronces justifica realmente aumentar los costos de la mina?**
- (b) **¿Qué rol juega el chancado primario?**
- (c) **¿Existirá una granulometría óptima para alimentar a un molino SAG?**

Caso III

Estudio de caso Mina → Planta

- ☺ **Porgera** es una operación a rajo abierto, de mineral de oro, ubicada en Papua Nueva Guinea. El mineral es enviado al chancado primario o se acopia, y una vez chancado se envía a molienda, la que consta de 2 molinos SAG y 3 molinos de bolas.
- ☺ El estudio *mine to mill* del JKMRC buscó maximizar la molienda SAG, modificando la granulometría de alimentación con ajustes en la tronadura y el chancado primario.
- ☺ Se estudió sólo el mineral más duro de Porgera mediante 3 campañas en las que se analizó los efectos de la tronadura y de la conminución. Se realizó un análisis mediante simulación, determinándose las condiciones que favorecen la molienda SAG.
- ☺ Se estableció la conveniencia de incrementar el factor de carga en la tronadura apretando los patrones de perforación, así como de operar el chancado primario al menor setting posible. Estos cambios produjeron un incremento del 15% en la tasa de molienda de este mineral. Se adjunta el trabajo y de su contenido surgen algunas interrogantes:

- (a) ¿Se puede establecer qué parte del aumento de tonelaje se debe a cambios en la molienda y qué parte a modificaciones en la tronadura?.
- (b) ¿Es sensato modificar la tronadura ante resultados de simulaciones?.
- (c) ¿Qué rol juega el chancado y la abertura de la parrilla de los SAG?.

Caso IV

Estudio de caso Mina → Planta

- ☺ **Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM)** es una operación a rajo abierto, de mineral de oro, ubicada en Australia. El mineral tronado pasa por chancado primario y opcionalmente por secundario, y se envía al acopio de alimentación a molienda SAG.
- ☺ En este trabajo, mediante modelos ajustados con datos de la faena, se simuló las granulometrías resultantes de las operaciones de tronadura y conminución involucradas.
- ☺ Al simular cambios en la tronadura se encontró que aumentos en el factor de carga y en la velocidad de detonación, producen granulometrías más finas, con pocos cambios en los gruesos. La simulación de las operaciones de conminución muestra que en el chancado primario se reducen las diferencias granulométricas, siendo aun significativas en los rangos fino e intermedio, y en la molienda SAG se logra aumentos de tonelaje.
- ☺ Con los resultados del estudio se afirma que la simulación de las operaciones involucradas permite explorar las interacciones mina planta e indicar mejoras potenciales para una faena. Se adjunta el trabajo y se plantean algunas interrogantes:

(a) ¿ Es sensato modificar la tronadura ante resultados de simulaciones?.

(b) ¿Existe un límite en las mejoras alcanzables mediante cambios en la tronadura?.

(c) ¿ Qué rol juega el chancado primario y podría jugar el secundario?.

Caso V

Estudio de caso Mina → Planta

☺ **Los Pelambres** es una mina de cobre a rajo abierto, ubicada en la IV Región. La molienda consta de 2 líneas compuestas por 1 molino SAG y 2 molinos de bolas.

☺ En el estudio se estableció la granulometría óptima de alimentación al SAG, para aumentar su rendimiento. Buscando obtener dicha granulometría, se modificó la tronadura, cambiando el tipo de explosivo y los tacos y la operación del chancado primario. Se analizó cuánto inciden la segregación en el acopio y los tipos litológicos y sus alteraciones, y se estudió también los límites en el aumento del tratamiento en molienda causados por la molienda secundaria.

☺ Se estableció una gran correlación entre la capacidad de tratamiento SAG y la razón de fineza de la alimentación. Se evaluó el impacto de los cambios tanto en el costo mina como en la tasa de molienda. Estos cambios produjeron un incremento de entre un 6 y un 8% en la producción y, aunque aumentó el costo mina, se incrementó las ganancias por mayor producción. El trabajo adjunto plantea algunas preguntas:

(a) ¿Gastar más dinero en la mina para una mejor fragmentación incrementa los beneficios para Los Pelambres como un todo?.

(b) ¿Qué rol juegan las distintas litologías y sus alteraciones?.

(c) ¿Existirá una granulometría óptima para alimentar a un molino SAG?.

Caso VI

Diploma en geo-minero-metalurgia