

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" Facultad de Metalurgia y Electromecánica Departamento de Metalurgia

COMPORTAMIENTO DE LAS FUNCIONES DE CLASIFICACIÓN Y FRAGMENTACIÓN PARA LA MOLIENDA DE LAS TOBAS VÍTREAS DEL YACIMIENTO SAGUA DE TÁNAMO

Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Yarina Montero Pérez

Моа, 2011



COMPORTAMIENTO DE LAS FUNCIONES DE CLASIFICACIÓN Y FRAGMENTACIÓN PARA LA MOLIENDA DE LAS TOBAS VÍTREAS DEL YACIMIENTO SAGUA DE TÁNAMO

Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Diplomante: Yarina Montero Pérez Tutores: Prof. Titular. Ing. Alfredo Coello Velázquez, Dr. C Prof. Titular. Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar, Dr. C Prof. Instructor. Ing. Roger Samuel Almenares Reyes

> Моа 2011

PENSAMIENTO

"Todos poseemos más poderes de los que hemos soñado tener. Podemos hacer cosas que nunca imaginamos llegar a realizar. No existen limitaciones excepto las que tenemos en nuestras mentes que nos impiden hacerla. No piense que usted no puede. Piense que sí puede"

Darwin Kingsley

DEDICATORIA

Dedico el presente Trabajo de Diploma con el más sincero sentimiento que existe en mí, a las personas que me enseñaron que solo triunfa en la vida aquel que lucha por alcanzar sus metas.

A mi hija, Beatriz Caridad Fuentes Montero, por la fuerza espiritual que me proporciona para seguir adelante.

A mi madre, Elda María Pérez Torres, como recompensa por su esfuerzo, dedicación y confianza cuando todo se volvió imposible a la mitad del camino.

A mi hermano, Alexey Montero Pérez, por su preocupación en la culminación de este trabajo.

A la memoria de mi padre, Miguel Ángel Montero Cortina, quien supo guiarme, para que desde donde esté se sienta orgulloso de verme realizada como profesional.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo lleva implícito una serie de gratos esfuerzos y apoyos que de no ser así no hubiese sido posible, de esta forma agradezco:

A la revolución cubana y a nuestro principal líder Fidel Castro Ruz, por darme la posibilidad de realizarme como profesional.

A mis tutores Dr. C, Alfredo L. Coello V, Dr. C, Pedro Enrique Beyris y Ing Roger Samuel Almenares Reyes quienes fueron el eslabón fundamental en la culminación de este trabajo.

A Yunier Pérez, por el apoyo y ayuda brindada durante la realización de este trabajo.

A los compañeros del CEDINNIQ que me brindaron su apoyo en la ralización de la parte experimental, en especial a Ángel, Chavela, Eduardo, Omar, José, Hira y Alicia.

A mis compañeros de estudio, Maipú, Juan Ramón, Fajardo, Henry y Evangelio.

A mi familia, por brindarme apoyo en todo momento, especialmente a mi tía María Isabel, por no permitirme desistir en los momentos más difíciles.

A todos aquellos que de una forma u otra colaboraron en la realización de este trabajo

Muchas gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se determinan los valores de las funciones de fragmentación y selección para el proceso de molienda de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo, aplicando la metodología de Kapur. La característica granulométrica de la muestra inicial se ajusta al modelo Rozin – Rammler. La cinética de molienda sigue las regularidades típicas de materiales rocosos. La función de distribución de fragmentación sigue tendencias similares a las reportadas por (Coello 2008). La función selección se incrementa con el aumento de las clases hasta un tamaño de partícula de 0,6 mm.

Palabras clave: Funciones de fractura; Molienda; Cinética de molienda.

ABSTRACT

In the present work the values of the fragmentation and selection functions for the grinding process of the vitreous tuffs of the Sagua de Tánamo deposit are determined, applying the methodology of Kapur. The grain sized characteristic of the initial sample it adjusts to the Rozin – Rammler model. The grinding kinetic follows the regularities typical of rocky materials. The fragmentation distribution function follows tendencies similar to the reported by (Coello 2008). The selection function is increased with the increase of the classes until a particle size of 0,6 mm.

Key words: Functions of fracture; Milling; Kinetics of milling.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN		1
CAPÍTULO 1.	MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	3
	1.1. GENERALIDADES SOBRE EL PROCESO DE MOLIENDA	3
	1.1.1. Clasificación de los molinos	4
	1.1.1.1. Molinos de bolas	5
	1.1.2. Leyes energéticas de la fragmentación	7
	1.2. GENERALIDADES SOBRE LAS FUNCIONES DE LA FRAGMENTACIÓN.	9
	1.2.1. Función de razón de fragmentación y la cinética de la desaparición	10
	1.2.2. Función de distribución de la fractura B	11
	1.2.3. Función de distribución de fragmentación y cinética de la aparición	11
	1.3. ASPECTOS GENERALES SOBRE LAS TOBAS VÍTREAS (VIDRIO VOLCÁNICO)	13
	1.4. USOS Y APLICACIONES DEL VIDRIO VOLCÁNICO	13
	1.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS TOBAS VÍTREAS DE EL PICAO EN SAGUA DE TÁNAMO	15
CAPÍTULO 2.	MATERIALES Y MÉTODOS	17
	2.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	17
	2.2. TOMA Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	18
	2.2.1. Método de cuarteo	19
	2.3. MÉTODOS Y TÉCNICA EXPERIMENTAL	20
	2.3.1. Metodología para la determinación de la composición granulométrica	20
	2.3.1.1. Técnica para el análisis de tamices	21
	2.3.1.2. Método húmedo de tamizado	21
	2.4. Ajuste de la distribución de tamaño partículas para el material molido	
	SEGÚN EL MODELO DE ROZIN - RAMMLER.	22
	2.5. Equipos e instrumentos utilizados	23
	2.6. CÁLCULO DE LA DE CARGA DE BOLAS Y LA MASA DE MATERIAL PARA ALIMENTAR AL	
	MOLINO	26
	2.7. DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE ROMPIMIENTO B	29
	2.8. DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN DE SELECCIÓN S.	30

CAPÍTULO 3.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	32
	3.1. RESULTADO DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	32
	3.2. RESULTADOS DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA	33
	3.3. RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN ROMPIMIENTO	34
	3.4. RESULTADO DE LA FUNCIÓN SELECCIÓN	35
CONCLUSIONE	S	37
RECOMENDAC	IONES	38
BIBLIOGRAFÍA		39
ANEXOS		



INTRODUCCIÓN

Las rocas y minerales industriales (RMI) constituyen los recursos minerales de gran valor en el mundo actual. La importancia de las rocas y minerales industriales ha sido creciente en los últimos 70 años y se comprueba al comparar la evolución de la demanda con la de los minerales metálicos (Ábrego, et al 2000).

Se denomina rocas y minerales industriales (RMI), a los materiales naturales (y, en ocasiones, residuos de la industria o de la construcción) que se emplean en la actividad humana, no para obtener metales o energía, sino por sus propiedades físicas, químicas u ornamentales, puestas de manifiesto en el mineral o roca tal como se obtiene o tras una transformación no metalúrgica (Ábrego, et al 2000).

Dentro de la gran variedad de rocas industriales, se encuentran las tobas vítreas (vidrio volcánico), materiales que se estudian en el presente trabajo, por su gran utilización a nivel mundial; precisamente por los altos precios en el mercado y la necesidad de buscar materiales alternativos que puedan reducir los costos, en cualquier esfera. El vidrio volcánico ocupa un lugar de importancia en el mercado mundial debido a su extenso campo de aplicación.

En Cuba las tobas vítreas han sido empleadas como materia prima para tallar figuras ornamentales y como retenedores de la humedad y aereadores de suelos en la agricultura, además de algunos estudios realizados para su utilización como material filtrante y polvo limpiador. La situación económica del país junto al encarecimiento de la mayoría de los materiales utilizados en la construcción, hacen necesario la búsqueda de materiales alternativos que redunden en una mejor economía en la sustitución de materiales.

Una de las aplicaciones más importantes reportadas en la práctica mundial, particularmente en Colombia e Italia, es el empleo del vidrio volcánico para la fabricación de cemento romano. En Cuba ya se conoce la utilización de las tobas zeolitizadas en la fabricación de cemento puzolánico. Para la utilización de este



material como puzolana natural es necesario el cumplimiento de ciertos requisitos establecidos en la ASTM 618, donde se plantea que debe poseer una finura que no supere el 34 % de retenido en el tamiz de 45 micrones, para ser utilizado como aditivo al cemento Pórtland. Esto se puede lograr mediante el proceso de molienda, por lo que es necesario realizar estudios que apunten al conocimiento de parámetros físicos y físicos mecánicos que permitan compilar la información necesaria para futuros diseños tecnológicos.

Las funciones de fractura son ampliamente usadas en la modelación de los procesos de molienda de minerales de probada eficiencia en los diseños de esquemas e instalaciones de molienda.

Problema de investigación: El insuficiente conocimiento sobre el comportamiento de las funciones de fractura que caracterizan el proceso de molienda de las tobas vítreas limitan el desarrollo de investigaciones, en el futuro diseño de esquemas tecnológicos para la producción racional de materiales de construcción.

Objeto de estudio: Las tobas vítreas del yacimiento del Picao en Sagua de Tánamo.

Objetivo general: Determinar los valores de las funciones de fragmentación y selección para el proceso de molienda de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo.

Objetivos específicos:

- Caracterizar granulométricamente las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo
- Aplicar la metodología de Kapur para la determinación de las funciones de fragmentación y selección.

Campo de acción: Comportamiento de las funciones de fracturas en el proceso de molienda de las tobas vítreas.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo del trabajo. Se presentan temas relacionados con las funciones de la fragmentación, la cinética y las leyes del proceso de molienda.

1.1. Generalidades sobre el proceso de molienda

La molienda es un proceso de reducción de las dimensiones de los trozos (granos) de los materiales mediante su fragmentación por la acción de fuerzas exteriores que superan las fuerzas interiores de cohesión, las que unen entre sí las partículas del cuerpo sólido.

La molienda es la última etapa de las operaciones de reducción de tamaño; en estas operaciones las partículas minerales se muelen por medio del impacto y la fricción o abrasión; esta se puede llevar a cabo por vía seca o húmeda. La molienda se realiza en los molinos, los cuales son tambores en cuyo interior se disponen los medios moledores, que se mueven libremente en el interior del mismo. Los medios moledores pueden ser barras, bolas, guijarros, rocas duras e incluso en algunos casos, los pedazos gruesos del propio mineral.

De acuerdo a la práctica industrial, la granulometría del producto alimentado varía de 250 hasta 5 mm, con excepción de los molinos de automolienda; aunque es recomendable alimentar el material con un tamaño menor a 15(8) mm. Los molinos reducen el mineral hasta 10 (800 µm.).

La molienda depende de un gran número de factores incluyendo el grado de diseminación del componente útil en la ganga.

A la molienda le corresponde el mayor peso en la liberación de los componentes útiles de las menas, por esta razón la calidad del producto final, la eficiencia de la



separación y la obtención de altos índices cualitativo- cuantitativos del beneficio dependen de la molienda; la eficiencia de la molienda es precisamente la clave del éxito de la separación de los minerales, una molienda que garantice el grado de liberación necesario, trae consigo bajas recuperaciones en el beneficio, bajos contenidos del componente útil en el concentrado y cuantiosas pérdidas del componente valioso en las colas; la remolienda del mineral implica además del consumo innecesario de energía, la reducción del componente útil por debajo del tamaño necesario, provocando pérdidas de este componente; por otra parte, cuando este último sucede con la ganga, se producen las lamas secundarias, las cuales tienen un efecto muy negativo en los índices de la separación. (Coello, 1999).

El rendimiento de los molinos depende del material a desmenuzar, del grosor del producto molido y el grado de molibilidad del mineral, de la construcción del molino, de sus dimensiones, de la forma del revestimiento, como también de las condiciones de explotación del molino, ciclo abierto o cerrado. El rendimiento del molino es proporcional al consumo de la energía para la molienda. El consumo de energía está ligado al grado de llenado del molino con el elemento triturante (Coello, 1993).

1.1.1. Clasificación de los molinos

Los molinos de tambor están constituidos por un tambor con dos tapas laterales, en el centro de las cuales se encuentran los gorrones, las cuales descansan en cojinetes de rodillos o fricción, según el tipo constructivo; el segundo es más común que el primero. El tambor se llena aproximadamente hasta la mitad del volumen interior con los elementos moledores. Durante la rotación del tambor, los elementos moledores, gracias a la fricción, se elevan hasta la altura que corresponde al equilibrio dinámico y caen en forma de parábola, o se deslizan hacia abajo en forma de capas. Por uno de los laterales se alimenta el material de forma continua, el cual se muele en el interior del tambor por los métodos de compresión, golpe y fricción, para luego descargarse por la otra boca lateral. Durante el movimiento del tambor, el material se desplaza por el interior del molino desde a boca de carga hasta el gorrón de descarga. En dependencia de la forma del tambor, los molinos se clasifican en cilíndricos y cilíndrico – cónicos. En función del tipo del medio moledor que emplea



se clasifican en de bolas, barras, de guijarros, de semi- automolienda y de automolienda. Los molinos se caracterizan por las dimensiones del diámetro interior y el largo del tambor. El tambor se recubre con planchas de acero Hard Ni, acero al carbono, al manganeso o cromo - molibdeno. De todos ellos los más resistentes a la abrasividad son los de acero de cromo –molibdeno y los de Hard níquel.

1.1.1.1. Molinos de bolas

Son considerados la última etapa de reducción de tamaño. Como lo indica su nombre, los cuerpos moledores son bolas de acero al manganeso o al cromo, también las hay de acero al carbono.

Las bolas tienen una mayor área superficial específica que las barras. El término molino de bolas está restringido a la relación largo / diámetro del molino, esta proporción debe ser de 1 - 1,5. Los molinos cuyas razones sean de 3 - 5, son considerados molinos tubulares; estos últimos como regla tienen dos cámaras, las cuales se llenan con diferentes cargas, e incluso en ocasiones son diferentes medios moledores, en la primera cámara se lleva a cabo la primera etapa de molienda y en la segunda la molienda es más fina. Estos molinos son ampliamente usados en la industria del cemento, clinker, yeso y otros, actualmente se preparan las condiciones para el montaje de una unidad de este tipo en la planta de níquel de Nicaro (Cuba). (Coello, 1999).

A los molinos tubulares de una sola cámara se les denomina molinos de guijarros, debido a que su medio moledor son las fracciones de 40 - 70 mm del propio mineral o de canto rodado. La carga de interior de guijarros es de 35 – 55 % del volumen interior del molino. Estos molinos son ampliamente utilizados en el tratamiento de las menas portadoras de oro; son muy extendidos en la República de Sudáfrica. Los molinos de bolas se diferencian en cuanto a la forma de descarga del mineral molido: de rejilla y de descarga central. La diferencia radica en que en el molino de descarga con rejilla, en el lateral de la descarga se instala una rejilla, la cual está compuesta por varios sectores. En el espacio entre la rejilla y la tapa lateral, están dispuestos los bolsillos elevadores, con ayuda de los cuales la pulpa se eleva hasta la boca de descarga. En los molinos de descarga central el diámetro de la boca de descarga es



mayor que el de la alimentación, de manera que la pulpa rebosa en la descarga. Estos molinos son proclives a la remolienda del material. En el trabajo de los molinos de bolas influyen un gran número de factores. La densidad de la pulpa debe ser lo mayor posible; generalmente es de 65 - 80 %; el trabajo del molino con pulpas diluidas trae consigo el incremento del contacto metal - metal, lo cual aumenta considerablemente el consumo de acero, en bolas y recubrimiento. Otro factor importante es la carga de bolas, la cual define el área superficial de los medios moledores; este debe ser lo más pequeño posible. La carga de bolas debe ser una combinación de varios diámetros de las bolas, con la tendencia de que el diámetro de las bolas sea lo más pequeño posible, lo cual no descarta la inclusión de bolas de mayor tamaño, el cual depende esencialmente del tamaño máximo de alimentación. Los molinos de bolas trabajan a altas velocidades de rotación, 70 - 80 % de la velocidad crítica. El régimen de trabajo del molino está íntimamente relacionado con

velocidad crítica. El régimen de trabajo del molino está íntimamente relacionado con frecuencia de rotación del tambor. Existen tres regímenes de trabajo de los molinos: cascada, catarata y combinado; en el régimen de cascada la velocidad de rotación es pequeña, por lo cual las bolas se elevan hasta una determinada altura, para luego desplazarse hacia abajo, "resbalando" unas sobre otras por capas paralelas, moliendo el material por fricción o desgaste, este régimen se usa cuando se necesita obtener productos de alta finesa, sobre todo cuando el golpe provoca la remolienda del material. A este tipo de régimen siempre le es característica la presencia de la llamada "zona muerta", en la cual no ocurre molienda alguna. (Coello, 1999).

El ulterior aumento de la velocidad de rotación del tambor trae consigo que las bolas bajo la acción de las fuerzas centrífugas se eleven hasta una altura mayor y al alcanzar el punto de equilibrio dinámico, para entonces caer describiendo trayectorias parabólicas, en este caso el mineral se muele por el mecanismo de golpe. A este régimen se le conoce como régimen de catarata.

Existe un régimen, que bien pudiera considerarse un régimen de transición de uno a otro régimen, naturalmente la frecuencia de rotación es intermedia entre los dos regímenes descritos más arriba, a éste régimen se le llama combinado.

Un factor a considerar, o constituye la cantidad de material en el interior del molino; de acuerdo a los estudios realizados por los investigadores de esta temática, existe



una masa crítica de material en el interior del molino, a la cual se le llama acumulación crítica u óptima (Coello, 1999). La dependencia entre éste parámetro y la productividad del producto final es parabólica como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1. Dependencia de la acumulación del mineral en el interior del molino y la productividad del producto final

1.1.2. Leyes energéticas de la fragmentación

A continuación se expone cronológicamente una revisión de las leyes clásicas que relacionan la energía de rotura con parámetros simples.

Ley de Rittinger

Rittinger en 1867, postuló que la energía consumida en la trituración es proporcional a la nueva superficie producida:

$$E_{ee} \propto \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right) = K_1 \cdot \Delta s \tag{1.1}$$

Siendo d y D tamaños característicos de producto y alimentación, respectivamente. Expresado en términos de utilización energética,

$$\frac{\Delta s}{E_{ee}} = K_1 = cte.$$
(1.2)

Ley de Kick

Kick en 1885, afirmó que para cualquier unidad de masa de material, la energía necesaria para producir una relación de reducción dada es constante, sin importar el tamaño que pudiera tener originalmente la partícula.

Sea K_2 la energía específica aplicada para una reducción de tamaño desde D hasta d=D/2, esto representa un paso de reducción. Si r pasos son precisos para una



reducción de tamaño de d/n, entonces n = 2r o bien $r = \frac{\log n}{\log 2}$. Por tanto la energía necesaria es $K_2 \cdot \left(\frac{\log n}{\log 2}\right) = K_3 \cdot \log n$, o de forma más general para una relación de reducción n=D/d:

$$E_{ee} = K_3 \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right) = K_3 \cdot \left(\log D - \log d\right)$$
(1.3)

Para expresar esta ley en términos de la utilización energética:

$$D/d = \exp(E_{ee}/K_3); \text{ como } \Delta s = K_4 \cdot \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right) = \frac{K_4}{D} \cdot \left(\frac{D}{d} - 1\right), \text{ entonces :}$$

$$\frac{\Delta s}{E_{ee}} = \frac{K_4}{E_{ee} \cdot D} \left(\exp\left(\frac{E_{ee}}{K_3}\right) - 1 \right)$$
(1.4)

Ley de Bond

Bond en 1952, concluyó que el trabajo necesario para romper un cubo de lado d es proporcional al volumen d³ de dicho cubo; pero al formarse la primera grieta, la energía fluye a las nuevas superficies resultantes, que serán proporcionales a d². Cuando se produce la rotura de una partícula de forma irregular, la energía de deformación se distribuye irregularmente según dicho autor, y por tanto la energía requerida para la rotura está entre d³ y d², siendo la media geométrica d^{2,5}, un compromiso entre Kick y Rittinger. Como el número de partículas con, supuestamente, la misma forma, es proporcional a 1/d³, el trabajo necesario para

romper la unidad de volumen será $\frac{d^{2,5}}{d^3} = \frac{1}{\sqrt{d}}$. Así, en este caso se puede escribir:

$$E_{ee} = K_5 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right) \tag{1.5}$$

Bond definió el índice de trabajo o índice de Bond como $W_i = K_5 \cdot \frac{1}{\sqrt{100}}$, que será la energía total requerida para reducir el tamaño de un mineral desde un tamaño teóricamente infinito hasta un producto con un 80 % inferior a 100 micras. Sustituyendo, se obtiene la conocida fórmula de Bond:



$$E_{ee} = W = W_i \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right)$$
(1.6)

En la que d y D son expresados en micras y corresponden al tamaño por el que pasa el 80% de producto y alimentación respectivamente.

También en este caso se puede expresar la ley de Bond en términos de utilización energética:

$$\frac{\Delta s}{E_{ee}} = \frac{1}{K_6} \cdot E_{ee} + \frac{1}{K_7} \cdot \frac{1}{\sqrt{D}}$$
(1.7)

El valor de W_i obtenido es aplicable directamente para el caso de molinos de bolas que trabajan en húmedo y en circuito cerrado. Para molienda seca, el valor de W_i debe multiplicarse por 1,30 a fin de tener en cuenta la menor eficiencia de este tipo de molienda (*Nanni et al, 1980*).

De la fórmula se puede deducir una definición, de valor más teórico que práctico, del índice de Bond, que sería el consumo energético especifico en kWh/st necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras, y según el propio Bond sería un parámetro de conminución que expresa la resistencia del material ante las operaciones de trituración y molienda (*Morell, 2004*).

1.2. Generalidades sobre las funciones de la fragmentación

El estado del arte actual, de los procesos de reducción está basado esencialmente en dos conceptos fenomenológicos-mecanicistas, la función de selección o función razón de la fragmentación y la función de distribución de la fragmentación (Epstein, 1947). Estas dos funciones de la conminución son básicas para la representación de un modelo realista y el conocimiento detallado de sus estructuras es esencial para la simulación del proceso.

En los trabajos desarrollados por S. R. Broadbent y T. G. Callcott (1956), A. J. Lynch (1980), E. G. Kelly y D.J Spottiswood (1990), entre otros, están ampliamente tratadas estas funciones de la fragmentación. En los trabajos examinados, relacionados con la determinación de las funciones de la fragmentación aparecen algunos ejemplos desarrollados para un grupo de materiales (antracita, cuarzo, mica,



granito, galena, pirita, calcita, zeolita, entre otros), sin embargo, no se hace referencia a la determinación de estas funciones para las tobas vítreas (vidrio volcánico).

1.2.1. Función de razón de fragmentación y la cinética de la desaparición

La razón específica de la fragmentación S(x), es definida como la fracción de partículas del punto de tamaño x, fragmentadas en la unidad de tiempo. Representa la probabilidad de las partículas de ser fragmentadas (Lynch, 1980).

Aquí la atención se encuentra en la razón a la cual las partículas de un tamaño especificado son rotas, si tener en cuenta el tiempo transcurrido, siendo la razón a la cual se producen como consecuencia de la rotura de las partículas mayores. Partiendo de esta definición, la expresión de primer orden puede escribirse:

$$D = -S(x)M(x,t)$$
(1.8)

donde:

D: *Razón de desaparición de partículas de tamaño x* y M(x, t) dx _ es la masa o fracción de la masa; como puede ser el caso, de partículas en el rango (x) a (x+dx) en el tiempo t. Claramente M(x, t) es la función absoluta o relativa (*normalizada*) de densidad del tamaño de partícula y las distribuciones correspondientes absoluta o relativa, acumulativa más fina y acumulativa retenida respectivamente:

$$F(x, t) = \int_{0}^{x} M(x, t) dy$$
 (1.9)

$$R(x, t) = \int_{x}^{\infty} M(x, t) dy$$
(1.10)

Se verifica que la función de densidad y las dos funciones de distribución están relacionadas mediante:

$$M(x,t) = -\frac{dR(x,t)}{dx} = \frac{dF(x,t)}{dx}$$
(1.11)



1.2.2. Función de distribución de la fractura B

La función de distribución de la fragmentación B(x,y) representa la proporción de partículas inicialmente de tamaño y que aparece en la gama granulométrica menor que x después de la fragmentación. (Lynch, 1980).

Cuando se fractura el material de tamaño j, se produce una serie de partículas hijas. Esta serie, antes de que ocurra la refractura, es llamada distribución progenitora primaria y se simboliza mediante *B*i, j en forma cumulativa, la cual es la fracción cumulativa en peso del material fracturado desde el intervalo j, que aparece por debajo del tamaño xi, el tamaño superior del intervalo i.

La fracción del producto de la fragmentación primaria, desde el intervalo j, que pasa hacia el intervalo i, es denotada por el símbolo $B_{i, j}$ y puede ser calculada:

$$B_{i, j} = B_{i, j} - B_i + 1, j$$
(1.12)

a *B* se le llamó inicialmente función de fragmentación, pero es más correcta la terminología de función de distribución, y se aplica estrictamente a la progenie primaria, antes de la refracturación, porque el proceso de conminución es justamente una sucesión de tales eventos, cuya suma describe el todo, si los intervalos sincronizados son tamaños suficientemente pequeños por ejemplo $2^{1/4}$ o al menos $2^{1/2}$.

1.2.3. Función de distribución de fragmentación y cinética de la aparición

La función de distribución de rotura b(x, y) dx es la fracción de masa de la progenie de partículas en el rango de tamaños (x) a (x + dx), formadas directamente, sin sufrir una rotura, cuando la unidad de masa de las partículas del punto de tamaño (y)es rota $(y \ge x)$. La función cumulativa de distribución de rotura B(x, y) es la masa de la progenie de partículas iguales o más finas que el tamaño (x), cuando la unidad de masa de las partículas de tamaño (y) es rota. Estas dos fórmulas de la función de rotura están relacionadas mediante (*Garcés et al, 2002*):

$$B(x, y) = \int_{0}^{x} b(w, y) dw$$
 (1.13)



$$b(x, y) = \frac{dB(x, y)}{dx}$$
(1.14)

Puesto de que se conserva la masa, entonces b(x, y) es una función de densidad normalizada en x:

$$\int_{0}^{y} b(x, y) dx = B(y, y) = 1$$
(1.15)

La función auto – similar es una clase de función de distribución de especial interés. Su representación en forma cumulativa es:

$$B(x, y) = B\left(\frac{x}{y}\right) \tag{1.16}$$

En otras palabras; el valor que toma la función auto – similar de rotura depende de la razón de progenie a las partículas de tamaños emparentados solamente. La forma de la función de densidad de la función auto – similar de distribución de rotura es:

$$b(x, y) = \frac{dB\left(\frac{x}{y}\right)}{dx} = \frac{1}{y} b\left(\frac{x}{y}\right)$$
(1.17)

Un ejemplo de la función auto - similar de distribución de rotura cumulativa es:

$$B(x, y) = \left(\frac{x}{y}\right)^{b}, \qquad b > 0$$
(1.18)

De las definiciones de la razón de rotura y de distribución de rotura en funciones, la expresión para la razón de aparición de la progenie de partículas del punto de tamaño (x), las cuales se forman mediante la rotura de partículas madres del punto de tamaño (y) es:

$$E = S(y)b(x, y)M(y, t)$$
 (1.19)

donde:

E: razón de aparición de partículas de tamaño x, mediante la rotura de partículas de tamaño y.

La razón total de aparición se obtiene, mediante la integración del término anterior sobre todas las partículas madres:

$$E = \int_{x}^{\infty} S(y)b(x, y)M(y, t) \, dy$$
 (1.20)

Diplomante Yarina Montero Pérez

12



Al producto de la razón de rotura por la distribución de rotura se le denomina función de Bass:

$$C_1(x, y) = S(y)b(x, y)$$
 (1.21)

Es también conveniente introducir la función cumulativa de Bass o función de Selekage (*Garcés et al, 2002*):

$$L(x, y) = S(y)B(x, y)$$
 (1.22)

Ambas funciones se relacionan:

$$\frac{dL(x, y)}{dx} = C_1(x, y)$$
(1.23)

Mientras que la función de Bass es la razón específica para alimentar material desde las partículas madres de tamaño (y) hacia las partículas generadas de tamaño (x), la función de Selekage es la razón específica de proveer desde las partículas madres de tamaño (y) hacia todas las partículas generadas menores o iguales de tamaño (x). Esta última función juega un rol central en la derivación de modelos disueltos de molienda.

1.3. Aspectos generales sobre las tobas vítreas (vidrio volcánico)

El vidrio volcánico, es un material piroclástico poroso, que se constituyen de vidrio en forma de espuma y que se forman durante un enfriamiento muy rápido de un magma ascendente de alta viscosidad. Estos son muy característicos de las vulcanitas claras y ácidas, como por ejemplo de la riolita, y por ello son de color blanco grisáceo hasta amarillento, raramente de color café o gris. La dureza varía de 5 – 6 en la escala de Mohs, aunque de dureza media, debido a su alta friabilidad el poder abrasivo es muy bajo, produciendo un efecto muy suave sobre la superficie. Su textura es esponjosa o espumosa; de color ceniza, amarillento; de brillo sedoso.

1.4. Usos y aplicaciones del vidrio volcánico

El vidrio volcánico son tobas vítreas de granos finos, ligeras muy porosas, con estructura pumítica y con elevada capacidad de absorción de agua, su estructura pumítica les confiere propiedades abrasivas que las convierte finamente molidas en un excelente polvo limpiador.



Sus principales usos son:

- 4 Medio Filtrante en la Industria Azucarera.
- Aislante Térmico.
- ♣ Decapado de Metales.
- + Producción de Fósforo.
- Material Abrasivo.
- Producción de Lozas Antiácidas.
- 4 Material de soporte en la filtración del acetileno.
- 4 Decoloración y filtrado de aceites comestibles.
- 4 Como aditivo en la fabricación de tableros de bagazo.

Este producto ha sido probado con resultados satisfactorios en la industria del vidrio como sustituto del Feldespato

El vidrio volcánico desde la época de los romanos ha tenido una amplia aplicación y uso, por ejemplo, ha sido empleado por miles de años en el concreto ligero. Los romanos, famosos por el desarrollo y uso del concreto (aparentemente con la ayuda de los griegos), utilizaron miles de toneladas de vidrio volcánico como agregado ligero. El Domo del Partenón, en Roma, fue construido con una mezcla de cal y vidrio volcánico y está estructuralmente sano en la actualidad, después de casi 2 000 años de desgaste. Basados en el ejemplo de los romanos, los europeos han utilizado el vidrio volcánico a lo largo de los dos últimos milenios en el concreto ligero y en bloques.

Sería imposible listar todas las aplicaciones de abrasivos, pero quedan incluidas limpiadores (desde jabones de mano a limpiadores de metal y vidrio), cosméticos (agente exfoliante) y compuestos dentales (pulido de dientes y pasta profiláctica, un compuesto de limpieza dental). Es usado para el acabado en metales, vidrio (paneles y pantallas de televisión y otros. La mayoría de nosotros alguna vez hemos usado jabón de mano de lava o un limpiador similar con base en pumicita para limpiar restos difíciles de quitar.

El vidrio volcánico, en su forma más burda, ha sido usado siempre en pinturas antiderrapantes, así como en recubrimientos. La industria de la pumicita está actualmente penetrando el mercado de los rellenos microfinos, que son buscados no



por su abrasividad sino más bien por su relativa fortaleza y su baja gravedad específica.

Las tobas vítreas son la materia prima ideal para el material de un buen muro, porque es porosa, ligera, dura (relativo a la solidez del grano) y no inflamable (*Ábrego, et al 2000*).

Otras aplicaciones del vidrio volcánico es que se utiliza como filtrante en la industria, como aereador de suelos en la agricultura, y en la elaboración de polvos abrasivos para cosmetología, odontología y distintos procesos químicos. Se usa en la fabricación de la dentadura, crema dental. Limpieza de superficies delicadas en construcción civil y monumental, tales como estucos, esgrafiados, bajorrelieves, y de forma general, todas aquellas superficies en las que sea deseable una aplicación suave. Se utiliza para pulimento del zapato. Limpieza ferroviaria del carro. Aplicable también a superficies metálicas para matizado muy leve. El vidrio volcánico para horticultura se emplea en cultivos diversos, invernaderos, campos de golf, jardinería de paisaje, entre otros. El vidrio volcánico es un gran complemento para el suelo. Provee porosidad para la aereación y al mismo tiempo retiene el agua en el área, permitiendo a las plantas permanecer verdes y saludables por periodos más prolongados entre lluvias o riegos (Ábrego, et al 2000).

1.5. Características de las tobas vítreas de El Picao en Sagua de Tánamo

Propiedades Químicas. Las tobas vitroclásticas y vitrocristaloclástica son rocas de composición ácida con alto contenido de SiO₂. Los valores del contenido de CaCO₃ se comportan generalmente por debajo del límite permisible en la tarea técnica (*Banderas et al, 1997*). Los resultados de intercambio catiónico total (I.C.T.) por lo general se comportan con valores menores a 45 meq. Los elementos nocivos F. Hg, Cd, se comportan muy por debajo de los límites de tolerancia (*Banderas et al, 1997*). *Propiedades físico – mecánica.* Se observan diferencias en las tobas vitroclásticas evaluadas en el sector I con relación a la de los sectores II y III. Las rocas del sector I son muy densas, tienen mayor resistencia, contrariamente poseen menor absorción y porosidad. En sentido general las tobas de ambos sectores presentan pesos volumétricos (saturados) inferior a 1.8 g/cm³ y elevada porosidad, sus poros cerrados



le confieren una baja densidad (0,77 g/cm³), por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero. Baja resistencia a la compresión y triturabilidad, posee una dureza de 6 por la escala de Mohs, se considera dura (relativo a la solidez del grano). Las tobas vitroclásticas de la localidad El Picao poseen un coeficiente de fortaleza promedio de f=1.4 por la escala de Protodiakonov. Con relación al calor de inmersión indica en buena medida el grado de alteración de las tobas vítreas. Se puede decir que existe una relación directa de los valores del calor de inmersión respecto a la presencia de contenidos de motmorillonita y/o zeolita (*Banderas et al, 1997*).

Composición Mineralógica. Las tobas del yacimiento mineralógicamente están constituidas esencialmente por vidrio volcánico y motmorillonita, subordinadamente aunque en bajos porcientos, calcita, cuarzo y feldespato. Vidrio V. contenido mínimo 54,2 %, máximo 80 %. Montmorillonita, máx. 39,8 %; min. 16,1 % (*Banderas et al, 1997*).

Conclusiones parciales

En los trabajos investigativos desarrollados con las tobas vítreas, el comportamiento de la función de distribución de la fragmentación y la función razón específica de la fragmentación, no se relaciona en la literatura.



CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La adecuada selección de los métodos y de los materiales es fundamental en todo trabajo investigativo, para garantizar su desarrollo eficaz y la veracidad de los resultados, basado fundamentalmente en la toma y preparación de las muestras, los análisis granulométricos, la cinética de molienda, la determinación de los parámetros de la función de distribución de fractura y la razón específica de fractura.

2.1. Descripción de la metodología experimental

La investigación se realizó a escala de laboratorio, con un material proveniente del yacimiento Sagua de Tánamo, tomando material suficiente para conformar muestras representativas, este material fue transportado hasta el Laboratorio de Beneficio de Minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Luego, se procedió a escoger el juego de tamices a utilizar, así como la carga de bolas y la masa a alimentar al molino para los ensayos de cinética y la determinación de los parámetros de rotura y selección.

La representatividad de la muestra se logró mediante el método de cuarteo. Una vez homogenizado el material se prepararon 585 g para los ensayos de cinética, y la determinación de la función de fragmentación y selección. Después de tener todo el material necesario, fue secado previamente en la estufa.

Luego de realizar esta operación, se molieron las muestras para diferentes tiempos, con sus respectivas réplicas para cada tiempo determinado. Para el estudio de la cinética de molienda (3, 5, 7, 10, 15, 20 y 25) min., y para la determinación de los parámetros B y S se molió para (1, 3, 5 y 7) min.



2.2. Toma y preparación de la muestra

Las muestras analizadas fueron tomadas en el yacimiento de tobas vítreas del Picao en Sagua de Tánamo. Se practicó un muestreo por puntos donde se obtuvo una masa de la muestra tomada de 100 kg.

El yacimiento se encuentra a 10 - 15 km al este de Sagua de Tánamo. Localidad "El Picao", en las siguientes coordenadas X = 676 000 Y = 215 000; X = 679 000 Y = 217 000, según datos del informe de la ORM de la provincia de Santiago de Cuba (*Banderas et al, 1997*).

La muestra fue sometida a un proceso de trituración manual hasta obtener fragmentos menores de 50 mm. Seguidamente se procedió a la trituración mecánica primaria empleando una trituradora de quijada 320 x 165 mm (figura 2.2). El producto triturado se sometió a una segunda etapa de trituración en una trituradora de quijada 150 x 75 mm (figura 2.3).

En estas trituradoras, el ancho de la boca de salida se reguló hasta la granulometría deseada, por lo que en este caso, se reguló de forma tal que todo el material a utilizar estuviera por debajo de 25 mm en el producto de la primera etapa y 3,15 mm en la segunda etapa, este último, tamaño de partícula máximo a alimentar al molino para el estudio cinético de molienda y la determinación de las funciones de fragmentación y selección.

La muestra en su totalidad fue sometida a un proceso de homogeneización y cuarteo, cuyo esquema se muestra en la (figura 2.1).





Figura 2.1 Esquema de reducción y preparación de la muestra

2.2.1. Método de cuarteo

El método de cuarteo se efectúa por el lanzamiento en el cono. Este lanzamiento consiste en que el material, mediante una pala (o una paleta), se echa en el vértice de un montón que adquiere la forma de cono, y se distribuye uniformemente por todos sus lados. El menudo restante se barre minuciosamente y también se arroja en el vértice del cono. Después de este se coloca una tabla delgada de madera en el vértice del cono y se introduce a presión en el material aproximadamente a una profundidad equivalente a la anchura de la tabla. Luego, conservando la posición de la tabla paralela a la posición inicial, y, por tanto, a la base, dicha tabla se desplaza a un lado. Con esto el material arrastrado por la tabla se distribuirá por la superficie lateral de la mitad del cono. Después la tabla en la misma posición, se mueve en dirección contraria y se desplaza la segunda mitad del material desde el vértice del *Diplomante Yarina Montero Pérez* 19



cono hacia la superficie lateral de la otra mitad del cono truncado. Más tarde esta posición de la tabla se cambia en 90°. La operación de nivelación se repite hasta que se obtenga una capa de mineral cómoda para el cuarteo, la cual debe ser no mayor de 100 a 150 mm y tener un diámetro no menor que las mayores partículas del material.

Se puede nivelar el cono con una pala, desplazando gradualmente el material desde el eje del mismo, por los radios hacia la periferia.

El cuarteo se realiza después de nivelar el montón: con la arista de esa misma tabla en la capa del material se hacen dos surcos mutuamente perpendiculares, los cuales se cruzan en proyección del vértice, así el montón se divide en 4 partes. Posteriormente dos cuartos opuestos se unen siendo estos la mitad de la muestra. Una mitad de esta se desecha y con la otra, se repite las operaciones de lanzamiento en el cono y cuarteo, la operación se repite hasta que se obtenga la muestra con la masa correspondiente al diámetro de la partícula más gruesa del material.

2.3. Métodos y técnica experimental

2.3.1. Metodología para la determinación de la composición granulométrica

La composición granulométrica se determinó por medio del análisis de tamiz. Este análisis se realizó por vía seco – húmeda, seleccionando un juego de tamices basado en la serie de Taylor ($\sqrt{2}$), los tamices seleccionados fueron (3,15; 2; 1,18; 0,6; 0,25; 0,18; 0,15; 0,09; 0.075, 0,053 y 0,045) mm. La masa mínima se determinó por la siguiente ecuación 2:

$$Q_{\min} = 0.02 \cdot d^2 + 0.5 \cdot d \tag{2.1}$$

Q_{min.}: es la masa de muestra mínima necesaria para realizar el análisis granulométrico, (kg).

d : es el diámetro del trozo mayor del material, (mm).

Para el pesaje de las muestras se utilizó una balanza digital con error permisible de 0,1 g y el secado del material se realizó en una estufa a una temperatura de 120 °C, presente en el Centro de Investigación del Níquel.



2.3.1.1. Técnica para el análisis de tamices

El análisis de tamices consiste en cernir la muestra a través de un juego estándar de tamices, y en determinar el porcentaje de residuos en cada uno de estos, con respecto a la masa de la muestra inicial. A menudo se utilizan el estándar elaborado por Taylor, en el que el tamaño de la tela metálica anterior, se diferencia del tamaño de la tela metálica posterior en $\sqrt{2}$ veces.

La estandarización de las vibraciones tiene gran importancia para los resultados del análisis del tamizado. El tiempo de cernido de la muestra se elige empíricamente respecto a las muestras sometidas a investigación. El tamizado se considera concluido cuando el aumento de peso del residuo en el más fino de los tamices, durante el tiempo de cernido, constituye no más del 5 %.

Con frecuencia, durante el cernido seco, sobre todo a través de los tamices menores de 1 mm, no se logra evitar la aglomeración y prácticamente la obstrucción completa de estos. En este caso se procede a la diseminación en medio acuosa (*tamizado húmedo*). Las muestras se tamizan por el método húmedo o seco en dependencia del grosor del material a lo que se quiere llegar y la exactitud necesaria de los resultados del análisis.

2.3.1.2. Método húmedo de tamizado

Cuando la muestra contiene una cantidad considerable de material fino, siendo necesaria una exactitud alta del análisis, o cuando el material se aglomera sobre la superficie tamizante, se utiliza el método por vía húmeda.

La muestra se deposita en un tamiz con orificios de menor dimensión, y las partículas más diminutas (*de lodo*) se lavan con un chorro débil. El lavado se realiza hasta que el agua se pone clara. El resto de la muestra que queda en la criba se seca y se pesa, de modo que, por las diferencias entre las masas se determina la masa de lodo lavado.

Para recoger la masa de material que quedó sobre el tamiz se procedió de la siguiente forma: 1.) se inclinó el tamiz sobre un recipiente. 2.) si queda material en las paredes del tamiz este se inclina nuevamente y se rocía ligeramente con agua por detrás del mismo hasta que no quede nada.



Los resultados del análisis de tamices se anotan en una tabla. Se determinan las salidas sumarias, equivalentes a la suma de salidas de todas las clases más gruesas (*salida sumaria por* +) y menos gruesa (*salida sumaria por* -) que los orificios de dicha criba.

2.4. Ajuste de la distribución de tamaño de partículas para el material molido según el modelo de Rozin - Rammler.

A partir de la metodología descrita en la literatura por Andreiev, (1980) se obtiene la ecuación de Rozin Rammler de la forma siguiente:

$$R = 100 \quad e^{-bx} \quad n \tag{2.2}$$

donde:

R: salida sumaria por más de la clase más gruesa que x en %

x: dimensión de los orificios de la criba

b y n: parámetros que dependen de las propiedades del material y de las dimensiones de x

Los coeficientes n y b se determinan por las fórmulas (2.3) y (2.4).

$$n = \frac{\log \log \frac{100}{R_{1}} - \log \log \frac{100}{R_{2}}}{\log X_{1} - \log X_{2}}$$
(2.3)

$$b = \frac{\log \frac{100}{R_{1}}}{X_{1}^{n} \log e}$$
(2.4)

La correspondencia entre los datos del experimento y la ecuación (2.2) se puede comprobar gráficamente distribuyendo los puntos experimentales en un sistema funcional de coordenadas.



2.5. Equipos e instrumentos utilizados

Para la realización de los experimentos fue necesario emplear un conjunto de instrumentos y equipos de laboratorio sin los cuales sería imposible el cumplimiento de los objetivos trazados. Además de cronómetro y pie de rey se contó con:

Trituradora 320x165 mm	
Longitud de la quijada	320 mm .
Boca de alimentación:	
Ancho	100 mm .
Largo	165 mm .
Boca de descarga:	25 mm .



Figura 2.2 Vista de la trituradora 320x165 mm

Trituradora 150x75 mm	
Longitud de la quijada	150 mm .
Boca de alimentación:	
Ancho	55 mm .
Largo	75 mm .
Boca de descarga:	3,15 mm .





Figura 2.3 Trituradora de quijada 150x75 mm

Tabla 1.1. Juego de tamices

No.	Tamaño (mm)	No.	Tamaño (mm)	No.	Tamaño (mm)
1	3,15	5	0,25	9	0,075
2	2,00	6	0,18	10	0,053
3	1,18	7	0,15	11	0,045
4	0,6	8	0,09		

Balanza técnica

Características:

Rango de peso: 1 - 5000 g.

Error = 0,1 g.



Figura. 2.4 Balanza digital



Estufa: T: (0 - 350) °C



Figura. 2.5 Estufa Memmert



Figura. 2.6 Tamizado de las muestras para su caracterización granulométrica

Molino. Características: D = 198 mm. L = 245 mm. $V_r = 70 \text{ rpm}$.



Figura.2.7 Molino utilizado para la determinación de la cinética, y razón específica de fractura y función de distribución de fractura de la partícula



2.6. Cálculo de la de carga de bolas y la masa de material para alimentar al molino

Se ha establecido que las cargas constituidas por bolas de diferentes tamaños ofrecen un rendimiento mayor que las cargas constituidas por bolas de un solo tamaño. Los minerales gruesos y resistentes exigen bolas de tamaño mayor, mientras que los minerales blandos y menudos se muelen mejor con bolas pequeñas. Para cada grosor del material que posee una moliendabilidad determinada es posible seleccionar tal característica del grosor de la carga de bolas que garantice el máximo rendimiento del molino. El número de choque de las bolas en el molino crece al disminuir su tamaño debido a que permaneciendo la misma masa total de bolas su número crece. Por lo tanto, es recomendable la aplicación de un tamaño mínimo cuando estas todavía son capaces de moler bien un tamaño de grosor y resistencia dada. Para determinar el diámetro de la bola máxima en la carga de bola se utiliza la fórmula de Rasumov (1975).

$$D = 28 \cdot \sqrt[3]{d} \tag{2.5}$$

donde:

D: diámetro máximo de las bolas, mm

d: diámetro de las partículas de mayor tamaño alimentadas al molino, mm .

Al considerar un tamaño máximo de las partículas alimentadas al molino de 3,15 mm al sustituir en la expresión 2.5 obtenemos:

$$D = 28 \cdot \sqrt[3]{3,15}$$
$$D = 41 mm$$

Conociendo las dimensiones principales del molino de bolas es posible calcular el volumen del molino por la siguiente expresión:

$$V_{mol} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4}, \, cm^3 \tag{2.6}$$

donde:

D: diámetro útil del molino, (19,5 cm) L: longitud del molino, (24 cm)

Al sustituir en la expresión 2.6 se obtendrá:

$$Vmol = \frac{3,14 \cdot (19,5)^2 \cdot 24}{4} \cdot cm^2 \cdot cm$$
$$Vmol = 7163,9 \text{ cm}^3$$

La masa total de bolas a añadir fue calculada teniendo en cuenta el criterio de que el molino de bolas alcanza su mayor rendimiento cuando la carga de bolas ocupa del 45 al 50 % de su volumen interior (Andreiev, 1980). La masa de la carga de bolas fue calculada mediante la expresión:

$$Mc.b = \gamma \cdot \theta \cdot V \tag{2.7}$$

donde: θ : grado de llenado del molino con la carga de bolas

 γ : densidad de las bolas, kg/m^3

V: volumen interior del molino (cm³)

Para $V = 7163.9 \ cm^3$ y $\theta = 0.45$ se obtiene $Mc.b = 14 \ kg$

La distribución de los tamaños y las cantidades de bolas cargadas al molino se muestran en la tabla 2.1.





Diámetro de las bolas	Contidad do balas	Masa	0/
(mm)	Cantidad de bolas	(kg)	70
40	15	4,53	32,28
36	20	4,88	34,81
28	25	2,97	21,20
20	38	1,64	11,71
TOTAL	98	14,02	100

Tabla 2.1 Características de la carga de bolas.

Al tomar como criterio fundamental trabajar con una carga de mineral tal que garantice un valor constante de la función razón específica de la fragmentación es preciso que el mineral ocupe del 60 al 110 % de los espacios entre las bolas. El volumen total de los inserticios entre las bolas se determina por la siguiente expresión:

Veb = Vcb - Vtb

(2.8)

donde: *Vcb*: volumen que ocupa la carga de bolas en el molino

(45 % del volumen total del molino de bolas)

Vmb: volumen total de la masa de bolas kg / m^3

El volumen obtenido fue comprobado hallando la diferencia del nivel de agua del molino con las bolas y sin estas.

Así para un volumen total de la masa de bolas de 1934,26 cm³ obtenido a partir del principio que las bolas de dimensiones variadas y colocadas sin orden en el interior del molino ocupan el 60 % de todo el volumen de la carga de bolas al sustituir en la expresión 2.8 se obtiene:

Veb = 3223,76 - 1934,26 $Veb = 1289,50 \ cm^3$



Al considerar que el material alimentado al molino de bolas ocupa el 60 % del volumen de los espacios entre las bolas y su peso volumétrico de 0,756 g/cm³, se obtiene que la masa de material a alimentar al molino de bolas es de 585 g.

2.7. Determinación de la función de rompimiento B

Para el ensayo de la determinación de la función de rompimiento se utilizó el método de determinación directa con alimentación de partículas de un solo tamaño o monotamaño (Austin y Concha, 1994), y en específico el método modificado de Kapur con los parámetros concentrados G y H, el cual se basa en una de las soluciones de la ecuación de la molienda dosificada de tamaño discreto (- 3 + 2) mm en la forma,

$$\ln \frac{R_i(t)}{R_i(0)} = G_i t + H_i \frac{t^2}{2}$$
(2.9)

$$G_{i} = -S_{1} + \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_{i,j} \frac{R_{j}(0)}{R_{i}(0)}$$
(2.10)

$$H_{i} = \sum_{j=1}^{i-1} \lambda_{i,j} \left(G_{j} - G_{i} \right) \frac{R_{j} \left(0 \right)}{R_{i} \left(0 \right)}$$
(2.11)

$$\lambda_{i,j} = S_{j+1} B_{i,j+1} - S_j B_{i,j}$$
(2.12)

donde:

Ri (t) - material retenido en un tiempo t, %.

Ri (0) - material retenido para t = 0, %.

G_i y H_i - Parámetros concentrados de Kapur.

Dado el hecho de que (2.9) es lineal en los parámetros Gi y Hi, esta ecuación puede ser utilizada para la determinación de los Bi, ja partir de una determinada cantidad de datos obtenidos experimentalmente. Además es posible reducir el orden de la ecuación (2.10) y obtener,

$$\frac{1}{t} \ln \frac{R_i(t)}{R_i(0)} = G_i + \frac{H_i}{2}t$$
(2.13)

Para la alimentación con partículas de un solo tamaño, $R_i(0) = 1$ para



i = 1,2 3...; entonces G_i en la ecuación (2.11) se simplifica a:

$$G_i = -S_1 B_{i,1}$$
 para $i = 2,3,$ (2.14)

$$G_i = -S_1$$
 para i=1

Mediante sustituciones de estas relaciones se obtienen las formas alternativas:

$$\ln \quad \frac{R_{i}(t)}{-S_{1}(t)} = B_{i,1} - \frac{H_{i}}{2S_{1}}t$$
(2.15)

$$\frac{\ln Ri(t)}{\ln R_1(t)} = B_{i,1} - \frac{H_i}{2S_1}t$$
(2.16)

Estas ecuaciones fueron empleadas para determinar los parámetros $B_{i,1}$, a partir de la molienda de los diferentes materiales ensayados en la clase de tamaño (-3,15 + 2) mm. Las muestras fueron preparadas a partir de la trituración previa del material tobaceo. Se tomaron los tiempos siguientes:

1; 3; 5 y 7 minutos.

2.8. Determinación de la función de Selección S.

Para la determinación de los parámetros Sj de la función razón específica de la fragmentación para los distintos tipos de materiales ensayados, se aplicó el siguiente procedimiento: de acuerdo con la teoría de las probabilidades, la razón de desaparición de material de tamaño j debido a la fragmentación es proporcional a la cantidad de material de tamaño j expuesto a ser fragmentado. Así:

$$-\frac{d}{dt}\left[M_{j}(t)W\right] = S_{j}M_{j}(t)W$$
(2.17)

Si S_j es constante en el tiempo, entonces se puede expresar:

$$\log \left[M_{j}(t) / M_{j}(0) \right] = -\frac{1}{2,3} S_{j} t \text{ ó } \ln \left[M_{j}(t) / M_{j}(0) \right] = -S_{j} t$$
(2.19)

Donde $M_j(0)$ es la fracción de masa del material de tamaño j para t = 0 (tamaño de alimentación). Entonces si log $M_j(t)$ se plotea contra t, resulta una línea recta de pendiente $S_j/2,3$ ó $-S_j$.

Conclusiones parciales



- El diseño de la investigación, garantiza adecuadamente el tratamiento del problema planteado y la aplicación de las metodologías para la determinación de las funciones fragmentación y selección, constituyeron la esencia del trabajo experimental.
- La selección y procesamiento del material de trabajo, durante los experimentos, con la aplicación de técnicas y de métodos reconocidos así como el empleo de equipos e instrumentos de medición en perfecto estado técnico y certificados, garantizan la calidad y la veracidad de los resultados.



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos luego de tabulados o graficados fueron sometidos a su análisis y discusión, los cuales se apoyaron en una amplia búsqueda bibliográfica que permitió de manera coherente profundizar en las valoraciones científicas de los resultados alcanzados.

3.1. Resultado del análisis granulométrico

De acuerdo a la regularidad que sigue la distribución de tamaño de la muestra analizada, existe un predominio de los granos gruesos. La distribución de tamaño se aproxima al modelo Rozin –Rammler con $R^2 = 0,94$ representado en la figura (3.1), calculados según los datos del anexo 1



Figura. 3.1 Característica de tamaño del material alimentado al proceso de molienda.

$$R = 100 \cdot e^{-0.176 \cdot x^{0.5259}} \tag{3.1}$$

Diplomante Yarina Montero Pérez

32



En la figura 3.2 la distribución de los datos de la composición granulométrica de la muestra y la línea de regresión que define la función logatmirizada de Rozin-Ramler según ecuación (3.1)



Figura 3.2. Característica de tamaño Rozin - Rammler

3.2. Resultados de la cinética de molienda

Los resultados de la cinética de molienda de las tobas vítreas del Picao se muestran en la figura (3.3). La regularidad mostrada coincide con la tipicidad de este tipo de estudio, calculados según los datos del anexo 2





Figura. 3.3 Característica de tamaño del material en los diferentes tiempos de molienda.

3.3. Resultados de la determinación de la función rompimiento

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, <u>B</u>. Esta función no depende del tamaño máximo del mineral (Lynch 1980).

Al aplicar el procedimiento explicado en el epígrafe 2.6 se obtuvo un comportamiento de la función de distribución de la fragmentación como el que se muestra en la figura (3.4). Los resultados de la función de selección S no coinciden con los obtenidos por (Pole 2005), pero se asemejan a los obtenidos por (Coello 2008), representados en los gráficos del anexo 3, como se muestra la función de fragmentación tiene un comportamiento similar en cada tiempo analizado.





Figura. 3.4 Comportamiento de la función de distribución de fragmentación B

Estos resultados son similares a los obtenidos (Coello et al 2008).

3.4. Resultado de la función selección

La función selección <u>S</u> 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 1980). La función de rompimiento <u>B</u> y selección <u>S</u> juegan un importante papel en la cuantitativa de las operaciones de trituración y molienda. Los resultados se muestran en las figuras. (3.4) y (3.5).

Al aplicar el procedimiento descrito en el epígrafe 2.7, para las tobas vítreas analizadas, se obtuvo un comportamiento de la función razón específica de la fragmentación como el que se muestra en la figura 3.5. Como puede apreciarse, los parámetros de la función razón específica de la fragmentación para las tobas en el proceso de molienda para cada clase de tamaño tiene un comportamiento similar en cada tiempo analizado ver anexo 4.





Figura.3.5 Comportamiento de la función de selección S



CONCLUSIONES

- La característica granulométrica de la muestra inicial se ajusta al modelo Rozin – Rammler, con una relación de correlación de 0,94. La cinética de molienda sigue las regularidades típicas de materiales rocosos.
- La función de distribución de fragmentación sigue tendencias similares a las reportadas por (Coello 2008).
- La función selección se incrementa con el aumento de las clases hasta un tamaño de partícula de 0,6 mm, momento a partir del cual comienza a decrecer.



RECOMENDACIONES

- Investigar el efecto de la carga de bolas en las funciones de fractura a escala de laboratorio y de banco ampliada.
- Desarrollar estudios sobre la determinación de las funciones de fractura a escala de banco ampliada.



BIBLIOGRAFÍA

- Andreiev S, E. 1980. Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales". Editorial MIR.
- Barry A. Wills, Tim Napier-Munn. 2006. Mineral Processing Technology an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral. ISBN: 0750644508.
- Batista, R. 2007. Valoración del Potencial de Los Recursos Minerales para la Industria del Cemento en Cuba. Tesis de Maestría. Inédito. IGP.
- Broadbent, S.R. y Callcott, T.G. 1956. A matrix analysis of processes involving particle assemblies. Phil. Trans. R.Soc. Lond., Ser., A, 249: 99-123.
- Cabrera M, R. 2010 Valoración de las tobas vítreas y zeolitizadas de la provincia Holguín para su utilización como puzolana natural en la construcción. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 39 p.
- Charles, R.J., 1957. Energy–size reduction relationships in comminution. Trans. AIME, Min. Eng. 208, 80–88.
- Coello V, A y Tijonov O, N. 1996. Regularidad en la Molienda de Minerales Lateríticos". Minería y Geología Vol XIII No 3.
- Coello V, A. 2002. Métodos de determinación de la molibilidad de los minerales". ISMM Moa.
- Coello V, A. 2002. Sostenibilidad Energética en los Procesos de Preparación Mecánica de Minerales .ISMM Moa.
- Coello V, A. et. Al. 1994. "Control de la Carga Interior del Molino A Través de Terceros Parámetros" Minería y Geología Vol II.
- Coello V. A. L y Tijonov, O. N. 2001. Molienda de minerales multicomponentes: modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía. Revista Minería y Geología. Vol. XVII, Nos. 3-4, 2001, pp. 49-53. ISSN 0258 5979.



- Coello, V, A. 1993: Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos, Revista Minería y Geología. Vol. 1, No1; Moa.
- Coello, V. A y N. TIJONOV O. 2001: Molienda de minerales multicomponentes: modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía, en la Revista Minería-Geología V: XVII, No. 3 y 4. 49-53 pp.
- Coello, V. A.; Menendez, A. J. M. y Laborde, B. R. 2007. Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. Powder technology 182 (2008) 113 115.
- Garcés I, León H y Muñoz H. 1990. Aplicación del Modelo Matricial en una Operación de Trituración. Metalurgia Vol 26 No 4. Madrid.
- Gaudin, A.M. y Meloy, R.P. 1962. Model and a comminution distribution equation for single fracture Trans. A.I.M.E.223: 40-43.
- Gaudin, A.M., y Meloy, T. P. 1991. Model and comminution distribution equation for repeated fracture. Trans. AIME. Vol. 223. pág 43-50.
- Gilvarry, J. J. 1961. Fracture of brittle solids, I.Distribution function for fragment size in single fracture. J. Appl. Phys.32: 391-399.
- Gupta, V. K., y Kapur, P. C. 1974. A simple mill matriz for grinding mills. Chemical Engineering, V 29. pág 634-637.
- Hukki, R.T. 1961. Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. Trans. AIME 220, 403 408.
- Kick F. 1883. Contribution to the Knowledge of Brittle Materials. Dinglers J.
- Laborde, B. R. 2005. Modelación y simulación del proceso de molienda del mineral laterítico con composición sustancial variable. Tesis Doctoral. ISMM. Moa. 44 p.
- López P., L. M. 2006. Caracterización Geológica de las materias primas mineras de los municipios Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como material de construcción. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 87 p.
- Lowrison G, Ch. 1974. Crushing and Grinding. The Size Reduction of solid Materals". Buter worts and Co. London.
- Lynch A, J. 1980. Circuitos de Trituración y Molienda de minerales Optimización, Diseño y Control". Editorial Rocas y Minerales. Madrid, España.



- Lynch A. J., Mineral Crushing and Grinding Circuits. Their simulation, optimisation, design and control. T1. Elsevier . Scientific Publishing Company. Amdertam, Oxford. N.Y.1977.
- Menéndez, A. J. M.; Coello V. A. L; Tijonov, O. N. y Rodríguez, D, M. A. 2006. Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant (Cuba). Powder Technology 170 (2006) 153– 157.
- Morrell S. 2004. An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits International. J. Miner. Process.
- Perry John, H at. Al. 1967. Chemical Engineer's Handbook". T. 1 Editorial Pueblo y Educación. La Habana.Cuba.
- Rittinger R, P. 1867. Von. Textbook of Mineral Dressing". Ernest and Korn . Berlín.
- Rosin, P. y Rammler, E. 1933. Thelaws governing the fineness of powdered coal.J. Inst. Fuel, 7: 29-36.
- Shubin. V. S y Pedre. C. 1975. Diseño de Maquinaria Industrial". Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba.
- Sokolowski, M. 1995. A new idea of a general law of comminution and establishing energy indices". Aufbereitungs Technik; 26 (3): 107-116.
- Taggart A, F. 1972. "Handbook of Mineral Dressing". Edición Revolucionaria. La Habana, Cuba.
- Walker, D.R., Shaw, M.C., 1954. A physical explanation of the empirical laws of comminution. AIME Trans. 199, 313–320.
- Lynch A. J., Mineral Crushing and Grinding Circuits. Their simulation, optimisation, design and control. T1. Elsevier . Scientific Publishing Company. Amdertam, Oxford. N.Y.1977.
- Menéndez, A. J. M.; Coello V. A. L; Tijonov, O. N. y Rodríguez, D, M. A. 2006. Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant (Cuba). Powder Technology 170 (2006) 153– 157.
- Morrell S. 2004. An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits International. J. Miner. Process.



- Perry John, H at. Al. 1967. Chemical Engineer's Handbook". T. 1 Editorial Pueblo y Educación. La Habana.Cuba.
- Rittinger R, P. 1867. Von. Textbook of Mineral Dressing". Ernest and Korn . Berlín.
- Rosin, P. y Rammler, E. 1933. Thelaws governing the fineness of powdered coal.J. Inst. Fuel, 7: 29-36.
- Shubin. V. S y Pedre. C. 1975. Diseño de Maquinaria Industrial". Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba.
- Sokolowski, M. 1995. A new idea of a general law of comminution and establishing energy indices". Aufbereitungs Technik; 26 (3): 107-116.
- Taggart A, F. 1972. "Handbook of Mineral Dressing". Edición Revolucionaria. La Habana, Cuba.
- Walker, D.R., Shaw, M.C., 1954. A physical explanation of the empirical laws of comminution. AIME Trans. 199, 313–320.

Anexos

Anexo 1. Composición granulométrica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo antes de la molienda.

Clase de tamaño	Peso	salida
(mm)	(g)	%
+ 4.00	0	0
- 4.00 +3.5	0	0
- 3.5 +2.00	176.4	35.28
-2.00 + 1.6	43.4	8.68
- 1,6 +1.00	44.6	8.92
-1.00 + 0.80	22.4	4.48
- 0,80 + 0.71	0.4	0.08
- 0,71 + 0.40	21.2	4.24
- 0,40 +0,0315	12	2.4
- 0,315 + 0,25	8.6	1.72
-0,25 + 0,150	29.4	5.88
- 0,150 +0,125	10	2
-0,125 + 0.075	29.2	5.84
-0,075 + 0.063	7.8	1.56
-0,63 + 0.044	15	3
-0,044	79.6	15.92
TOTAL	500.00	100.00

Análisis granulométrico 1

Análisis granulométrico 2				
Clase de tamaño	Peso	salida		
(mm)	(g)	%		
+ 4.00	0	0		
-4.00 +3.5	0	0		
- 3.5 +2.00	142.6	28.52		
-2.00 + 1.6	39.8	7.96		
- 1,6 +1.00	45	9		
-1.00 + 0.80	25	5		
- 0,80 + 0.71	0.4	0.08		
- 0,71 + 0.40	24.4	4.88		
- 0,40 +0,0315	15.6	3.12		
- 0,315 + 0,25	13.4	2.68		
-0,25 + 0,150	36.8	7.36		
- 0,150 +0,125	12.6	2.52		
-0,125 + 0.075	39.2	7.84		
-0,075 + 0.063	9.8	1.96		
-0,63 + 0.044	22	4.4		
-0,044	73.4	14.68		
TOTAL	500.00	100,00		

Análisis granulométrico 3

Clase de tamaño	Peso	salida
(mm)	(g)	%
+ 4.00	0	0
-4.00 +3.5	0	0
- 3.5 +2.00	147	29.4
-2.00 + 1.6	41.4	8.28
- 1,6 +1.00	45.2	9.04
-1.00 + 0.80	22.4	4.48
- 0,80 + 0.71	0.4	0.08
- 0,71 + 0.40	23.8	4.76
- 0,40 +0,0315	15.8	3.16
- 0,315 + 0,25	12.6	2.52
-0,25 + 0,150	39	7.8
- 0,150 +0,125	13.2	2.64
-0,125 + 0.075	39.8	7.96
-0,075 + 0.063	11.4	2.28
-0,63 + 0.044	21	4.2
-0,044	67	13.4
TOTAL	500.00	100,00

Anexo 2. Composición granulométrica de las tobas vítreas de Sagua de Tánamo para cada tiempo de molienda

Clase de tamaño	Peso	salida
(mm)	(g)	%
+ 3,15	0,000	0,000
-3,15 +2	47,100	8,051
- 2 +1,18	94,400	16,137
-1,18 + 0,6	40,200	6,872
- 0,6 +0,25	39,800	6,803
-0,25 +0,18	60,300	10,308
- 0,18 + 0,15	59,600	10,188
- 0,15 +0,09	55,100	9,419
- 0,09 + 0,075	17,200	2,940
-0,075 + 0,053	27,100	4,632
- 0,053 +0,045	15,700	2,684
-0,045	128,500	21,966
TOTAL	585,00	100,00

Composición granulométrica para 1 minuto

Composición granulométrica para 3 minutos

Clase de tamaño	Peso	salida
(mm)	(g)	%
+ 3,15	0,000	0,000
-3,15 +2	0,205	0,035
- 2 +1,18	4,098	0,701
-1,18 + 0,6	8,094	1,384
- 0,6 +0,25	27,252	4,658
-0,25 +0,18	24,896	4,256
- 0,18 + 0,15	53,685	9,177
- 0,15 +0,09	82,064	14,028
- 0,09 + 0,075	30,121	5,149
-0,075 + 0,053	45,796	7,828
- 0,053 +0,045	13,626	2,329
-0,045	295,164	50,455
TOTAL	585,00	100,00

Composición granulométrica para 5 minutos

Clase de tamaño	Peso	salida
(mm)	(g)	%
+ 3,15	0,000	0,000
-3,15 +2	0,000	0,000
- 2 +1,18	2,600	0,444
-1,18 + 0,6	1,600	0,274
- 0,6 +0,25	25,700	4,393
-0,25 +0,18	27,600	4,718
- 0,18 + 0,15	43,700	7,470
- 0,15 +0,09	86,600	14,803
- 0,09 + 0,075	27,700	4,735
-0,075 + 0,053	54,200	9,265
- 0,053 +0,045	26,000	4,444
-0,045	289,300	49,453
TOTAL	585,00	100,00

Composición granulométrica para 7 minutos

Clase de tamaño	Peso	salida
(mm)	(g)	%
+ 3,15	0,000	0,000
-3,15 +2	0,000	0,000
- 2 +1,18	1,000	0,171
-1,18 + 0,6	1,000	0,171
- 0,6 +0,25	17,400	2,974
-0,25 +0,18	23,200	3,966
- 0,18 + 0,15	30,100	5,145
- 0,15 +0,09	79,500	13,590
- 0,09 + 0,075	29,900	5,111
-0,075 + 0,053	60,000	10,256
- 0,053 +0,045	30,800	5,265
-0,045	312,100	53,350
TOTAL	585,00	100,00



Anexo 3. Análisis de regresión para la determinación del valor de la función de fragmentación B

















Anexo 4. Función de selección para cada tamaño de partícula







