

## EL MOLINO ULTRASÓNICO DE RODILLOS EN LA MOLIENDA DEL CUARZO

REFERENCIA PACS 43.35.Zc

Valderrama-Reyes W.<sup>1</sup>; Aubé G.<sup>2</sup>; Pavlov-Gómez T.<sup>2</sup>; Gaete-Garretón L.<sup>2</sup>; Vargas-Hernández Y.<sup>2</sup>

Universidad de Santiago de Chile

Laboratorio de Ultrasonidos

Av. Ecuador 3493

Santiago 2. Chile

E-Mail 1: wvalderr@cmat.utfsm.cl

E-Mail 2: lgaete@lauca.usach.cl

### ABSTRACT

Using an ultrasonic-assisted high compression roller mill, a systematic study of the quartz mill is presented. By means of a statistical factors experimental design the effect of different grinding parameters were examined. The effect on the material flow, the energy expense and the product size was registered covering three levels. The results indicate that the ultrasound reduces the energy expense significantly. Other factors as the process capacity or the size of the product do not show significant effects by the presence or magnitude of ultrasound.

### RESUMEN

Se presenta un estudio sistemático de la molienda de cuarzo utilizando un molino de rodillos de alta presión que opera con ultrasonidos. Mediante un diseño experimental estadístico por factores se examinó el efecto de la velocidad de los rodillos, el tamaño de alimentación fresca, la relación entre la separación de los rodillos y el tamaño de alimentación, y el nivel de potencia ultrasónica aplicado en los rodillos, cubriendo este último tres niveles. Se registró el efecto sobre el flujo de material, el gasto energético y el tamaño de producto.

Los resultados indican que los ultrasonidos reducen significativamente el gasto de energía, lo que se expresa en un menor torque ejercido por el motor, en un menor consumo de potencia y en consumos específicos de energía por unidad de material procesado que pueden ser menores aún incluyendo el gasto de energía en generar ultrasonidos. Otros factores tales como la capacidad de proceso o el tamaño del producto no muestran efectos significativos generados por la presencia o magnitud de los ultrasonidos.

### INTRODUCCIÓN

Una de las tecnologías que se muestra promisorias en la difícil tarea de realizar molienda fina de materiales es la del Molino Ultrasónico de rodillos, una máquina construida como un molino de rodillos de alta presión, pero dotado de capacidades ultrasónicas, y que ha sido descrito en [1]. Para esta máquina los autores claman un excelente comportamiento desde el punto de vista mecánico, energético y de la resistencia a la abrasión, problemas que han

sido críticos para hacer que la tecnología de los molinos de rodillo sea aplicada de forma masiva en los procesos de molienda. Una vez establecidas las potencialidades de la máquina en términos genéricos, se hace necesario evaluar el proceso para cada material a beneficiar. En este trabajo se presenta la evaluación del molino ultrasónico de rodillos para la molienda del cuarzo. Se ha elegido este material por tratarse de un producto calificado como duro, difícil de moler, abundante en la naturaleza y de gran número de aplicaciones industriales.

## PLAN EXPERIMENTAL

La evaluación de una tecnología como la descrita puede representar una cantidad considerable de trabajo si se pretende hacer ensayos para todos los valores posibles de cada una de las variables en estudio. Por esta razón, se ha elegido la realización de una matriz experimental construida con un criterio estadístico para cubrir un amplio espacio de posibilidades con una cantidad reducida de experimentos.

Las variables consideradas para los ensayos fueron la velocidad de los rodillos, la potencia ultrasónica consumida, el tamaño de la alimentación y la razón entre el tamaño de la alimentación y la separación entre rodillos (gap). Las variables de respuesta observadas fueron el flujo de material, la potencia mecánica neta consumida por el proceso, el consumo específico de energía mecánica y el consumo específico total neto agregando la energía ultrasónica, el torque en los rodillos, la distribución de tamaño del producto y la razón de reducción obtenida.

Se realizó previamente un examen de reproductibilidad de la técnica experimental, para lo cual se hicieron 6 ensayos equivalentes de molienda con las variables del proceso situadas en valores medios del rango a estudiar, según se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1 Ensayos de Reproductibilidad**

Item	Valor medio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
RPM rodillo mayor	150		
RPM rodillo menor	342.9		
Potencia ultrasónica (W)	20		
F80 (mm)	2186		
Gap nominal (mm)	500		
Razón F80 a Gap	4.4		
Velocidad Tangencial (mt/s)	0.503		
Tiempo molienda (seg)	<b>62.28</b>	1.29	2.7%
Flujo másico (ton/h)	<b>0.175</b>	0.0032	1.8%
Potencia neta (kW)	<b>0.316</b>	0.02	6.3%
Energía Específica Mecánica neta ( kWh/ton)	<b>1.801</b>	0.128	7.1%%
Energía Específica Total Neta, (kWh/ton)	<b>1.92</b>	0.129	6.7%
P80 (mm)	<b>676</b>	21	3.1%
Razón de Reducción	<b>3.2</b>	0.099	3.1%

A continuación, se realizó una serie de ensayos siguiendo un diseño factorial de dos niveles y cuatro variables, sin confundido, en dos bloques. Luego se amplió el diseño para incluir un nivel adicional de la potencia ultrasónica, lo que constituye un tercer bloque. La Tabla 2 muestra el arreglo de valores escogido y los principales resultados obtenidos. La nomenclatura es la estándar en diseños factoriales, llamando O al ensayo en que todas las variables están en su nivel bajo, mientras que los restantes ensayos se denominan según las variables que están en nivel alto.

Para cada condición de ensayo se hicieron tres moliendas, reprocesando en la segunda y tercera el material de la primera molienda y midiendo en cada etapa la distribución de tamaño resultante y las variables de proceso. Estas últimas experiencias permiten investigar el comportamiento cinético del sistema.

**Tabla 2 Plan Experimental**

Símbolo	Variable	Nivel Bajo	Nivel alto	Observaciones
V	Velocidad del rodillo mayor (rpm)	50	230	La velocidad tangencial de ambos rodillos es la misma
F	Tamaño de Alimentación F80 ( $\mu\text{m}$ )	967	2925	
G	Razón entre el tamaño de alimentación F80 y la separación entre rodillos (gap)	3.9-4.9	9.7-9.8	Por limitaciones de ajuste este factor presenta dispersión asociada a cada bloque
U	Potencia Ultrasónica (Watt).	0	20	Primera Serie.
U	Potencia Ultrasónica (Watt).	20	100	Segunda Serie.
	Nº Ensayos en cada serie	16		No hay confundido de variables

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La discusión se ordenará en función de la capacidad de proceso, del consumo energético, y del tamaño del producto. Para ello se reportan los efectos absolutos y relativos de los factores sobre un grupo de variables de respuesta. La tabla 3 muestra los resultados obtenidos. En cada caso se reporta el promedio de todos los ensayos, y luego el efecto de cada factor, el cual corresponde a la mitad de la diferencia entre el promedio de los resultados cuando el factor respectivo se encuentra en su nivel alto respecto del promedio cuando dicho factor se encuentra en su nivel bajo. Se indican los valores absolutos de dichos efectos y en la línea siguiente su relación porcentual con los promedios del conjunto de ensayos. Para cada variable de respuesta se presentan por separado el resultado de los ensayos en que se compara el efecto de la presencia de ultrasonidos con los de la serie en que se evalúa el efecto de elevar la potencia ultrasónica aplicada.

### Capacidad de proceso

La capacidad de proceso es el resultado combinado del flujo de material que se logra hacer pasar por el molino y de la reducción de tamaño lograda. Examinando en primer lugar el flujo de material, se observa que ésta aumenta significativamente con la velocidad de los rodillos y disminuye al hacerse más gruesa la alimentación. La separación entre los rodillos y la presencia de ultrasonidos no afectan en forma significativa este resultado. Si se gráfica el flujo respecto de la velocidad del rodillo, separando los datos según el tamaño de alimentación, se observa que a velocidad mayor el flujo se desvía de la linealidad, evidenciando cierto resbalamiento, lo que es más marcado para la alimentación más gruesa.

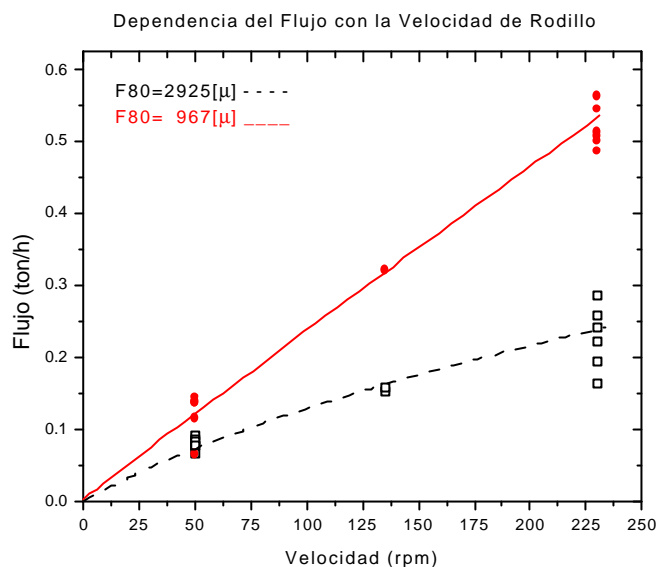


Figura 1 Dependencia del flujo de la velocidad del rodillo.

Tabla 3 Efectos de las variables

	PROMEDIOS	EFECTOS			
		VELOCIDAD	POTENCIA ULTRASÓNICA	F80 /GAP	F80
<b>Flujo (ton/h)</b>					
PU 0-20 Watt	0.245	0.134	0.006	-0.007	-0.089
		54.7%	2.4%	-2.7%	-36.4%
PU 20-100 Watt	0.236	0.141	-0.015	-0.017	-0.079
		59.8%	-6.6%	-7.3%	-33.6%
<b>PotMecNeta (kW)</b>					
PU 0-20 Watt	0.439	0.223	-0.155	0.82	-0.205
		51.0%	-35.3%	18.8%	-46.9%
PU 20-100 Watt	0.263	0.167	-0.021	0.036	-0.114
		63.3%	-7.9%	13.6%	-43.4%
<b>E mec esp neta(kWh/t)</b>					
PU 0-20 Watt	1.785	-0.109	-0.693	0.384	-0.200
		-6.1%	-38.8%	21.5%	-11.2%
PU 20-100 Watt	1.071	0.056	-0.022	0.232	-0.096
		5.2%	-2.0%	21.6%	-8.9%
<b>E esp total neta(kWh/t)</b>					
PU 0-20 Watt	1.849	-0.143	-0.629	0.386	-0.182
		-7.7%	-34.0%	20.9%	-9.9%
PU 20-100 Watt	1.547	-0.220	0.327	0.303	-0.018
		-14.2%	21.1%	19.6%	-1.1%
<b>Torque (Nm)</b>					
PU 0-20 Watt	45.8	-5.4	-4.4	7.6	-20.5
		-11.7%	-9.6%	16.5%	-44.7%
PU 20-100 Watt	37.6	1.6	-3.9	3.4	-15.3
		4.1%	-10.3%	9.0%	-40.7%
<b>Distribución de Tamaño Acumulado a 74μ</b>					
PU 0-20 Watt	12.6	-0.3	-0.5	2.8	-3.0

		-2.0%	-4.0%	22.3%	-24.1%
PU 20-100 Watt	11.7	0.4	-0.4	2.2	-3.1
		3.4%	-3.2%	19.0%	-26.4%
<b>P20(mm)</b>					
PU 0-20 Watt	137.3	0.1	0.5	-36.4	39.6
		0.1%	0.4%	-26.5%	28.9%
PU 20-100 Watt	142.4	-4.3	4.6	-30.0	39.6
		-3.0%	3.2%	-21.1%	27.8%
<b>P80(mm)</b>					
PU 0-20 Watt	605.2	-10.3	3.6	-101.1	108.7
		-1.7%	0.6%	-16.7%	18.0%
PU 20-100 Watt	609.3	-12.7	0.6	-91.7	109.1
		-2.1%	0.1%	-15.0%	17.9%

Si prestamos atención ahora a la cantidad de material fino generado bajo malla 200 (74 $\mu$ ), se observa que ni la velocidad del rodillo ni la aplicación de ultrasonido tienen efectos significativos. Con el tamaño de alimentación más grueso disminuye la proporción de fino. En cambio, al aumentar la razón entre alimentación y gap, aumenta la proporción de fino obtenido. Ambos efectos son lógicos y esperables. Igual tendencia muestran los tamaños P20 y P80. De lo anterior se desprende el resultado obvio que la capacidad de proceso mejora al hacer girar más rápido los rodillos minimizando la separación entre los mismos. Ambas condiciones aplicadas simultáneamente conducen a un aumento del torque requerido para operar la máquina.

Al examinar ahora el efecto de variables sobre el torque, se observa que la aplicación de ultrasonidos disminuye significativamente el torque necesario, y que el efecto se prolonga al elevar la potencia ultrasónica. La menor separación entre rodillos eleva el torque, como es de esperar, mientras que la alimentación más gruesa lo reduce. Este último efecto aparentemente contradictorio parece provenir del efecto negativo sobre el flujo que tiene el material grueso, lo que se traduce en que la cantidad de mineral en la zona activa es menor, demandando menos torque de la máquina.

#### Consumo de Energía

La demanda de potencia presenta una conducta predecible, creciendo con la velocidad y con el uso de separación menor entre rodillos. El material grueso demanda menos potencia por la misma razón planteada en la discusión del torque. Sin embargo, aquí se aprecia un efecto sumamente relevante del ultrasonido. En promedio, al aplicar 20 watt de ultrasonido, la potencia neta requerida por el motor se reduce a un 30% de la situación sin ultrasonido. Al continuar elevando la potencia ultrasónica, el efecto se atenúa considerablemente.

Como consecuencia de lo anterior, el consumo específico de energía se reduce en una proporción similar. Si agregamos a este consumo la energía utilizada para generar el ultrasonido para calcular el consumo específico global neto, aún se mantiene la reducción en casi un 70% en promedio al aplicar 20 watt de ultrasonido. Sin embargo, al elevar a 100 watt la potencia de ultrasonido, se eleva en 40% el consumo total de energía. En conclusión, es la presencia de ultrasonido lo que provoca el efecto de reducción del consumo de energía.

#### Cinética de Molienda

Las pruebas de molienda repetida permiten estudiar el comportamiento cinético del molino. El número de veces que el mineral se procesa da una medida de la cinética del proceso en moliendas sucesivas. Como se trata de un procesamiento secuencial del material, el tiempo que éste está efectivamente sometido a condiciones de molienda se reduce al de residencia en los rodillos. El tiempo total de proceso incluye los tiempos de espera del material grueso antes de ser mordido por los rodillos, lo cual tiene sentido tecnológico, pero da información confusa sobre el proceso de molienda mismo.

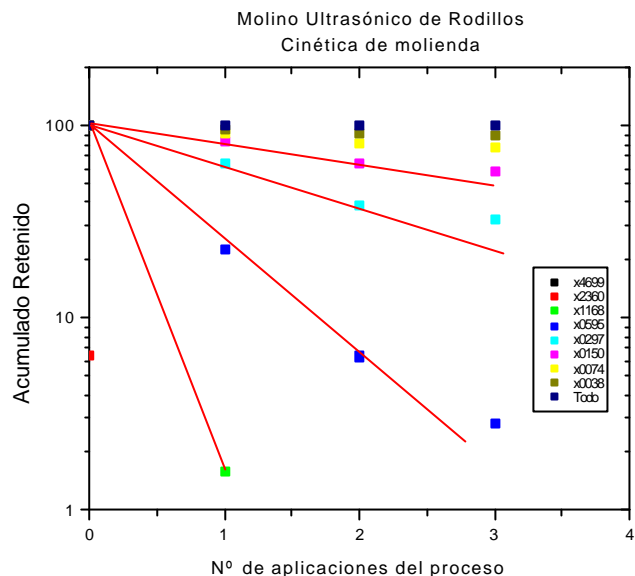


Figura 2 Cinética de molienda de los ensayos preliminares.

La Figura 2 muestra la evolución del porcentaje de material retenido sobre una malla dada en función del número de pasadas por el molino. Se aprecia claramente que la cinética es de primer orden hasta la segunda pasada. En la tercera pasada se observa una atenuación general de la velocidad de desaparición de material.

En la Figura 3 se muestran curvas cinéticas en función de los factores ensayados. Se observa que la relación entre el tamaño de alimentación y el gap interrodillos es mucho más significativo que el ultrasonido o la velocidad. Asimismo, al introducir material más fino, la cinética se hace similar para todos los casos ensayados.

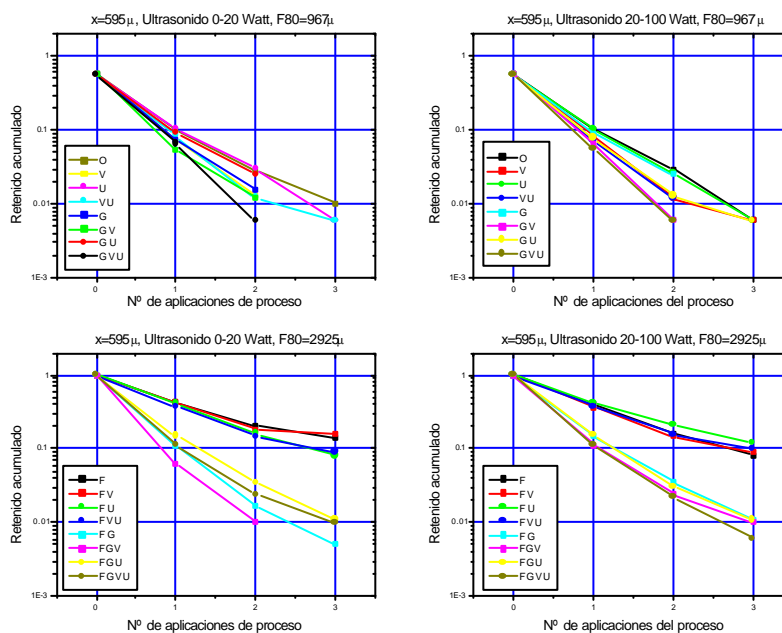


Figura 3 Efecto de factores en la cinética de molienda, para dos rangos de potencia en la aplicación de ultrasonido.

## **CONCLUSIONES**

Los ensayos de reproductibilidad muestran que la metodología propuesta es adecuada para la evaluación de una tecnología de molienda.

La realización de ensayos sistemáticos basados en el diseño factorial estadístico propuesto muestra que la aplicación de ultrasonidos en un molino de rodillos reduce significativamente el gasto de energía, aún considerando la necesaria para generarlos.

El menor consumo energético se expresa en una disminución del torque ejercido por el motor, un menor consumo de potencia y en consumos específicos de energía por unidad de material procesado menores.

Otros factores tales como la capacidad de proceso o el tamaño del producto no muestran efectos significativos generados por la presencia o magnitud de los ultrasonidos.

Estos resultados, que se asemejan a algunos obtenidos previamente para otras sustancias, mantienen vigente la expectativa de hacer viable la aplicación del molino de rodillos de alta presión a minerales más duros, como los hallados en la industria minera del cobre, reduciendo la exigencia mecánica a través de la presencia de ultrasonidos.

Los resultados que se muestran en la Figura 3 muestran que los ultrasonidos no parecen influir de forma significativa en la cinética de molienda, ésta se mantiene de primer orden en todos los casos hasta la segunda pasada sin variar los parámetros de la máquina.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos el soporte financiero del proyecto FONDEF D97T1011 y de los proyectos DICYT-USACH 059931-GG y DICYT-USACH 059931VH.

## **REFERENCIAS**

- 1.- Gaete-Garretón, L. , Vargas-Hernández Y. y Velásquez-Lambert C.  
Application of ultrasound in comminution. Ultrasonics 38 (2000) 345-352.