



*Ministerio de Educación Superior  
Instituto Minero-Metalúrgico  
"Doctor A. Núñez Jiménez"*

*Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia*

# *Trabajo de Diploma*

*Título: Discusión Experimental del modelo de  
Nikolov para Trituradores de Martillo*

*Diplomante: José Ángel Guevara Chávez*

*Tutores: DrC. Ing. Alfredo L. Coello Velásquez  
MsC. Ing. José R. Hechavarría Pérez*

*Moa 2007*

## *Pensamiento*

*"No existe nada en la vida inalcanzable, como tampoco hay barreras que te limiten el paso hacia tus objetivos; solo se necesita para lograrlo el amor y la comprensión de aquellos que te rodean."*

*José Ángel Guevara Chávez*

*(27/05/2007)*

## *Dedicatoria:*

*Este trabajo va dedicado a toda mi familia, pero muy en especial a mis padres que me ofrecieron todo lo que estaba a su alcance, a mi abuela que me hizo un hombre de bien, gracias a ellos hoy estoy logrando forjarme como un profesional, para ellos mi eterno amor y agradecimiento, a ellos de todo corazón va dedicado este trabajo.*

## *Agradecimientos*

*Yo agradezco de todo corazón a todas las personas que hicieron posible la realización de este arduo trabajo. A mis tutores José Ramón Hechavarria y Alfredo Coello Velásquez quienes fueron el eslabón fundamental y sin los cuales no hubiese sido posible la culminación de este trabajo. A mi familia la que siempre estuvo presente y me alentaba en los momentos difíciles, a mis amigos y compañeros ya graduados y a los que están por graduarse los que estuvieron conmigo en las buenas y en las malas, al colectivo de trabajadores de la Empresa Geominera de Holguín los que me brindaron su apoyo incondicional, especialmente para lo compañeros Dorado, Caises Cheo, Evaristo, Diosmedes, Edilmer, Júnior, José, Parra y a los operadores de la planta.*

*A todos ellos muchas gracias.*



## **RESUMEN**

El presente trabajo fue realizado en la Planta de Zeolita de San Andrés en el municipio Holguín el mismo está basado en la aplicación de métodos experimentales en la determinación del comportamiento de la trituración por impacto del mineral objeto de estudio.

Para la realización de la investigación se utilizó una instalación diseñada específicamente para estos fines, con la cual es posible variar los valores de variables de operación como: la cantidad de martillo la productividad y la velocidad de impacto.

Los principales resultados obtenidos muestran la influencia del tamaño de las partículas, la productividad, la velocidad de impacto y el número de martillos en la función de clasificación característica del proceso. Se obtiene también la influencia de la velocidad de impacto y de la productividad en la función de distribución de la fragmentación.

Se realiza además una evaluación de los resultados obtenidos con las predicciones de Nikolov (2002 y 2004), los cuales caracterizan el comportamiento de trituración a partir de parámetros similares a los estudiados en este trabajo.



## SUMMARY

The present work was work carried out in the Plant of Zeolita of San Andrés in the municipality Holguín the same one it is based on the application of experimental methods in the determination of the behavior of the trituration for impact of the mineral study object.

For the realization of the investigation an installation was used designed specifically for these ends, with which is possible to vary the securities of operation variables like: the quantity of hammer the productivity and the impact speed.

The main obtained results show the influence of the size of the particles, the productivity, the impact speed and the number of hammers in the function of characteristic classification of the process. It is also obtained the influence of the impact speed and of the productivity in the distribution function of the fragmentation.

He is also carried out an evaluation of the obtained results with the predictions of Nikolov (2002 and 2004), which characterize the trituration behavior starting from similar parameters to those studied in this work



INDICE	Pag.
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO # 1. FUNDAMENTOS DE PROCESOS DE TRITURACIÓN DE MINERALES.....	12
1.1 Aspectos Básicos .....	¡Error! Marcador no definido.
1.2 Métodos de trituración y molienda. ....	¡Error! Marcador no definido.
1.3 Principales Equipos de Trituración.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3.1 Trituradora de mandíbula.....	¡Error! Marcador no definido.
1.3.2 Trituradoras de cono .....	¡Error! Marcador no definido.
1.3.3 Trituradoras de rodillos .....	¡Error! Marcador no definido.
1.3.4 Trituradoras de impactos .....	14
1.4 Funciones de Distribución de Tamaño.....	17
1.4.1 Funciones continua de distribución de tamaño. ....	21
1.4.2 Funciones discretas de distribución de tamaño. ....	22
1.4.3 Método de análisis de tamices.....	23
1.5 Modelación de Procesos de Trituración de Minerales.¡Error! Marcador no definido.	
1.5.1 Métodos energéticos de modelación.....	31
1.5.2 Métodos Matriciales. ....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO # 2. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y DEL PROCESO TECNOLÓGICO. ....	30
2.1 Descripción de la materia prima. ....	42
2.1.1 Descripción de los aspectos principales del yacimiento San Andrés..	44
2.2 Descripción del flujo tecnológico.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO # 3. PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACION GRANULOMETRICA.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1 Toma y preparación de muestras. ....	¡Error! Marcador no definido.
3.2 Determinación de la productividad.....	47
3.3 Caracterización granulométrica del esquema tecnológico.¡Error! Marcador no definido.	
3.3.1.- Determinación de la masa mínima en los puntos del esquema. ¡Error! Marcador no definido.	



3.3.2.- Metodología para el análisis de granulométrico...**¡Error! Marcador no definido.**

3.4.- Cálculo del Índice Operacional de Bond..... **¡Error! Marcador no definido.**

CAPITULO # 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS..... 55

4.1 Resultados de las velocidades de las bandas transportadoras**¡Error! Marcador no definido.**

4.2- Resultados del cálculo de la productividad.. **¡Error! Marcador no definido.**

4.4 Resultados del cálculo del Índice operacional.**¡Error! Marcador no definido.**

CONCLUSIONES.....**¡Error! Marcador no definido.**

RECOMENDACIONES.....**¡Error! Marcador no definido.**

BIBLIOGRAFIA..... 69

Anexos .....**¡Error! Marcador no definido.**



## **INTRODUCCION**

La planta de Zeolitas de San Andrés, ubicada a tres kilómetros del poblado de igual nombre y perteneciente a la provincia de Holguín, es una de las cuatro instalaciones dedicadas al procesamiento de Zeolitas naturales en nuestro País. Esta Planta ha logrado mantener un crecimiento, modesto pero sostenido, de sus volúmenes de producción y ventas de esta importante materia prima, durante los últimos años, obteniendo niveles de desempeño satisfactorios desde el punto de vista técnico y económico. Resulta conocida la problemática actual de los recursos energéticos y principalmente con los combustibles fósiles, con los que se produce la casi totalidad de la energía eléctrica en nuestro País, por lo que la máxima dirección de nuestra Revolución ha declarado la reducción de los consumos de portadores energéticos como una tarea de primera prioridad.

Según Martín (2005), la zeolita es un mineral muy importante en la actualidad por las aplicaciones que el mismo tiene. El uso de las zeolitas naturales en la aplicaciones medioambientales 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).

Desde hace más de quince años, en Cuba, se producen Zeolitas naturales utilizadas fundamentalmente para la producción de fertilizantes, para el tratamiento de aguas y residuales, para la producción de hortalizas y vegetales principalmente en casas de cultivos protegidos y para muchas otras aplicaciones

En el estudio de la modelación y simulación de procesos de trituración se destacan varios trabajos realizados en la entidad, como los trabajos de doctorados realizados Coello y Hechavarría (2003) y trabajos de diploma Coello, Hechavarría y Ballar (2006).

Aun no se ha logrado la modelación y simulación de los procesos de trituración del mineral en la planta, lo cual indiscutiblemente, resultaría de vital importancia para la toma de decisiones y mejora continua del proceso.

Teniendo en cuenta que la trituración por impacto es la de mayor índice de consumo de energía por tonelada de mineral procesado en la instalación se define este proceso como el **objeto de trabajo** de la presente investigación y el **campo de acción** como; las relaciones de las principales variables del proceso (velocidad, productividad y número de martillo) en las funciones de clasificación y de fragmentación.

**Problema:** Insuficiente conocimiento sobre el comportamiento de las funciones que caracterizan la trituración por impacto del mineral zeolítico. Que limitan la aplicación de los métodos matriciales para su simulación.



**Objetivos generales:** Definir el comportamiento de las funciones de clasificación y fragmentación para la trituración del mineral de San Andrés.

**Objetivos Específicos:**

- 1 Definir las relaciones de tamaño de las partículas, la velocidad de impacto , la productividad y la cantidad de martillos en el comportamiento de la función de clasificación.
- 2 Establecer la influencia de la velocidad y la productividad en el comportamiento de la distribución de la fragmentación.
- 3 Evaluar la correspondencia de los modelos de Nikolov con los resultados obtenidos experimentalmente.

**Hipótesis:** Es posible determinar la influencia de las diferentes variables de operación, en las funciones de la trituración a partir de la experimentación en una instalación de prueba.

## **CAPÍTULO # 1. PROCESOS DE TRITURACIÓN DE MINERALES.**

El objetivo principal de los procesos de trituración de minerales es la reducción del tamaño de los granos minerales para su posterior utilización en otros procesos, como es en la actualidad el caso de los minerales zeolíticos objeto del presente trabajo, o el de facilitar la separación de aquellos componentes útiles durante el beneficio de los minerales. En ambos casos las exigencias del tamaño del producto obtenido durante el proceso, constituyen aspectos de gran importancia. : Tagart (1950), Andreiev (1980), (Coello 1999).

La trituración de minerales resulta de gran importancia, en primer lugar por el hecho de que existe una gran gama de procesos de diferentes ramas que utilizan minerales. Por otra parte la trituración y molienda de minerales consumen un elevado porcentaje de la energía eléctrica que se produce a escala mundial (según Coello (1999); 50 - 70 % de la energía consumida en las plantas de beneficio).

La trituración constituye la primera etapa de la preparación mecánica, cuyo objetivo esta relacionado con la liberación del componente útil de la ganga; al igual que la molienda, es un proceso de reducción de tamaño de las partículas minerales bajo la acción de fuerzas externas, que superan en magnitud las fuerzas internas de cohesión del mineral. En ocasiones, los minerales portados por las rocas estériles se diferencian en sus propiedades físicas o físico-mecánicas, resultados de la trituración o la molienda, los de mayor dureza se concentrarán en las fracciones más gruesas; los frágiles o menos duros, se presentarán en las clases más finas. El tamaño hasta donde se necesita triturar antes de la separación depende del tamaño del entrecrecimiento. en CURSO DE PREPARACIÓN MECÁNICA DE MENAS Y MINERALES (Coello 1999).

El tamaño hasta donde se necesita triturar antes de la separación depende del tamaño del entrecrecimiento.

### **1.1 Mecanismos de Trituración y Molienda.**

Durante la trituración y la molienda tienen lugar un número considerable de mecanismos, que no son más que los tipos de fuerzas rompedoras que actúan sobre el material. Se conocen cinco métodos de trituración: compresión, corte, flexión, impacto (golpe) y desgaste o fricción.

Los esfuerzos necesarios para el rompimiento de los materiales se desarrollan en los equipos de trituración y molienda. En los procesos continuos, como resultados del rompimiento desordenado de los pedazos minerales en la zona de trabajo del equipo tienen lugar casi todos los métodos de trituración, aunque el rol principal siempre corresponderá a aquel método para lo cual fue diseñada la máquina.

El método de trituración se elige en función de las propiedades físicas y físico-mecánicas de los materiales y el tamaño del mineral. Las rocas minerales se clasifican en duras, blandas, viscosas y frágiles.

La capacidad de los materiales de ofrecer resistencia al rompimiento depende en gran medida de la presencia o no de fisuras, micro fisuras y poros, estas últimos disminuyen la dureza de los materiales en general.

Con el objetivo de reducir las posibilidades de la remolienda de los materiales, los equipos actuales utilizan los métodos de compresión y golpe (impacto), y adicionalmente emplean desgaste y flexión.

## **1.2 Principales Equipos de Trituración**

Según la búsqueda realizada (Andreiev (1980), Tagart (1972), Lynch (1980), Shubin (1975) y Otros) los principales tipos de Trituradoras utilizadas en los procesos de reducción de tamaño de los Minerales son:

- Trituradoras de mandíbulas.
- Trituradoras de conos.
- Trituradoras de cilindro.
- Trituradoras por choques o impacto.

### **1.2.1 Trituradoras de impactos**

En las trituradoras de impactos el material se tritura fundamentalmente por los golpes que recibe de los elementos de trituración, gracias a la energía cinética que estos poseen.

Este grupo de equipos se puede dividir en:

- Trituradoras de martillos.
- Trituradoras giratorias.
- Desintegradoras.

Esta clasificación obedece a la forma de los elementos trituradores

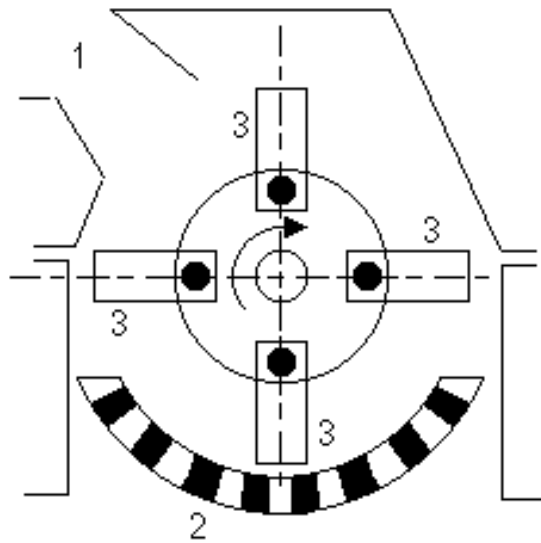


Figura No 1. Esquema de una trituradora de martillos

En este tipo de trituradoras los órganos de trituración serán martillos los articulados al rotor (3) que gira en el espacio de trabajo del equipo, el cual esta limitado por el cuerpo revestido de placas acorazadas de material resistente al impacto y al desgaste.

El material a triturar penetra en el espacio de trabajo a través de la abertura de carga de la trituradora (1) y cae en la zona de acción en que los martillos golpean los fragmentos y los lanzan hacia las paredes revestidas. De tal forma la destrucción del material se llevará a cabo por:

- Los golpes de los Martillos.
- Los golpes al chocar con las corazas, al ser lanzados los fragmentos contra las corazas.
- Por la fricción y aplastamiento ocasionados por la acción de los martillos sobre el material alojado entre estos y las paredes del equipo.

Las machacadoras de martillos se fabrican con rejillas o sin ellas. Las rejillas están destinadas a obtener el producto por debajo de cierto tamaño máximo y se emplean principalmente en la trituración fina. Las trituradoras de martillo sin rejillas garantizan el producto necesario debido a la alta velocidad de del rotor

Es notable que en las trituradoras sin rejillas la destrucción del material por aplastamiento y fricción tendrá una importancia mucho menor que en las trituradoras con rejillas. Las trituradoras de martillo se pueden clasificar.

- De uno o de dos rotores.
- De acuerdo a la forma de giro del rotor en reversibles y no reversibles.

Las trituradoras reversibles permiten la utilización de los martillos por ambas caras de trabajo sin realizar el desmontaje de estos.

La velocidad para los martillos según Shubin (1975) es de 30 - 55 m/seg. Según Andreiev (1980) esta está en los límites de 35-65 m/seg. y puede llegar a 115 m/seg.

Según Perry (1967) y Taggart (1972) los tipos de martillos más frecuentemente utilizados en estos equipos son los que se muestran en la figura No 2 .

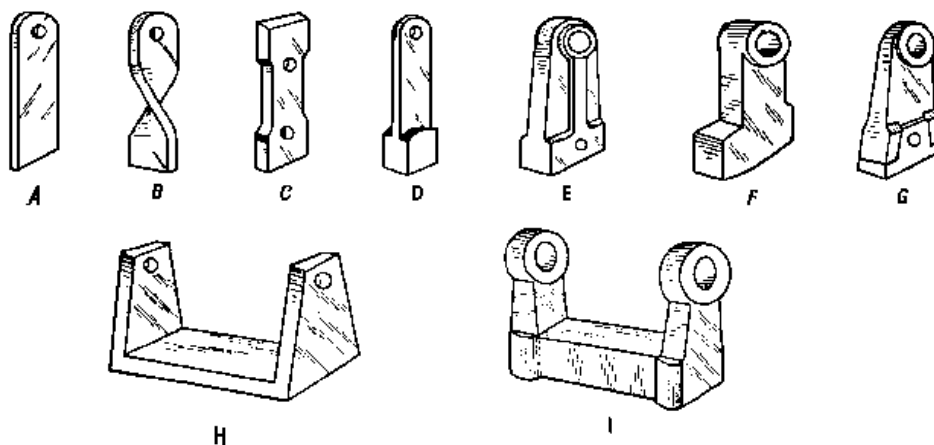


Figura No 2 Diferentes tipos de martillos para trituradoras



### **1.3 Funciones de Distribución de Tamaño.**

Por lo general los minerales que se alimentan a los trituradores y molinos, así como los productos que se obtienen en estos se componen de un número  $n$  de granos o partículas con diferentes formas y dimensiones que varían en límites relativamente amplios.

Lo anterior implica la necesidad de representar la magnitud de los fragmentos por una dimensión que generalmente se denomina; diámetro de la partícula o fragmento. Aunque las formas geométricas convencionales resultan muy raramente presentes en la práctica, en algunas aproximaciones se utilizan estas formas para describir el tamaño de las partículas.

- Para fragmentos de forma esférica se utiliza el diámetro de la misma.
- Para fragmentos de forma cúbica, por diámetro se considera la longitud de la arista del cubo.
- Para formas irregulares, el diámetro se determina por las dimensiones principales de un paralelepípedo. Utilizando diferentes fórmulas, según el procedimiento de medición y los objetivos para los cuales se determina esta magnitud.

En la mayoría de los casos el procedimiento de medición se realiza con la ayuda de cribas para lo cual se utiliza la aproximación siguiente:

$$D = b. \quad (1)$$

Siendo  $b$  el ancho del paralelepípedo.

Con el objetivo de determinar las dimensiones de una masa de granos, utilizando el método de análisis de cribas, por diámetro de los mismos se utiliza generalmente la dimensión del orificio cuadrado más pequeño, por el cual estos granos pueden pasar.

Debido a la presencia de una amplia gama de tamaños, en la mayoría de los materiales utilizados en la práctica, resulta necesaria la utilización de varios tamices para obtener una mayor información sobre la caracterización del tamaño de estos materiales.

La representación detallada de la composición granulométrica de una masa de material se denomina: característica de grosor.

La característica de grosor representa la composición granulométrica de un material, es decir los por cientos o fracciones de masa de la muestra que se enmarcan en los intervalos de dimensiones establecidos convenientemente, seleccionando para ello los tamices correspondientes. Las características de grosor se pueden representar en forma individual o sumaria (acumulativa)

La característica individual se representa como el por ciento o fracción de la masa analizada que corresponde a tamaños determinados por separados. La característica sumaria o acumulativa expresa el por ciento o la fracción de la masa total que se encuentra por encima o por debajo de una dimensión de tamiz dada, de la cuál se obtienen por diferencias los resultados que ofrecen la característica individual. En la figura No. 3 se representa la característica sumaria o acumulativa de un material determinado, la curva a se traza por el retenido o por más y b por el cernido o por menos, en el primer caso se toman los por cientos o fracciones que pasan por cada tamiz y en el segundo los retenidos en el tamiz.

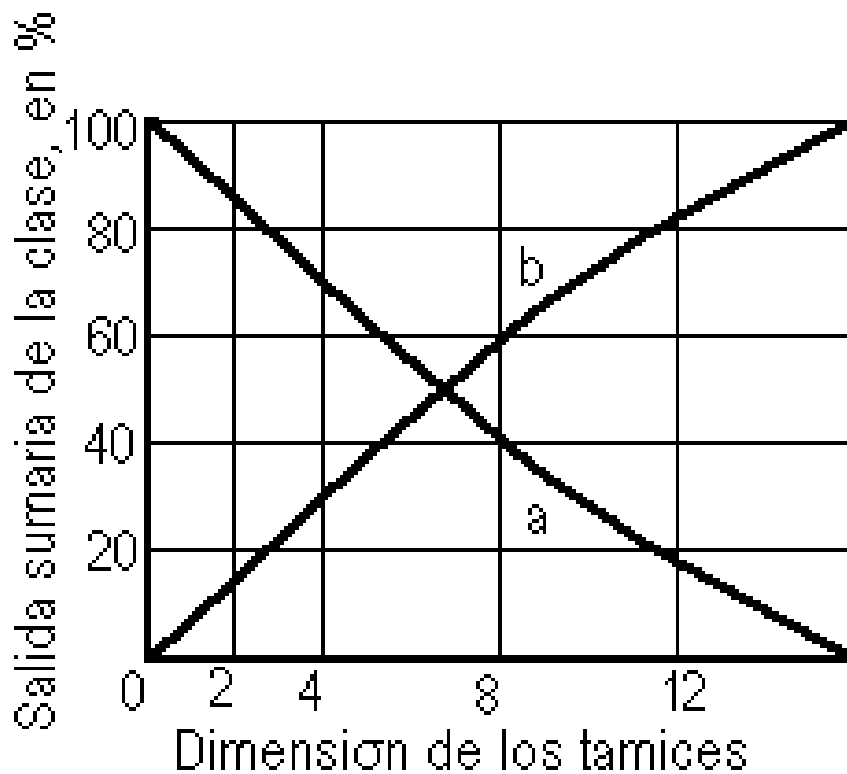


Figura No 3 Característica sumaria o acumulativa de tamaño

La forma de la característica sumaria de tamaño caracteriza el predominio de los diferentes intervalos de tamaño en el material analizado, esta puede ser; cóncava, convexa o rectilínea, tal como se muestra en la figura No 4. La curva convexa se obtiene cuando en el material predominan los granos gruesos, la cóncava cuando predominan los granos finos y la recta cuando la distribución presenta una distribución de tamaño casi uniforme.

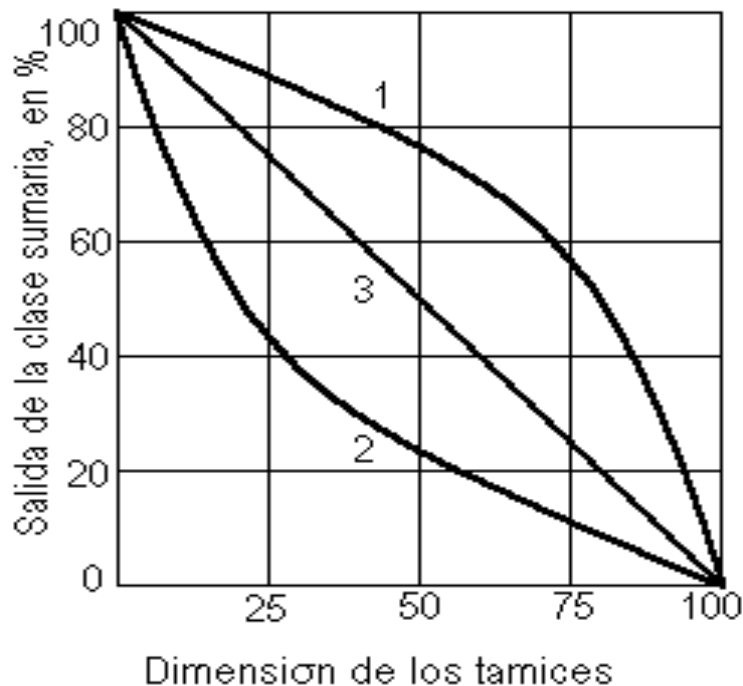


Figura No 4 Diferentes formas de la característica sumaria o acumulativa

El trazado de la característica sumaria de grosor con intervalos amplios de tamaño de los fragmentos del material implica que; los segmentos en el eje de las abscisas, en la zona de las clases finas, resultan de un tamaño sumamente pequeño, lo que dificulta el trazado y por tanto la utilización de dichas características. En este caso muchos autores utilizan el sistema de coordenadas con escala logarítmica o semi - logarítmica, con el fin de evitar que los gráficos resulten excesivamente grandes

Varios autores han tratado de representar matemáticamente, funciones que describan las distribuciones de tamaño de los minerales, estas pueden ser de forma continua o discreta.

### 1.3.1 Funciones continua de distribución de tamaño.

La representación de funciones de distribución considerando el tamaño de las partículas como una variable continua puede realizarse en su expresión más general según Lynch (1980), mediante la siguiente ecuación:

$$W(x).dx = a.x^m .e^{-b.x^n} .dx \quad (2)$$

Donde:

$W(x)$  = Masa de las partículas de tamaño  $x$ .

$a$ ,  $b$ ,  $m$  y  $n$  son constantes.

A partir del tratamiento teórico de la rotura de partículas únicas o independientes, Gilvarry (1971) y Gaudin y Meloy (1962) proponen un modelo para la característica de grosor en función de las variables que caracterizan el agrietamiento en el material, esta ecuación en forma reducida se puede representar, según la ecuación de Rosin- Rammler (1933)

$$y = 1 - \exp(-b.x^m) \quad (3)$$

También para la distribución de tamaño en forma continua se conocen las siguientes ecuaciones.

De Gaudin-Shuhmann, Linch (1980)

$$y = \left( \frac{x}{k} \right)^\alpha \quad (4)$$

Donde:

$\alpha$  y  $k$  son constantes. Gaudin y Meloy (1962)

$$y = 1 - (1 - x / x_0)^r \quad (5)$$

Siendo:

$x_0$ : Es el tamaño de la muestra original y  $r$  es una medida del número de grietas.

Como se conoce el tamaño de las partículas casi siempre se obtiene en intervalos de tamaño por lo que su representación como variable continua ofrece algunos inconvenientes, por lo anterior resultan más ampliamente utilizadas las funciones de distribución en forma discreta.

### **1.3.2 Funciones discretas de distribución de tamaño.**

Las distribuciones de tamaño en forma discontinua o discreta utilizan funciones similares a las detalladas anteriormente pero estas se caracterizan por una serie de puntos;  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , y por tanto la curva de distribución granulométrica se representa como una serie de líneas rectas que unen los puntos definidos.

Aquí los puntos definidos con la función coinciden con los tamaños de tamices utilizados durante el análisis, y resulta una práctica útil; tomar un paso uniforme entre el tamaño de los tamices que generalmente debe representar una progresión geométrica donde se mantenga la relación:

$$\frac{x_0}{x_1} = \frac{x_1}{x_2} = \frac{x_2}{x_3} = \dots = \frac{x_i}{x_{i-1}}$$

Según Lynch (1980): Este tipo de distribución presenta las siguientes ventajas:

- Se describe toda la distribución granulométrica.
- No se realizan aproximaciones para la adaptación a una función continua.
- Los valores pueden ser leídos directamente.
- Todas las distribuciones pueden representarse por este método.
- Este tipo de representación resulta muy ventajoso para el trabajo utilizando las técnicas de computación.

### 1.4 Método de Análisis de Tamices.

El cribado de materiales áridos con el fin de determinar su composición granulométrica, lleva el nombre de análisis de cribas. Los procedimientos para analizar este análisis están unificados.

Los materiales de un grosor superior de 25 mm se laboran en cribas horizontales, osciladoras y de mano y los materiales de un grosor inferior a 25mm, en cribas de laboratorio.

La masa de muestra para el análisis de cribas se toma conforme al grosor del mayor trozo en dicha muestra, ver tabla No 1 Andreiev (1980). La masa de muestra para el análisis de criba se toma conforme al grosor del mayor trozo en dicha muestra según la fórmula siguiente:

$$Q_{\max} = 0.02d^2 + 0.5d \quad (6)$$

Donde:

$Q_{\max}$  es masa de muestra para realizar análisis granulométrico.

d: diámetro del trozo mayor del mineral.

Tabla No 1 Masa mínima de la muestra según el tamaño máximo del material.

Dimensiones del mayor trozo (mm)	0.1	0.3	0.5	1	3	5	10
Masa mínima de la muestra en Kg	0.025	0.05	0.1	0.2	0.3	2.25	18

Las muestras se criban por el método húmedo o seco en dependencia del, grosor del material y la exactitud necesaria de los resultados del análisis.

Cuando el cribado de un material con grosor superior a 5mm es único, la muestra se elige de tal forma que en la criba de arriba se forme una capa con un grosor no superior de dos



trozos de máximo tamaño. El tiempo necesario para cribar una clase superior a 5mm es de 10min. Para un material más fino de 5 mm la muestra es de 500 a 1000g y para un material más fino de 0.1mm, de 100g. el cribado dura 30 min. El cribado húmedo de materiales finos, con un suministro ininterrumpido de agua, es de 3min. Las pérdidas de material, durante el análisis de cribas no deben ser superiores al 1%.

La norma cubana número 178 del 2002 elaborada por el Comité Técnico de normalización NC/CTN 23 "Áridos" trata sobre el análisis granulométrico de áridos, en la misma se establecen los elementos principales sobre este tipo de análisis así como los utensilios a utilizar, el procedimiento para preparar las muestras, así como la cantidad de mineral a utilizar teniendo en cuenta la clase de tamaño.

### ***1.5 Principales regularidades de los Trituradores de Martillos.***

Investigaciones experimentales relativamente amplias de la influencia de diferentes variables en el tamaño de salida de una trituradora de martillos, se pueden encontrar en Taggart (1950), para una trituradora de martillos específica durante el procesamiento de grava de río, las cuales se exponen a continuación, con sus respectivas representaciones gráficas.



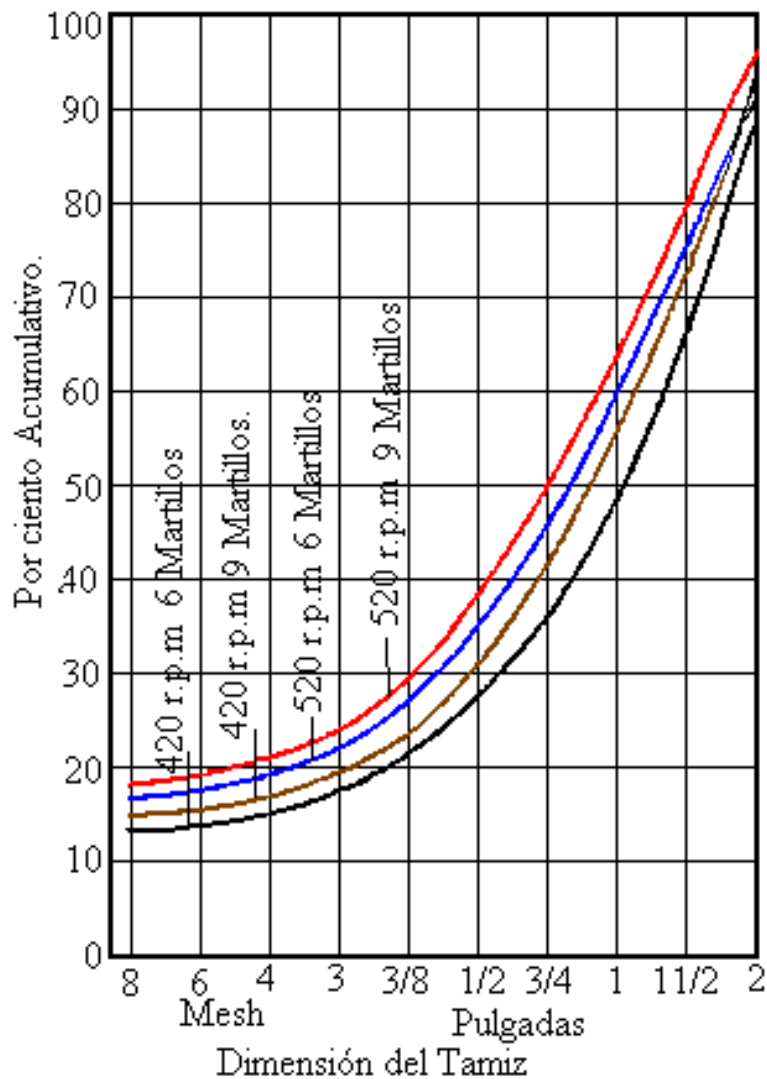


Figura No.5. Relación entre la cantidad de martillos y la distribución de tamaño de salida del material a diferentes velocidades del rotor..

En la figura No.5 Se observa el efecto del incremento del número de martillos para dos escalas de velocidades sobre la distribución de tamaño del producto obtenido.

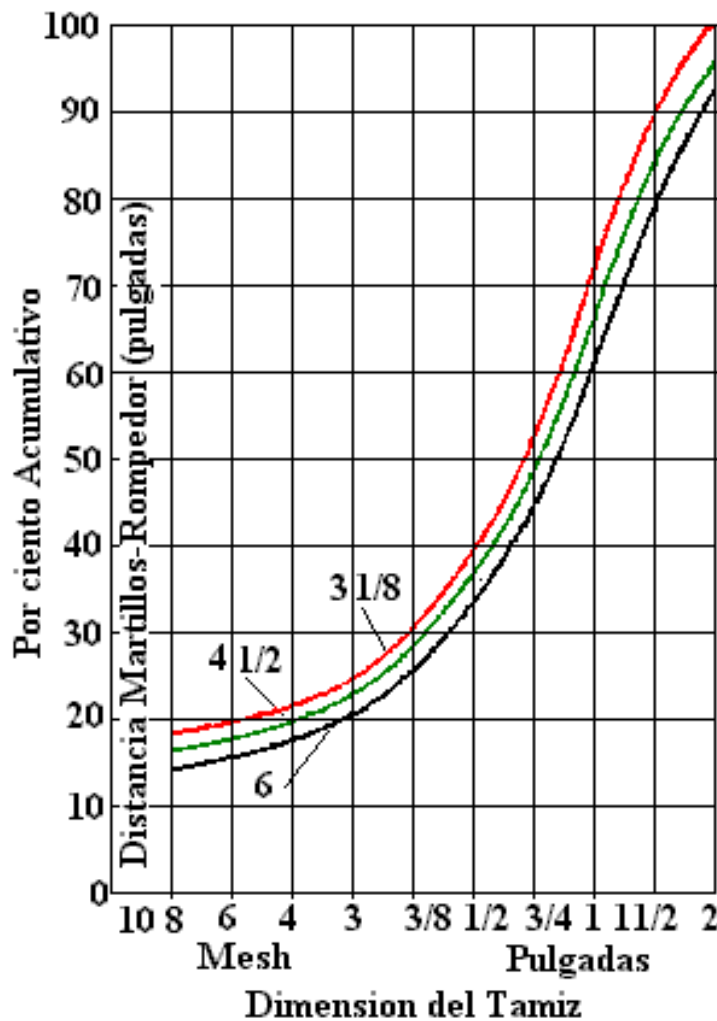


Figura No 6 Influencia de la holgura entre el rotor y el estator sobre el producto obtenido

En la figura No 6 se representa la influencia de la holgura entre el rotor y el estator sobre el producto obtenido para tres valores diferentes de esta variable independiente.

Los resultados de la variación de las holguras de la rejilla de salida de la trituradora aparecen en la figura No.7.

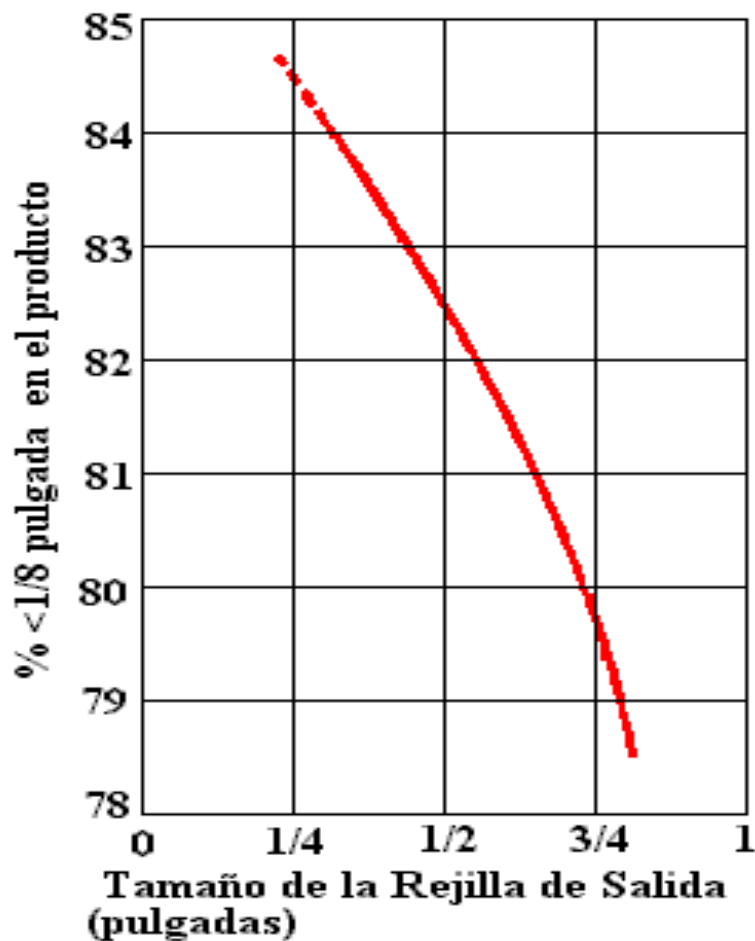


Figura No.7. Comportamiento del tamaño de salida del material en dependencia de las dimensiones de la rejilla de salida.

Una variable de gran influencia en la distribución del producto obtenido resulta la velocidad de rotación del equipo según se puede observar en las curvas representadas en la figura No.8.

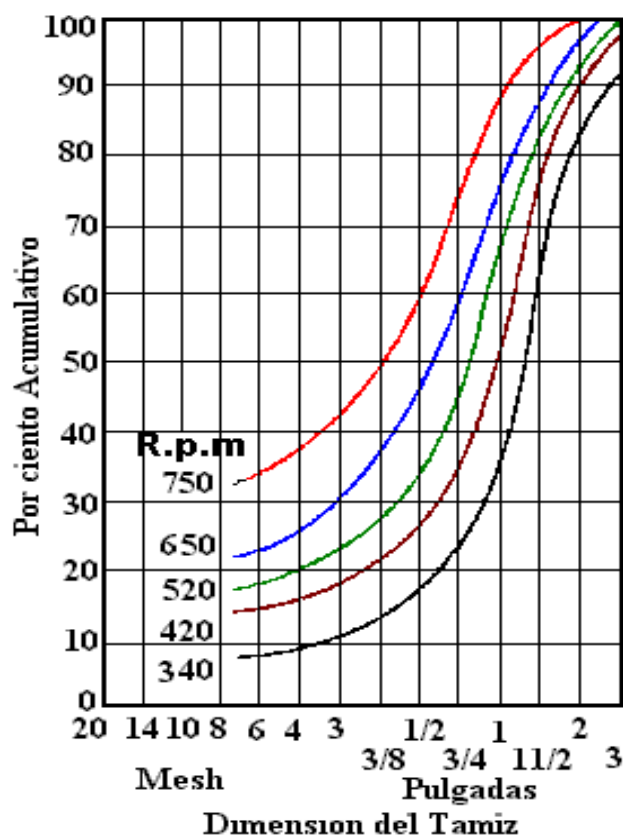


Figura No.8. Influencia de la Velocidad de Rotación en el tamaño de Salida del Mineral.

El efecto del tamaño del mineral alimentado al equipo resulta de especial interés (ver figura no.9).

Esta curva demuestra que el tamaño de alimentación tiene un efecto muy pequeño en el producto < 100 mesh pero el rango de reducción límite se incrementa con el incremento del tamaño alimentado desde aproximadamente 2 para la alimentación más fina experimentada, hasta 3 para el mayor tamaño alimentado.

El rango de 50 % de tamaño (50 % retenido) es aparentemente más dependiente sobre las partículas más finas en la alimentación; para las condiciones del experimento esta fue 5 para  $\frac{1}{8}$  in en los tamaños menores, desde 6-8 para  $\frac{3}{8}$  in y salta a 19 para  $1\frac{1}{2}$  in en menor tamaño, tan lejos como 50 % puntos de medición el tamaño de un producto.

La conclusión parece ser que este tipo de molino es más eficiente para en la tritución de las clases mayores que  $1\frac{1}{2}$  in que en las mas finas ( $\frac{1}{8}$  -  $\frac{3}{8}$ ”).

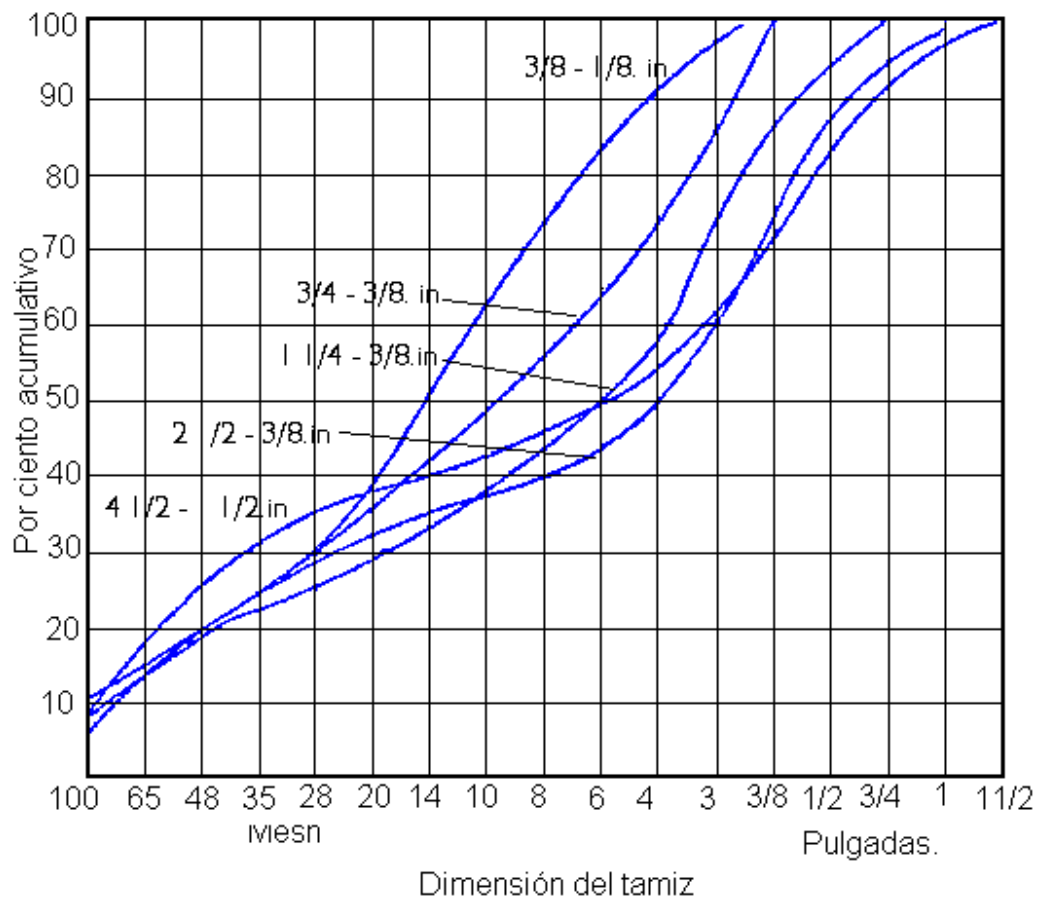


Figura No.9. Influencia del tamaño del material alimentado a la trituradora en el tamaño del producto obtenido.

## **1.6 Modelación y Simulación de Procesos de Trituración.**

La sustitución de los sistemas reales de trituración por modelos o aproximaciones simplificadas de estos procesos constituye una herramienta muy útil para el diseño y la mejora de los mismos.

Según Coello (1999): A lo largo de más de 100 años los procesos de reducción de tamaño se han venido estudiando mediante la revisión de la energía consumida durante el trabajo del equipamiento de trituración y molienda. Este punto de vista lógico está relacionado con los altos consumos energéticos que tienen lugar en las operaciones 50 - 70 % en planta de beneficio.

En los procesos de trituración, resulta muy importante la característica del tamaño del producto obtenido ya sea para su concentración posterior o para su utilización, como materia prima preelaborada, en otros procesos. Esta situación parece influir significativamente en el hecho de que en la mayoría de los modelos encontrados, el tamaño del producto se encuentra presente.

Resulta lógico que el incremento de simplificaciones en los modelos casi siempre conduce a la disminución de la exactitud de los mismos.

En la actualidad el desarrollo de las tecnologías de computación electrónicas brinda muy buenas posibilidades para el desarrollo de modelos matemáticamente más complejos.

En el presente acápite se recogen los principales modelos utilizados en la simulación de los procesos objeto de trabajo de acuerdo con la bibliografía consultada.

### 1.6.1 Modelos energéticos.

Los modelos energéticos para la simulación de los procesos de trituración relacionan la energía consumida en dicho proceso, con los resultados del mismo, es decir con la reducción de tamaño obtenida. El modelo más antiguo que se encontró durante la búsqueda bibliográfica fue el de Rittinger (1867) quien enunció un modelo de la relación energía- tamaño que se puede representar por la ecuación siguiente:

$$E = C_R \left( \frac{1}{p} - \frac{1}{f} \right) \quad (7).$$

Siendo:

E: Energía

$C_R$ : Coeficiente de Rittinger

p: Caracteriza el tamaño del material triturado.

f: Caracteriza el tamaño del material de alimentación.

,Según Andreiev (1966), Kick.-Kirpichov enunció otro modelo del proceso de trituración y molienda, el cual puede expresarse de la forma siguiente.

$$E = C_K (Ln f - Ln p) \quad (8)$$

Donde:

$C_K$  = Coeficiente de Kick.

Fred.Bond, (1951) planteó que; el trabajo total realizado durante el proceso de reducción de tamaño debe incluir; el trabajo de deformación más el trabajo de formación de la nueva superficie, por lo cual propuso el siguiente modelo.

$$E = C_{Bond} \left( \frac{1}{\sqrt{p}} - \frac{1}{\sqrt{f}} \right) \quad (9).$$

Donde:

$C_B$ : Coeficiente de Bond,

El índice de Bond se determina mediante un ensayo de molienda a escala de laboratorio, para el caso de la trituración también existen ensayos para determinar un parámetro similar que caracteriza el consumo energético.

Estos modelos energéticos no son únicos ya que han sido desarrollados otros por varios autores como; Walker (1954), Charles (1957), Hukki (1961), Tijonov (1988), Coello (1996), Solowski (1995), Morrell (2004).

### **1.6.2 - Métodos matriciales.**

Los métodos matriciales, de modelación de los procesos de trituración y molienda, se caracterizan por considerar, tanto el material de alimentación como el producto obtenido como distribuciones discretas de tamaños y a partir de ellos es posible realizar la modelación y simulación de estos procesos con una mayor información sobre el tamaño del mineral.

Estos modelos son ampliamente utilizados en la modelación de procesos de trituración y molienda. Los modelos matriciales que con mayor frecuencia se encontraron en la literatura consultada son:

El modelo de White y Whitten (1979)

$$p = (I - C).(I - BC)^{-1} f \quad (10)$$



Siendo:

p: Vector que caracteriza la distribución de tamaño del producto.

f: Vector que caracteriza la distribución de tamaño del mineral de alimentación.

I: Matriz identidad.

C: Matriz que caracteriza la función de clasificación, cuantifica la probabilidad de fragmentación de las partículas de cada tamaño dado. Esta es una matriz diagonal.

B: Matriz de distribución de la fragmentación Matriz triangular inferior que caracteriza la forma en que se distribuyen las partículas formadas por la fragmentación de las partículas de mayor tamaño

Este modelo describe un proceso de trituración o de molienda en el cual las partículas objeto de rotura pueden someterse a más de un ciclo de fragmentación tal como se indica en la figura no 10

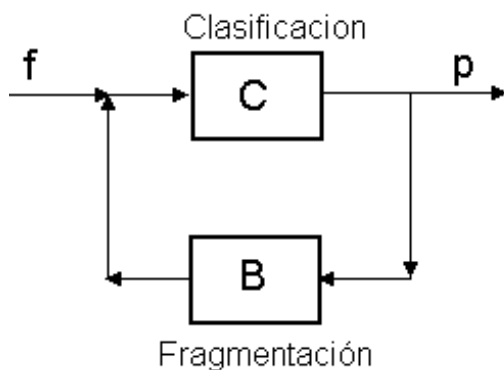


Figura No 10 Representación grafica del modelo de White y Whitten

El modelo de fragmentación simple simula estos procesos teniendo en cuenta la fragmentación de las partículas como un evento que no se repite para una misma partícula, por esto las matrices se encuentran enlazadas en serie.

$$P = (I - C)f + BC.f \quad (11)$$

White y Whitten elaboraron además un modelo para la determinación de la función de selección en trituradores de mandíbulas y de conos el cual se puede expresar como:

$$C_i(x_i) = 1 - \left( \frac{x_i - d}{D - d} \right)^n \quad (12)$$

Donde:

$C_i$  : Es la probabilidad de fractura de las partículas de tamaño  $i$ .

$d$ : Tamaño mínimo de las partículas que pueden fracturarse.

$D$ : Tamaño de partículas para las cuales la probabilidad de fractura es igual a la unidad o 100 %

$n$ : Parámetro.

$d$  y  $D$  se relacionan con las dimensiones y forma del triturador y con los parámetros del proceso.

La función de distribución de la fragmentación, es determinada por estos autores según (13):

$$B(x, y) = \begin{cases} k \left( \frac{x}{y} \right)^m + (1-k) \left( \frac{x}{y} \right)^l & \text{--- para } x < y \\ 0 & \text{--- para } x > y \end{cases} \quad (13)$$

Donde:

$x$ : Tamaño mínimo de las partículas del intervalo  $i$

$y$ : Tamaño promedio de las partículas fragmentadas que se encuentran en el intervalo de tamaño  $j$

$k$ ,  $m$  y  $l$ : parámetros.

Los elementos de la matriz de distribución de la fragmentación en forma individual (b) se calculan mediante:

$$b_{ij} = B(Di - 1, dpj) - B(Di, dpj) \quad (14)$$

$$b_{jj} = 1 - B(Dj, dpj) \quad (15)$$

También debe cumplirse que:

$$B_{i,j} = 1 - \sum_{k=1}^{k=i} b_{k,j} \dots \dots \dots \forall j \quad (16)$$

A continuación se analizan los principales modelos encontrados en el estudio bibliográfico utilizados para los trituradores de impacto.

### ***Vogel y Peukert, 2003.***

Estos proponen un modelo para la determinación de la probabilidad de rotura por impacto, para la fragmentación de partículas aisladas.

Nikolov,

Nikolov utiliza el modelo de White y Whitten, ecuación (10), considerando que las partículas serán sometidas a varias etapas de fractura.

Para la determinación de la función de selección Nikolov utiliza una nueva función de clasificación Nikolov (2002).

$$C_i = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x_1 - d}{d}\right)^k\right] \quad (17)$$

Donde:

d: Tamaño mínimo de los fragmentos que se rompen en las condiciones del Proceso.

k: Parámetro de forma

Las ecuaciones propuestas para la determinación de d, presentan diferencias en los reportes de Nikolov (2002): ecuación (18) con respecto a los de 2004: ecuación (20)

$$d = x_{\max} \cdot \exp\left\{-\left[C_0 + C_1 \cdot \ln\left(\frac{Q_0}{Q}\right)\right] \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^n\right\} \quad (18)$$

Donde:

$x_{\max}$ : Tamaño máximo del material de alimentación al equipo

$c_0$ : Constante.

$c_1$ : Factor de interacción entre las partículas.

Q: Productividad (t/h).

n: Parámetro característico del material.

E: Energía de impacto (j /kg)

$E_0$  y  $Q_0$  : Parámetros de energía y productividad tomados como referencia

$$x_{\min} = \beta \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^s \cdot \left(\frac{E_0}{E}\right)^n \quad (19)$$

Siendo:

$\beta$  (mm): Tamaño especial de partícula que depende del diseño del triturador y de las propiedades de los fragmentos.

n: Parámetro del material.

s: Parámetro que tiene en cuenta la intensidad de los choques entre partículas.

Para la determinación de la función de distribución de la fragmentación Nikolov (2002) utiliza la integración de los modelos de distribución de Broadbent y de Calcott: ecuación; (20).

$$b_{ij}(d_{ij}) = 1.582 \left\{ k \cdot \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{d_i}{d_j} \right)^m \right) \right] + (1 - k) \cdot \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{d_i}{d_j} \right)^l \right) \right] \right\} \quad (20)$$

Donde:

k: Denota la fracción fina de masa.

m y l Coeficientes del material.

El considera que k no se debe considerar constante realizando su cálculo según la ecuación (21).

$$k = 1 - \exp \left\{ - \left[ C_2 + C_1 \cdot \ln \left( \frac{Q_0}{Q} \right) \right] \cdot \sqrt{\frac{E}{E_0}} \right\} \quad (21)$$

Donde:

$c_2$ : Se considera constante para la simplificación del modelo.

$c_1$ : Se considera al igual que en la ecuación (18), que caracteriza las interacciones entre las partículas.

En el año 2004 Nikolov utiliza la ecuación propuesta por White y Whitten 1979, no obstante sugiere que la mayor coincidencia de los resultados de la simulación realizados por el en este último trabajo podrían obtenerse utilizando la función de distribución de la fractura propuesta en su reportes del año 2002.

En ambos casos este autor aplica la metodología utilizada por King (2000), para la determinación de los elementos de la matriz de fractura.

La validación de los resultados presentados en los reportes de Nikolov, se realizó durante la trituración de caliza en un triturador de árbol horizontal de una planta piloto. Los principales resultados de esta validación Nikolov (2002) se muestran en las figuras 11 a la 14, las curvas continuas representan los resultados obtenidos durante la experimentación y los símbolos y trazos discontinuos las predicciones de los modelos.

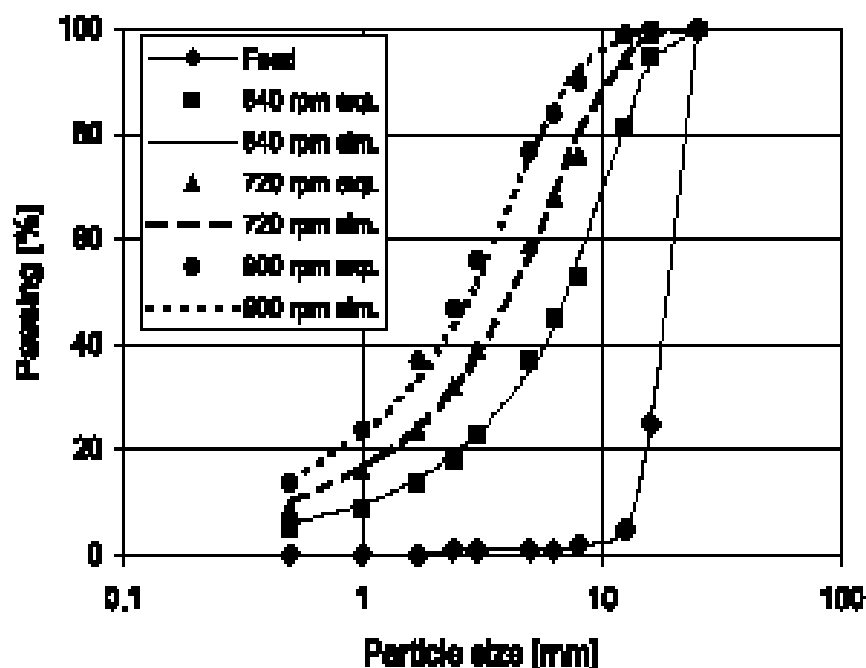


Figura No 11 Tamaño del producto en función de la velocidad del rotor para una productividad  $Q = 2 \text{ ton/h}$

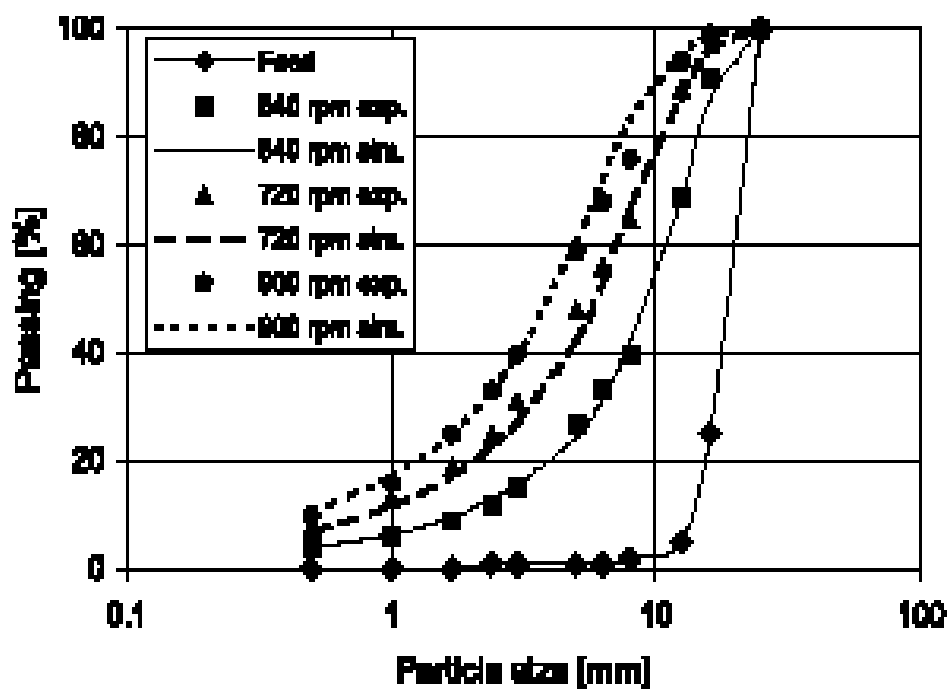


Figura No 12 Tamaño del producto en función de la velocidad del rotor para una productividad  $Q = 7$  ton/h

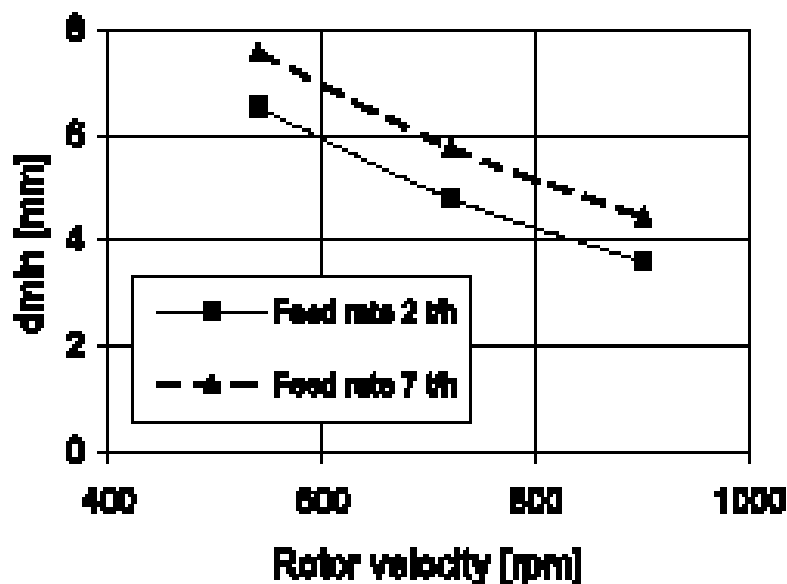


Figura No 13 Comportamiento del tamaño mínimo (d) con la variación de la velocidad del rotor y del flujo de alimentación al equipo

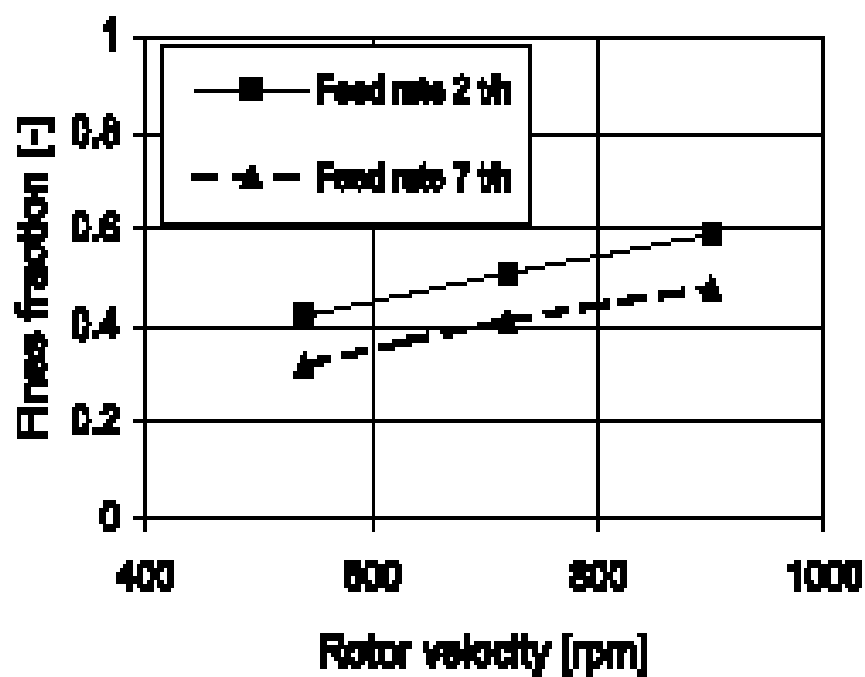


Figura No 14 Influencia de la velocidad del rotor en la fracción de productos finos ( $k$ )



## **CAPÍTULO # 2. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA Y DEL PROCESO TECNOLÓGICO.**

Las zeolitas ocurren en grandes variedades geológicas, en su mayor parte como alteraciones de minerales autigénicos, bajo temperatura y presión como minerales en sistemas metamórficos, minerales secundarios en zonas erosionadas por la intemperie o en venas. Las zeolitas comerciales están actualmente limitadas por marcos autigénicos y finalmente en alteraciones de rocas sedimentarias cristalinas. Comúnmente son 9 las zeolitas que ocurren en rocas sedimentarias: La analcima, chabazita, la clinoptilonita, la erionita, la ferrierita, la hualandita, la laumontita, la modernita, y la filipsita. La analcima y la clinoptilonita son las más abundantes. Las 9 zeolitas muestran un considerable rango de contenido de cationes y radio de Si: Al. Excepto por la hualandita y la laumontita, estos generalmente son alcalinos y más siliciosos que sus contrapartes en rocas ígneas.

El potencial comercial de minerales de zeolitas esta limitado por 5 de estas presentes: La chabazita, la clinoptilolita, la erionita, la mordenita y la filipsita. Estas son unas de las más comunes de las más abundantes en la naturaleza y tienen una favorable capacidad de intercambio de ion absorbancia y tamizado molecular.

La ferrierita y la faujasita son también potenciales económicas pero estas son poco comunes y son conocidos en muy pocos sitios en el mundo. En la figura No. 14 se representa el esquema de formación de una Zeolita y en la figura no 15 el mecanismo de cristalización.

## **2.1 Descripción de la materia prima.**

Las propiedades físicas de una zeolita deben de considerarse por: una descripción mineralógica de la zeolita desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, hábitos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión. Y desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillantez, color, viscosidad de Brookfield, viscosidad de Hércules, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste.

La caracterización de cualquier zeolita siempre incluye la descripción básica de sus características mineralógicas y una evaluación al cambio con el efecto con la humedad las cuales son consideradas para las aplicaciones comerciales específicas.

Las zeolitas son caracterizadas por las siguientes propiedades:

1. Alto grado de hidratación.
2. Baja densidad y un gran volumen de vacíos cuando es deshidratado.
3. La estabilidad de su estructura cristalina cuando se deshidrata.
4. Las propiedades de intercambio del catión.
5. Presenta canales moleculares uniformes clasificados en los cristales deshidratados.
6. Por su habilidad de absorber gases y vapores.
7. Por sus propiedades catalíticas.

### **2.1.1 Descripción de los aspectos principales del yacimiento San Andrés..**

El yacimiento San Andrés de la provincia de Holguín se encuentra ubicado al Noroeste de la ciudad de Holguín. El mismo se ubica geológicamente dentro de la secuencia de rocas de la formación Loma blanca como parte del arco de islas volcánicas del cretácico en el anticlinorium Holguín.

Los volúmenes de reserva calculados superan el orden de varias decenas de miles de millones de toneladas de zeolitas, de ellas más del 60% se encuentran en categorías de uso industrial.

Este yacimiento se caracteriza por la presencia de tobas zeolitizadas en el que predominan los tipos Heulandita y Clinoptilonita con contenidos de más del 60 y hasta un 85% de zeolita.

Litológicamente la materia prima útil se presenta en tobas vitro y vitro cristaloclasticas con colores verde claro o verde.

#### **Los valores medios obtenidos de las propiedades físico-mecánicas de la materia prima del yacimiento de San Andrés son:**

Humedad natural promedio	11,72%
Peso volumétrico húmedo	1,97 t/m <sup>3</sup>
Peso volumétrico seco	1,73 t/m <sup>3</sup>
Valor medio de la relación de vacío	0,35
Valor medio de la saturación	76,04%
Peso específico	2,53 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	2,1%
Resistencia media a la compresión natural	157,36 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia media a la compresión saturada	180 kg/cm <sup>2</sup>

## **2.2 Descripción del flujo tecnológico**

El material procedente de la mina a cielo abierto es transportado en camiones volteo hasta la planta descargándose en una tolva receptora de 14 m<sup>3</sup> que tiene instalada una criba fija de 350 x 350 mm, donde el mineral retenido se reduce manualmente. El mineral se tritura en el triturador primario de mandíbulas y se clasifica en una criba de 3 paños; el retenido en la malla de mayor tamaño se tritura en el triturador de conos.

Las fracciones retenidas en el segundo y tercer tamiz pueden ser enviadas al (a):

- Almacén a granel de forma independiente como producto terminado.
- Almacén a granel conjuntamente con uno o los 2 restantes productos de la clasificación como producto terminado.
- La retritución en el triturador de impacto solo o conjuntamente con la clase inmediata inferior y recircular nuevamente a la criba.
- La sección de trituración fina de forma independiente o conjuntamente con uno o los dos productos restantes.

El pasante de la tercera malla pasa directamente a la sección de trituración fina de forma independiente o conjuntamente con una o las dos clases restantes, o a almacén de producto terminado también de forma independiente o unida a una o las dos restantes clases.

Los tamices más usados en esta primera etapa de cribado son las siguientes:

- 25 x 25 mm.
- 12 x 12 mm.
- 5 x 8 mm.

De esta forma las fracciones obtenidas son:

- Mayor 25 mm.
- De 12 a 25 mm.
- De 5 a 12 mm.
- Menor de 5 mm (5-0 mm).



En la segunda sección o sección de trituración fina el mineral se tritura en el primer triturador de martillos y se clasifica en una criba electromagnética de 2 tamices, obteniéndose tres clases de tamaño.

Los retenidos de las mallas pueden evacuarse para ser utilizados como productos terminados o pasar al segundo triturador de martillos, de forma independiente o conjuntamente con otras clases para ser triturados nuevamente. El producto que pasa a través del segundo tamiz se utiliza como producto terminado.

Los productos correspondientes a estas tres clases de tamaño, generalmente son:

- Desde 3 hasta 8 mm
- Desde 1 hasta 3 mm
- Menor de 1 mm.

El esquema de este proceso se encuentra representado en el anexo 1.

## **CAPITULO # 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.**

### **3.1 Materiales y Métodos.**

Para la realización de todos los experimentos se utilizó una instalación a escala de laboratorio que consta de:

- Una tolva de alimentación con regulación de la cantidad de mineral a la salida de la misma.
- Un transportador de cinta de goma que traslada el mineral desde la tolva al triturador de martillos.
- Un triturador de martillos.

Las principales características técnicas de la instalación son las siguientes:

#### **Tolva de alimentación:**

- Volumen útil ( $\text{dm}^3$ ): 8
- Construcción: En forma de pirámide truncada, construida de chapa de acero galvanizado.

#### **Transportador de cinta:**

- Longitud (mm): 1110
- Ancho de la cinta (mm): 180
- Cantidad de rodillos de transporte: 6
- Cantidad de rodillos de retorno: 1
- Diámetro de los rodillos (mm): 35.
- Diámetro de los tambores - motriz y conducido- (mm): 88.
- Accionamiento por moto reductor por acoplamiento directo.

- Velocidad de salida del moto reductor (rpm): 26
- Velocidad de la cinta (m/s): 0.2
- Potencia del Motor (kW): 0.15.

### **Trituradora de Martillos:**

- Dimensiones del rotor ( Diámetro y Longitud) mm: 100 y 97
- Cantidad de martillos: 2,3 ó 4.
- Tipo de martillos: de estribos.
- Accionamiento: por electromotor.
- Velocidad del motor (rpm): 1670.
- Transmisión: por poleas y correa en V.
- Diámetros de las poleas motrices (mm): 110, 75 , 55.
- Diámetro de la polea conducida (mm): 62.
- Velocidades del rotor (rpm): 1500, 2100 y 3100.

El mineral utilizado fue Zeolita del yacimiento de San Andrés, triturado en la sección de trituración primaria de esta planta y clasificado con tamices de forma manual para obtener clases estrechas de tamaño. La figura que representa la instalación se encuentra en el anexo 1.

### **3.2 Determinación de la Influencia de Variables de Operación en la Función de Distribución de la Fragmentación.**

Con este experimento se determinó la influencia de la velocidad de impacto (V) y de la cantidad de mineral alimentado al triturador (Q) en el comportamiento de la Función de distribución de la fragmentación del mineral.

Para ello se utilizó la instalación de prueba descrita anteriormente, con un número de martillos igual a 4 (constante), variando la velocidad en tres rangos y la productividad en

dos niveles. El material de alimentación fue una clase estrecha de tamaño de 4 hasta 6 mm.

**La Variable dependiente a analizar** es la distribución de la fragmentación, Considerando esta como la distribución de tamaño de las partículas obtenidas por fragmentación (partículas con tamaño inferior a 3 mm)

**Las Variables independientes fueron:**

- -Velocidad del triturador (V)
- Productividad (Q).

De esta forma se diseñó un experimento factorial de 2 variables independientes, una (Q) con 2 niveles y la otra (V) con 3, con los siguientes valores.

V1= 1500 rpm                      Q1= 0.3 t/h

V2= 2100 rpm                    Q2= 0.6 t/h

V3= 3100 rpm

La matriz del experimento queda representada según la Tabla #2

Tabla #2 Matriz del Experimento

No Experimento	V	Q
1	-	-
2	-	+
3	0	-
4	0	+
5	+	-
6	+	+



Las diferentes velocidades que se utilizaron se lograron cambiando las poleas del motor eléctrico que acciona el triturador de martillos (ver características de la instalación utilizada).

La determinación de la productividad del Triturador de impacto, se tomó sobre la Banda transportadora que conduce el producto desde la tolva hacia el triturador. Para ello, primero es preciso comprobar la velocidad de la banda transportadora, la cual se determinó cronometrando el tiempo que la misma demora en recorrer un metro de longitud, los resultados arrojaron un tiempo de 5 segundos, por tanto.

Como:

$$V = \frac{S}{t} \quad (22)$$

Donde:

V; Velocidad de la cinta (m/s).

S: Distancia recorrida (m).

t: tiempo (segundos).

Por tanto:

$$V = \frac{1...m}{5....s}$$

$$V = 0.2 \text{ m/s.}$$

La productividad se calcula entonces por la ecuación 24, aunque previamente es necesario determinar la productividad específica o la masa de mineral por metro de longitud de la banda. Este parámetro se determina pesando la cantidad de material en un metro de banda.

$$Q = 3,6.q.v \quad (23)$$

Donde:

Q; Productividad (ton/h).

q; Masa por metro de banda o productividad específica (kg/m)

v; Velocidad de la cinta (m/s)

Como la tolva de la instalación utilizada permite la regulación de la cantidad de alimentación al triturador, la productividad se varió en 2 niveles, 0.4 kg/h\*m y 0.85 kg/h\*m, con las cuales se obtuvieron las productividades en los niveles referidos anteriormente, es decir 0.3 y 0.6 toneladas por hora.

Durante cada experimento se trituró una cantidad de mineral suficiente para la representatividad de las muestras a tomar (aproximadamente 30 kg)

Luego de obtener el producto, se le realizó un cuarteo y el análisis de tamices utilizando la serie 4 3 2 1 y 0.5 mm y tomando un tamaño de 3 kg para cada muestra.

El proceso de tamizado de las muestras se realizó de forma manual siempre realizando un pesaje del retenido en cada tamiz en una balanza del laboratorio de la Planta. Como base normativa para realizar el proceso de caracterización del tamaño de las muestras tomadas se empleó la norma cubana número **178** del 2002 elaborada por el Comité Técnico de normalización NC/CTN 23 "Áridos" que se encuentra disponibles en la UEB.

De esta forma la distribución de la fragmentación se evalúa según la distribución del mineral fragmentado, considerándose como fragmentado, todo el mineral con tamaño menor de 3 mm. El número de réplicas de cada experimento fue tres.

Los resultados de la caracterización granulométrica de las muestras están plasmados en las tablas que se encuentran en el anexo 2.

### **3.3 Determinación del Comportamiento de la Función de Clasificación.**

En este contexto se realizaron dos experimentos; el primero para determinar el comportamiento de la función de clasificación en función del tamaño de las partículas y un segundo experimento donde se determinó la influencia de variables de operación en la función de clasificación para una misma clase estrecha de tamaño del mineral.

#### **3.3.1 Determinación de la influencia del tamaño de las partículas en la función de clasificación.**

Con la realización de este experimento se trata de conocer como influye el tamaño de las partículas en la probabilidad de rotura del mismo, para esto se utilizó la misma instalación que en el experimento anterior, a una velocidad de 3100 rpm, un número de martillos igual a 4 y una productividad de 0.6 t/h sin utilizar rejilla de regulación a la salida del triturador para evitar la refragmentación del mismo.

Como mineral de alimentación se utilizó una serie de clases estrechas de tamaños de diferentes granulometrías, las mismas fueron: 9 a 6 mm, 6 a 4 mm, 4 a 3 mm, 3 a 2 mm, 2 a 1 mm, 1 a 0,5 mm.

Para el análisis granulométrico del producto que se obtuvo luego de la trituración, se realizó un cuarteo para lograr la mayor homogenización del material para la selección de las replicas, luego se tomaron un total de 6 tamices, con orificios cuadrados: 6, 4, 3, 2, 1 y 0.5 mm. Aquí se utilizó un tamiz para cada clase de tamaño de un diámetro igual que el diámetro inicial menor de la clase de tamaño que se analizó y así se determinó la fracción de esa clase que fue fragmentada, lo cual constituye la variable dependiente del experimento.

La variable independiente en este caso es el tamaño del mineral alimentado caracterizado por el tamaño medio de las partículas en cada intervalo, es decir; 7.5 5 3.5 2.5 1.5 y 0.75

El proceso de tamizado de las muestras se realizó de forma manual siempre realizando un pesaje del retenido en cada tamiz. Con esta metodología se realizaron 3 replicas para así validar los resultados, es decir un total de 18 muestras. Los resultados de la caracterización granulométrica de las muestras están plasmados en las tablas que se encuentran en el anexo 3.

### **3.3.2 Determinación de la influencia de las variables de operación velocidad y productividad en la función clasificación.**

Con este experimento se puede determinar el comportamiento de la razón de fractura de una clase estrecha de tamaño pasando el producto triturado por un tamaño de tamiz dado inferior al tamaño mínimo alimentado y lo más cercano posible a este valor, considerando el producto que pasa por dicho tamiz como material fragmentado y el retenido en el mismo como material no fragmentado. Aquí se utilizó la misma instalación que en los experimentos anteriores trabajando con productividades, números de martillos, y velocidades variables

<b>Variables independientes</b>	<b>Niveles</b>
V Velocidad	3
Q Productividad	3
M No de martillos	3

**Variable dependiente:** Probabilidad o razón de fragmentación de las partículas

De esta forma se obtienen un total de 27 experimentos

Cantidad de experimentos: 27

Cantidad de réplicas por experimento: 3

Total de réplicas: 81

Variables	Valores		
	Nivel -	Nivel 0	Nivel +
No de martillos	2	3	4
Productividad (t/h)	0.3	0.6	2.3
Velocidad (rpm)	1500	2100	3100

La matriz del experimento factorial Completo quedó de la siguiente manera:

Tabla # 3 Matriz del Experimento

No Experimento	V	M	Q
1	-	-	-
2	-	-	0
3	-	-	+
4	-	0	-
5	-	0	0
6	-	0	+
7	-	+	-
8	-	+	0
9	-	+	+
10	0	-	-
11	0	-	0
12	0	-	+
13	0	0	-
14	0	0	0
15	0	0	+
16	0	+	-
17	0	+	0
18	0	+	+
19	+	-	-
20	+	-	0
21	+	-	+
22	+	0	-
23	+	0	0
24	+	0	+
25	+	+	-
26	+	+	0
27	+	+	+

La clase de tamaño que se utilizó como mineral de alimentación fue de 4 a 6 mm esta fue sometida a trituración variando todos los parámetros antes mencionados.

Finalizado el proceso de trituración el producto obtenido se sometió a un cuarteo y luego a un análisis de tamiz realizado con un tamiz de 4 mm, obteniendo dos productos uno retenido y otro cernido, donde se pesó para conocer que cantidad del material inicial se trituró, es decir la fracción o probabilidad de fragmentación.

Los procedimientos para variar los niveles de las variables independientes (Q y V) fue el mismo que el que se describe en el experimento para la determinación del comportamiento de la función de distribución de la fragmentación.

Los resultados de la caracterización granulométrica de las muestras están plasmados en las tablas y las figuras que se encuentran en el anexo 3.

## CAPITULO # 4 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 4.1 Función de Fragmentación.

Al analizar los datos obtenidos en el experimento descrito en el acápite 3.2 del presente trabajo (ver Anexo 2) se pueden determinar las relaciones que existen entre las diferentes variables independientes con la variable dependiente, es decir la función de distribución de la fragmentación.

En las figuras No 15,16 y 17 se representa gráficamente la influencia de la productividad en la función de distribución de la fragmentación (representada de forma acumulativa según el cernido

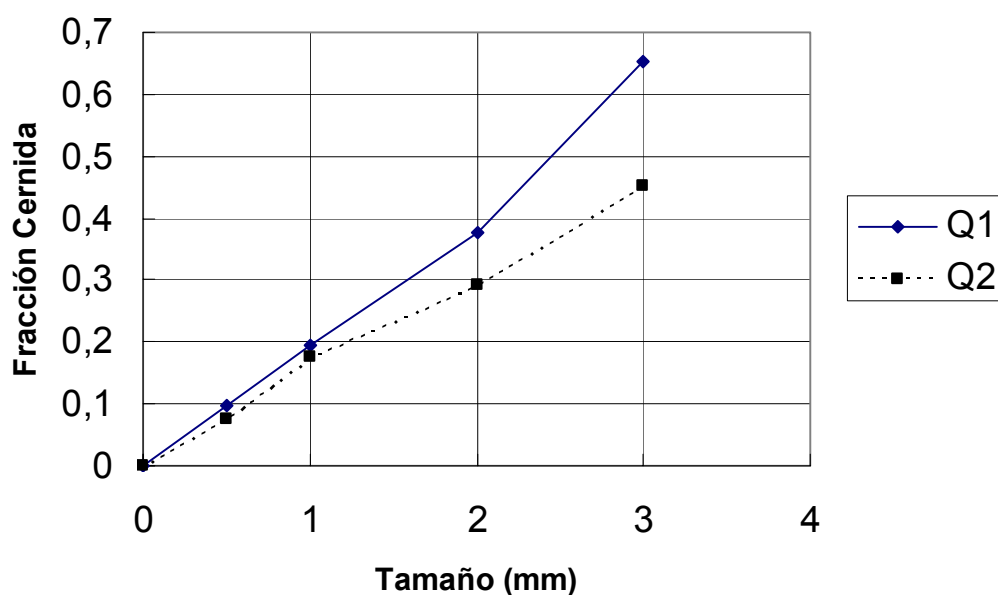


Figura No 15 Influencia de la productividad en la Función de distribución de la fragmentación para la velocidad 1500 rpm.

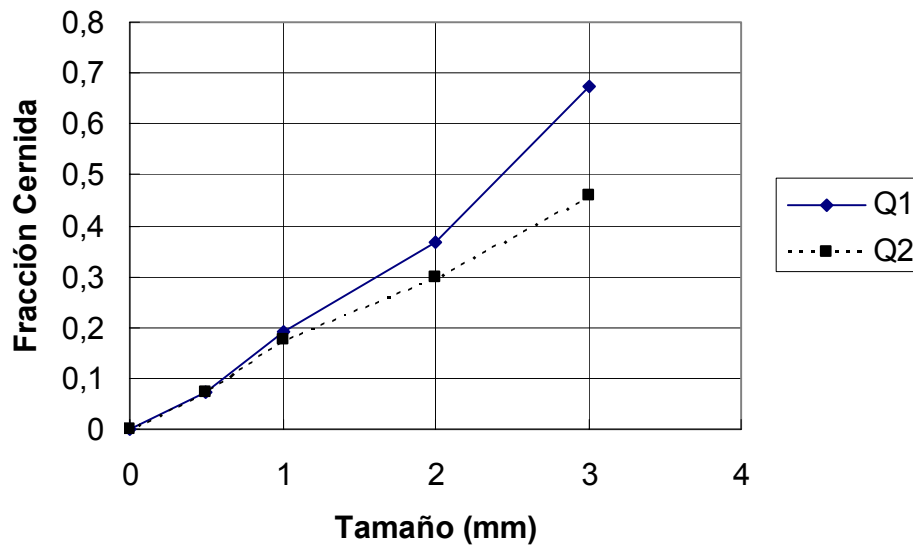


Figura No 16 Influencia de la productividad en la Función de distribución de la fragmentación para la velocidad 2100 rpm.

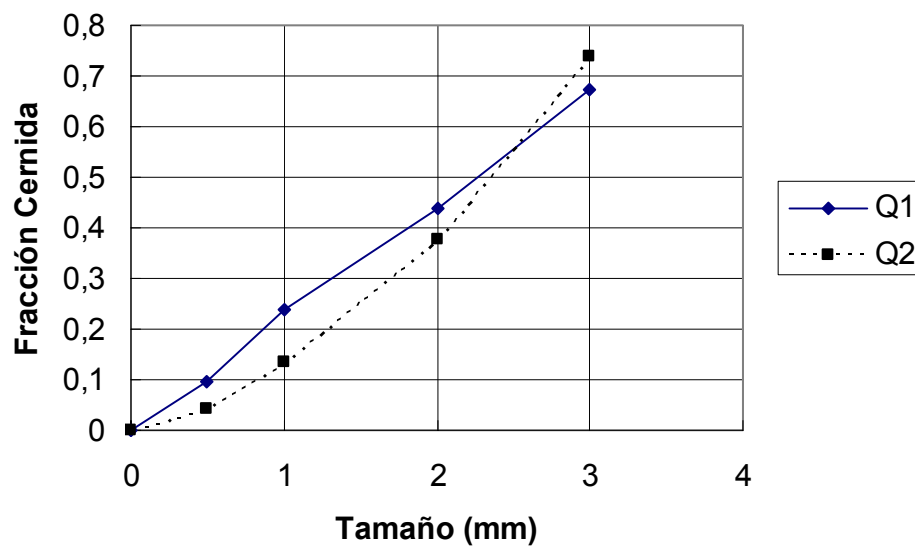


Figura No 17 Influencia de la productividad en la Función de distribución de la fragmentación para la velocidad 2100 rpm.



Teniendo en cuenta que  $Q1 < Q2$  se puede apreciar que en los tres gráficos anteriores resulta evidente que; para las tres velocidades experimentadas el incremento de la productividad conduce a la disminución de los finos en la distribución de la fragmentación

A continuación se representa de forma gráfica la influencia de la velocidad de impacto en la función de distribución de la fragmentación en las figuras 18 y 19.

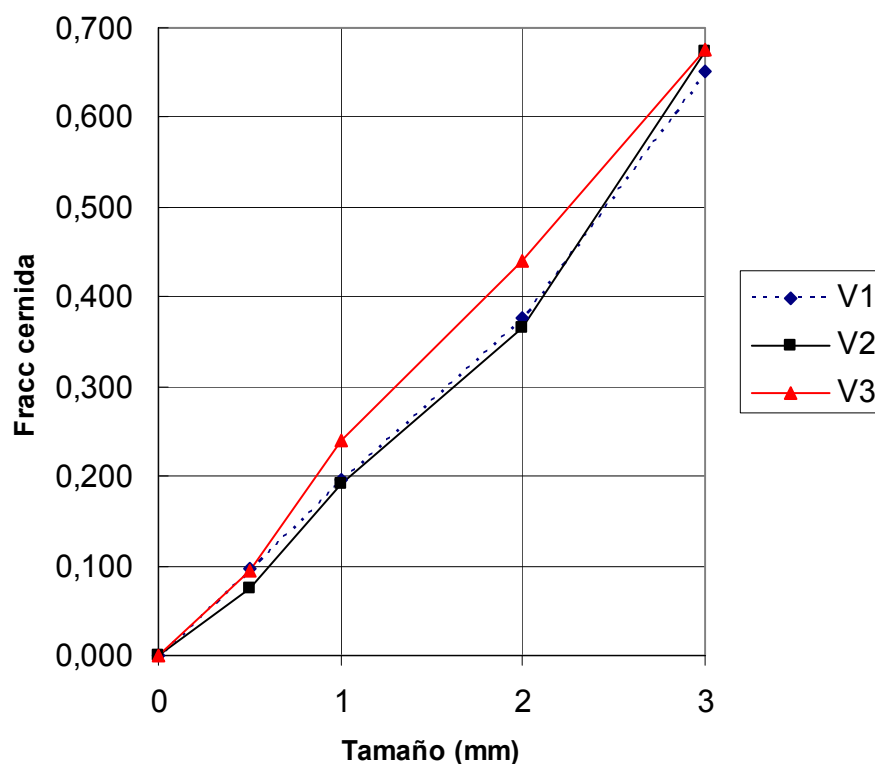


Figura No 18 Influencia de la velocidad en la Función de distribución de la fragmentación para la productividad 0.3 ton/h.

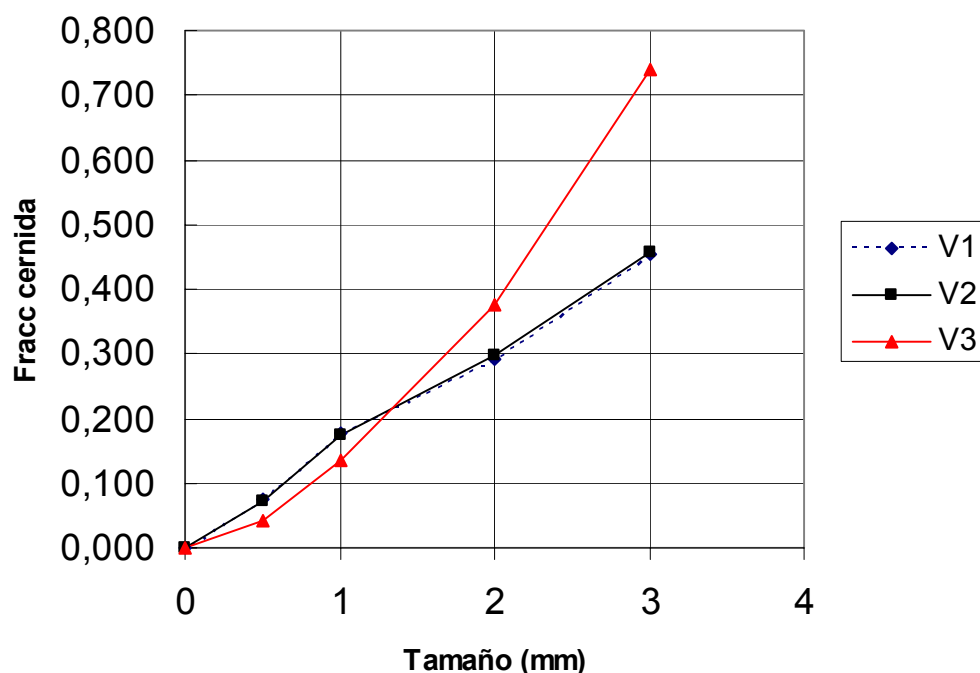


Figura No 19 Influencia de la velocidad en la Función de distribución de la fragmentación para la productividad 0.6 ton/h.

Al analizar los gráficos de estos experimentos donde se ve la influencia de la velocidad en la función de fragmentación podemos concluir diciendo que el incremento de la velocidad conduce a la obtención de una distribución con un producto más fino, aunque entre la velocidad 1 y 2 la variación resulta relativamente pequeña lo cual debe ser consecuencia de la menor diferencia entre ambas que con respecto a la tercera velocidad (v3).

Al evaluar la influencia de V y de Q en la función de distribución de la fragmentación se observa una correspondencia con los reportes de Nikolov (2002) y con las conclusiones de Nikolov (2004), donde se concluye que el comportamiento de la distribución de la fragmentación durante la trituración por impacto no depende solamente de las características del mineral.

## 4.2 Función de Clasificación.

### 4.2.1 Influencia del tamaño de las partículas en la función de clasificación.

Los resultados obtenidos durante la realización del experimento descrito en el acápite 3.3.1 se representa en la figura No 20.

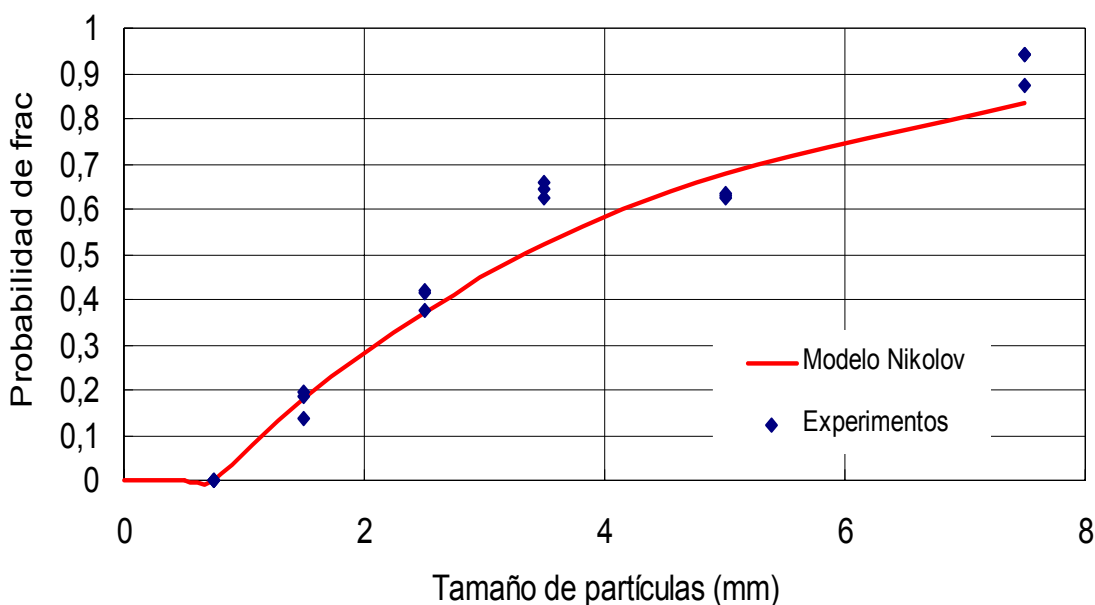


Figura No 20. Influencia del tamaño de las partículas en la probabilidad de fragmentación

En este caso se determinó de forma experimental el tamaño  $d_{min}$  para el cual la probabilidad de fragmentación es nula el cual aproximadamente es 0.5 mm para las condiciones del experimento.

Como se puede observar existe una correspondencia no solo cualitativa sino también cuantitativa con el modelo de Nikolov (2004) y (2006) para la determinación de la influencia del tamaño en el comportamiento de la función de clasificación, lo anterior se puede afirmar a partir del conocimiento del  $d_{min}$  de forma experimental la única incógnita del modelo es el

exponente  $n$  el cual se determinó su valor utilizando Microsoft Excel resultando este igual a 1.8.

Los resultados al aplicar el Estadígrafo de prueba Chi se detallan en la Tabla No 4

Tabla No 4 Aplicación del Estadígrafo Chi para los resultados experimentales con respecto al modelo de Nikolov.

Tamaño	Nikolov	Experimento	Prueba chi
7,5	0,835	0,918	0,9994
5	0,678	0,531	
3,5	0,520	0,642	
2,5	0,373	0,403	
1,5	0,181	0,171	
0,75	0,000	0	

#### 4.2.2 Influencia de variables de operación en la función de clasificación.

Los resultados obtenidos durante la realización del experimento descrito en el acápite 3.3.2 se representa en la figura No 21 a la 29.

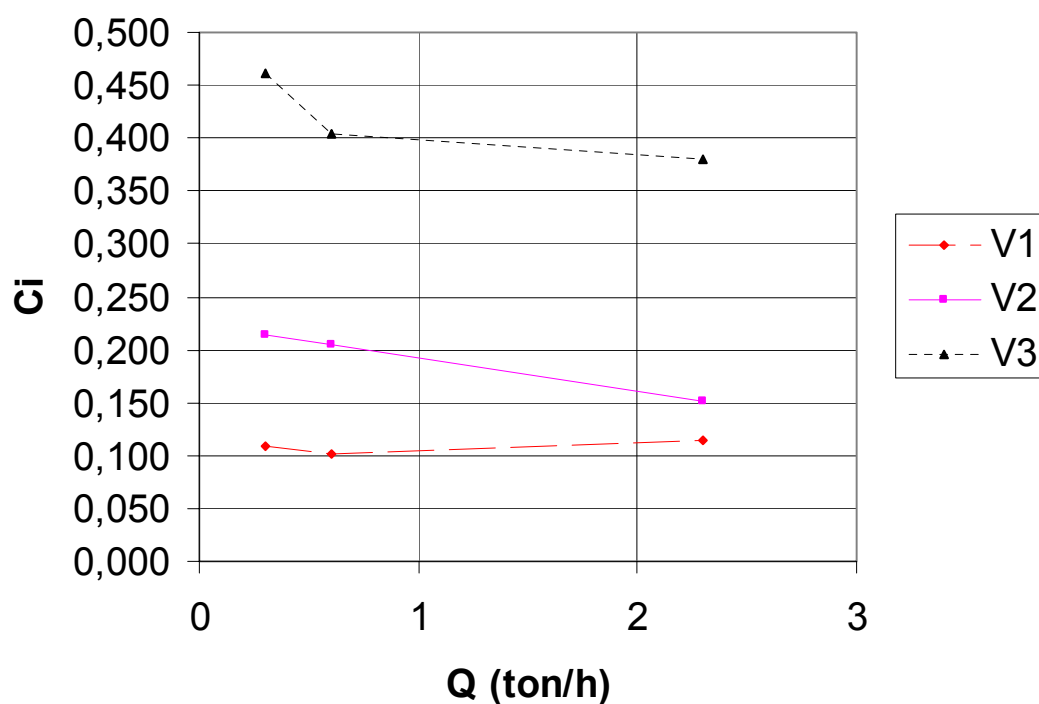


Figura No 21. Influencia de la velocidad en la probabilidad de fragmentación con un número de martillo igual a dos

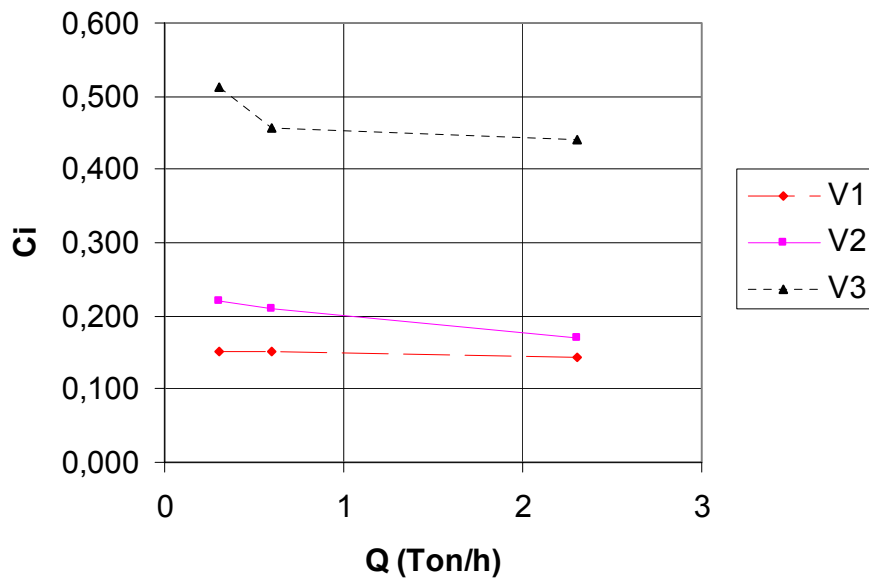


Figura No 22. Influencia de la velocidad en la probabilidad de fragmentación con un número de martillo igual a tres

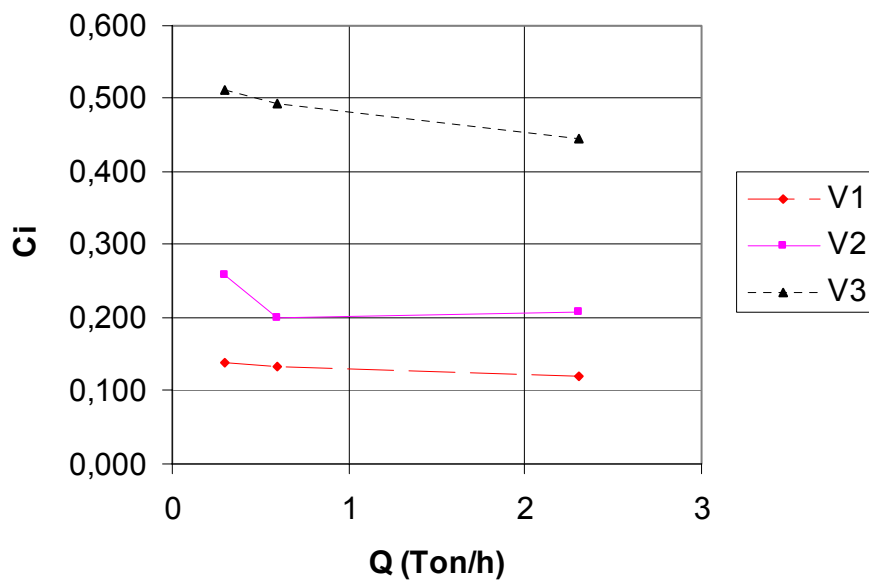


Figura No 23. Influencia de la velocidad en la probabilidad de fragmentación con un número de martillo igual a cuatro

Del análisis de las figuras 21, 22 y 23 se puede concluir que si se logra un incremento de la velocidad también vamos a lograr que exista un incremento de la probabilidad de fractura .

En las figuras 24, 25 y 26 se muestran los resultados de la influencia de la productividad en la probabilidad de fractura.

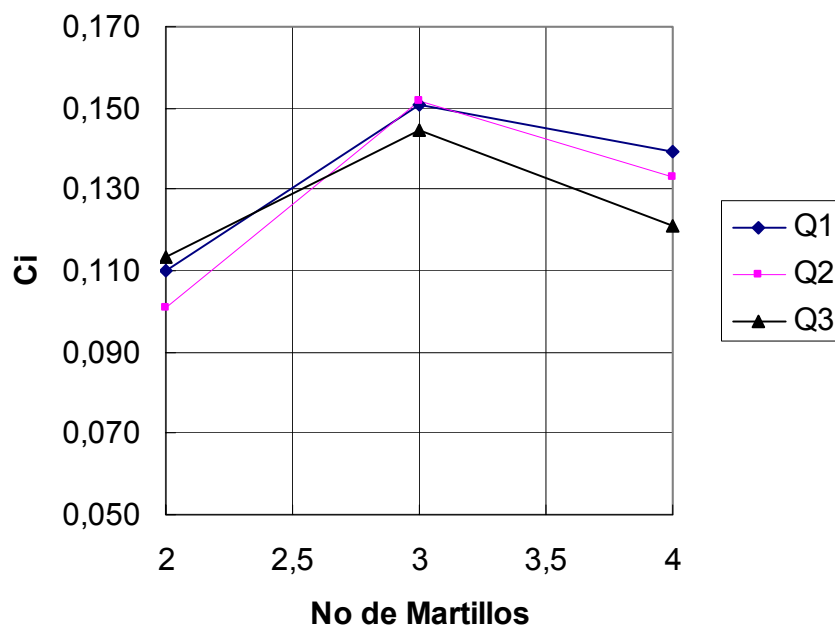


Figura No 24. Influencia de la productividad en la probabilidad de fragmentación con una velocidad de 1500 rpm

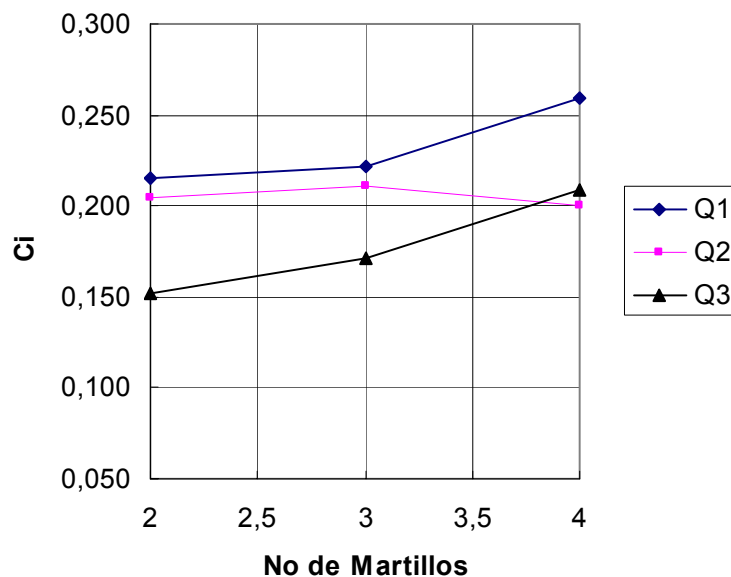


Figura No 25. Influencia de la productividad en la probabilidad de fragmentación con una velocidad de 2100 rpm

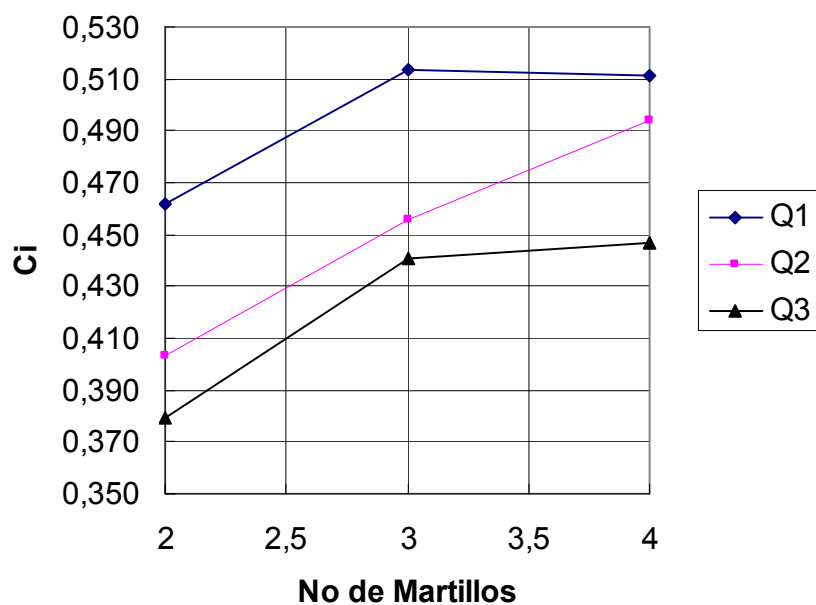


Figura No 26. Influencia de la productividad en la probabilidad de fragmentación con una velocidad de 3100 rpm



Exceptuando en el experimento donde se utiliza la mínima velocidad se observa claramente que el incremento de la productividad provoca la disminución de la probabilidad de fractura, lo que se manifiesta acorde con los reportes de Nikolov (2002) y (2004).

En las figuras No 27, 28 y 29 se muestra la influencia del número de martillos en la probabilidad de fractura.

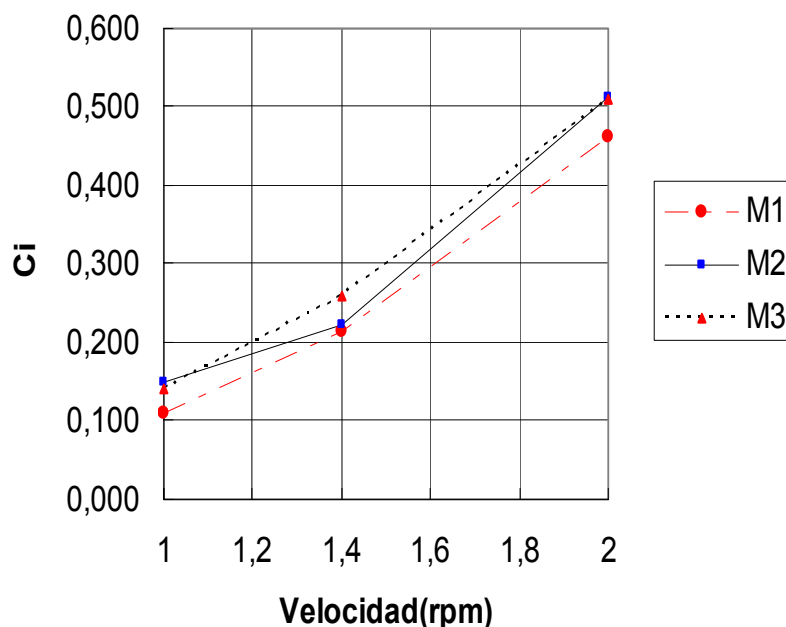


Figura No 27 Influencia del número de martillos en la probabilidad de fragmentación para  $Q = 0.3 \text{ ton/h}$

Según se muestra en las figuras 27, 28 y 29 podemos llegar a la conclusión que si aumentamos el número de martillos del triturador habrá una tendencia al incremento de la probabilidad de fractura lo que concuerda con el estudio realizado por Tagart(1950)

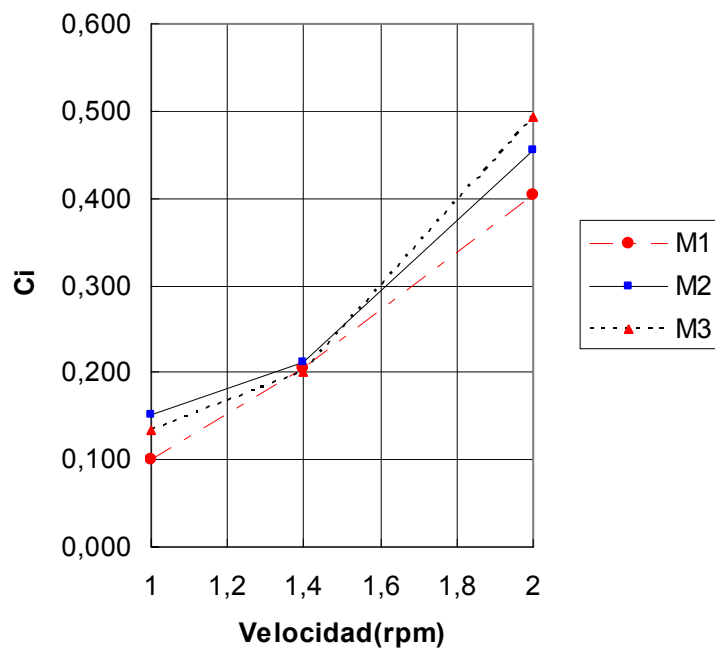


Figura No 28 Influencia del número de martillos en la probabilidad de fragmentación para Q= 0.6 ton/h

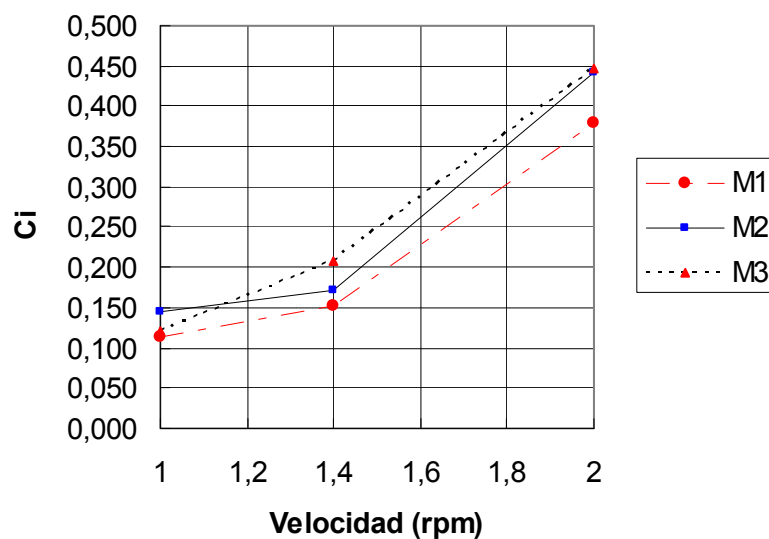


Figura No 29 Influencia del número de martillos en la probabilidad de fragmentación para Q= 2.3 ton/h

**CONCLUSIONES.**

- 1 Se desarrolló y aplicó una metodología experimental para el análisis de la influencia de algunas variables independientes en el comportamiento de las funciones; de clasificación y de distribución de la fragmentación en la trituración por impacto del mineral de zeolita del yacimiento San Andrés.
- ✓ Queda demostrada la correspondencia del modelo de Nikolov (2004 y 2006) para la determinación de la probabilidad de fragmentación en función del tamaño de las partículas que se alimentan al triturador, el parámetro  $d_{min}$  y del exponente K con los resultados de los experimentos, lo cual se corrobora estadísticamente con la prueba.
  - ✓ Se demostró que durante la trituración por impacto de una clase estrecha de tamaño se observa una influencia de la productividad y la velocidad de impacto en la función de clasificación con las mismas tendencias que las que reporta Nikolov en sus artículos.
  - ✓ Los resultados obtenidos indican que la función de distribución de la fragmentación, determinada según el experimento, depende de la velocidad de impacto y de la productividad lo cual coincide con el modelo utilizado por Nikolov (2002) y con sus recomendaciones en 2004.
  - ✓ Se determinó experimentalmente que la cantidad de martillos influye en la probabilidad de fragmentación del mineral



## **RECOMENDACIONES**

Al terminar el presente trabajo las principales recomendaciones son:

1. Estudiar si la variable cantidad de martillos influye en la función de distribución de la fragmentación.
2. Continuar la investigación para obtener el modelo matemático del proceso.
3. Realizar ensayos a escala industrial para validar los resultados obtenidos.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. Andreiev S, E y Otros. " Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales". Editorial MIR 1980.
2. Andreiev S, E y Otros. " Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales Útiles". Nedra 1966.
3. Andreiev S, E , Tovarov y Otros. "Leyes de la Trituración y Cálculo de la Composición Granulométrica". Metalurgizdat 1959.
4. Bond, F.C., The thing theory of comminution (La tercera teoría de la conminución). Trans. A.I.M.E., 193: 484-494.1952.
5. Broadbent, S.R. y Callcott, T.G., A matrix analysis of processes involving particle assemblies( Un análisis matricial de procesos que comportan conjunto de partículas).Phil. Trans. R.Soc. Lond., Ser.,A, 249: 99-123.1956.
6. Charles, R.J., 1957. Energy–size reduction relationships in comminution. Trans. AIME, Min. Eng. 208, 80–88.
7. Coello V, A y Tijonov O, N "Regularidad en la Molienda de Minerales Lateríticos". Minería y Geología Vol XIII No 3 1996.
8. Coello V, A. y Otros "Control de la Carga Interior del Molino A Través de Terceros Parámetros" Minería y Geología Vol II 1994.
9. Coello V, A "Métodos de Determinación de la Molibilidad de los Minerales". ISMM Moa 2002.

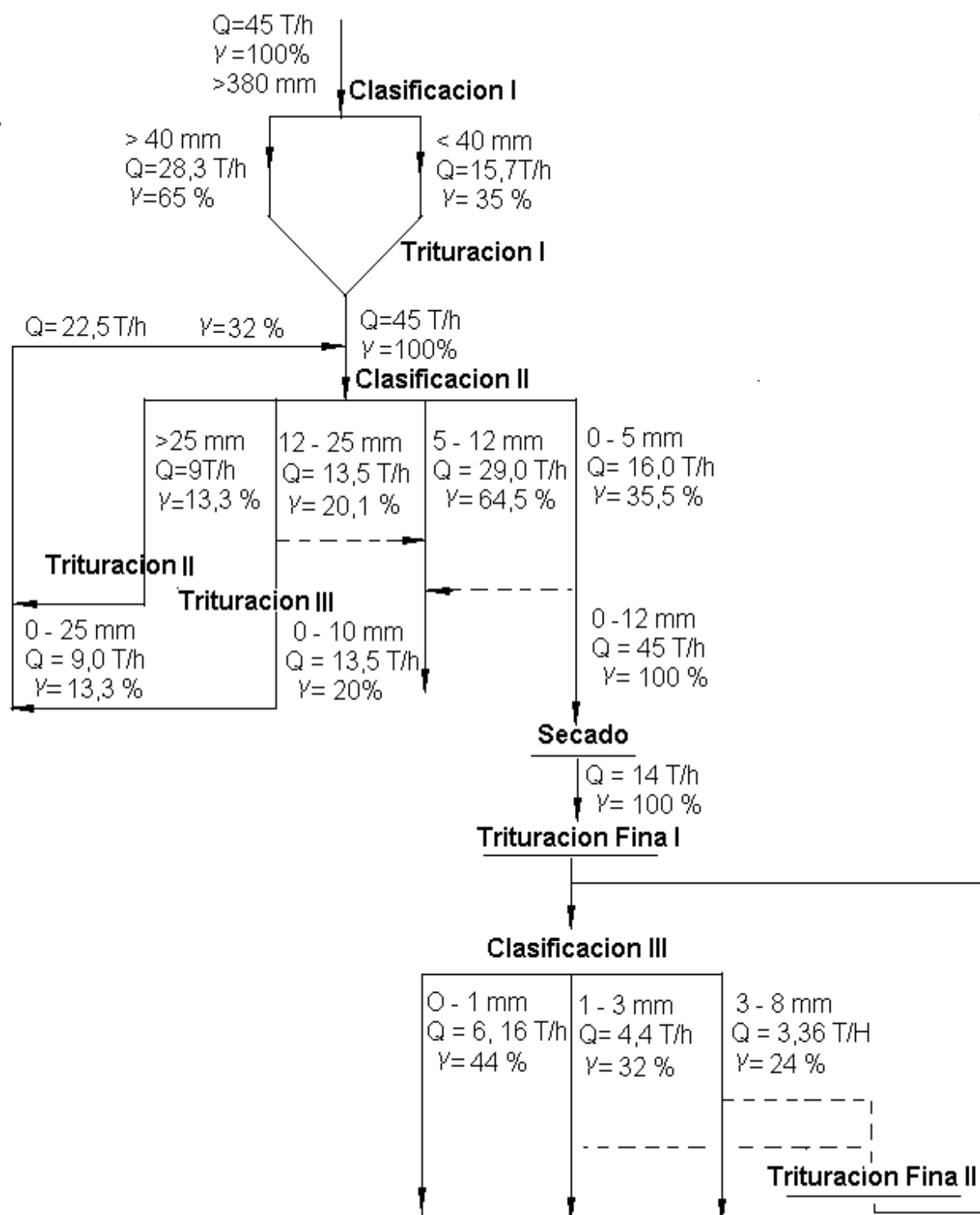
10. Coello V, A. "Sostenibilidad Energética en los Procesos de Preparación Mecánica de Minerales". ISMM Moa 2002.
11. Garcés I, León H y Muñoz H "Aplicación del Modelo Matricial en una Operación de Trituración". Metalurgia Vol 26 No 4. Madrid 1990.
12. Gaudin, A.M. y Meloy, R.P., Model and a comminution distribution equation for single fracture (Modelo y ecuación de distribución de la conminución por fractura única). Trans. A.I.M.E. 223: 40-43. 1962.
13. Gilvarry, J.J., Fracture of brittle solids, I. Distribution function for fragment size in single fracture (Fractura de sólidos frágiles, I. Función de distribución para el tamaño de fragmentos con fractura única). J. Appl. Phys., 32: 391-399. 1961
14. Hechavarría J Y Turrueñas Y. Utilización del MatLab en la Simulación de Procesos de Trituración de Minerales: Trabajo de Diploma FACEI . Universidad Holguín 2006.
15. Hukki, R.T.,. Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. Trans. AIME 220, 403 – 408. 1961
16. Kick F. " Contribution to the Knowledge of Brittle Materials. Dinglers J 1883
17. Lowrison G, Ch " Crushing and Grinding. The Size Reduction of solid Materals". Buter worts and Co. London 1974.
18. Lynch A, J "Circuitos de Trituración y Molienda de minerales Optimización, Diseño y Control". Editorial Rocas y Minerales. Madrid 1980.
19. Morrell S An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits International. J. Miner. Process. (2004).



20. Nikolov, S., 2002. Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers Minerals Engineering 15, 715– 721.
21. Perry John, H y Otros "Chemical Engineer's Handbook". T. 1 Editorial Pueblo y Educación. La Habana 1967.
22. Rittinger R, P Von " Textbook of Mineral Dressing". Ernest and Korn . Berlín. 1867.
23. Rosin, P. y Rammler, E. The laws governing the fineness of powdered coal (Las leyes que rigen la finura del carbon pulverulento). J. Inst. Fuel, 7: 29-36. 1933.
24. Sokolowski, M. "A new idea of a general law of comminution and establishing energy indices". Aufbereitungs Technik 1995; 26 (3): 107-116.
25. Shubin. V, S y Pedre. C. "Diseño de Maquinaria Industrial". Editorial Pueblo y Educación. La Habana 1975.
26. Taggart A, F. "Handbook of Mineral Dressing". Edición Revolucionaria. La Habana 1972.
27. Walker, D.R., Shaw, M.C., 1954. A physical explanation of the empirical laws of comminution. AIME Trans. 199, 313–320.
28. Weichert, R., 1988. International Journal of Mineral Processing 22
29. Manual de Preparación Mecánica .

## Anexo 1

### Flujo tecnológico de la planta







**Figura # 30 Representación del Triturador**



**Figura # 31 Representación de los martillos del triturador**

## Anexo 2

**Tabla # 5. Valores del producto retenido en las serie de tamices (gramos)**

<b>Experimentos</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>
<b>b11</b>	2604	142	123	57	28	47	3000
<b>b12</b>	2566	156	113	87	52	26	3000
<b>b13</b>	2574	139	111	83	46	46	3000
<b>b21</b>	2615	210	82	58	23	12	3000
<b>b22</b>	2556	210	62	37	74	62	3000
<b>b23</b>	2526	295	64	51	38	26	3000
<b>b31</b>	2102	247	247	198	124	82	3000
<b>b32</b>	2273	264	248	124	58	33	3000
<b>b33</b>	2291	242	216	95	95	61	3000
<b>b41</b>	2615	210	82	58	23	12	3000
<b>b42</b>	2543	210	62	50	74	62	3000
<b>b43</b>	2526	295	64	51	38	26	3000
<b>b51</b>	2211	232	179	158	126	95	3000
<b>b52</b>	1781	382	307	254	159	117	3000
<b>b53</b>	2094	335	205	173	129	65	3000
<b>b61</b>	1487	388	549	362	147	67	3000
<b>b62</b>	1460	415	536	388	134	67	3000
<b>B63</b>	1470	388	582	358	142	60	3000

Tabla # 6 Distribución acumulativa según el cernido						
Experimentos	Tamaño de tamices (mm)					
	4	3	2	1	0,5	0
b11	0,132	0,085	0,044	0,025	0,016	0
b12	0,145	0,092	0,055	0,026	0,009	0
b13	0,142	0,096	0,059	0,031	0,015	0
b21	0,128	0,058	0,031	0,012	0,004	0
b22	0,148	0,078	0,058	0,045	0,021	0
b23	0,158	0,060	0,038	0,021	0,009	0
b31	0,299	0,217	0,135	0,069	0,027	0
b32	0,242	0,154	0,072	0,030	0,011	0
b33	0,236	0,156	0,084	0,052	0,020	0
b41	0,128	0,058	0,031	0,012	0,004	0
b42	0,148	0,078	0,058	0,045	0,021	0
b43	0,158	0,060	0,038	0,021	0,009	0
b51	0,128	0,058	0,031	0,012	0,004	0
b52	0,152	0,082	0,062	0,045	0,021	0
b53	0,158	0,060	0,038	0,021	0,009	0
b61	0,504	0,375	0,192	0,071	0,022	0
b62	0,513	0,375	0,196	0,067	0,022	0
b63	0,510	0,381	0,187	0,067	0,020	0

Tabla # 7 Valores medios de la distribución acumulativa según el cernido					
Experimentos	Tamaño de tamices (mm)				
	3	2	1	0,5	0
b1	0,652	0,375	0,196	0,096	0
b2	0,454	0,292	0,177	0,074	0
b3	0,673	0,366	0,191	0,074	0
b4	0,458	0,297	0,174	0,073	0
b5	0,675	0,440	0,240	0,096	0
b6	0,740	0,376	0,135	0,042	0

## Anexo 3

**Tabla # 8 Datos obtenidos para la determinación de la influencia del tamaño de las partículas en la función de clasificación.**

Clase Tamaño	Cernido (gramos)	Retenido (gramos)	Total (gramos)	% fractura Fracción	Tam. medio (mm)	Media % fract
<b>9 a 6 mm</b>	2645	385	3030	0,87	7,50	0,92
	2820	175	2995	0,94	7,50	
	2810	180	2990	0,94	7,50	
<b>6 a 4 mm</b>	1305	1235	2540	0,51	5,00	0,53
	1410	1110	2520	0,56	5,00	
	1300	1195	2495	0,52	5,00	
<b>4 a 3 mm</b>	1460	875	2335	0,63	3,50	0,64
	1490	780	2270	0,66	3,50	
	1490	820	2310	0,65	3,50	
<b>3 a 2 mm</b>	815	1350	2165	0,38	2,50	0,40
	925	1305	2230	0,41	2,50	
	910	1270	2180	0,42	2,50	
<b>2 a 1 mm</b>	275	1740	2015	0,14	1,50	0,17
	375	1665	2040	0,18	1,50	
	370	1545	1915	0,19	1,50	
<b>1a 0,5 mm</b>	0	1790	1790	0,00	0,75	0,00
	0	1790	1790	0,00	0,75	
	0	1790	1790	0,00	0,75	

**Tabla # 9. Valores obtenidos para el análisis de la función de clasificación**

No Experim	Cernido (g)	Retenido (g)	Total (g)	Fracción Cernida
C1,1	298	2702	3000	0,099
C1,2	367	2633	3000	0,122
C1,3	323	2677	3000	0,108
C2,1	474	2526	3000	0,158
C2,2	530	2470	3000	0,177
C2,3	351	2649	3000	0,117
C3,1	396	2604	3000	0,132
C3,2	434	2566	3000	0,145
C3,3	426	2574	3000	0,142
C4,1	270	2730	3000	0,090
C4,2	310	2690	3000	0,103
C4,3	329	2671	3000	0,110
C5,1	435	2565	3000	0,145
C5,2	495	2505	3000	0,165
C5,3	436	2564	3000	0,145
C6,1	294	2706	3000	0,098
C6,2	438	2563	3000	0,146
C6,3	465	2535	3000	0,155
C7,1	269	2731	3000	0,090
C7,2	406	2594	3000	0,135
C7,3	346	2654	3000	0,115
C8,1	415	2585	3000	0,138
C8,2	383	2617	3000	0,128
C8,3	503	2497	3000	0,168
C9,1	311	2689	3000	0,104
C9,2	351	2649	3000	0,117
C9,3	427	2573	3000	0,142



No Experim	Cernido (g)	Retenido (g)	Total (g)	Fracción Cernida
C10,1	600	2400	3000	0,200
C10,2	642	2358	3000	0,214
C10,3	692	2308	3000	0,231
C11,1	684	2316	3000	0,228
C11,2	704	2296	3000	0,235
C11,3	607	2393	3000	0,202
C12,1	898	2102	3000	0,299
C12,2	727	2273	3000	0,242
C12,3	709	2291	3000	0,236
C13,1	609	2391	3000	0,203
C13,2	629	2371	3000	0,210
C13,3	600	2400	3000	0,200
C14,1	632	2368	3000	0,211
C14,2	527	2473	3000	0,176
C14,3	740	2260	3000	0,247
C15,1	648	2352	3000	0,216
C15,2	580	2420	3000	0,193
C15,3	571	2429	3000	0,190
C16,1	493	2507	3000	0,164
C16,2	506	2494	3000	0,169
C16,3	365	2635	3000	0,122
C17,1	434	2566	3000	0,145
C17,2	513	2487	3000	0,171
C17,3	592	2408	3000	0,197
C18,1	667	2333	3000	0,222
C18,2	580	2420	3000	0,193
C18,3	629	2371	3000	0,210



No Experim	Cernido (g)	Retenido (g)	Total (g)	Fracción Cernida
C19,1	1474	1526	3000	0,491
C19,2	1200	1800	3000	0,400
C19,3	1485	1515	3000	0,495
C20,1	1509	1491	3000	0,503
C20,2	1753	1247	3000	0,584
C20,3	1358	1642	3000	0,453
C21,1	1641	1359	3000	0,547
C21,2	1434	1566	3000	0,478
C21,3	1526	1474	3000	0,509
C22,1	1261	1739	3000	0,420
C22,2	1415	1585	3000	0,472
C22,3	953	2047	3000	0,318
C23,1	1321	1679	3000	0,440
C23,2	1296	1704	3000	0,432
C23,3	1483	1517	3000	0,494
C24,1	1220	1780	3000	0,407
C24,2	1736	1264	3000	0,579
C24,3	1490	1510	3000	0,497
C25,1	1295	1705	3000	0,432
C25,2	970	2030	3000	0,323
C25,3	1149	1851	3000	0,383
C26,1	1457	1543	3000	0,486
C26,2	1155	1845	3000	0,385
C26,3	1356	1644	3000	0,452
C27,1	1006	1994	3000	0,335
C27,2	1481	1519	3000	0,494
C27,3	1533	1467	3000	0,511

**Tabla # 10. Valores medios obtenidos para el análisis de la función de clasificación**

No Experim	Cernido	Retenido	Total	Fracción Cernida
C1	329	2671	3000	0,110
C2	452	2548	3000	0,151
C3	419	2581	3000	0,140
C4	303	2697	3000	0,101
C5	455	2545	3000	0,152
C6	399	2601	3000	0,133
C7	340	2660	3000	0,113
C8	434	2566	3000	0,145
C9	363	2637	3000	0,121
C10	645	2355	3000	0,215
C11	665	2335	3000	0,222
C12	778	2222	3000	0,259
C13	613	2387	3000	0,204
C14	633	2367	3000	0,211
C15	600	2400	3000	0,200
C16	455	2545	3000	0,152
C17	513	2487	3000	0,171
C18	625	2375	3000	0,208
C19	1386	1614	3000	0,462
C20	1540	1460	3000	0,513
C21	1534	1466	3000	0,511
C22	1210	1790	3000	0,403
C23	1367	1633	3000	0,456
C24	1482	1518	3000	0,494
C25	1138	1862	3000	0,379
C26	1323	1677	3000	0,441
C27	1340	1660	3000	0,447



**Tabla # 11 Datos de la matriz ( Ci Vs Vel.) para Q1**

<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	1	1	1	0,110
2	1,4	1	10	0,215
2	2	1	19	0,462
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
3	1	1	2	0,151
3	1,4	1	11	0,222
3	2	1	20	0,513
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
4	1	1	3	0,140
4	1,4	1	12	0,259
4	2	1	21	0,511

**Tabla # 12 Datos de la matriz ( Ci Vs Vel.) para Q2**

<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	1	2	4	0,101
2	1,4	2	13	0,204
2	2	2	22	0,403
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
3	1	2	5	0,152
3	1,4	2	14	0,211
3	2	2	23	0,456
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
4	1	2	6	0,133
4	1,4	2	15	0,200
4	2	2	24	0,494

Tabla # 13 Datos de la matriz ( Ci Vs Vel.) para Q3				
M	V	Q	No Exp	Ci
2	1	3	7	0,113
2	1,4	3	16	0,152
2	2	3	25	0,379
M	V	Q	No Exp	Ci
3	1	3	8	0,145
3	1,4	3	17	0,171
3	2	3	26	0,441
M	V	Q	No Exp	Ci
4	1	3	9	0,121
4	1,4	3	18	0,208
4	2	3	27	0,447

Tabla # 14 Datos de la matriz ( Ci Vs M.) para V1				
M	V	Q	No Exp	Ci
2	1	1	1	0,110
3	1	1	2	0,151
4	1	1	3	0,140
M	V	Q	No Exp	Ci
2	1	2	4	0,101
3	1	2	5	0,152
4	1	2	6	0,133
M	V	Q	No Exp	Ci
2	1	3	7	0,113
3	1	3	8	0,145
4	1	3	9	0,121

**Tabla # 15 Datos de la matriz ( Ci Vs M.) para V2**

<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	2	1	10	0,215
3	2	1	11	0,222
4	2	1	12	0,259
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	2	2	13	0,204
3	2	2	14	0,211
4	2	2	15	0,200
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	2	3	16	0,152
3	2	3	17	0,171
4	2	3	18	0,208

**Tabla # 16 Datos de la matriz ( Ci Vs M.) para V3**

<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	3	1	19	0,462
3	3	1	20	0,513
4	3	1	21	0,511
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	3	2	22	0,403
3	3	2	23	0,456
4	3	2	24	0,494
<b>M</b>	<b>V</b>	<b>Q</b>	<b>No Exp</b>	<b>Ci</b>
2	3	3	25	0,379
3	3	3	26	0,441
4	3	3	27	0,447

Tabla # 17 Datos de la matriz ( Ci Vs Q.) para M1				
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	1	2	1	0,110
0,6	1	2	4	0,101
2,3	1	2	7	0,113
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	2	2	10	0,215
0,6	2	2	13	0,204
2,3	2	2	16	0,152
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	3	2	19	0,462
0,6	3	2	22	0,403
2,3	3	2	25	0,379

Tabla # 18 Datos de la matriz ( Ci Vs Q.) para M2				
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	1	3	2	0,151
0,6	1	3	5	0,152
2,3	1	3	8	0,145
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	2	3	11	0,222
0,6	2	3	14	0,211
2,3	2	3	17	0,171
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	3	3	20	0,513
0,6	3	3	23	0,456
2,3	3	3	26	0,441

Tabla # 19 Datos de la matriz ( Ci Vs Q.) para M3				
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	1	4	3	0,140
0,6	1	4	6	0,133
2,3	1	4	9	0,121
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	2	4	12	0,259
0,6	2	4	15	0,200
2,3	2	4	18	0,208
Q	V	M	No Exp	Ci
0,3	3	4	21	0,511
0,6	3	4	24	0,494
2,3	3	4	27	0,447

## Anexo 4

### Análisis estadístico de la función de clasificación

Tabla #20 Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,95
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,90
R <sup>2</sup> ajustado	0,90
Error típico	0,05
Observaciones	81

Tabla #21 ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Regresión	3	1,58	0,528	235,84	1,04E-38
Residuos	77	0,17	0,002		
Total	80	1,76			

Tabla #22 ANÁLISIS DE ESTIUDENT						
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-0,1518	0,0275	-5,51	4,5E-07	-0,2066	-0,0970
V	0,0002	0,00001	26,25	3,7E-40	0,0002	0,0002
Q	0,0148	0,0060	2,48	1,5E-02	0,0029	0,0267
M	-0,0225	0,0064	-3,50	7,8E-04	-0,0354	-0,0097

En el análisis estadístico realizado teniendo en cuenta el coeficiente de correlación (0.95) podemos decir que existe una relación lineal entre el resultado de la fracción cernida obtenida en el experimento y la variables involucradas en el mismo ( productividad, velocidad y número de martillo), o podemos decir también que teniendo en cuenta el coeficiente de determinación(  $R^2$  ) que el 90,18 % de las variaciones de las variaciones de la fracción cernida dependen de la variación de la (productividad, velocidad y número de martillo)

A través de la tabla de análisis de varianza podemos decir que el modelo en estudio es significativo (probabilidad igual a  $1.036 \times 10^{-38}$ ) es decir la probabilidad de que el modelo de regresión sea rechazado es casi nulo.

#### **(Modelo de regresión o Modelo matemático estimado)**

$$\text{Fracción cernida} = 0,00021V + 0,1483Q - 0,0225M - 0,1517$$

Haciendo el análisis de Estiudent se puede asegurar que los coeficientes de regresión que aparecen en el modelo son significativamente diferente de cero( todas las probabilidades son menores que 0.05, nivel de confianza 95%); siendo la variable mas significativa la velocidad(V) de menor probabilidad, y la menos significativa y de mayor probabilidad la productividad(Q).