

Principales características y parámetros físicos y físico-mecánicos de tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes para la simulación de la preparación mecánica

Mafefe Frazao-Ndumba¹ / maffrazaod@yahoo.es
Francisco Martins Pole¹ / fmpole@yahoo.es
Alfredo L. Coello-Velázquez¹ / acoello@ismm.edu.cu
Juan María Aguado Menéndez² / maguado@uniovi.es
Gerardo Orozco Melgar¹ / gorozco@ismm.edu.cu

RESUMEN

A partir de establecer las características y parámetros físicos y físico-mecánicos de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes se elaboró una propuesta de variante tecnológica para la preparación mecánica. La composición granulométrica de los productos triturados se determinó mediante el análisis de tamizado por vía seco-húmeda. El índice de Bond, la cinética de molienda y la función selección fueron establecidos según las metodologías recomendadas en la literatura. La función de rompimiento se determinó por el método del monotamaño y el Kapur-modificado. Para garantizar la reproducibilidad de los resultados se empleó el método de la 2s. Entre los principales resultados se obtuvo que el modelo experimental se asemeja considerablemente al modelo de Rozin- Rammler y el índice de Bond es de 13,51 kWh/t. Para obtener un producto granulométricamente más homogéneo y más fino se empleó un esquema de dos etapas de trituración en circuito cerrado, que es más efectivo que el esquema de dos etapas con circuito abierto. El valor de d_{80} obtenido fue de 1,823 mm.

PALABRAS CLAVE

Tobas zeolitizadas, parámetros físico-mecánicos, preparación mecánica, yacimiento Caimanes, Moa, Cuba.

Recibido: mayo 2007 / Aceptado: junio 2007

¹ Instituto Superior Minero Metalúrgico. Las Coloradas s/n, Moa, Cuba.

² Grupo de Ingeniería para el Desarrollo, Universidad de Oviedo, España.

Main characteristics and physical-mechanical parameters of the zeolitic tuffs from Caimanes deposit for the simulation of the mechanical preparation

ABSTRACT

Characterization based on physical and physico-mechanical parameters of zeolitic tuffs from Caimanes deposit was done in order to obtain technological variants for its mechanical treatment. Granulometric composition of products of mechanical treatment was made by sieve analysis through the wet-dry way. Bond index, grinding kinetic and the selection function were established according to the recommended methodologies in the bibliography. Breakage function was determined by the methods of mono-size and the modified kapur. In order to guarantee the reproducibility of the results the method of 2s was used. Among the main results, it was established that the experimental model is very similar to Rozin Rammler model and Bond index was 13,51 kWh/t. The two stage scheme with a closed circuit was more adequate than the two stage scheme with an open circuit in order to obtain a granular product more homogeneous and finest. The obtained d_{80} was 1,823 mm.

KEY WORDS

Zeolitic tuffs, physical-mechanical parameters, mechanical treatment, Caimanes deposit, Moa, Cuba.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la producción de zeolitas naturales ha experimentado un crecimiento sostenido debido a su probada utilidad como elemento natural, utilizado en la conservación de semillas para la agricultura, en la fabricación de fertilizantes, el tratamiento de aguas, el mejoramiento y conservación de los suelos, las producciones agrícolas protegidas y otras (Coello et al, 2004).

El uso de las zeolitas naturales en la aplicaciones medio ambientales sigue ganando un espacio importante en el interés de muchos autores gracias a su bajo costo, su presencia mundial y el amplio espectro de su aplicaciones (Engret y Rubio, 2004; Rodríguez-Iznaga et al, 2002). Los métodos y tecnologías existentes para la remoción de contaminantes biológicos o químicos existentes son revisados para su introducción e implementación, además de los recientes esfuerzos realizados en el descubrimiento de alternativas ecológicamente amigables y económicamente factibles (Rozic et al., 2000). Las clinoptilolitas y mordenitas aparecen como las variedades mineralógicas más importantes y juegan un rol industrial significativo (Mondale et al., 1995 y Tschernich, 1992).

Comúnmente el procesamiento de las rocas zeolitizadas naturales incluye las operaciones de trituración y molienda, el cribado y la clasificación. La diversidad de sus aplicaciones implica una gran variedad de producciones, caracterizadas principalmente por su espectro granulométrico como principal característica de calidad.

La concentración de fases impone la necesidad de realizar un número importante de estudios experimentales que apunten, en primer lugar, al conocimiento de los parámetros físicos y físico-mecánicos que permitan compilar la información necesaria para el diseño de la preparación mecánica. El objetivo del presente trabajo es exponer los principales resultados de la determinación de los parámetros físicos y físico-mecánicos y

las funciones necesarias para la simulación de la preparación mecánica de tobas zeolitizadas de un sector del yacimiento Caimanes en Moa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomó una muestra representativa del horizonte superior de un sector del yacimiento Caimanes con ayuda del método de puntos y masa total de una tonelada. La muestra inicial fue sometida a estudio de su composición química, tamaño de los granos y agrietamiento, usando la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). La mineralogía fue estudiada por medio de la difracción de rayos X empleando un difractómetro alemán HZG-4 y el software ANALYZE para el procesamiento de los datos experimentales y el análisis cualitativo.

La muestra en su totalidad se trituró, en dos etapas, en trituradoras de mandíbulas (TQ), hasta un diámetro inferior a 3,15 mm, después de una trituración manual hasta 100 mm, posterior a la cual fue homogeneizada y cuarteada con ayuda del método del anillo y el cono .

Se realizaron estudios granulométricos con tamices siguiendo la serie de Taylor. Se determinó el índice de Bond, la cinética de molienda y las funciones de selección y rompimiento según metodologías descritas (Menéndez-Aguado, 2001; Austin y Concha, 1994). Se estudió la influencia de la carga de bolas en la funciones de rompimiento y selección. Con los resultados experimentales obtenidos se procedió a la simulación con el software MODSIM.

RESULTADOS

Los resultados de la MEB aparecen en la figura 1. Según los contenidos de calcio y potasio se puede definir que las zeolitas presentes en la muestra son cálcicas y en menor grado potásicas. El contenido de Fe esta asociado a su presencia en grietas y fisuras.

La foto de la figura 1 muestra la diversidad de la geometría de los granos, siendo su tamaño variable entre los 50 y 70 micrómetros. En la figura 2 se observa la presencia de grietas, fisuras y microfisuras que varían desde uno hasta seis micrómetros y cavidades con cristales en el orden de los 20 a 30 micrómetros.

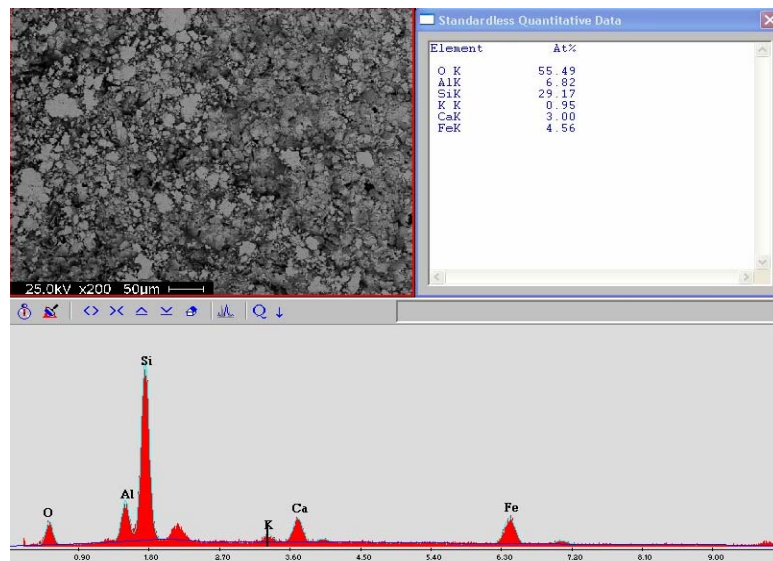


Figura 1. Imagen de MEB, muestra de toba zeolitizada molida por debajo de 74 μm (arriba a la izquierda). Resultado del análisis químico semicuantitativo por EDS (arriba a la derecha). Abajo: espectro de la abundancia cualitativa de los elementos, los cationes predominantes son el Ca y el K.

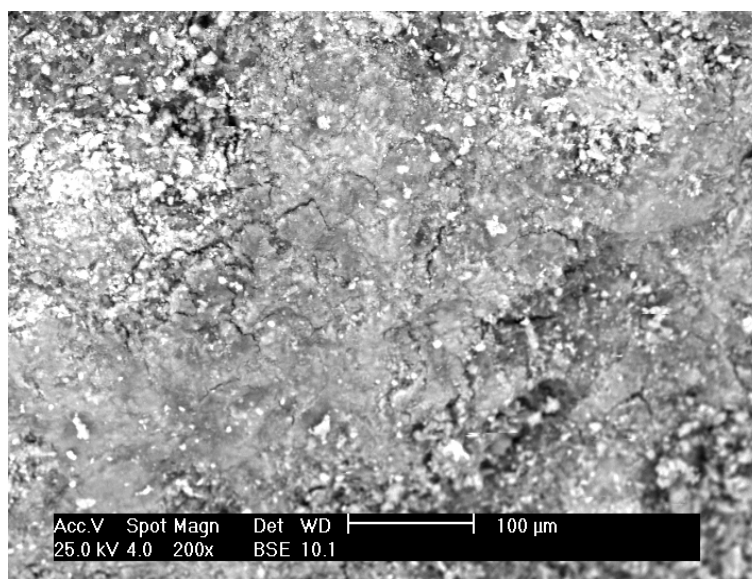


Figura 2. Imagen de electrones retrodispersados. Se observa de forma general el tamaño fino del grano de la muestra, algunas cavidades de alrededor de 30 μm están rellenas por cristales de zeolitas muy pequeños.

La figura 3 muestra la composición mineralógica de la toba zeolitizada analizada por difracción de rayos X, empleando radiación de CoK α y utilizando el software ANALYZE para el procesamiento de los datos experimentales y la representación de los resultados cualitativos. Se establecieron las fases: heulandita-Ca, clinoptilolita-Ca y cuarzo.

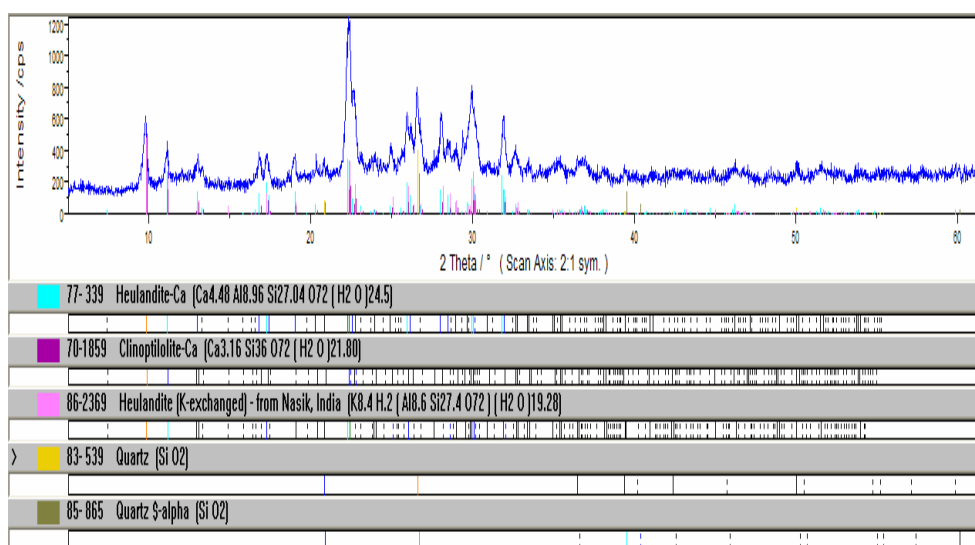


Figura 3. Composición mineralógica cualitativa de la muestra determinada por difracción de rayos X. Radiación empleada CoK α . Software Analyze.

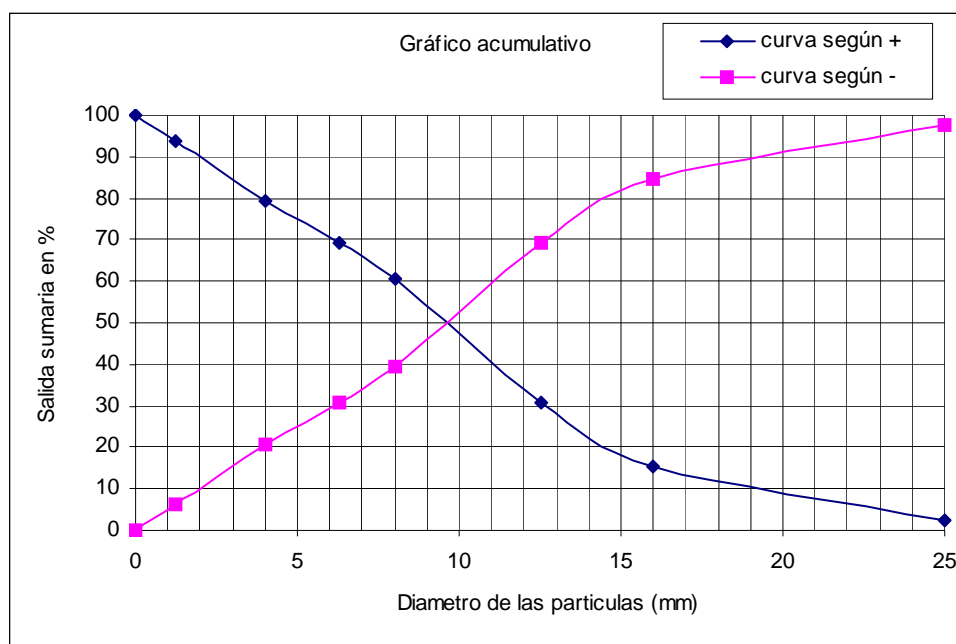


Figura 4. Composición granulométrica de la muestra obtenida en la (TQ) 320x165

La figura 4 y la tabla 1 muestran los resultados del análisis granulométrico para el producto triturado. A juzgar por la forma de la curva granulométrica, el tamaño de los granos tiene una tendencia a ser homogéneo hasta la clase cercana a los 12 mm. El diámetro d_{80} está en el orden de los 13,8 mm aproximadamente. De acuerdo con los resultados de la tabla 1, el diámetro máximo se encuentra en los valores cercanos a los 2,0 mm, el diámetro d_{80} es de 0,8 mm.

Tabla 1. Composición granulométrica del producto triturado en la trituradora 150x75

Clase de tamaño(mm)	Peso (g)	g (%)	g + (%)	g ⁻ (%)
3	1241,3	9,79	9,79	100
-3 +2	685,5	5,41	15,2	90,21
-2 +1,25	438,9	3,46	18,67	84,8
- 1,25 +0,8	1511,7	11,93	30,59	81,33
-0,8 + 0,51	1180,5	9,31	39,91	69,41
-0,51 +0,25	1629,1	12,85	52,76	60,09
-0,25 + 0,16	1832,5	14,46	67,22	47,24
- 0,16+0,074	1830,1	14,44	81,66	32,78
-0,074+0,00	2324,8	18,34	100	18,34
Total	12674,5	100		

Cinética de la molienda

Los resultados de la cinética de molienda del material zeolítico del yacimiento Caimanes aparecen en la figura 5. La regularidad observada coincide plenamente con la tipicidad de este tipo de estudio. El 80-90 % de la clase -0,074 mm se alcanza por encima de los 20 minutos.

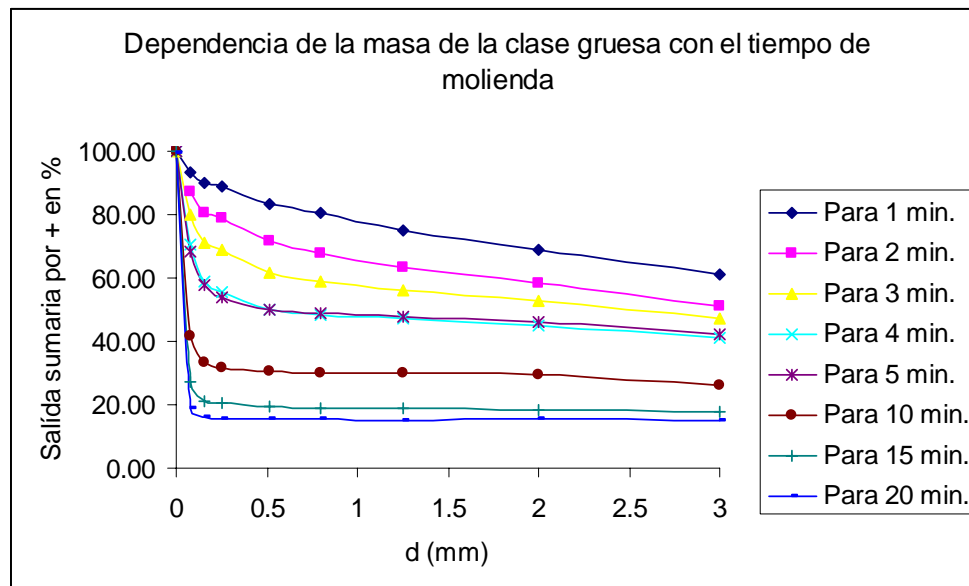


Figura 5. Dependencia de la masa de la clase gruesa con el tiempo de molienda.

Resultados de la determinación del índice del Bond

El índice de Bond es definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y molienda (Morrell, 2004). Este índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del 20 del siglo XX (Mosher y Tague, 2001). Sus valores han sido usados para el diseño industrial de los circuitos de molienda (Rowland y Kjos, 1978); su error aún satisface de manera general a los proyectistas. Este índice es casi obligatorio para determinar en condiciones de laboratorio cuando no se tienen aún las datas industriales, como sucede en el caso del yacimiento Caimanes. El procedimiento de Bond es una parte estándar para la caracterización de los circuitos de molienda y trituración (Mosher y Tague, 2001). El valor determinado del índice Bond para la muestra investigada es de 12,28 Kwh/st o sea, 13,51 kWh/t, muy similar a los valores para las rocas feldespáticas y dolomíticas (Benvimdo et al., 1998).

Determinación de las funciones de rompimiento y selección. Influencia de la carga de bolas

La modelación de los procesos de trituración y molienda están basados en la descripción del producto de la fractura primaria de los trozos minerales. Justo esta descripción se denomina función de rompimiento (B). Esta función no depende del tamaño máximo del mineral (Lynch, 1977), ni del tiempo de molienda (Austin y Concha, 1994), aunque sí describe la naturaleza del proceso de fractura o rompimiento de un mineral. La función rompimiento producto de un acto simple de fractura se puede definir como la fracción de las partículas hijas de tamaño menor que x que resulta del rompimiento de un partícula simple y (King, 2001). La función selección S por su parte, no es otra cosa que la probabilidad de que una partícula mineral resulte fracturada.

Esta función depende de las características del mineral y el equipamiento (Lynch, 1977). Tanto la función de rompimiento B y selección S juegan un rol cardinal en la descripción cuantitativa de las operaciones de trituración y molienda. Los resultados para la función rompimiento aparecen en las figuras 6 y 7.

La regularidad que sigue la función B (rompimiento) para el caso de las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes coincide con las reportadas en diferentes trabajos (Lynch, 1977; King, 2001). A juzgar por los resultados expresados en la figura 7, la carga de bolas no influye en los resultados de la función de rompimiento, lo cual corrobora las tesis planteadas por diferentes autores sobre la naturaleza de esta función (Lynch, 1977; Plasher, 1987; Austin y Concha, 1994; King, 2001). Los valores de la función B (x, y) son insensibles a las condiciones de molienda por lo menos en las condiciones normales de operación (Shoji, 1979).

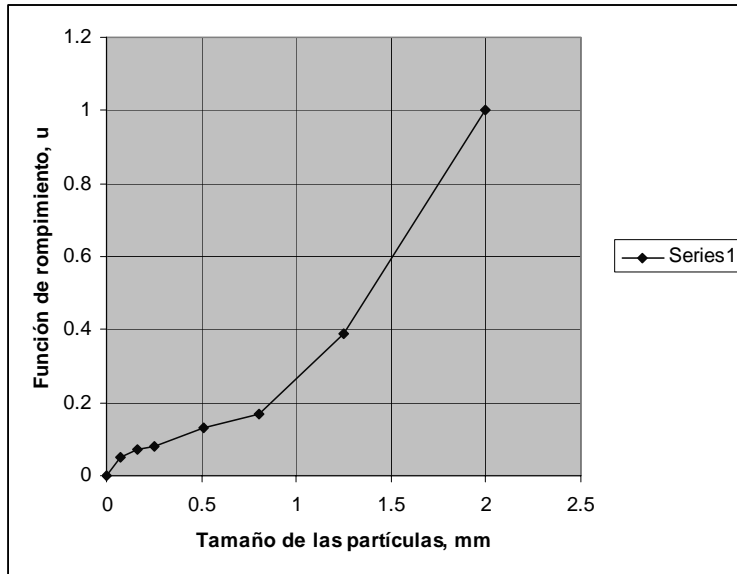


Figura 6. Función rompimiento para una carga de bolas de 50 %. Serie 1:50 %.

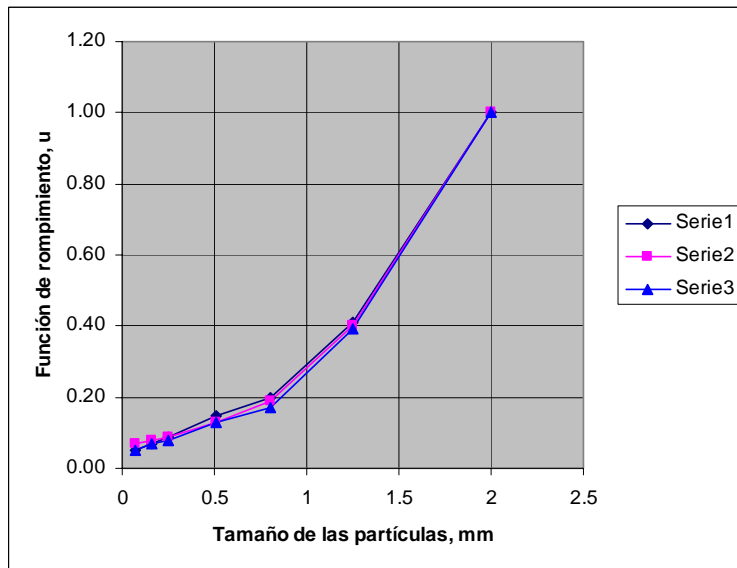


Figura 7. Influencia de la carga de bolas en la función rompimiento. Carga de bolas. Serie 1: 40 %. Serie 2: 45 %. Serie 3: 50 %.

Los resultados de la función S (selección) para la muestra investigada del yacimiento Caimanes en términos de regularidad coinciden con los resultados reportados en la literatura (Kotake et al, 2002), figura 8. De manera que a medida que aumenta el tamaño de la partícula, se incrementa la probabilidad de fractura del material. En consecuencia, a medida que aumenta la carga de bolas, aumenta también la probabilidad de fractura de las partículas minerales como se representa en la figura 9.

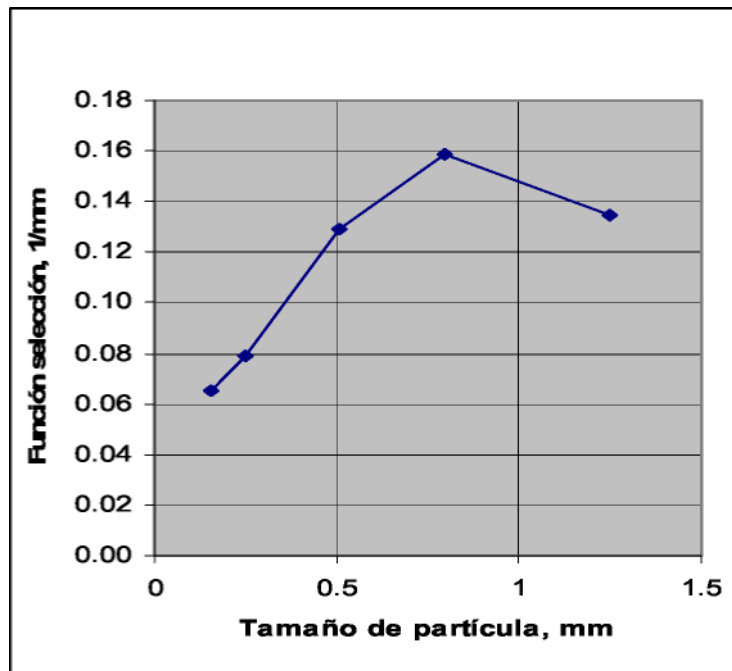


Figura 8. Función selección para una carga de bolas de 50%.

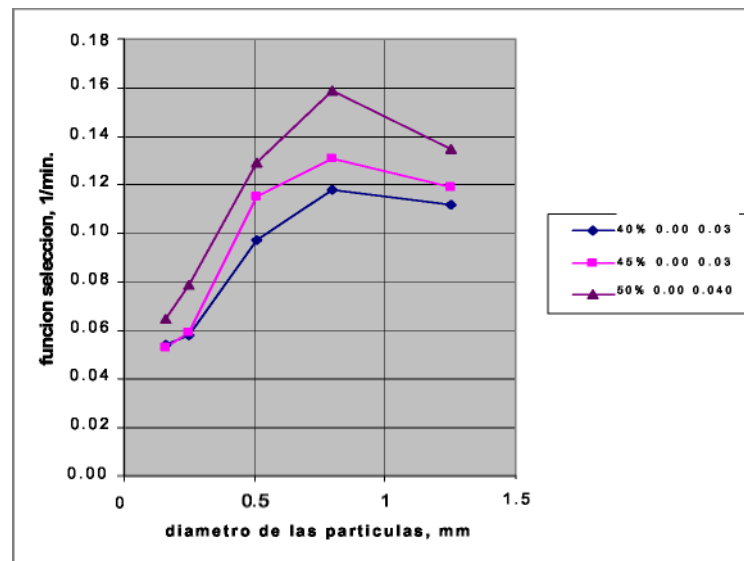


Figura 9. Influencia de la carga de bolas en la función selección.

Simulación del proceso de reducción de tamaño de la zeolita de Caimanes con ayuda del MODSIM

El esquema tecnológico seleccionado para la simulación aparece en la figura 10. Los resultados estimados con ayuda del modelo Rozin-Rammler aparecen en la figura 11.

A juzgar por los resultados expuestos en la figura 11 el tamaño máximo del mineral expresado en términos de d_{100} corresponde aproximadamente a 46,5 mm.

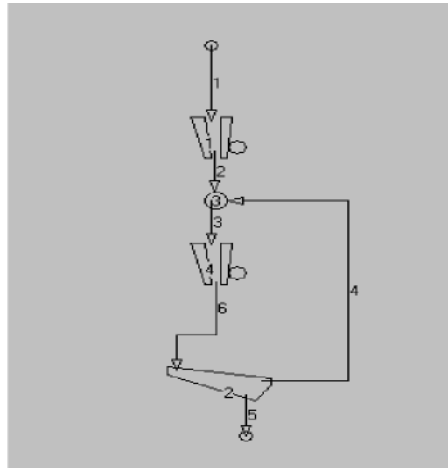


Figura 10. Esquema tecnológico empleado para la simulación

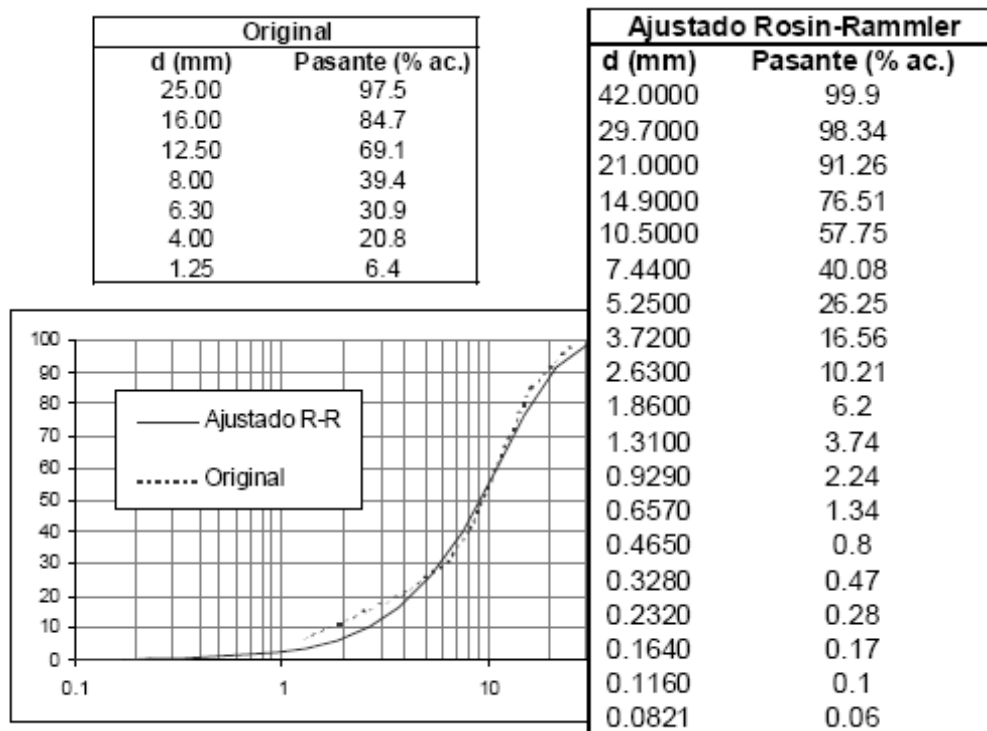


Figura 11. Datos de entrada y de salida del ajuste al modelo Rosin-Rammler.

En la tabla 2 se muestran los resultados graficados de la composición granulométrica de la trituración de las rocas zeolitizadas para el esquema escogido. De acuerdo con los resultados es posible obtener un producto triturado con un

tamaño máximo d_{80} de 1,823 mm. Los resultados de la simulación de la primera trituradora demuestran una similitud muy cercana a los resultados experimentales, los valores de d_{80} para ambos casos son bastante cercanos (13,86 y 13,8 mm respectivamente).

Tabla 2. Resultados de la simulación del esquema de dos etapas con circuito cerrado

Salida acumulativa por cernido, %						
d (mm)	Alim. 1 ^a	Salida 1 ^a	Alim. 2 ^a	Rechazo criba	Pasante criba	Salida 2 ^a
42,00	99,9	99,97	99,98	100	100	100
29,70	98,34	99,29	99,47	100	100	100
21,00	91,26	95,08	96,29	100	100	100
14,90	76,51	83,99	87,92	100	100	100
10,50	57,75	67,17	75,24	100	100	100
7,44	40,08	49,21	61,7	100	100	100
5,25	26,25	35,69	51,44	100	99,94	99,76
3,72	16,56	27,01	43,86	100	98,9	95,54
2,63	10,21	20,11	33,33	100	93,58	73,88
1,86	6,2	14,8	19,28	96,88	81,18	33,02
1,31	3,74	10,79	14,52	76,12	63,79	25,95
0,929	2,24	7,82	10,51	54,99	46,08	18,74
0,657	1,34	5,64	7,65	40,5	33,94	13,8
0,465	0,8	4,06	5,62	30,54	25,59	10,41
0,328	0,47	2,91	4,09	22,68	19,01	7,73
0,232	0,28	2,08	2,97	16,66	13,96	5,68
0,164	0,17	1,49	2,14	12,13	10,17	4,13
0,116	0,1	1,06	1,54	8,78	7,36	2,99
0,082	0,06	0,76	1,1	6,33	5,31	2,16
d_{80}	16,343	13,856	12,152	1,413	1,823	2,938

d - tamaño de las partículas (mm).

d_{80} - tamaño del tamiz donde se retiene el 20 % del material alimentado (mm).

Al comparar los productos finales de los dos esquemas (dos etapas con circuito abierto y dos etapas con circuito cerrado) se ve claramente que en términos de calidad, el esquema con circuito cerrado permite la obtención de un producto granulométricamente más homogéneo que el esquema de dos etapas con circuito abierto, además de resultar más fino; el d_{80} es de 1,823 y 3,1 mm respectivamente como se observa en la figura 13.

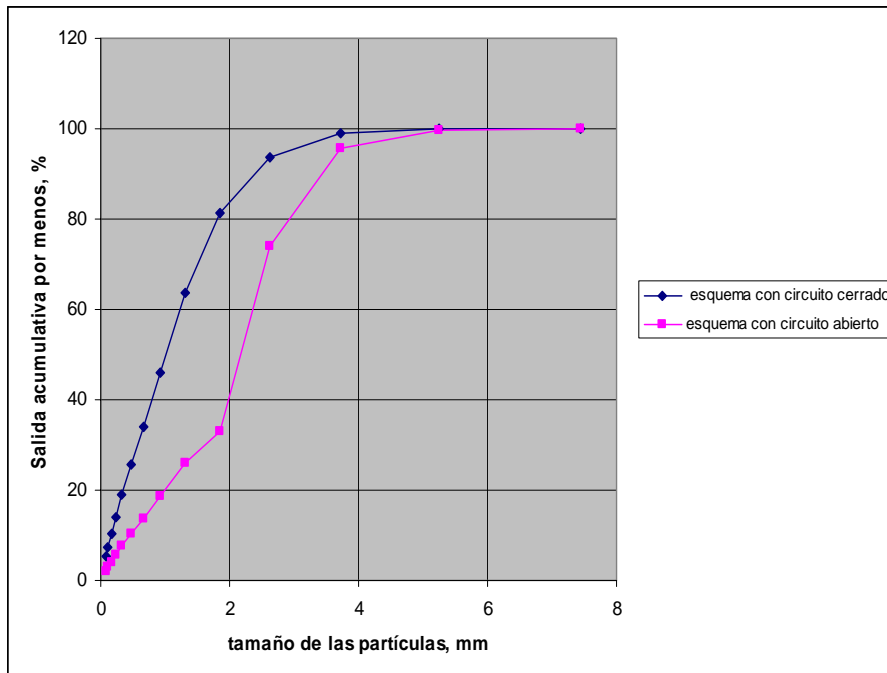


Figura 13. Característica granulométrica de los productos finales de los dos esquemas.

CONCLUSIONES

El tamaño de los granos tiende a ser homogéneo hasta la clase cercana a 12 mm, estando el d_{80} en el orden de los 13,8 mm aproximadamente. El valor del índice de Bond es de 12,28 Kwh/st (13,51 kWh/t), muy similar a los valores reportados por otros autores para las rocas feldespáticas y dolomíticas. La cinética de molienda sigue las regularidades reportadas en Andreev (1987), el 80-90% de la clase -0,074 mm se alcanza en un tiempo estimado en unos 20 minutos.

De acuerdo con los valores de la función de rompimiento se puede afirmar que son insensibles a las condiciones de molienda para los límites normales de operación, la carga de bolas no influye en sus resultados. Esta regularidad que sigue la función B coincide con las reportadas en la literatura (Lynch, 1977 y Austin Concha, 1994).

A medida que aumenta el tamaño de las partículas se incrementa la probabilidad de fractura del material investigado (función selección). La regularidad de la función selección obtenida es similar a las reportadas por Lynch (1977).

En términos de calidad, el esquema con circuito cerrado permite la obtención de un producto granulométricamente más homogéneo que el esquema de dos etapas con circuito abierto, además de resultar este producto más fino; los valores obtenidos para el d_{80} son de 1,823 y 3,1 mm respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Mieres de la Universidad de Oviedo. Al Dr. Benjamín Calvo, coordinador de la Red Iberoamericana XIII C. A los Ingenieros Leyri Centeno y Luis Betancourt del Instituto Universitario de Tecnología Región Capital, Venezuela.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREIEV, S., PEROV, A. 1980. *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. C. Habana. Editorial Pueblo y Educación
- AUSTIN, L. & CONCHA, F. 1994. *Diseño y simulación de circuitos de molienda clasificación*. CYTED-Green Print Impresores. Chile.
- BARLEY, S.E., OLIN, T. J., BRICKA, R. M., ADRIAN, D.D. 1999. A review of potentially low cost sorbent for heavy metal. *Water Research* 33:2469-2479.
- BENVINDO DA LUZ, A. 1994. *Zeolitas: propiedades e usos industriais*. No 68 ISSN-0103-7382, CETEM.
- BENVINDO DA LUZ, A., VALENTE POSSA, M., LUIZ DE ALMEIDA, S. 1998. Tratamiento de minérios. CETEM CNPq/MCT.
- CHOJNACKI, A., CHOJNACKA, K., HOFFMAN, J., GÓREKI H. 2004. The application of natural zeolites for mercury removal: from laboratory tests to industrial scale. *Minerals Engineering* 17 :933-937.
- COELLO-VELÁZQUEZ A. L., ECHAVARRÍA R., MENÉNDEZ-AGUADO J. M. 2004. Flexibilización de la producción en la planta de Zeolitas de San Andrés, Holguín. IV Jornadas Iberoamericanas de Materiales de la Construcción. Tegucigalpa. Honduras. Sept. 23-26.
- COELLO, A. 1993. Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos. *Minería y geología*. 10 (1) : 53-56

- EGRET, A., & RUBIO J. 2004. Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*. Article in press. *ScienceDirect. Elsevier*.
- KING, P. 2001. *Modeling and simulation of mineral processing system*. Butterworth Heinemann. Boston.
- LYNCH, A. 1977. *Mineral processing and grinding circuits: Their simulation, optimisation. Design and control*. Elsevier. Amsdertam, Oxf. NY.
- MONDALE K.D., CARLAND, R.M. AND APLAN, F.F. 1995. The comparative ion exchange capacities of natural sedimentary and synthetic zeolites. *Miner. Eng.* 8 (4-5) :535-548.
- MORREL, S., 2004. An alternative energy - size relationship to that proposed by Bond for design and optimisation of grinding circuits. *International Journal of Mineral Processing*. 74 :133-141.
- OROZCO, G. 1996. Caracterización geólogo-mineralógica del yacimiento de las tobas zeolíticas Caimanes, Moa, Holguín, *Minería y Geología*.13 (3) :13-18
- OROZCO, G. & RIZO, R. 1998. Depósitos zeolitas naturales de Cuba. *Acta Geológica Hispana* 33 (1-4):335-349
- OUKI S.&, KAVANNAGH M. 1997. Performance of natural zeolite for the threatment of mixed metal contaminated effluents. *Waste Management* 15 :383-394.
- RABILERO, A., 2002. Empleo de las zeolitas naturales en la producción de cemento y otros aglomerantes. Curso Taller Uso y diversificación de las zeolitas. Guayaquil, Ecuador.
- RIVERA A., RODRIGUEZ FUENTES G., ALTSHULER E. 2000. Time evolution of natural clinoptilolite in aqueous médium conductivity and pH experiments. *Microporous and Mesaporous Material* 40:173-179.
- RODRÍGUEZ-IZNAGA, I., GÓMEZ, A., RODRÍGUEZ-FUENTES, G. 2000. Natural clinoptilolite as an exchanger of Ni⁺² and NH⁺⁴ ions Ander hidrotermal conditions amd high ammonia concentration. *Microporous and Mesaporous Material* 53 (X) :71-81.

- ROWLAND, C. & KJOS, D. 1978. Rod and Ball mill, In *Mineral Processing Plant Design*, Ed. Mular and Bhappu, AIME, NY.
- TRIANA, F. & TRIANA, E. 1992. *Las zeolitas, más de cien formas de utilización y aplicación*. Editorial Científico técnico C. Habana.
- VELÁZQUEZ, M., & RODRÍGUEZ, T. 2002. Tratamiento de aguas de piscina mediante el empleo de las zeolitas naturales. Curso Taller Uso y diversificación de las zeolitas. Guayaquil, Ecuador. Marzo.