

LA CONMINUCIÓN COMO UNA OPERACIÓN DE TRANSFERENCIA MACROMOLECULAR DE MASA

Alexis Yovanovic

Ingeniero Civil Químico, Universidad Católica del Norte, Chile (1973)

Ottimah & Modelo Operacional – Otimização e Controle Processos Minerais

Rua Padre Marinho, 37 – 13º andar, Santa Efigênia CEP 30140-040

Belo Horizonte-MG, Brasil - (55 31) 3241 6295 ayovanovic@uai.com.br

RESUMEN

El *Modelo Operacional* consiste en una nueva interpretación macrofenomenológica para las operaciones de tratamiento mecánico de minerales, en general, con base en la *Transferencia Macromolecular de Masa*, materia que podría futuramente ser incorporada al plan de estudios de las carreras de ingeniería química, metalúrgica y de minas. Este nuevo abordaje propone una analogía entre los procesos químicos de transferencia de masa (moleculares) y algunos de los procesos mecánicos de beneficio mineral, configurando una nueva base teórica para estos procesos y, en el caso particular de este trabajo, para las operaciones unitarias de conminución.

El *Modelo Operacional* define el *Índice Base de Conminución* (IB) que el material precisa para ser transferido de la fase Alimentação al Produto, y que es la propiedad macrofenomenológica posible de obtenerse a partir del laboratorio, mediante procedimiento experimental específico definido por el *modelo*, en testes en planta piloto o en experiencias comparativas con molinos industriales. La roca es estudiada como una disolución en fase sólida de la substancia de interés, dentro de una solución de ganga. El grano es la unidad macromolecular básica del transporte entre las fases Roca y Pulpa (producto).

El Autor editó recientemente, en Brasil, el libro: *Ingeniería de la Conminución y Molienda en Molinos Tubulares* (400 pág. - en portugués). Anteriormente, en 2004, fue editado el libro: *Ingeniería de la Concentración de Masa por Flotación* (300 pag. – en portugués), describiendo en detalle la teoría sobre *Transferencia Macromolecular de Masa* en operaciones de beneficio mineral, cuyo resumen es presentado en este trabajo.

* Este Artículo se complementa con otro, presentado en este mismo Congreso PROCEMIN 2006:
TRANSFERENCIA MACROMOLECULAR DE MASA: APLICACIÓN PARA OPTIMIZACIÓN DE CIRCUITO DE FLOTACIÓN

INTRODUCCIÓN

Operaciones con Transferencia Macromolecular de Masa

Para el estudio de los procesos con *Transferencia Macromolecular de Masa* es utilizado el esquema presentado en la Figura 1. Son divididas en dos grupos principales: *Conminución* (molienda, chancado) y de *Separación con Concentración* (flotación, centrifugación, concentración magnética, concentración gravítica, hidroclasificadores, etc.). También son analizados los fenómenos auxiliares inherentes al *transporte en medio viscoso* (leyes de la hidráulica, aspectos reológicos, etc.), que afectan el desempeño de algunas de estas operaciones.



Figura 1 – Operaciones con TMMM

Las operaciones de *Conminución* transfieren la totalidad de la masa de Alimentación para el Producto (no existe separación con concentración), con menor tamaño medio y mayor superficie específica (operaciones homogéneas) y también con mayor liberación de la substancia de interés (operaciones selectivas), dependiendo de la selectividad del proceso. Las operaciones de *Separación con Concentración* transfieren parcialmente la masa alimentada, generando un Producto Principal: el Concentrado, con mayor concentración de la substancia de interés, y una Cola o relave.

NUEVO MODELO DE CONMINUCIÓN

Conminución como una Operación con Transferencia Macromolecular de Masa

La *conminución* de partículas puede ser interpretada como una operación directa (apenas que irreversible) en analogía con la operación de destilación fraccionada. La destilación es un método de separación utilizado en la ingeniería química para separar los componentes de una solución, lo cual depende de la distribución de las substancias entre las fases gaseosa y líquida, y es aplicable a los casos donde todos los componentes estén presentes en ambas fases. En la Figura 2 se ilustra esta característica.

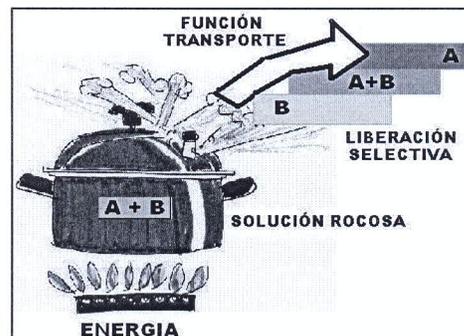


Figura 2 – Destilación Fraccionada

La conminución ocurre mediante la aplicación de energía mecánica al equipo, creando impacto, atrición y abrasión, de modo que podemos separar (desagregar) una sustancia, a partir de su roca, en fragmentos de diversos tamaños y con diferentes grados de liberación. La liberación de los granos individuales de las sustancias insertas en la roca permite, en los materiales heterogéneos, el incremento de la ley individual de las partículas (liberación de los granos) creando algún grado de clasificación que incrementa el gradiente entre las fases roca y pulpa, utilizando y maximizando las diferencias específicas entre las sustancias liberadas, como por ejemplo: la hidrofobicidad, la susceptibilidad magnética, la gravedad específica de las sustancias y el propio tamaño de las partículas (fragmentos) o granos de sustancias diferentes.

La roca se define como una disolución, en fase sólida, de sustancias de interés, dentro de una solución de ganga. El grano es considerado como la unidad básica macromolecular del transporte. Este grano está inicialmente inserto en la roca, "disuelto" en ganga y, junto con la aplicación de energía de conminución, este grano acompaña los fragmentos de la roca que está siendo conminuida, partículas cada vez de menor tamaño y con mayor grado de liberación. El grado de liberación corresponde a la proporción de granos de sustancia y de ganga dentro de las partículas mixtas. Las partículas de menor tamaño normalmente presentarán mayor liberación.

El objetivo de la conminución es la liberación de los granos de interés, en nivel aceptable para la operación de separación que normalmente viene a seguir, y que generalmente corresponde a 80% de proporción de granos liberados dentro de una partícula mixta. La aplicación de energía es inversamente proporcional al tamaño de los granos, desprendiéndose más rápido las partículas de mayor grano individual. Los minerales "blandos" precisarán menos energía para alcanzar a liberación deseada.

Las características específicas de las sustancias presentes en la roca son colocadas en mayor evidencia cuando el mineral es más heterogéneo (más sustancias diferentes dentro de la roca) y cuando la aplicación de energía es mayor, o sea, cuando la reducción de tamaño y la liberación de los granos son más acentuadas. La retirada de alguna parte de masa, aprovechando apenas el grado de separación producido directamente por la conminución, forma parte del contexto de la *pre-concentración* de minerales (la extracción de lamas también puede ser considerada en esta actividad) y su utilización es muy recomendable.

La velocidad media de liberación de la partícula, desde su solución rocosa, depende de la intensidad de la energía aplicada y de la dureza de la roca, entre otros aspectos. La aplicación de energía es muy compleja en la operación de molienda, y su medida macroscópica involucra pérdidas electromecánicas de transmisión, de movimiento de los equipos, del medio moedor y del propio mineral. La energía neta utilizada por la molienda en el mecanismo específico de conminución es casi imposible de medir, pues involucra muchas pérdidas por ineficiencia, disipación por ruido y calor, gasto energético entre los propios medios de molienda, entre ellos y el revestimiento del molino, etc.

Ya liberadas (o parcialmente liberadas), las partículas poseen algún grado de movilidad, debido a la heterogeneidad de la roca, por ejemplo, si los granos de algunas sustancias fueren más pesados que otros, las partículas más ricas de estas sustancias tenderán a sedimentar hasta el fondo del equipo, en la llamada "zona de molienda" (fase roca), permitiendo un mayor contacto con los medios de molienda (mayor selectividad de conminución) y alcanzando un menor tamaño y mayor liberación que las otras sustancias más livianas. Este mecanismo se define como "Clasificación Interna". En la Figura 3 se ilustra el esquema básico de las operaciones de molienda.

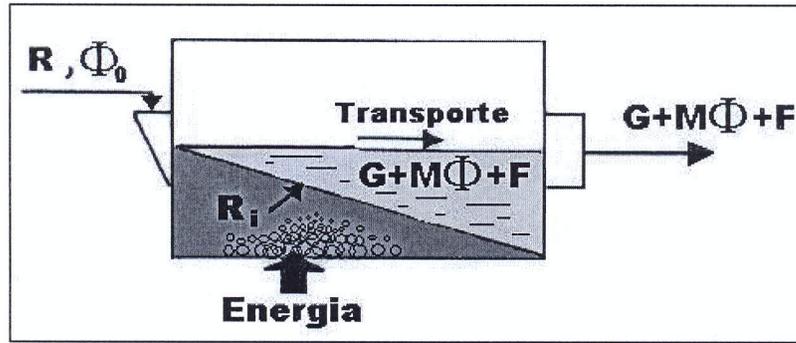
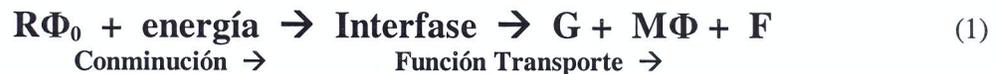


Figura 3 – Esquema Básico Operaciones de Molienda

Como se observa en la figura anterior, la Roca (**R**) es sometida a la conminución y, dentro del equipo, ella se acumula parcialmente en el fondo, la *Zona de Molienda*, con nuevas características de composición, tamaño y de liberación (**R_i**). En la medida en que el material alcanza condiciones de ser transportado hasta la salida, la *función transporte* lo hará, a una determinada velocidad. El producto (**P**) se divide en Gruesos – **G** (muchas veces ganga gruesa y liviana, que no interesa moler más), en Finos – **F** (muchas veces corresponde al material fino y liviano, como las lamas, ya existentes en la alimentación) y una parte mayor de material de interés – **M**, que alcanza el grado de liberación deseado.



Donde,

Φ_0 = Grado de liberación de la substancia de interés (**A**) en la Roca;

Φ = Grado de liberación de la substancia de interés en la parte principal del producto.

Mecanismos de Transporte

En escala molecular, la transferencia de masa en una determinada fase es el resultado de una diferencia de concentración o *gradiente*, de modo que las moléculas individuales se difunden, desplazándose desde un lugar de alta concentración hasta otro de baja concentración. Diferentemente, en el área mineral, la transferencia macromolecular de masa ocurre como resultado de la aplicación de alguna fuente de energía externa que permita la “migración” de determinadas partículas, como por ejemplo, un campo magnético para separar partículas de mayor susceptibilidad magnética, la fuerza centrífuga en hidrociclones – aprovechando la diferente gravedad específica entre determinadas especies, la fuerza hidrofóbica para el fenómeno de flotación y, para el caso de la conminución, el gradiente proviene de la diferencia entre la tensión de quiebra de la partícula y la energía aplicada en la *quiebra*, en la fase roca.

Para la conminución de *materiales homogéneos* o cuando el interés de la operación de conminución es apenas la reducción de tamaño de toda la masa sometida al proceso, el mecanismo se resume a la mudanza de tamaño medio entre la alimentación **F** hasta un producto **P**, mediante la aplicación de energía.



Los modelos de simulación llamados de “energéticos”, establecen que el consumo específico de energía es función de la reducción de tamaño general de la roca alimentada, del tipo:

$$\text{Energía} = f(\mathbf{P} / \mathbf{F}) \quad (3)$$

En procesos convencionales de molienda es adoptado, como criterio de medida, la evaluación de la malla donde 80% de las partículas son pasantes (**F80** y **P80**). En procesos de molienda muy fina es considerada la medida de la superficie específica obtenida en el producto.

Para el caso del chancado de materiales heterogéneos (como son la mayoría de los minerales), podemos expresar la reacción de desagregación llevando en cuenta la selectividad derivada de la concentración de la sustancia A de interés (ley x) en determinadas fajas granulométricas, en la operación de chancado selectivo, donde el producto puede ser posteriormente separado para producir la pre-concentración del mineral de interés.

$$\mathbf{R} \times \mathbf{x} + \text{energía} \rightarrow \mathbf{G} \times \mathbf{x}_g + \mathbf{M} \times \mathbf{x}_m + \mathbf{F} \times \mathbf{x}_f \quad (4)$$

Donde,

R = Roca; [**R**] = **R** x **x** = concentración de la sustancia de interés en la Roca

G = Gruesos, con ley **x_g**;

M = Mineral pre-concentrado, con ley **x_m**;

F = Finos, con ley **x_f**.

La expresión (4) constituye la fórmula fundamental, introducida por el *Modelo Operacional*, que describe el abordaje analógico del proceso de *chancado selectivo* de materiales heterogéneos, con finalidad de pre-concentración. Si **x_g** fuere bajo, por ejemplo, inferior a la ley de corte (cut-off) establecida en la operación de extracción (**x_g** < **x_c**), el material grueso podría ser descartado mediante la operación de harneo del flujo, como ocurre con minerales cuya base rocosa contiene exceso de magnetita. Además, si la ley de la fracción fina (**x_f**) es poco significativa, de modo que la distribución [**F**] no es muy importante, esta parcela de masa puede ser descartada mediante hidrociclones.

Este último procedimiento es muy recomendado para minerales alterados, principalmente en minas a cielo abierto, donde los finos (lamas) naturales provenientes de la mina son normalmente perjudiciales para los procesos posteriores de concentración, acarreado diversas impurezas difíciles de separar después de producida la mezcla entre ellas y los finos del mineral de interés, generados en las operaciones de molienda.

El Producto es **P** = [**M**] = **M** x **x_m**; y la eficiencia de la pre-concentración es:

$$E_{PC} = [\mathbf{M}] / [\mathbf{R}] \quad , \text{Recuperación de } \underline{\mathbf{A}} \quad (5)$$

En la fase del *Producto*, que para el caso de la molienda a húmedo se trata de pulpa, existe normalmente algún grado de clasificación interna con potencialidad para la separación de las partículas de A desde la ganga, inclusive con diferentes grados de liberación, y de fragmentos de roca original con mezcla pobre de A y ganga. La obtención de granos totalmente libres de A es muy improbable de modo que, para efectos prácticos, el proceso de desagregación es interrumpido en el momento de alcanzar una *liberación* considerada suficiente de la sustancia de interés, para atender las necesidades de procesamiento posterior (**Φ**). A rigor, la ecuación (1) ocurre sucesivas veces, a través de innumerables eventos de quiebra, hasta alcanzar la liberación deseada para las sustancias de interés, y es aplicable tanto en operaciones discontinuas, en molinos de laboratorio, como en operaciones continuas industriales.

En la Figura 4, a modo de ejemplo, se ilustra la distribución de mineral de Pirocloro, cuya roca presentaba una ley media (x) de 1,15 % de Nb_2O_5 , a partir del chancado selectivo en molino de martillos. Las mallas de referencia utilizada fueron de +595 μm para los *gruesos* y de -9 μm para los *finos*.

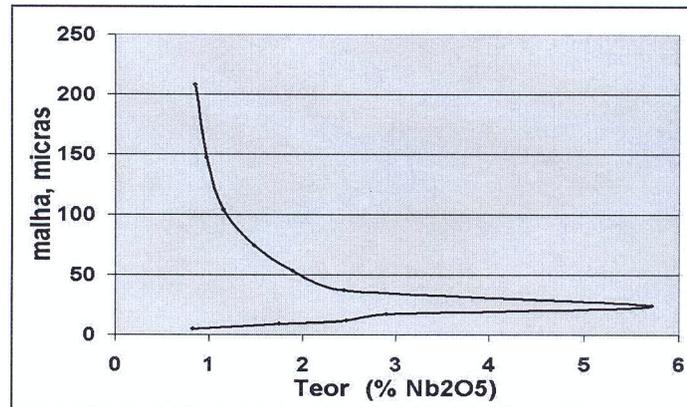


Figura 4 – Chancado Selectivo de Pirocloro (Yovanovic, 1988)

En este caso, los resultados obtenidos fueron:

$G = 32,15$ % de la masa, y $x_g = 0,55$ $5Nb_2O_5$;

$M = 54,92$ % de la masa, y $x_m = 1,58$ $5Nb_2O_5$;

$F = 12,93$ % de la masa, y $x_f = 0,83$ $5Nb_2O_5$.

Para la molienda de materiales heterogéneos (como son la mayoría de los minerales), podemos expresar la reacción de desagregación de la forma antes mostrada en la ecuación (1), llevando en cuenta la selectividad derivada de la liberación de la sustancia A de interés (Φ) en determinadas fajas granulométricas, en la operación de molienda selectiva, donde el producto puede ser posteriormente sometido a operaciones de separación con concentración de masa (separación magnética, flotación, etc.). La ecuación (1) constituye la expresión fundamental, introducida por el *Modelo Operacional*, que describe el abordaje analógico del proceso de molienda selectiva de materiales heterogéneos. Este tipo de representación admite diversas formas y la más simple de ellas recomendamos que sea siempre utilizada, dada la enorme complejidad de esta operación en la escala continua industrial, donde otros sub-procesos deben todavía ser considerados.

El grado de liberación (Φ) corresponde a la proporción entre granos de la sustancia de interés y de ganga, dentro de las partículas mixtas. La evaluación de Φ es hecha considerando el valor medio de la liberación entre diversas fajas granulométricas, considerando valores máximo (G) y mínimo (F), de acuerdo con el tamaño de partícula compatible con el proceso que viene a seguir. Obviamente, cada caso definirá su propia faja de masa M , como por ejemplo, en la molienda primaria, con objetivo de separar granos de magnetita, donde la liberación es obtenida en tamaños entre 10 a 35 mesh (420 a 1.680 μm).

En las operaciones de flotación, puede resultar necesario separar la fracción F , antes de flotar. La fracción G normalmente sale directamente por las colas, sedimentando con facilidad. La eficiencia obtenida en la liberación de la sustancia A en el producto de la molienda, depende directamente de la aplicación de energía, de la forma:

$$\text{Energía} = f(\Phi / \Phi_0) \quad (6)$$

En la molienda selectiva de rocas heterogéneas la liberación de partículas puede obtenerse moliendo el material de diferentes formas. La forma más económica, donde es utilizado el menor consumo de energía, ocurre cuando el valor de liberación deseado (Φ) es obtenido con el máximo tamaño posible en el producto (P_{80}). El *Modelo Operacional* establece que, en las operaciones de molienda, el producto no debe ser apenas evaluado como una cuestión de tamaño, mas de liberación de la substancia de interés. Lo importante es definir algunas medidas macroscópicas que permitan establecer el *punto de operación* del proceso (tamaño / liberación) y las relaciones de scale-up con los equipos continuos; estos mecanismos son: La Cinética de Liberación (en función de la energía aplicada) y la Función Transporte (en función de la velocidad de retirada del producto) que son utilizadas normalmente para definir el tamaño y la capacidad volumétrica de los equipos.

También, deben ser definidas: la Selectividad, que resulta de la *Curva de Selectividad*, que representa la preferencia de liberar la substancia de interés en relación a las otras y a la propia ganga, en la fase roca; además, existe la *clasificación interna* en la fase pulpa que proporciona condiciones que permiten optimizar el desempeño operacional; la Aplicación de Energía, que refleja la eficiencia de la recepción de energía por parte de las partículas y las dificultades de conminución inherentes al mineral (como la dureza de la solución sólida de ganga, donde la substancia de interés está inserta, y el tamaño de los granos de la substancia de interés), siendo esta última fundamental para la optimización de los costos de operación.

Gradientes y Fuerzas Impulsoras

Roca: Conminución

Los granos de diferentes substancias insertas en la formación rocosa del mineral son desprendidos de la mezcla cuando la roca es sometida a una fuerza externa (impacto, atrición o abrasión), obteniendo algún grado de concentración por causa de la mayor liberación de los granos y presentando tendencia a la clasificación, con base en alguna propiedad específica de cada substancia que muestre mayor diferencia con las otras substancias presentes en la mezcla.

La velocidad media de liberación de la partícula, desde su solución rocosa, dependerá de la intensidad de la energía aplicada y de la dureza de la roca. La aplicación de energía es inversamente proporcional al tamaño individual de los granos, desprendiéndose más rápido las partículas con granos de mayor tamaño. Los minerales "blandos" precisarán de menos energía para alcanzar la liberación deseada. Para efectos prácticos, la condición de dura o blanda se debe más a la ganga que disuelve la substancia de interés y no de la substancia en si, cuyo tamaño de grano hace consumir más energía por la mayor dificultad de liberar la ganga en torno del.

Yovanovic (1975) participó de la ejecución de testes de dureza para Andesita primaria, cuyos resultados son mostrados en la Tabla 1. En este caso, el grado de dureza fue medido con base a los procedimientos derivados del abordaje energético (Bond F., 1961), y dimensionado en kWh/t corta de mineral (2000 libras).

Tabla 1 – Dureza de la Andesita Primaria (Yovanovic, 1975)

Textura Andesita	Wi, kWh/st
Gruesa	12,82
Media	14,35
Fina	15,24

Casi la totalidad de los abordajes macrofenomenológicos conocidos, del tipo cinético, evalúa la transferencia de masa en función de la velocidad de desaparecimiento de las partículas de roca, con base en la observación de determinadas fajas granulométricas (visión de tamaño). El *Modelo Operacional* optará por evaluar la velocidad de liberación de la sustancia de interés, hasta alcanzar el nivel deseado, de la forma más selectiva posible con relación a la ganga y a las otras sustancias (molienda selectiva), y con la menor energía específica posible. Lo deseable es liberar la sustancia de interés al mayor tamaño medio posible del producto molido (**P80**), moliendo selectivamente estas partículas, al mínimo costo posible.

La velocidad en que las partículas abandonan la fase roca, o sea, cuando alcanzan una determinada combinación entre tamaño/liberación/peso para ser transportadas como producto, puede ser representada de la siguiente forma:

$$N_x = \text{Coeficiente de Transferencia} \times \text{Área de Contacto} \times \text{Gradiente} \quad (7)$$

Donde N_x es el flujo másico (masa/tiempo)

Pulpa: Función Transporte

Si los granos de algunas sustancias fueren más pesados que los granos de otras, las partículas más ricas de estas primeras sustancias tenderán a sedimentar hasta el fondo del equipo, en la “zona de molienda” (fase roca), permitiendo un mayor contacto con los cuerpos moledores (mayor selectividad de conminución) y alcanzando un menor tamaño y una mayor liberación que las otras sustancias más livianas. Este mecanismo es definido por el Modelo Operacional como “*Clasificación Interna*”.

El régimen al cual se mueve la partícula, en cualquier punto en sentido vertical, dependerá del gradiente de transporte en ese punto, el cual puede ser maximizado mediante la adición de determinados reactivos químicos o por la optimización de las condiciones reológicas de la pulpa, entre otros aspectos. El gradiente proporcionado por la mayor liberación de los granos es la fuerza impulsora que promueve la transferencia de partículas dentro del molino, propiciando una mayor selectividad de la conminución en favor de determinadas partículas, notadamente aquellas especies de mayor gravedad específica. La utilización de circuitos cerrados y el excesivo nivel de carga de cuerpos moledores tienden a homogeneizar el proceso (y el producto), en vez de aprovechar su heterogeneidad en beneficio de la selectividad y de los menores costos de operación.

El área que separa las fases es fundamental para la selectividad del proceso, y esta área es mayor en molinos de alta relación de largo en relación al diámetro (L/D), al contrario de lo observado en las tendencias actuales de diseño. Para la fase pulpa se define el siguiente mecanismo de transporte:

$$N_x = K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0) \quad (8)$$

O sea, la masa que sale de la roca y entra en la corriente de transporte depende también de un cierto coeficiente de transferencia (caudal, dilución), del área superficial de la carga interna (que divide la zona de molienda con la corriente de transporte del producto) y de la diferencia relativa de liberación entre el material de la roca y la partícula con mayor liberación (por lo tanto de menor tamaño). En estado estacionario, se ha comprobado que existe una acumulación de masa dentro del molino, en la “zona de molienda”, inserta en el valor de \underline{A} , de modo que, para un volumen de carga relativamente constante, ocurre que:

$$N_x = \underbrace{K}_{\text{ROCA}} \times \underbrace{A}_{\text{PULPA}} \times \Delta E = K_t \times A_t \times (\Phi - \Phi_0) \quad (9)$$

De la ecuación anterior podemos observar que:

- Al reducir la intensidad de la aplicación de energía, para mantener el flujo N_x es necesario que Φ disminuya. O sea, el producto quedaría más grueso. Por el contrario, el aumento de intensidad en la aplicación de energía o del coeficiente de transferencia (velocidad de rotación, por ejemplo) haría aumentar el valor de Φ .
- El aumento de N_x , para la misma intensidad de aplicación de energía, involucra aumento del área A , vía aumento del nivel de carga, hasta el punto en que es superado el valor máximo de la relación mineral/bola, haciendo Φ disminuir.
- El aumento del valor de A_t , para el mismo flujo de masa, involucra la reducción del coeficiente o velocidad de transferencia K_t , tornando el proceso más selectivo.
- Cualquier opción debería procurar, también, el mínimo consumo específico de energía para el máximo flujo y máxima liberación.

Los Mecanismos Macroscópicos de la Conminución

Liberación

Dependiendo de la heterogeneidad, de la dureza de la roca y de la textura de los granos de las sustancias de interés, con este primer mecanismo es posible estudiar y simular el fenómeno de conminución natural (o apenas "conminución", como es normalmente enfrentado por la literatura convencional). En esta fase de la pesquisa, la conminución es estudiada en analogía con un proceso de destilación fraccionada, donde la masa es transferida desde la solución rocosa para la pulpa, en forma de partículas, con diversos grados de liberación, mediante la aplicación de energía.

El grado de liberación de la partícula de interés debe ser evaluado por faja granulométrica, de acuerdo con el *Índice de Liberación* (Φ). Las fajas granulométricas consideradas no deben ser muy numerosas, para reducir el tiempo y el costo de los trabajos experimentales. Al microscopio es efectuado un conteo de granos sobre secciones pulidas, para cada faja granulométrica, donde:

$$\Phi = (\text{Peso de la sustancia libre} / \text{Peso total de sustancia}) \times 100, \text{ para cada faja.}$$

El producto de la conminución posee una cierta *distribución de quiebra*, cuyos fragmentos individuales generados por cada evento de quiebra son diferentes del fragmento que los originó, y diferentes entre sí. Los abordajes cinéticos convencionales evalúan la quiebra con base en la velocidad de desaparecimiento de las partículas, desde diversas fajas de tamaño para tamaños inferiores (Función Selección), y la distribución de la quiebra por cada evento es establecida en forma de matriz (matriz Quiebra), que caracteriza la generación de fragmentos, considerando tácitamente el proceso como siendo homogéneo, llevando en cuenta apenas el tamaño de las partículas y considerando que los fragmentos generados poseen características análogas entre sí y con las partículas mayores que las generaron.

Função Transporte

La retirada oportuna de producto, mediante cierta velocidad y selectividad, permite utilizar la energía con mayor eficiencia sobre las partículas que todavía precisan ser conminuidas. Esta extracción de producto, que constituye el mecanismo de la *función transporte*, demora entre 10 a 13 minutos para retirar las partículas prontas, contando desde el momento de entrada al molino, dependiendo de diversas variables, como el valor de **P80** procurado y la gravedad específica de las partículas, entre otros aspectos.

Con tiempos mayores, en un sistema discontinuo, como en molino de laboratorio, la zona de molienda comienza a acumular finos, lo cual hace aumentar la viscosidad del medio, reduciendo la movilidad de los cuerpos moledores y creando efectos de amortiguación de impactos (por el llenado de los espacios con partículas finas), disminuyendo el mecanismo principal de quiebra y liberación. En la Figura 5 se ilustra el efecto del tiempo de molienda sobre el consumo específico de energía, en una experiencia “batch”, a seco, característica de los testes que definen la propiedad macrofenomenológica de los modelos del tipo *Energético* (teste de Bond). Por la falta de la *función transporte* (ella ocurre apenas en los procesos continuos), la acumulación de finos comienza a perjudicar el proceso a partir de 10 minutos.

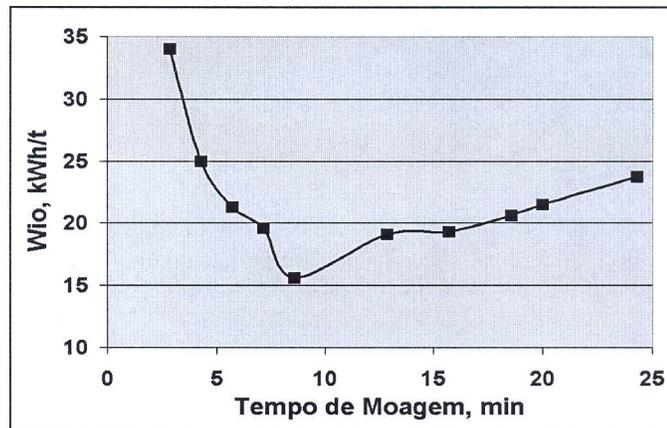


Figura 5 – Molienda sin la “Función Transporte”

Selectividad

El gradiente proporcionado por la mayor liberación de los granos, que maximiza determinadas diferencias de propiedades entre las sustancias, es la fuerza impulsora que promueve la transferencia de partículas dentro del equipo de molienda (*clasificación interna*), propiciando una mayor *selectividad* de conminución en favor de determinadas partículas, prioritariamente aquellas especies de mayor gravedad específica. La operación posterior de separación con concentración (por ejemplo, la Flotación) posee su propia medida de selectividad, dependiente del grado de liberación obtenido en la molienda, de modo que también es posible controlar la operación de molienda a través de la selectividad observada en el proceso posterior de concentración. La Selectividad es la propiedad que define la operación de *conminución selectiva*. El Modelo Operacional propone la utilización de la *Curva de Selectividad* como elemento macroscópico para el estudio de este mecanismo, el cual puede ser observado en función de la aplicación de energía (E vs. Φ) o de la reducción de tamaño ($P80$ vs. Φ).

Aplicación de Energía

La energía es aplicada mecánicamente a través del piñón y es convertida, por el movimiento de rotación del cilindro, en *energía masiva de conminución*, donde una sumatoria de efectos de Impacto, Atrición y Abrasión proporcionan la quiebra con liberación de la sustancia de interés. La energía puede llegar hasta el material de forma más o menos eficiente, dependiendo de las características mecánicas del equipo (geometría, velocidad) y de su operación (% de sólidos, nivel de llenado de cuerpos moledores, tipo de cuerpo molidor, etc.).

Los modelos del tipo *energético* formulan bien la aplicación mecánica de energía, al punto que hasta hoy son utilizados para el diseño de equipos. La gran ventaja de estos modelos es su consagrada aplicación industrial y su sólida base experimental, relacionada con operaciones continuas. Además de la falta de adecuados fundamentos científicos, la mayor desventaja de estos abordajes es la falta de flexibilidad cuando los parámetros (paradigmas) que sustentan los cálculos son mudados, como es el caso del circuito abierto, menor nivel de cuerpos moledores, cambios de velocidad y otros aspectos.

CONCLUSIONES

Una determinada cantidad de contactos entre cuerpos moledores y el material, por unidad de fuerza, permite que el material sea conminuido hasta un tamaño definido, que correspondería al grado de liberación deseado. Dentro de ciertos límites, pocos contactos, mas de gran fuerza, pueden equivaler a muchos contactos de menor intensidad (el diámetro del molino, por ejemplo, es una variable que actúa en este sentido). El Modelo Operacional introduce el *Índice de Conminución* (Yovanovic y Moura, 1991, 1993), que lleva en cuenta los fenómenos auxiliares de transporte y de clasificación.

El *Índice de Conminución IC* es la herramienta utilizada para el scale-up con operaciones industriales, y permite relacionar la aplicación mecánica de energía al molino y las formas como esta energía llega al material, de modo que la condición optimizada puede ser debidamente definida para cada caso estudiado. El Modelo Operacional utiliza la siguiente expresión para describir la transferencia de masa por cada evento de quiebra, en las operaciones de *molienda*, para una roca constituida por ganga y una substancia de interés (derivada de la ecuación 1):

$$R\Phi_0 \times IC \rightarrow G + M\Phi + F \quad (10)$$

El *Modelo Operacional* propone que, dependiendo del tiempo de residencia de las partículas y de las condiciones operacionales, el *Índice de Conminución* define la cantidad más probable de contactos masivos entre los cuerpos moledores y el material, y la intensidad de este contacto:

$$IC = (BL / TM) \times TZ \times DI \times RM \times FG, \text{ (Potencia - hora)/t} \quad (11)$$

Donde,

TZ = Tiempo de residencia de la fase roca dentro de la *zona de molienda*, min;

TM = Tasa de alimentación, en toneladas métricas por hora, base seca;

BL = Peso de la carga de cuerpos moledores dentro del molino, toneladas métricas;

RM = Velocidad de rotación del molino, rpm;

DI = Diámetro interno del molino, piés;

FG = Factor de golpe, por rpm. Cantidad estimada de golpes que un cuerpo molidor cualquiera podría proporcionar por cada rotación del molino, la cual es función del nivel de llenado.

Un mineral duro requiere mayor *Índice de Conminución* que otro más quebradizo para ser reducido de un tamaño **F80** para **P80**, alcanzando la liberación deseada, condición que puede ser estudiada en laboratorio. Las condiciones operacionales del equipo, elemento clave e innovador del modelo aquí propuesto, definen **IC** también en función del tiempo, llevando en cuenta los fenómenos auxiliares de transporte y clasificación (interna y externa).

El abordaje mecánico de la entrega de energía al equipo también está representada en la ecuación 11, a través de las variables inherentes al equipo y a la carga a ser colocada en movimiento, de modo que el modelo puede definir la condición óptima mecánico-operacional que permita suministrar al mineral el *Índice de Conminución* necesario, con el mínimo consumo de energía. Por

otro lado, el término **TZ** lleva en consideración el mecanismo de clasificación interna que favorece la molienda selectiva, a través de la sedimentación de las partículas más pesadas.

El *Modelo Operacional* define también el *Índice Base de Comminución (IB)*, que el material precisa para pasar de la condición Alimentación para Producto, y que será la propiedad macrofenomenológica posible de obtener a partir del laboratorio, mediante procedimiento experimental específico definido por el Modelo Operacional; en testes en planta piloto; o inclusive en experiencias comparativas con molinos industriales.

REFERENCIAS

- Bird, R.B., Stewart, W.E and Lightfoot, E. N., *Transport Phenomena*, 1960, John Wiley & Sons: New York (in Spanish – Editorial Reverté S.A., Barcelona, 1964).
- Bond, F.C., 1961: "Crushing and Grinding Calculations", Processing Machinery Department, Allis-Chalmers Manufacturing Company, Milwaukee, Wisconsin. Reprinted from British Chemical Engineering, 1961.
- Levenspiel, O., *Chemical Reaction Engineering*, 1972, John Wiley Sons Inc., EEUU.
- Smith, J.M., *Chemical Engineering Kinetics*, 1971, Third edition in Spanish, C.E.C.S.A., Mexico.
- Treybal R.E., *Mass Transfer Operations*, 1970, McGraw Hill Book Company, Inc (in Spanish Edition, Editorial Hispano-Americana, B.Aires).
- Yovanovic A.P., Experiencia personal como General Mill Foreman del Concentrador Colon (30.000 ton/día). El Teniente, Chile, 1975/1976.
- Yovanovic A.P. e Moura H.P., 1991 – "Novo Modelo Matemático da Moagem em Moinhos de Bolas". In: 5º SEMINÁRIO DO IBRAM DE COMPUTAÇÃO APLICADA À MINERAÇÃO, Agosto 1991, Belo Horizonte. Anais do Congresso. 1991
- Yovanovic A.P. e Moura H.P., 1993 – "A New Macrophenomenological Concept of Comminution in Balls Mills". In: XVIII INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, May 1993, Sidney, Australia, 1363-1368.
- Yovanovic, A.P., *Engenharia da Concentração de Massa por Flotação. Volume 1: Fundamentos da Flotação*, 2004, Belo Horizonte, Edited by A. Yovanovic.
- Yovanovic, A.P., *Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares*, 2006, Belo Horizonte, Edited by A. Yovanovic.
- Yovanovic, A.P., *Operações com Transferência Macromolecular de Massa*, 2006, Belo Horizonte, in prep.