

Molino ultrasónico de rodillos de alta presión para materiales frágiles

Luis Gaete Garretón,^A Yolanda Vargas Hernández,^A
Alain Chamayou,^B John Dodds^B

^AUniversidad de Santiago de Chile, Laboratorio de Ultrasonidos, Chile

^BEcole des Mines D'Albi-Carreaux, Francia

lgaete@usach.cl

RESUMEN

En este artículo se presenta y describe un Molino Ultrasónico de Rodillos de Alta Presión (MURAP). Se establecen las principales ventajas del ultrasonido aplicado a la molienda para el caso de materiales frágiles los que, en general, son de alta dureza. Para independizarse de características geométricas se compara el desempeño de la máquina con ella misma operando sin activación ultrasónica, sólo como un molino de rodillos de alta presión. Los resultados, establecidos para andesita (óxidos de Cu) y cuarzo, cuando se emplea el ultrasonido, muestran una disminución en el consumo de energía de un 20%, en la tensión sobre los ejes de un 50% y el desgaste de las superficies moledoras de hasta un 50%.

PALABRAS CLAVES

Molino, ultrasonido, rodillos, alta presión, molienda.

ABSTRACT

A High Pressure Ultrasonic Roll Mill is described in this paper. The main assets of ultrasound applied to grinding of brittle materials, which are commonly hard are described. The machine running with ultrasonic activation was compared against itself without it, as high pressure mill only, for being independent of geometrical characteristics. The results, over andesite (Cu oxides) and quartz, show a decrease of energy consumption of 20%, stress over the axes of 50%, and reduction of the milling surfaces wearing up to 50%.

KEYWORDS

Roll mill, ultrasound, high pressure, grinding.

INTRODUCCIÓN

Tecnologías de molienda de materiales más eficientes y robustas son siempre un tema de interés. Una de las posibilidades de mejorar los procesos de molienda, que ha sido explorada desde hace años, es el empleo del ultrasonido, sin embargo, actualmente no hay en el mercado una máquina ultrasónica de molienda, aunque ya existen tecnologías de ultrasonido disponibles para los procesos relacionados con perforación de materiales y destrucción de cálculos renales.



Aparentemente Gärtner ha sido el primero en intentar la molienda de materiales en suspensión aplicando ultrasonido.¹ Sus resultados fueron modestos y sin interés práctico. Fleischhauer y Kröger (1969),² emplearon ondas ultrasónicas de alta potencia (400W) para fragmentar mineral de carbón para su posterior extracción por solvente, la zona activa de su dispositivo es de interés aunque no hay detalles de sus resultados. Graff (1979)³ empleó una serie de transductores ultrasónicos como parte de un molino de estampa multietapa con el que el 80% de las partículas obtenidas eran menores de 0.5mm, y las más grandes de entre 50 y 65 mm, sin proporcionar información sobre el consumo de energía. En experimentos de una etapa consiguió moler hasta un 40% bajo 4,76 mm, un 50% bajo 2,37 mm y porcentajes menores de fino, no hay mayor información cuantitativa de sus resultados.

Tarpley and Moulder (1980),⁴ estudiaron la fragmentación fina de carbón bajo campos ultrasónicos para usos energéticos, para esto diseñaron varios dispositivos. Sus resultados fueron promisorios reportando consumos del orden de 3 kWh/Ton para producir carbón 80% bajo la malla 200. Un molino de martillo necesitaría para producir el mismo material un consumo de energía del orden de 20 kWh/Ton, resultados igualmente interesantes se consiguieron para tamaños más finos. Más tarde, en 1988, Link y Killmeyer,⁵ intentaron reproducir sus resultados sin éxito.

Leach y Rubin (1988),⁶ estudiaron la fragmentación ultrasónica de probetas cilíndricas de roca excitadas mediante un transductor de potencia adosado a uno de sus extremos, observando fracturas preferentemente en los nodos y mejores resultados en materiales frágiles.

Lo y Kientzler (1992)⁷ recuperaron una de las máquinas originales de Tarpley y Moulder y luego de rediseñar el generador de ultrasonido emplearon el sistema para la molienda de minerales. Sus resultados fueron similares a los de un molino de bolas, no mejores, sin embargo, su investigación ha servido para identificar algunos puntos débiles del diseño original y para proponer nuevos diseños.⁸ Menacho, Yerkovic y Gaete⁹ hicieron ensayos de molienda en un molino de bolas, comparando un mineral estándar con uno pretratado con ultrasonido.

El material pretratado exhibió una tasa de molienda superior del orden del 32%.

Los mecanismos y fenómenos que conducen a los resultados descritos previamente no están aún explicados completamente y se realiza investigación básica para ahondar en su conocimiento. Un punto clave que ayuda a entender el efecto del ultrasonido en los materiales es el experimento realizado por Blaha y Langenecker (1959).¹⁰ Ellos estudiaron la influencia del ultrasonido en la tenacidad de un monocristal de zinc. Los resultados se pueden ver en la figura 1. El efecto del ultrasonido es evidente y ha sido propuesto como explicación que producen una acumulación de defectos y propagación de grietas presentes en el material causando el desmoronamiento del mismo.

Los experimentos y trabajos descritos soportan la idea de enfrentar el complejo problema de diseño de una máquina de molienda asistida por ultrasonido que permita moler manteniendo altos rendimientos energéticos. Para esto se ha abordado el diseño de un molino asistido por ultrasonido, conjugando las competencias de especialistas en diseño de máquinas y expertos en ultrasonido. El resultado se presenta en este trabajo en el que se muestra un reciente diseño

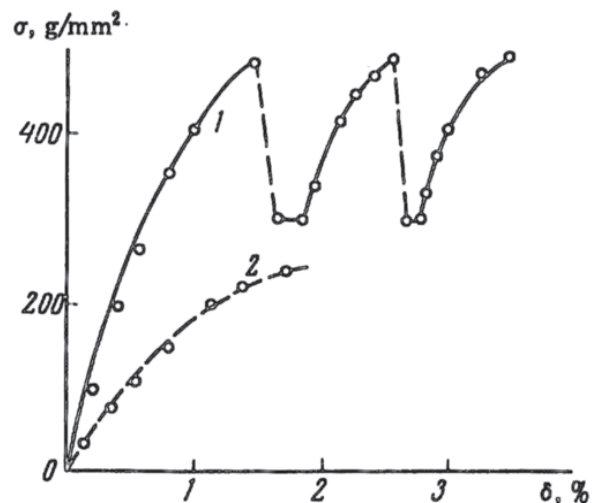


Fig. 1. Comportamiento de la resistencia de un cristal de zinc a la tensión mecánica durante un proceso de estiramiento de una pieza construida como un monocristal de zinc (Blaha y Langenecker)¹⁰ La línea segmentada representa los resultados al aplicar ultrasonido. La curva 1 muestra como se recupera la tenacidad del material cuando se suspende la utilización de ultrasonido. La curva 2 muestra los resultados para una aplicación continua.

de un MURAP, se evalúa su desempeño y se muestra la conveniencia de abordar un escalamiento de la tecnología a mayores capacidades de proceso.

Debido a su alta capacidad de proceso y buen rendimiento,¹¹ la máquina se ha diseñado como un molino de rodillos de alta presión. Esta tecnología de molienda es la más eficiente disponible hoy día, sin embargo, tiene problemas de desgaste excesivo en las superficies moledoras y fatiga en los ejes cuando se intenta utilizar para materiales duros. Este diseño ha permitido superar los problemas de acoplamiento entre el material a moler y los transductores ultrasónicos, una de las dificultades a resolver cuando se desarrolla una tecnología que emplea ultrasonido. El rendimiento se obtiene haciendo que las partes activas del molino sean esencialmente resonantes.¹² En esta comunicación se presentan los detalles principales de diseño y la evaluación del MURAP en la molienda de materiales duros y frágiles como cuarzo y andesita (óxidos de Cu). Los ensayos, se presentan en el mismo orden y están encaminados a evaluar el rendimiento energético de la tecnología desarrollada, la robustez de la máquina y la calidad del proceso.

DESCRIPCIÓN DEL MURAP

El molino se compone esencialmente de tres partes: la primera de ellas es la llamada parte activa del molino, en esta versión¹³ consiste en un sistema que permite montar dos rodillos de diferente diámetro alineados según su eje de simetría (ver figura 2).

Los rodillos están hechos de acero SAE 1220, templado a dureza máxima, para disminuir los problemas de desgaste.

Los sistemas motriz y de control se aprecian en la figura 3 en la que se muestra un esquema del dispositivo experimental necesario para la evaluación del MURAP.

La máquina está dotada de una cinta extensiométrica para detectar el desplazamiento relativo de un rodillo respecto del otro. La tensión de molienda se ajusta mediante resortes y o elastómeros que se muestran esquemáticamente con el rótulo de “Tensores” en la figura 3 y aparecen con el número 8 en la vista en perspectiva de la figura 2. La molienda se realiza entre los dos rodillos, uno que es un transductor

ultrasónico diseñado como una palanqueta resonante que proporciona la energía elástica para la molienda y otro, llamado “rodillo pasivo” que proporciona la presión de molienda, consiguiéndose el acoplamiento necesario para transmitir las ondas ultrasónicas al material en proceso. La fuerza motriz, que se comunica al rodillo pasivo se transmite al activo mediante un sistema de engranajes calculados de forma que las superficies de los cilindros activo y pasivo tengan la misma velocidad tangencial. El material a procesar se introduce entre los dos rodillos

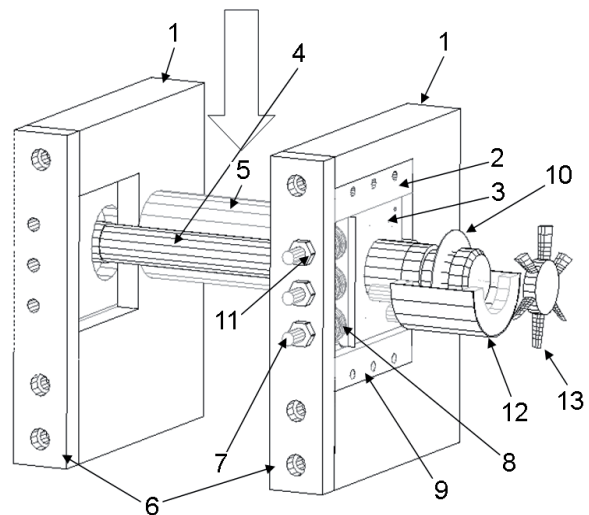


Fig. 2. Parte activa del Molino Ultrasónico de Rodillos de Alta Presión (MURAP). En el diagrama: 1 Muros soportantes (acero estructural), 2 Rodamientos lineales, 3 Soporte rodamientos, 4 Rodillo ultrasónico, 5 Rodillo pasivo, 6 Pernos Parker de montaje, 7 Control de tensión, 8 Resortes tensores, 9 Soportes rodamientos, 10 Electrodo rotatorio, 11 Tuercas fijación holgura, 12 Cáster, 13 Ventilador.

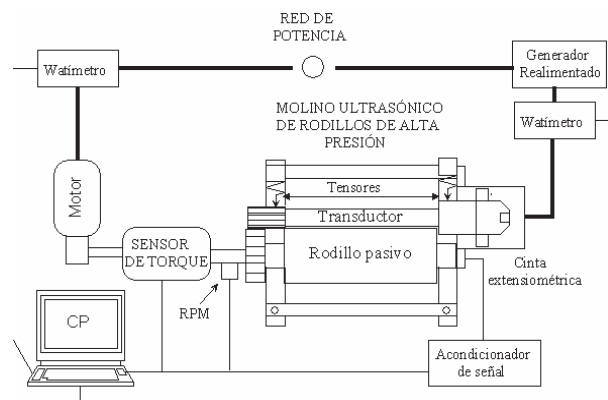
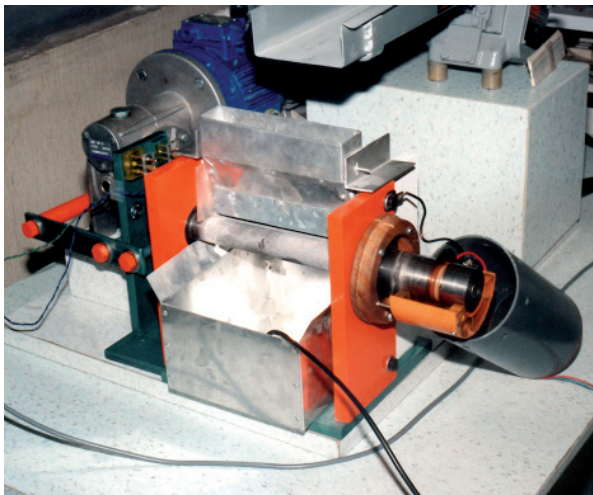


Fig. 3. Diagrama de bloques para un experimento típico de molienda con el MURAP.

mediante un embudo especialmente diseñado para estos efectos. La forma de operación de la máquina requiere que el espacio de admisión de material a moler entre los dos rodillos esté siempre lleno, el nivel del material presente en el embudo proporciona una ligera presión para facilitar la captura (mordida) de las partículas en proceso.

Cabe destacar que la zona activa de la máquina ultrasónica es de unos treinta centímetros de longitud. El motor que impulsa los rodillos es de 2 HP y tiene un variador de velocidad. Por motivos de espacio no se expondrán en este artículo los resultados de ensayos realizados con diferentes velocidades angulares, los que, en general, tienen la influencia esperable en el flujo de mineral molido. La máquina completa ocupa una superficie de aproximadamente 1,6 por 0,8 metros y es capaz de producir alrededor de 10 toneladas (material de densidad aproximada 3) en un día completo de trabajo (24 horas).

Para hacer un estudio comparativo de los beneficios del empleo de ultrasonido se hace el mismo experimento de molienda con la máquina ultrasónica y con el mismo sistema sin activar el generador de ultrasonido. En estas condiciones la máquina trabaja como un molino de rodillos de alta presión.¹¹ En los experimentos se hace necesario medir simultáneamente la potencia consumida por el motor, el sistema ultrasónico, y las variables susceptibles de medir, esto se logra con un sistema de adquisición de datos controlado por computador.



Prototipo del MURAP desarrollado para este estudio.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los experimentos consisten en realizar diversas moliendas de cuarzo y roca ígnea (andesita), midiendo los parámetros de interés. Para evaluar el rendimiento de la máquina se emplea la “velocidad específica de fractura” (S_i^E). Este parámetro¹⁴ es en realidad un estimador de las principales características de una máquina en ensayos de molienda, mide la capacidad de generar distribuciones de tamaño de partícula de mineral considerando la energía empleada en hacer aparecer cada clase de la distribución. Los resultados en un ensayo de molienda consideran la distribución granulométrica de partida, la que genera el proceso y el gasto de energía empleado en el mismo. Así este importante parámetro se calcula como:

$$S_i^E = -\frac{1}{E_{\text{Específica}}} \ln\left(\frac{P_0\%}{F_i\%}\right) \quad (1)$$

Donde S_i^E es la velocidad específica de fractura.
 $E_{\text{Específica}}$ es la energía empleada en producir una unidad de masa de producto (kWh/Ton).

$P_0\%$ es el porcentaje acumulado en cada tamaño producido.

$F_i\%$ es el porcentaje acumulado de material en cada tamaño de la alimentación.

Las curvas de la velocidad específica de fractura se representan en escalas logarítmicas y cuanto más eficiente es el proceso más arriba está la curva asociada. A continuación se muestran los resultados de los ensayos realizados para las características más relevantes del proceso.

ENSAYOS DE CONSUMO DE ENERGÍA

Las partes ultrasónicamente activas se han diseñado como piezas resonantes, así la conversión de energía eléctrica en acústica es muy eficiente. En la figura 4 se muestra la relación entre la potencia total demandada por la máquina y la potencia acústica aplicada para un ensayo típico de molienda de andesita. En esta figura se puede apreciar que mientras mayor es la potencia aplicada, menor es el consumo global de energía para la molienda. Sin embargo, la evaluación de la tecnología debe también considerar otros aspectos del proceso. Debido a ello se hace necesario medir, por ejemplo, el desgaste del

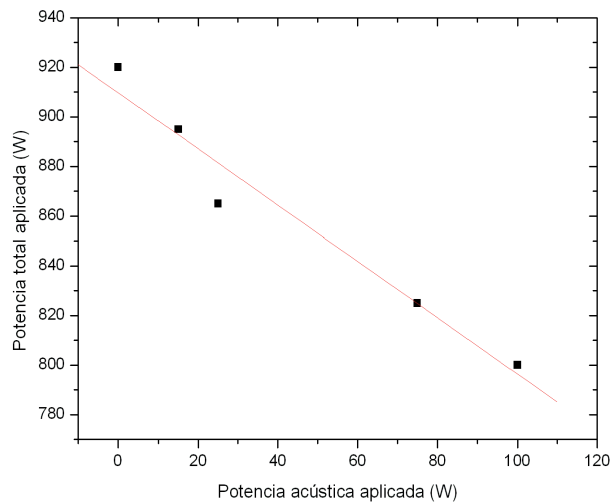


Fig. 4. Potencia total empleada en la molienda versus la potencia ultrasónica aplicada, rodillos a 120 RPM. Material de ingreso andesita (Minera Pudahuel) monotamaño 6 # Tayler.

equipo y algún parámetro que indique la relación entre el consumo de energía y el producto obtenido como resultados de la molienda (S_i^E).

ENSAYOS DE DESGASTE DE MATERIAL

El desgaste de los rodillos moledores de acero 1220 templados, es muy bajo, por lo que una prueba de desgaste tomaría mucho tiempo y además generaría un problema de acumulación de material molido en un laboratorio. Para hacer el ensayo de desgaste se utilizaron rodillos de material blando o sin templar. Los experimentos se realizaron fuera del laboratorio debido al gran volumen de material molido que generan. Se construyeron los rodillos con acero 1020 de uso estructural y un acero para construcción de herramientas (4340). Así después de un ensayo que duró varias horas se pudo evaluar el comportamiento de los rodillos con y sin ultrasonido. Los resultados se presentan en la figura 5(a).

Debido a la influencia del torque en la duración de los ejes y a su correlación con el desgaste del material, se muestra también, en la figura 5(b), una curva de su comportamiento frente a la activación ultrasónica de los rodillos.

Es inmediato apreciar la disminución en la pérdida de material que se produce cuando se aplica ultrasonido a los rodillos moledores. El desgaste coincide con una apreciable baja en el torque de trabajo.

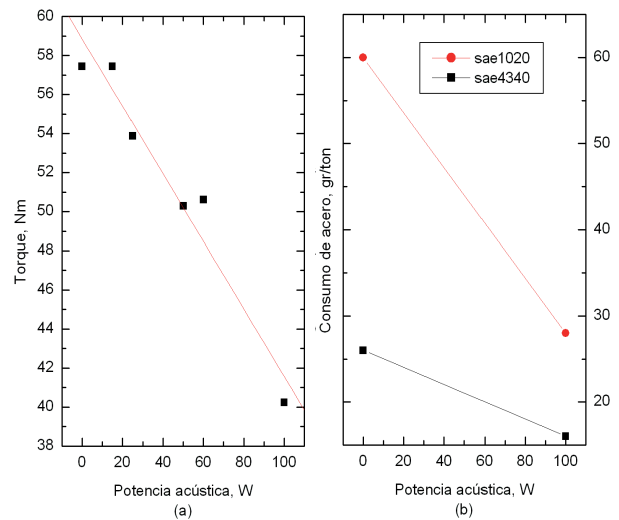


Fig. 5. Ensayos de desgaste de los rodillos construidos con dos tipos de acero. (a) Torque contra la potencia ultrasónica aplicada. (b) Desgaste de los rodillos contra potencia ultrasónica aplicada.

ENSAYOS DE VELOCIDAD ESPECÍFICA DE FRACTURA

En la figura 6(a) se puede apreciar el comportamiento de la máquina moliendo mineral de Cu. La máquina ultrasónica se ha activado con diferentes potencias, y además se efectuó una prueba a 0 W, esto es sin utilizar ultrasonido, lo que implica que la máquina operaba como un molino de rodillos de alta presión. Se advierte que la mejor curva de rendimiento global se obtiene para una potencia ultrasónica de 20 W. Las diferencias de rendimiento se explican porque a pesar de que aplicando una mayor energía ultrasónica mejoran las variables mecánicas, como se puede apreciar en las figuras 4 y 5, la producción de finos disminuye bajando la velocidad específica de fractura. Así, las curvas consideradas mejores son las que están en las partes superiores de la figura.

Debe notarse que la curva que muestra la mayor velocidad de fractura para el mineral de cobre es la que se obtiene con una potencia ultrasónica aplicada de 20 W. Para establecer si este comportamiento es común a todos los materiales frágiles aplicamos la tecnología de molienda ultrasónica al cuarzo, material conocido por las dificultades que presenta para la molienda, ver figura 6(b). La velocidad específica de fractura en el cuarzo tiene un comportamiento un poco diferente al que se encuentra con el mineral

de cobre. De forma similar al caso anterior, la mejor curva es para la molienda que se realiza con 20 W de potencia ultrasónica. Pero, sorprendentemente, la curva de “0 W” supera a la de 100 W. Por claridad no

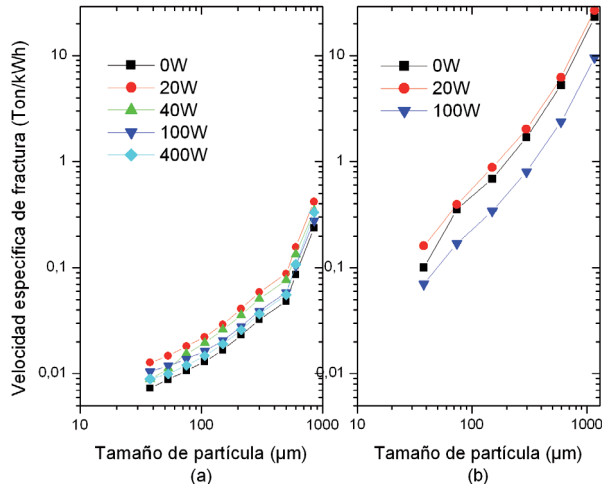
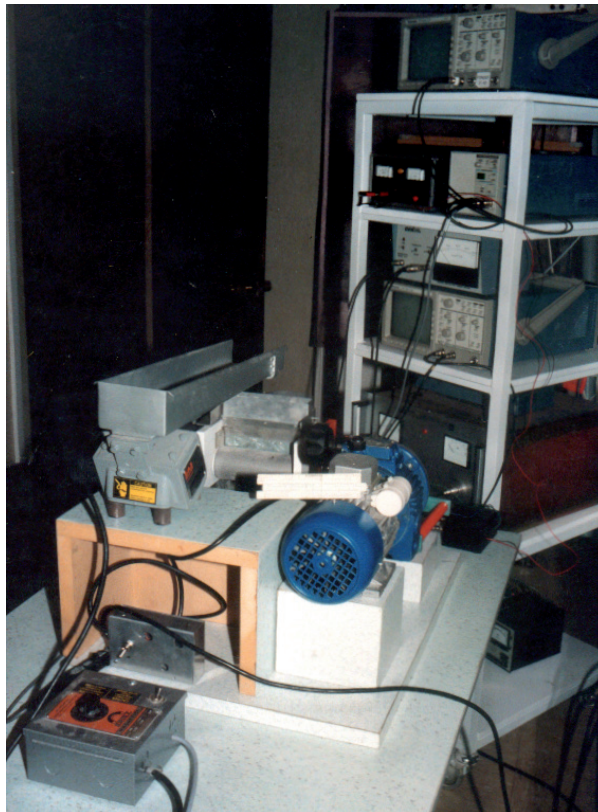


Fig. 6. Curvas de velocidad específica de fractura para dos materiales frágiles. (a) Alimentación: mineral de cobre (andesita) monotamaño [1.18, 1.7 mm]. Separación entre rodillos 0.2 mm. 120 rpm. (b) Alimentación: cuarzo monotamaño P80 2925 mm, Separación entre rodillos 0,25 mm 150 rpm.



Equipo utilizado para la evaluación del MURAP.

se representan curvas de otras potencias obtenidas para este ensayo. Diremos que, en general, las curvas de alta potencia se acercan más a la de 20 W que a la de 0 W. Debe notarse sin embargo, que la velocidad de fractura no toma en cuenta el desgaste del material moledor (rodillo) y en ese aspecto las altas potencias ultrasónicas tienen mucho que ganar. Así, por ejemplo, si se desea un material de mucha pureza podría ser recomendable realizar la molienda a 100 W de potencia ultrasónica sacrificando ligeramente el rendimiento del proceso. En este aspecto se puede mencionar que, para el cuarzo molido con una potencia ultrasónica de 100 W, no se detectó contribución de acero en el producto luego de haber reducido el tamaño desde unos 3 mm hasta 100% inferior a 40 micrones, en tres pasadas. En los ensayos repetidos se producen los efectos esperados: gran cantidad de fino y los “hábitos de fractura” del mineral se conservan manteniéndose la ventaja de la molienda para la potencia ultrasónica de 20 W.

CONCLUSIONES

Se ha ensayado una tecnología de molienda ultrasónica, en especial en la molienda de materiales frágiles. De los resultados de esta investigación se puede concluir lo siguiente:

La tecnología ultrasónica de molienda en MURAP consume en general menos energía que cualquiera de las tecnologías en uso actualmente.

El molino ultrasónico (MURAP) presenta una dramática disminución en el desgaste de los rodillos moledores.

Durante el proceso de molienda el comportamiento del mineral es similar al que se presenta en otras tareas de molienda.

Para cada material se debe establecer la mejor estrategia de molienda considerando, por ejemplo, la velocidad específica de fractura o alguna característica que se desee privilegiar. Por ejemplo, si se necesita un material extremadamente puro conviene el empleo de altas energías ultrasónicas, privilegiando este aspecto ante los mejores rendimientos.

Dado los altos consumos de energía que se registran en los procesos de molienda en la industria

minera es de interés escalar la tecnología desarrollada para hacerla útil en este tipo de tareas.

El buen desempeño de la máquina ultrasónica hace interesante explorar su empleo en molienda no tan fina para minerales que, por ejemplo, serán sometidos a lixiviación bacteriana.

Resulta de interés explorar si la máquina ultrasónica es capaz de activar la superficie de las sustancias molidas para facilitar procesos posteriores, como, por ejemplo, la flotación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la contribución del Proyecto ECOS-CONICYT C03E05 para mantener los intercambios científicos que han sido necesarios para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

1. W. Gärtner, *Acustica* 3, pp 124-128, 1959.
2. W. J. Fleischhaner and C. Kröger, *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen*, N° 2081, 1969.
3. K. F. Graff, *Ultrasonics International'79 Proc.*, pp 171-175, Graz, Austria, May 1979.
4. W. B. Tarpley Jr., P. L. Howard and G. R. Moulder, *Quarterly Technical Progress Report* N°2, 1980.

5. T. Link and R. P. Killmeyer, *PETC Coal Preparation Division Internal Report*, 1988.
6. M. F. Leach and G. A. Rubin, *Ultrasonic Symposium of IEEE*, pp 485-488, 1988.
7. Y. C. Lo and P. J. Kientzler, *Comminution-Theory and Practice Symposium*, SME Littleton, Co., Ed. S. K. Kawatra, Chapter 47, pp 645-659, 1992.
8. Y. C. Lo, P. Kientzler and R. P. King, *XVIII International Mineral Proc. Congress*, Sydney, 23-28 May, pp 145-153, 1993.
9. J. Menacho, C. Yerkovic and L. Gaete-Garretón, *Mineral Engineering*, Vol. 6, N° 6, 1993.
10. F. Blaha and B. Langenecker, *Acta Metallurg* 7(2), pp 93-100, 1959.
11. N. Patzelt, J. Kneecht, W. Baum, *Proceedings of the XX IMPC_ Aachen*, 21, 26 September pp 155-164.
12. L. Gaete-Garretón, Y. Vargas-Hernández, A. Chamayou, J. A. Dodds; W. Valderama-Reyes, F. Montoya-Vitini, *Chemical Engineering Science* 58 (2003) 4317 – 4322.
13. L. Gaete-Garretón, A. Gutiérrez-Silva, L. Magne-Ortega, J. Menacho-Llaña, Y. Vargas-Hernández, F. Montoya-Vitini. *Patente de Invención*. Registro N° 42.571Chile. 2005.
14. G. Austin, *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*, Pub. Society of Mining Engineers (1984).

