



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

*Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia*

Trabajo de Diploma

Título: Análisis del proceso de fragmentación Múltiple Durante la Trituración por Impacto del Mineral de Zeolita del Yacimiento San Andrés.

Diplomante: Victor Akssen Hernández Hidalgo.

*Tutores: MSc. Ing. José R. Hechavarría Pérez.
DrC. Ing. Alfredo L. Coello Velázquez.*

Moa 2009

SINTESIS

En el presente trabajo se realiza un estudio experimental de la trituración por impacto del mineral de zeolita del yacimiento de San Andrés. Durante el mismo se determina la influencia de las variables; regulación de tamaño de salida, energía de impacto y productividad en el comportamiento de la distribución de tamaño del producto, mediante ensayos de laboratorio.

A partir de los resultados obtenidos se demuestran las principales regularidades de las curvas de distribución granulométrica del mineral de San Andrés para las diferentes condiciones de operación estudiadas. Para una mejor presentación del trabajo los principales resultados se ilustran mediante varios gráficos y tablas. También se realiza una aproximación matemática de los resultados para su futura modelación del proceso a escala de laboratorio e industrial.

ABSTRACT.

In this work the author make an experimental study to impact crushing in zeolite ore of San Andres. He studied the influence of output regulation size, the flux food rate and impact energy in size distribution of product. This research was developing utilizing laboratory scale tests.

Raising the experimental results is possible demonstrate the principal regularities in size distribution of product for different operation conditions. For mayor knowledge the results were presented in some table and graphic. Also here He makes mathematical approximation to results for modelation and simulation the process at laboratory and industrial scales.

INDICE

INTRODUCCION	Página 1
1 Capítulo I ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA TRITURACIÓN POR IMPACTO.	3
1.1 Métodos de Trituración y Molienda	4
1.2 Fundamentos Físicos de los Fenómenos de Fractura de Materiales.	6
1.3 Funciones de Distribución de Tamaño.	7
1.3.1: Funciones continuas de distribución de tamaño.	23
1.4 Modelación de Procesos de Trituración de Minerales.	
1.5 Análisis de Resultados de Trabajos Realizados Sobre la Trituración del Mineral de San Andrés.	
2 CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS.	
2.1. Caracterización de la Materia Prima en la Mena de San Andrés.	30
2.2. Descripción del Flujo Tecnológico de la Planta de San Andrés.	33
2.3 Diseño de Experimento.	36
2.4. Descripción de la Instalación de Prueba Utilizada.	38
2.5. Descripción de la Metodología Experimental.	39
3 CAPITULO III. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.	
3.1 Análisis Estadístico de los Resultados.	43
3.2 Análisis del Comportamiento de las Distribuciones de Tamaño del Producto.	48
3.3 Análisis de las Principales Tendencias en el Comportamiento de los Resultados.	50
3.4 Descripción Matemática del Comportamiento de la Distribución de Tamaño del Producto.	60
CONCLUSIONES.	72
BIBLIOGRAFIA	73
ANEXOS	76

INTRODUCCIÓN.

Desde hace algunas décadas, las investigaciones sobre las zeolitas naturales se han incrementado de manera importante. Esto lo demuestran los artículos, patentes y libros que sobre ellas se publican anualmente. Los minerales zeolíticos se utilizan fundamentalmente como suavizantes de agua, en detergentes, como catalizadores, como adsorbentes, para mejorar las características de suelos al controlar el pH, la humedad y el mal olor de los abonos, entre otras aplicaciones.

“La producción de zeolitas naturales en Cuba, constituye un renglón exportable con una tendencia al incremento de su demanda en varios países (Martínez R 2005, Pinzón E 2005, Febles 2005, y otros), constituyendo además un mineral de gran importancia, para la sustitución de importaciones en varias ramas de nuestra economía”.

La planta de Zeolitas ubicada en San Andrés, es una instalación dedicada al procesamiento de Zeolitas naturales. Esta planta ha logrado mantener por varios años una producción sostenida y una venta eficiente de tan importante producto.

En años anteriores algunos expertos en la materia han desarrollado diferentes investigaciones referentes al tema del comportamiento de la trituración por impacto del mineral de San Andrés con el objetivo de mejorar la eficiencia de este proceso.

Hechavarría y Coello (2003) realizaron una evaluación del comportamiento de trituración a escala industrial, donde tuvieron en cuenta el efecto de varias variables de operación. Ballar (2006) determinó el comportamiento de trituración del mineral en sus diferentes etapas para condiciones nominales de las variables de operación. Guevara (2007) estudió el comportamiento de las funciones de clasificación y fragmentación del mineral utilizando experimentos a escala de laboratorio para un proceso de fragmentación simple. Hernández (2008) realizó una investigación de la influencia del flujo de alimentación, la velocidad y la regulación de la salida de la trituradora en la distribución de tamaño del producto obtenido, utilizando experimentos a escala industrial.

A pesar de la existencia de estos importantes resultados; resulta necesario el estudio del proceso de fragmentación múltiple del mineral, es decir, para una salida controlada del producto, con el objetivo de obtener la influencia del tamaño de la regulación de salida del producto conjuntamente con las variables energía de impacto y productividad en el comportamiento de trituración del mineral.

Se define el **Objeto de investigación**, como; la trituración por impacto del mineral de zeolita del yacimiento de San Andrés.

El Campo de Acción: La influencia de las variables, energía de impacto, productividad y regulación del tamaño de salida en el comportamiento de la distribución de tamaño del producto.

El Problema Científico: radica en el hecho de que no se conoce el comportamiento de la distribución de tamaño del producto durante la trituración por impacto múltiple del mineral de San Andrés.

Objetivos:

Determinar las principales regularidades del comportamiento de la distribución de tamaño del producto en función de las variables, energía de impacto, la productividad y la regulación de salida de la trituradora.

Demostrar a que modelo matemático se ajustan las curvas de distribución de tamaño del producto.

Hipótesis: Con la utilización de métodos experimentales es posible conocer las principales regularidades de la trituración por impacto del mineral de San Andrés, para un proceso de impactos repetidos (Con regulación del tamaño de salida).

Capítulo I

CAPÍTULO I.

ELEMENTOS PRINCIPALES DE LA TRITURACIÓN POR IMPACTO.

Según Fuerstenau et al (2005) en Estados Unidos la energía utilizada en procesos de trituración y molienda de materiales asciende 15 billones de Kw/ año. Este es el 1% del total producido en el país. Se estima que a nivel mundial el 2 % de la energía producida se destina a estos fines, además aproximadamente 500000 ton de acero se utilizan para la sustitución de piezas desgastadas. Por tales causas la trituración y la molienda constituyen procesos que deben ser estudiados y utilizados de la forma más eficiente posible.

La trituración es un proceso de reducción de materiales comprendido entre los tamaños de entrada de 1 metro a 1 centímetro (0,01m), diferenciándose en trituración primaria (de 1 m a 10 cm) y trituración secundaria (de 10 cm a 1 cm). Las fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño son: la compresión, el cizallamiento, la percusión o impacto y la atrición o abrasión.

Un concepto de trituración y desmenuzamiento se da en Andreiev (1980) según el cual. La trituración y el desmenuzamiento son procesos de disminución de las dimensiones de los fragmentos (granos) de los minerales, mediante la destrucción de los mismos por la acción de fuerzas exteriores que superan las fuerzas de cohesión, que unen entre sí las partículas del cuerpo sólido. En esencia los procesos de trituración y de desmenuzamiento no se diferencian entre sí. Comúnmente se considera que de la trituración se obtiene un producto preferentemente grueso y del desmenuzamiento un producto más fino de 5 mm.

Todos los aparatos de trituración deben de disponer de mecanismos o técnicas para hacer frente a los problemas que son:

Un sistema o técnica antidesgaste.

Un sistema de regulación de la granulometría del producto.

Un mecanismo anti- in triturables que garantice la integridad de la máquina.

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).

Según Coello (1999): 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.

1.1 Métodos de Trituración y Molienda.

Los métodos de trituración y molienda constituyen procedimientos para la reducción de tamaño de los materiales, que se pueden diferenciar entre sí por el tipo de acción destructora a que se someten los mismos.

Según varios autores los métodos de trituración se pueden clasificar en cuatro tipos principales:

- Por aplastamiento o compresión.
- Por hendimiento o penetración.

- Por impactos o golpes.
- Por fricción.

Según la máquina o equipo utilizado en un proceso de trituración o molienda esta garantizará que durante el mismo prevalezcan unos u otros métodos. Sin embargo en un proceso donde intervienen un número grande de granos o trozos, a consecuencia del desorden de la posición de dichos fragmentos, en el espacio de trabajo de la máquina, se observan más de un método de trituración, pero el papel principal lo juega siempre aquel para cuya realización está constituida la máquina dada Andreiev (1980).

Según este autor; el método de trituración se debe seleccionar en teniendo en cuenta que:

La trituración gruesa media y fina de las rocas duras y frágiles se ejecuta generalmente por aplastamiento y las duras y viscosas por aplastamiento combinado con la fricción.

La trituración gruesa de las rocas blandas y frágiles se realizan normalmente por penetración y la media y fina por choque.

Todos los minerales se trituran por choque con la participación de fricción.

La trituración y la molienda pueden ejecutarse en seco o por vía húmeda.

La trituración gruesa, media y fina generalmente se realizan por vía húmeda la cual resulta más productiva y se realiza con mínimas cantidades de polvo, no obstante en ocasiones esto presenta desventajas para el tratamiento y utilización posterior del material.

Según Andreiev (1980) la diferencia sustancial entre los molinos y las trituradoras consiste en que en las trituradoras no hay contacto directo entre los elementos de trabajo (que trituran). Entre ellos siempre hay una holgura llenada por el material que se tritura durante el trabajo. Las piezas de trituración de los molinos tienen contacto directo entre sí durante la marcha en vacío. Durante el trabajo bajo carga se dividen por una capa del material o pueden estar en contacto parcialmente"

Shubin (1975) plantea que por su aplicación las máquinas trituradoras se dividen convencionalmente en: Trituradoras para gruesos, medios y finos.

En la industria generalmente se requieren altos grados de trituración, con frecuencia las dimensiones iniciales del material a procesar alcanza hasta 1,5 metros, mientras que para el beneficio de los minerales o en la utilización posterior se requiere frecuentemente que las dimensiones de las partículas no superen las milésimas de milímetro.

1.2 Fundamentos Físicos de los Fenómenos de Fractura de Materiales.

Los fundamentos de la fragmentación de partículas han sido objeto de estudio de varios autores. Se realizaron estudios para determinar el comportamiento; tensión - deformación, en un material rocoso sometido a compresión. Estos análisis demostraron que el comportamiento del material resulta prácticamente elástico, aunque en la zona intermedia ya existe cierto desplazamiento relativo debido al deslizamiento de los átomos.

Según Rompf, la energía se consumen en: Creación de nuevas superficies, deformación plástica alrededor del extremo de la grieta, alteración de la estructura del material en la vecindad de la grieta, el fenómeno eléctrico resultante de la separación de cargas, reacciones químicas endotérmicas, energía cinética de las ondas elásticas.

Por estas razones Herbst demostró que la energía total, requerida para la formación de una nueva superficie en condiciones reales supera en aproximadamente 100 veces a la energía requeridas en condiciones ideales. No obstante muchos de estos aspectos son difíciles de evaluar, por lo que se recurre a la simplificación de considerar que el campo de tensiones elásticas es la única fuente energética

Por estos motivos se debe destacar que el comportamiento de trituración de los minerales, en procesos reales, no ha sido factible describirlos cuantitativamente a través de modelos esenciales, derivados de estos fundamentos teóricos, al menos con precisiones aceptables.

Por todo lo anterior estos procesos son simulados a partir de modelos tales como los modelos energéticos, modelos basados en el balance de la población de partículas y en los últimos años a partir de la aplicación de los métodos de elementos finitos o métodos DEM.

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 de l 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:

$$D = b. \quad (1.1)$$

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, lo cual se representa en la figura 1.1.

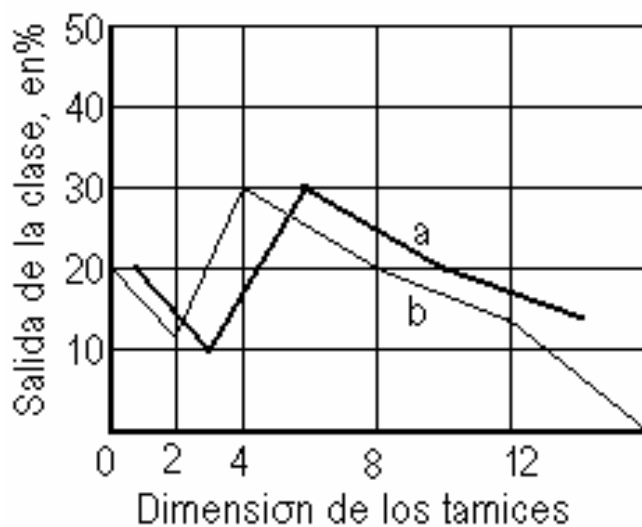


Figura 1.1 Características individuales de tamaños.

La curva a se traza por el diámetro medio del intervalo y la curva b para el menor diámetro de la clase

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. 8 se representa la característica sumaria o acumulativa de un material determinado, la curva a se traza por más y b 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.

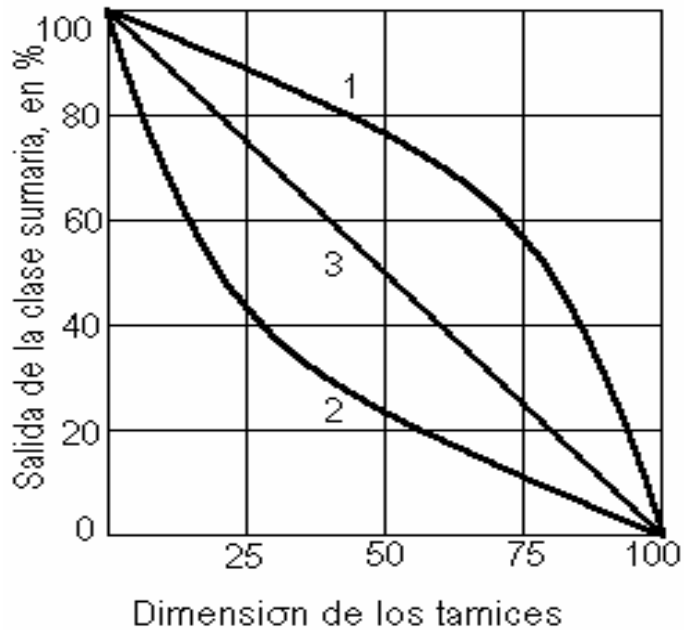


Figura 1.2: Característica sumaria o acumulativa de tamaño.

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 1.2. 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.

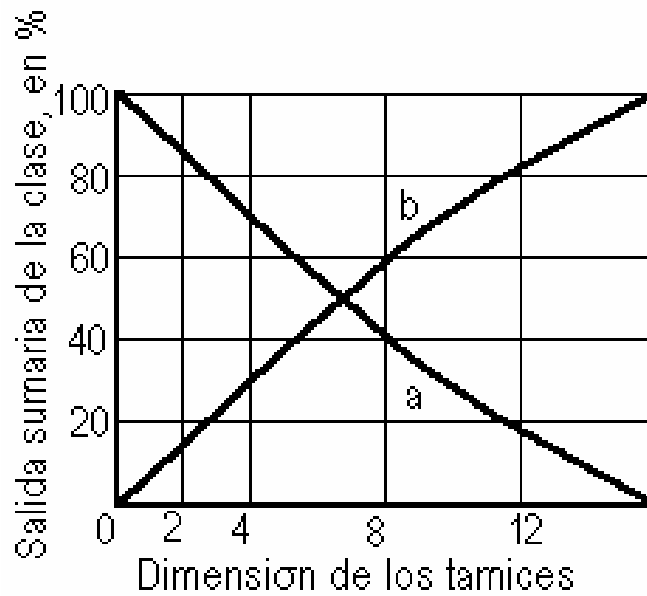
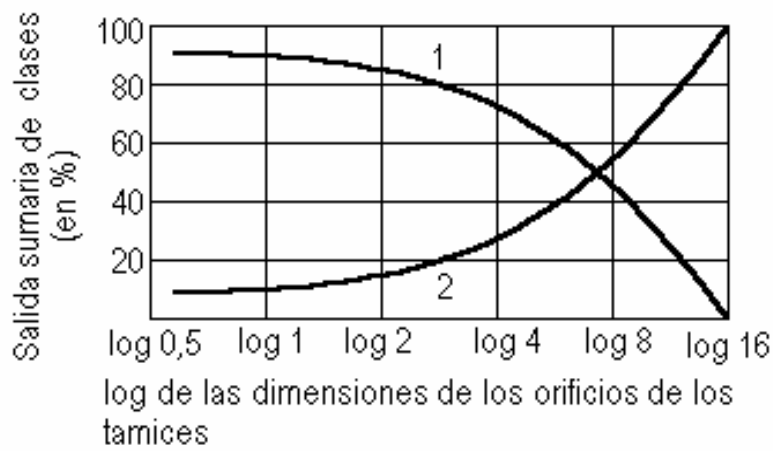


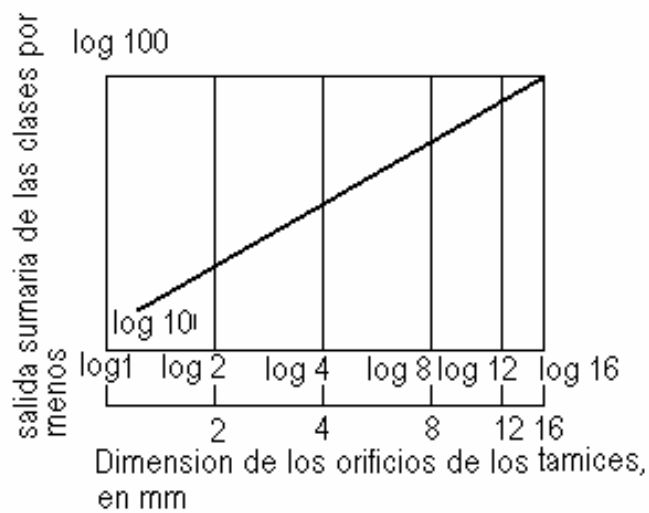
Figura 1.3: Diferentes formas de la característica sumaria o acumulativa.

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. En la figura 10 se muestra un ejemplo del trazado de la característica sumaria en coordenadas semi logarítmicas y en la figura 11 en coordenadas logarítmicas.



Características sumarias de grosor semilogarítmicas
1"por mas",2"por menos"

Figura 1.4: Característica sumaria de tamaño en escala semi logarítmica.



Característica sumaria de grosor logarítmica

Figura 1.5: Característica sumaria de tamaño en escala logarítmica.

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 continuas 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 (1.2):

$$W(x).dx = a.x^m .e^{-b.x^n} .dx \quad (1.2)$$

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)

$$y = 1 - \exp(-b.x^m) \quad (1.3)$$

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

De Gaudin - Shuhmann, Lynch (1980)

$$y = \left(\frac{x}{k} \right)^\alpha \quad (1.4)$$

Donde:

α y k son constantes. Gaudin y Meloy (1962)

$$y = 1 - (1 - x / x_0)^r \quad (1.5)$$

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 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:

$$\frac{x_0}{x_1} = \frac{x_1}{x_2} = \frac{x_2}{x_3} = \dots = \frac{x_i}{x_{i-1}} \quad (1.6)$$

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.

Este tipo de distribución se puede representar en forma matricial utilizando un vector columna de n filas con una columna, tanto en forma individual como en forma acumulativa.

1.3.3: 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:

$$Q_{\max} = 0.02d^2 + 0.5d \quad (1.7)$$

Donde:

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

d: diámetro del trozo mayor del mineral.

Tabla 1.1: 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.

En la tabla 1.2 se muestran las principales series de tamices de ensayos tomada de Lynch (1980)

Tabla 1.2: Principales series de tamices de ensayos (Lynch, 1980)

Tamiz Talyer			Tamiz British Standard			
Malla	Abertura		Malla	Abertura		Malla
	(Pulgadas)	(mm)		(Pulgadas)	(mm)	
	2.968					
	2.496					
	2.100					
	1.766					
	1.484					
	1.248					
	1.050					
	0.883					
	0.742					
	0.624					
	0.525					
	0.441					
	0.371					
	0.312	7.925	2			
3	0.263	6.680				
	0.221	5.613	3			
4	0.185	4.699				
	0.156	3.962	5			
6	0.131	2.794		5	0.1320	3.34
	0.110	2.362	7		0.1107	2.81
8	0.093	1.981		7	0.0949	2.41
	0.078	1.651	9		0.0810	2.05
10	0.065	1.397		10	0.0660	1.67
	0.055	1.168	12		0.0553	1.40
14	0.046	1.168		14	0.0474	1.20
	0.039	0.991	16		0.0395	1.00
20	0.0328	0.833		18	0.0336	0.85
	0.0276	0.701	24		0.0275	0.70
28	0.0232	0.589		25	0.0236	0.60
	0.0195	0.495	32		0.0195	0.50
35	0.0164	0.417		36	0.0166	0.421
	0.0138	0.351	42		0.0139	0.353
48	0.0116	0.295		52	0.0116	0.295
	0.0097	0.246	60		0.0099	0.252
65	0.0082	0.208		72	0.0083	0.211
	0.0069	0.175	80		0.0070	0.177
100	0.0058	0.147		100	0.0060	0.152
	0.0049	0.124	115		0.0049	0.125
150	0.0041	0.104		150	0.0041	0.105
	0.0035	0.088	170		0.0035	0.088
200	0.0029	0.074		200	0.0030	0.076
	0.0024	0.061	250		0.0026	0.065
270	0.0021	0.053		300	0.0021	0.053
	0.0017	0.043	325			
400	0.0015	0.037				
	0.0012	0.030				
	0.00106	0.026				

1.4 Modelación de Procesos de Trituración de Minerales.

La modelación y simulación de los procesos de trituración y molienda de minerales resulta de gran importancia para la mejora y optimización de estos procesos con especial interés en aspectos tales como obtener clases de tamaño determinadas durante el proceso (tamaño del producto), minimizar la energía consumida por unidad de mineral procesado, para lo cual resulta necesario determinar cuantitativamente variables como el tamaño de alimentación, óptimo, valor de los parámetros de control adecuados (ejemplo regulación de la salida en los trituradores de mandíbulas y de conos), características de las cribas o regulación de los equipos de clasificación que se incluyen en los circuitos de trituración y molienda, etc.

Los procesos de trituración y molienda resultan procesos de gran complejidad, dentro de varias razones por; la gran diversidad de equipos diferentes que realizan estos procesos con características diferentes, así como por las grandes diferencias en las características físicas de la gran variedad de minerales que se procesan por esta vía, así como por la gran cantidad de partículas con formas y tamaños diferentes y por la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso tales como la temperatura, la humedad del mineral, las condiciones de alimentación, etc, que son capaces de influir marcadamente en el comportamiento de los minerales y del proceso en general.

Por lo anterior, la descripción de los procesos de trituración y molienda a través de modelos analíticos generales resulta muy difícil y por ello se utilizan ampliamente modelos o aproximaciones con altos grados de simplificación, apoyados casi siempre por técnicas experimentales.

1.5 Análisis de Resultados de Trabajos Realizados Sobre la Trituración del Mineral de San Andrés.

Hechavarría y Coello (2003) realizaron una evaluación del comportamiento de varias clases de tamaño del producto durante la trituración por impacto a escala industrial, en la Planta de San Andrés. Estos autores tuvieron en cuenta el efecto de algunas variables de operación, como la velocidad, la productividad, y la cantidad de martillos.

Ballar (2006) determinó el comportamiento de trituración del mineral en sus diferentes etapas para condiciones fijas de las principales variables de operación.

Las siguientes figuras reflejan los resultados obtenidos por Ballar en su investigación donde se observan las curvas granulométricas del producto triturado en tres etapas diferentes.

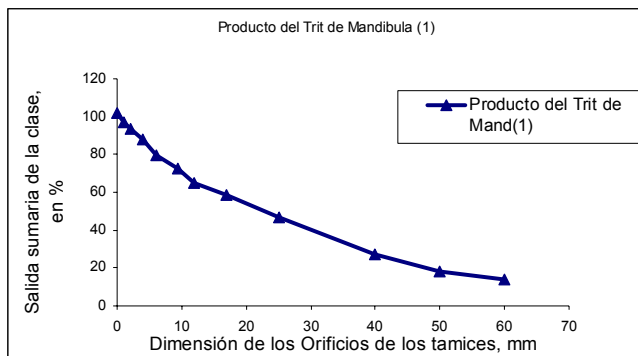


Fig. 1.6: Composición granulométrica del producto triturado de la trituradora de mandíbula.

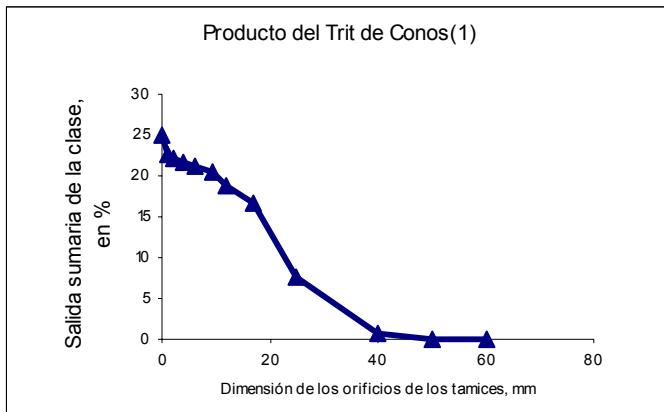


Fig. 1.7: Composición granulométrica del producto del mineral triturado en la trituradora de conos.

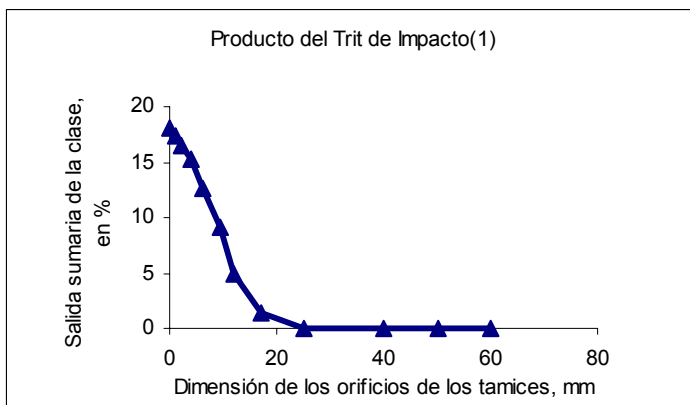


Fig. 1.8: Composición granulométrica del producto del mineral triturado en la trituradora de impactos.

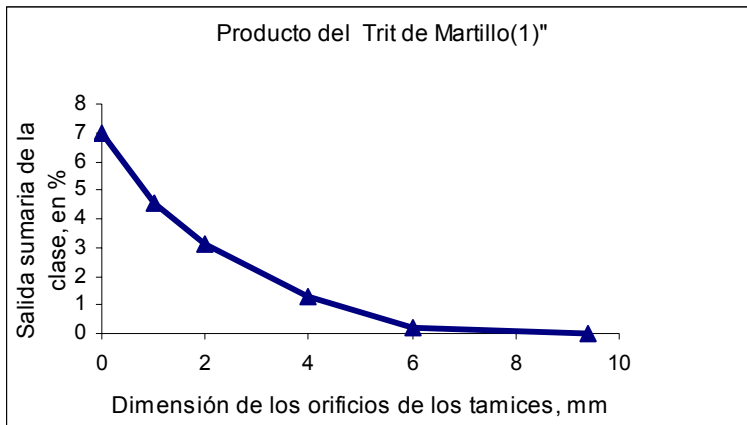


Fig. 1.9: Composición granulométrica del producto del mineral triturado en la trituradora de martillos.

Los resultados del índice energéticos operacionales para cada operación de trituración obtenidos por Ballar (2006) aparecen en la tabla 1.3

Tabla 1.3: Resultados del Índice operacional para las diferentes trituradoras.

Trituradores	Índice de Bond (kWh/t)		
	1	2	3
Triturador de Mandíbula	13,54	17,53	15,83
Triturador de Conos	17,2	10,81	12,8
Triturador de Impactos	33,62	34,58	32,27
Triturador de Martillos	87,71	80,96	82,41

Guevara (2007) estudió el comportamiento de las funciones de clasificación y fragmentación del mineral utilizando experimentos a escala de laboratorio para un proceso de fragmentación simple (sin regulación del tamaño de salida del producto).

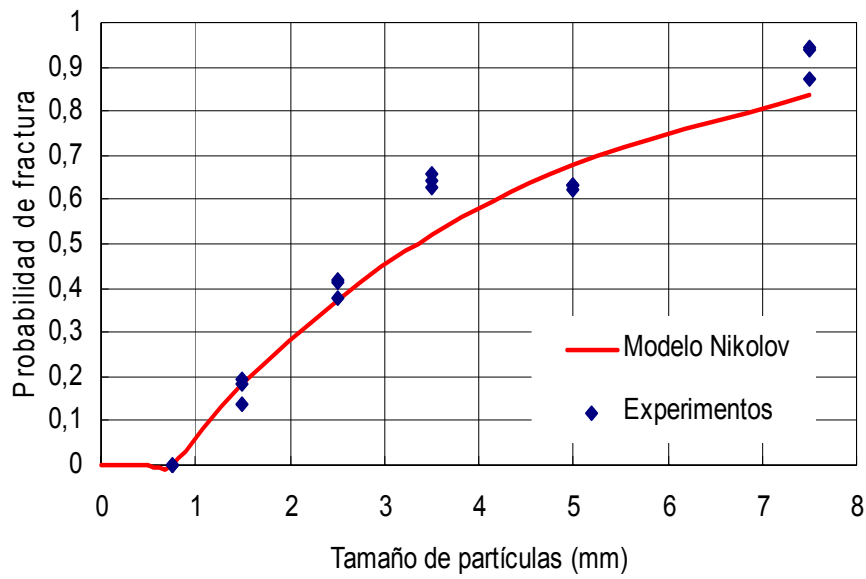


Figura No 1.10: Influencia del tamaño de las partículas en la probabilidad de fragmentación para condiciones fijas de operación.

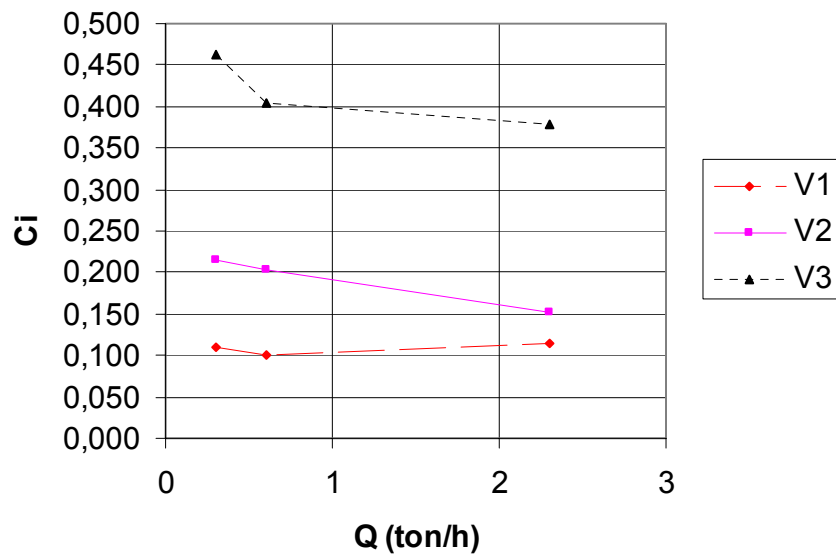


Figura 1.11: Influencia de la velocidad en la probabilidad de fragmentación

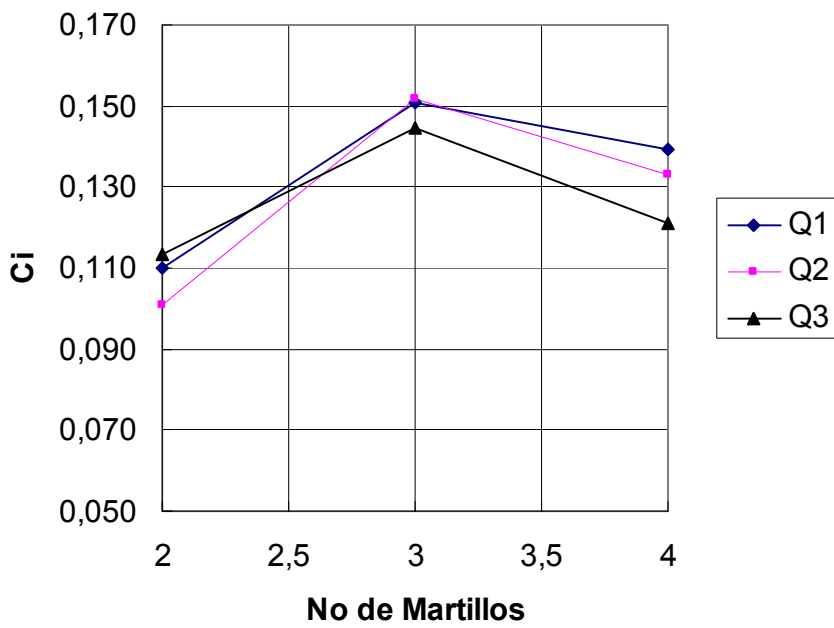


Figura 1.12: Influencia de la productividad en la probabilidad de fragmentación con una velocidad de 1500 rpm.

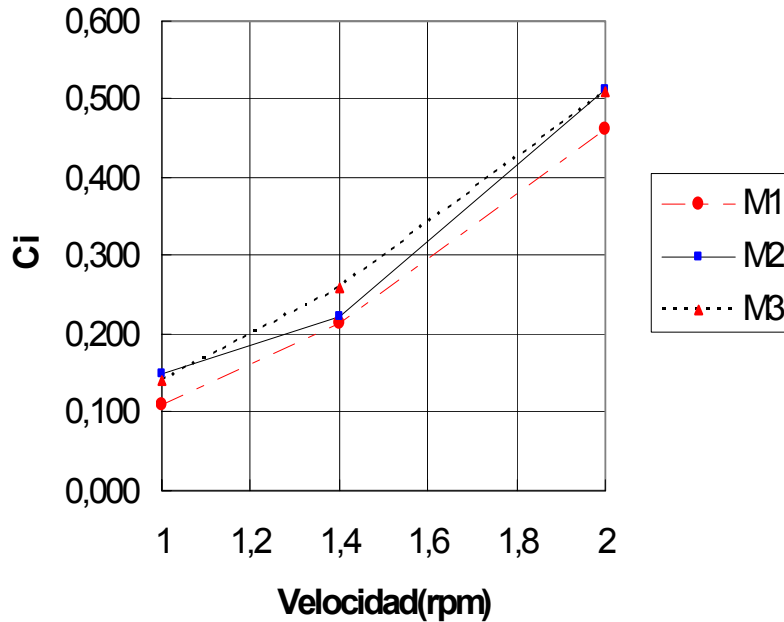


Figura 1.13: Influencia del número de martillos en la probabilidad de fragmentación para: $Q = 0.3 \text{ ton/h}$

En su estudio experimental este autor no valoró la influencia de la regulación de tamaño de salida del triturador de tampoco realizó una modelación matemática de los gráficos obtenidos en la caracterización granulométrica del mineral.

Hernández (2008) realizó una investigación de la influencia del flujo de alimentación, la velocidad y la regulación de la salida de la trituradora en la distribución de tamaño del producto obtenido, utilizando experimentos a escala industrial.

Hechavarría, Coello, Menéndez y Laborde (2008): realizaron un análisis del comportamiento de la función de clasificación y de la función de distribución de la fragmentación durante la trituración por impacto de este mineral utilizando una instalación de prueba a escala de laboratorio para un proceso de fragmentación simple. Los resultados experimentales permitieron la obtención de los modelos que describen el comportamiento de trituración del mineral, utilizando para ello el método de balance de la población de partículas.

Capítulo II

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS UTILIZADOS.

En este capítulo se describe principalmente las características de la zeolita utilizada y el flujo tecnológico de la planta de San Andrés, también se describen los principales métodos, equipos e instrumentos utilizados para el desarrollo de la investigación.

2.3. Caracterización de la Materia Prima en la Mena de San Andrés.

El yacimiento San Andrés de la provincia de Holguín se encuentra ubicado al Noroeste de esta ciudad. El mismo se encuentra 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.

Algunos de los valores medios obtenidos de las propiedades físico-mecánicas de la materia prima del yacimiento de San Andrés son:

1. Peso volumétrico húmedo : 1,97 t/m³
2. Peso específico : 2,53 g/cm³
3. Peso volumétrico seco : 1,73 t/m³
4. Humedad natural : 11,72%
5. Absorción : 2,1%
6. Valor medio de la relación de vacío : 0,35
7. Valor medio de la saturación : 76,04%
8. Resistencia media a la compresión natura l: 157,36 Kg. /cm²
9. Resistencia media a la compresión saturada : 180 Kg. /cm²

La composición química media del tipo tecnológico de yacimiento de San Andrés que será utilizado en el trabajo.

Composición Química

- 1 SiO₂ : 65.3
- 2 Al₂O₃ : 11.5
- 3 Fe₂O₃ : 1.7
- 4 FeO : 0.7
- 5 CaO : 3.0
- 6 MgO : 1.1
- 7 Na₂O : 2.5

El yacimiento San Andrés ha sido sometido a análisis de elementos nocivos, los cuales presentan valores inferiores a los normados por varias prestigiosas compañías e instituciones reconocidas oficialmente. Estos parámetros son:

1. F no más de 0,04%
2. As no más de 0,01%
3. Pb no más de 0,002%
4. Cd no más de 0,0008%
5. Hg no más de 0,05%

Tabla 2.1: Algunos de los elementos tóxicos que presenta este mineral zeolítico que se procesa en la planta.

Composición Química elemental (10^{-3} %).	Tipo de mineral	
	max	min
Pb	0.8	0.4
Zr	30	10
La	20	6
MO	1	0.3
CO	2	1
Zn	6	4
Ba	100	40
Ga	0.4	0.4
Mn	60	8
Ti	300	100
V	4	1
Se	4	2
Y	10	3

2.4. Descripción del Flujo Tecnológico de la Planta de San Andrés.

El material procedente de la mina a cielo abierto es transportado en camiones de volteo hasta la planta, descargándose en una tolva receptora de 14 m³ 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

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 re trituración 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.

Las mallas más usadas en esta primera etapa de cribado son las siguientes:

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.

En la figura 2.1 se representa de forma esquemática el flujo tecnológico de la Planta de Zeolita de San Andrés.

Esquema del flujo tecnológico de la planta de Zan Andrés.

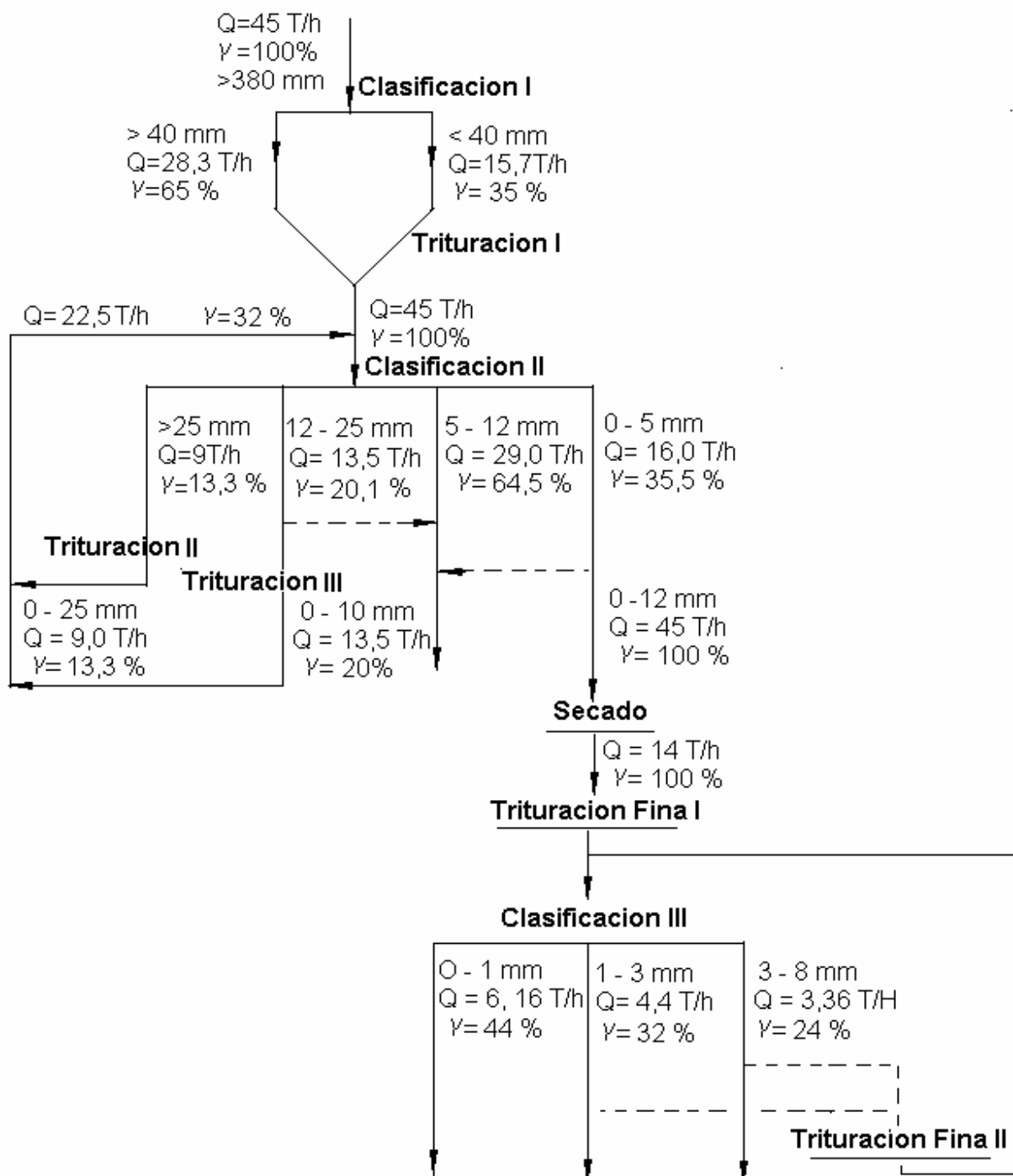


Figura 2.1 Esquema del flujo tecnológico de la planta de San Andrés.

2.3 Diseño de Experimentos.

Para desarrollar la investigación se utilizó un diseño factorial con tres variables independientes; el flujo de alimentación de mineral a la trituradora (Q en t/h), la Energía de impacto (E en j/kg) y la regulación de la salida del producto en la trituradora (S en mm), utilizándose 3 niveles ó valores diferentes de cada variable.

Las variables dependientes en este experimento son; la distribución de tamaño del producto obtenido en cada experimento. De esta forma el diseño experimental se puede representar según la tabla 2.1. La misma representa un experimento factorial completo por tanto el número de experimentos se determina según la expresión (2.1)

$$n = (V_i)^n \quad (2.1)$$

Donde:

V_i Es el número de variables independientes.

N número de niveles.

Teniendo en cuenta que el número de variables independientes es igual a tres y que el número de niveles de cada variable es tres el número de experimento será igual a veintisiete. Para garantizar una adecuada confiabilidad en los resultados se realizaron tres réplicas de cada uno de estos experimentos.

Tabla 2.2 Diseño experimental utilizado para la determinación de la influencia de las variables de operación seleccionadas en el comportamiento de trituración por impacto del mineral.

Número de Experimentos	S	V	Q
1	min	min	min
2	min	min	med
3	min	min	max
4	min	med	min
5	min	med	med
6	min	med	max
7	min	max	min
8	min	max	med
9	min	max	max
10	med	min	min
11	med	min	med
12	med	min	max
13	med	med	min
14	med	med	med
15	med	med	max
16	med	max	min
17	med	max	med
18	med	max	max
19	max	min	min
20	max	min	med
21	max	min	max
22	max	med	min
23	max	med	med
24	max	med	max
25	max	max	min
26	max	max	med
27	max	max	max

Donde:

E _{min} =	0.15	S _{min} =	3	Q _{min} =	0.3
E _{med} =	0.30	S _{med} =	5	Q _{med} =	0.6
E _{max} =	0.45	S _{max} =	6	Q _{max} =	2.3

2.4. Descripción de la Instalación de Prueba Utilizada.

Para la realización de todos los experimentos se utilizó una instalación a escala de laboratorio (Ver figuras 1 y 2 de los Anexos I) que consta de:

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

Las principales características técnicas de la instalación son las siguientes:

Tolva de alimentación:

1. Volumen útil (dm³): 8
2. Construcción: En forma de pirámide truncada, construida de chapa de acero galvanizado.

Transportador de cinta:

1. Longitud (mm): 1110
2. Ancho de la cinta (mm): 180
3. Cantidad de rodillos de transporte: 6
4. Cantidad de rodillos de retorno: 1
5. Diámetro de los rodillos (mm): 35.
6. Diámetro de los tambores - motriz y conducido- (mm): 88.
7. Accionamiento por moto reductor por acoplamiento directo.
8. Velocidad de salida del moto reductor (rpm): 26
9. Velocidad de la cinta (m/s): 0.2
10. Potencia del Motor (kW): 0.15.

Trituradora de Martillos:

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

2.5 Descripción de la Metodología Experimental.

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

Donde se comprueba por la siguiente fórmula:

$$V = \frac{S}{t} \quad (2.2)$$

Donde:

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

S: Distancia recorrida (m).

t: tiempo (segundos).

Por tanto:

$$V = \frac{1...m}{5....s} \quad V = 0.2 \text{ m/s.}$$

La productividad se calcula entonces por la ecuación (2.3), 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.

$$Q = 3,6.q.v \quad (2.3)$$

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 3 niveles, con las cuales se obtuvieron las productividades en los niveles referidos anteriormente, es decir 0.3, 0.6 y 2,3 toneladas por hora.

La determinación de la Energía de impacto se determina según la ecuación de la energía cinética específica utilizada por Nikolov (2002 y 2003); Vogel y Peukert (2003 y 2005) y Otros.

$$E = \frac{1}{2} \cdot v^2 \quad (2.4)$$

Durante cada experimento se trituró una cantidad de mineral suficiente para la representatividad de las muestras a tomar (aproximadamente 3 kg)

Luego de obtener el producto, se le realizó un cuarteo y el análisis de tamices. 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 empleo 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 4 mm. El número de réplicas de cada experimento fue tres.

Capítulo III

CAPITULO III. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.

3.1 Análisis Estadístico de los Resultados.

Los resultados de la caracterización granulométrica del producto obtenido durante los experimentos realizados según el procedimiento 2.5 se presentan en las tablas 1, 2, 3 y 4 de los anexos II

Para analizar la influencia de las variables: energía de impacto, regulación de salida y productividad, en el comportamiento del tamaño del producto, se seleccionaron dos variables dependientes. Estas fueron D1 y D2 que representan las fracciones cernidas en los tamices 2 y 1 mm respectivamente. Este procedimiento comprende un análisis de varianza y de regresión múltiple.

Para desarrollar estos análisis se utilizó el paquete estadístico *Statgraphic* versión 5.1. Los resultados de los análisis de varianza se muestran en las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1 Resultados del análisis de varianza para D1.

Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:S	0.546222	2	0.273111	41.93	0.0000
B:E	0.749021	2	0.374511	57.50	0.0000
C:Q	0.0604544	2	0.0302272	4.64	0.0142
RESIDUOS	0.325676	50	0.00651351		

TOTAL (CORREGIDO)	1.67782	56			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla 3.2 Análisis de Varianza para D2.

- Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:S	0.476262	2	0.238131	37.76	0.0000
B:E	0.668259	2	0.33413	52.98	0.0000
C:Q	0.0129435	2	0.00647177	1.03	0.0565
RESIDUOS	0.315352	50	0.00630704		
<hr/>					
TOTAL (CORREGIDO)	1.46868	56			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Resulta conocido que en las tablas ANOVA se descompone la variabilidad de D1 y D2 en las contribuciones debidas a los tres factores o variables independientes. Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Como se puede observar los 3 p-valores son inferiores a 0.05 estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en D1 y D2 para un intervalo de confianza de un 95.0%.

Los resultados del análisis de regresión múltiple se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 Análisis de regresión para la variable dependiente: D1

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	0.868021	0.0535637	16.2054	0.0000
S	-0.0797402	0.00912967	-8.73418	0.0000
E	0.915965	0.0906575	10.1036	0.0000
Q	-0.0328434	0.0124872	-2.63016	0.0111

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	1.30539	3	0.435128	61.92	0.0000
Residuo	0.372434	53	0.00702706		

Total (Corr.) 1.67782 56
R-cuadrado = 77.8025 porcentaje
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 76.546 porcentaje
Error estándar de est. = 0.0838276
Error absoluto medio = 0.0583686
Estadístico de Durbin-Watson = 1.04071 (P=0.0000)
Autocorrelación residual en Lag 1 = 0.448722

Tabla 3.4 Análisis de regresión para la variable dependiente: D2.

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	0.563883	0.0587165	9.60349	0.0000
S	-0.0708234	0.0100079	-7.07672	0.0000
E	0.830526	0.0993787	8.35719	0.0000
Q	- 0.0127468	0.0136885	- 0.931201	0.0565

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	1.02114	3	0.340381	40.31	0.0000
Residuo	0.447537	53	0.00844409		
Total (Corr.)	1.46868	56			

R-cuadrado = 69.528 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 67.8031 porcentaje

Error estándar de est. = 0.0918917

Error absoluto medio = 0.0552014

Estadístico de Durbin-Watson = 1.40207 (P=0.0044)

Auto correlación residual en Lag 1 = 0.282811

Dado que el p-valor en las tablas ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables independientes con D1 y D2 para un nivel de confianza del 99%.

Las ecuaciones de los modelos de regresión lineal ajustados son:

$$D1 = 0.868021 - 0.0797402*S + 0.915965*E - 0.0328434*Q.$$

$$D2 = 0.563883 - 0.0708234*S + 0.830526*E - 0.0127468*Q.$$

El estadístico R-cuadrado indica que los modelos explican un 77.8% de la variabilidad en D1 y el 69.5% de la variabilidad de D2. Como se observa; los tres p valores son inferiores a 0.05 por tanto las tres variables independientes son estadísticamente significativas en el comportamiento de D1 y D2 para un nivel de confianza del 95%.

En el gráfico de la figura 3.1 se muestra el ajuste entre los valores de D1 calculados mediante el modelo de regresión lineal y los obtenidos de forma experimental. El gráfico de la figura 3.2 muestra este análisis para D2

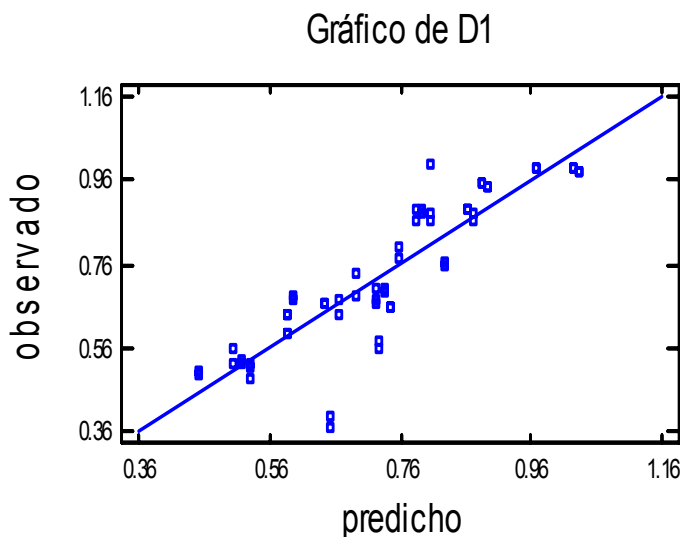


Gráfico de D2

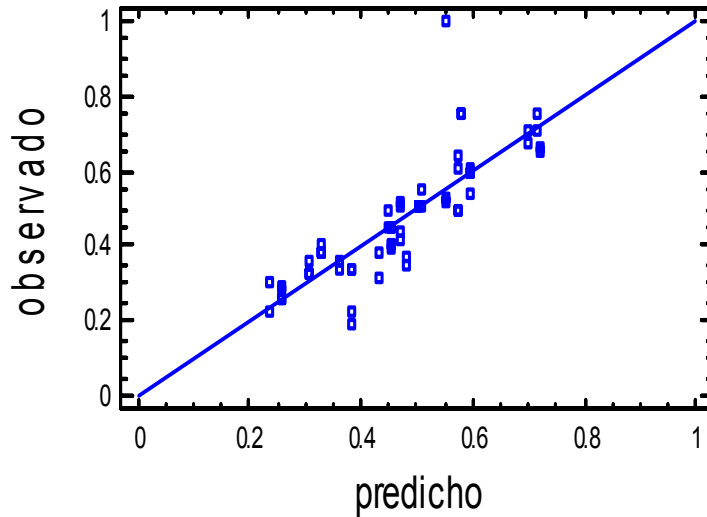


Figura 3.2 Comparación entre el modelo de regresión lineal y los valores experimentales para D2.

3.2 Análisis del Comportamiento de las Distribuciones de Tamaño del Producto.

En la tabla 3.5 se presenta la fracción pasante acumulativa según los tamices utilizados, los resultados del comportamiento del producto pasante acumulativo (valores promedios de los experimentos) se reflejan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Pasante acumulativo (valores promedio)

Numero Experimento	4	3	2	1	0
1	0,999	0,960	0,785	0,509	0,000
2	0,989	0,822	0,657	0,429	0,000
3	0,991	0,866	0,711	0,471	0,000
4	1,000	0,991	0,940	0,571	0,000
5	1,000	0,995	0,953	0,597	0,000
6	1,000	0,874	0,757	0,492	0,000
7	1,000	0,995	0,980	0,655	0,000
8	1,000	0,997	0,988	0,731	0,000
9	1,000	0,996	0,986	0,690	0,000
10	0,981	0,884	0,678	0,391	0,000
11	1,000	0,966	0,639	0,382	0,000
12	0,963	0,762	0,510	0,339	0,000
13	1,000	0,958	0,697	0,400	0,000
14	0,974	0,874	0,681	0,434	0,000
15	1,000	0,900	0,656	0,349	0,000
16	1,000	0,962	0,871	0,752	0,000
17	0,993	0,968	0,892	0,623	0,000
18	1,000	0,988	0,872	0,520	0,000
19	1,000	0,868	0,527	0,270	0,000
20	1,000	0,887	0,565	0,288	0,000
21	0,996	0,774	0,499	0,264	0,000
22	1,000	0,729	0,384	0,205	0,000
23	1,000	0,969	0,699	0,399	0,000
24	0,977	0,822	0,595	0,348	0,000
25	1,000	0,987	0,882	0,524	0,000
26	1,000	0,970	0,877	0,510	0,000
27	0,970	0,799	0,568	0,361	0,000

3.3 Análisis de las Principales Tendencias en el Comportamiento de los Resultados.

Al analizar los datos obtenidos en el experimento descrito en el acápite 2.3 del presente trabajo (ver tabla 3.2) se pueden determinar las principales tendencias del comportamiento de la distribución de tamaño del producto en dependencia del comportamiento de las variables de operación; regulación de tamaño de salida del producto, energía de impacto y productividad.

En las figuras 3.3 hasta la 3.11 se representa gráficamente la influencia de las variaciones de la energía de impacto, en el comportamiento de la distribución de tamaño del producto para iguales valores de la productividad y de la regulación del tamaño de salida.

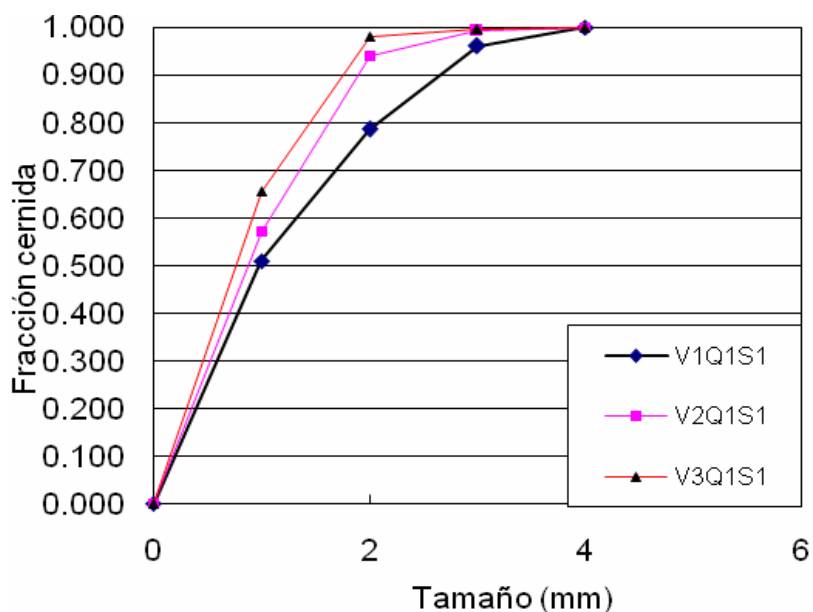


Figura 3.3. Influencia de la velocidad de impacto a productividad y regulación de salida mínima en la distribución de tamaño del producto.

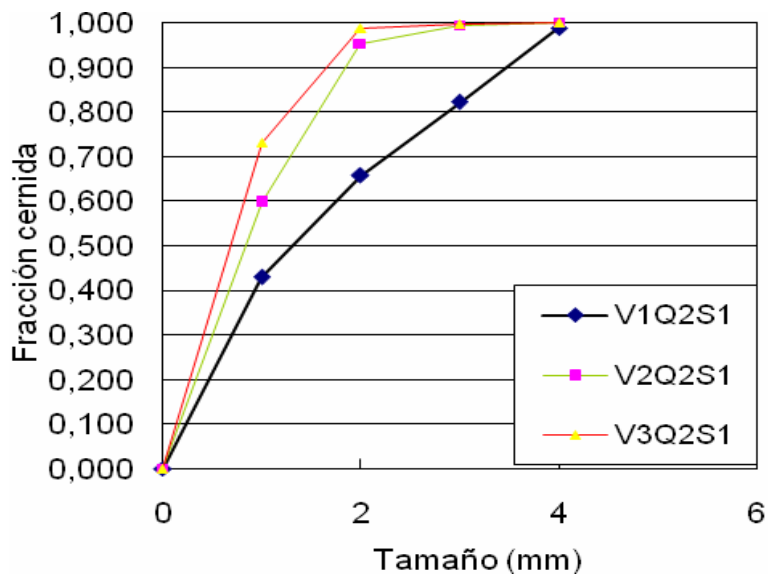


Figura 3.4. Influencia de la velocidad de impacto a productividad media y regulación de salida mínima en la distribución de tamaño del producto.

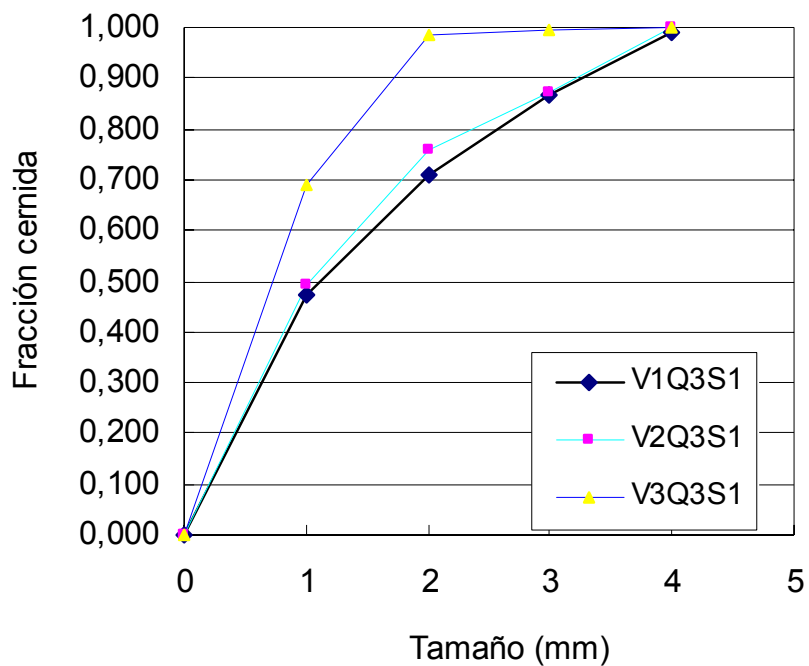


Figura 3.5. Influencia de la velocidad de impacto a productividad máxima y regulación de salida mínima en la distribución de tamaño del producto.

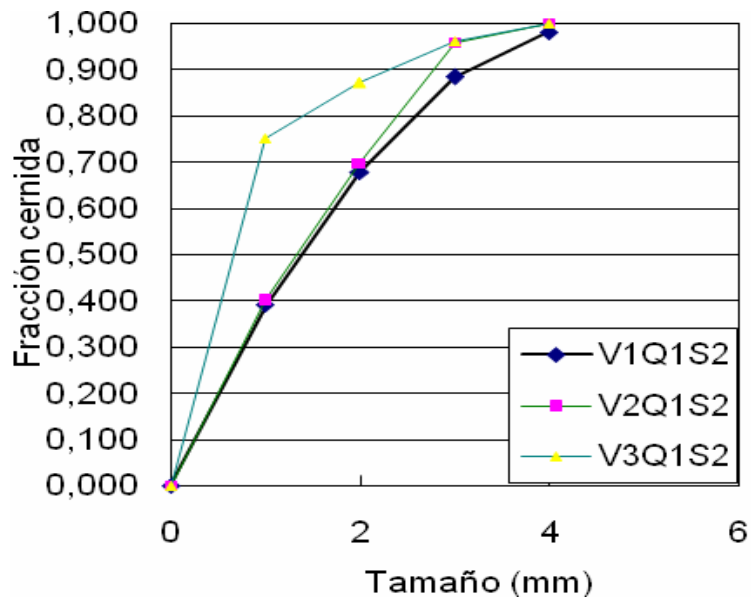


Figura 3.6. Influencia de la velocidad de impacto a productividad mínima y regulación de salida media en la distribución de tamaño del producto.

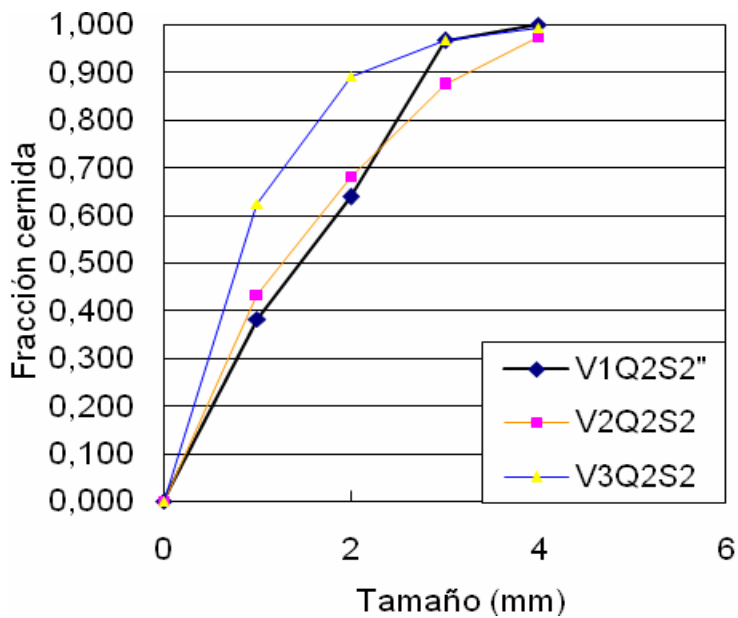


Figura 3.7. Influencia de la velocidad de impacto a productividad media y regulación de salida media en la distribución de tamaño del producto.

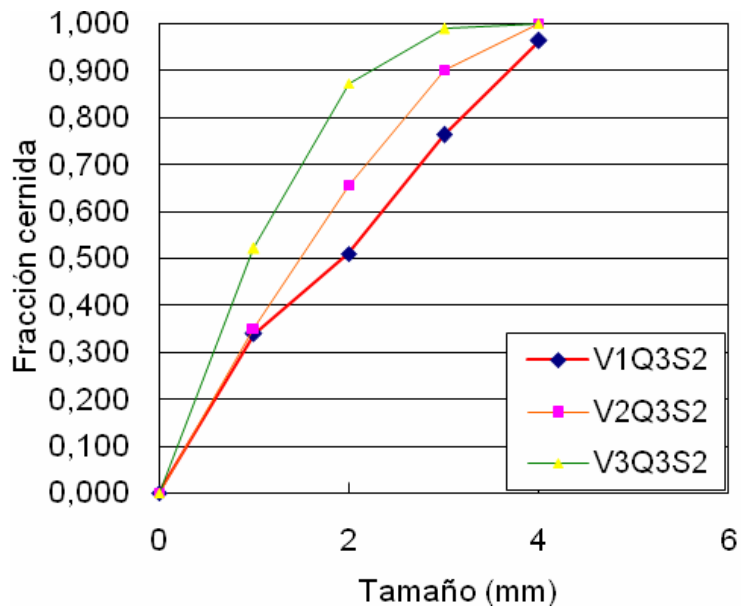


Figura 3.8 Influencia de la velocidad de impacto a productividad máxima y regulación de salida media en la distribución de tamaño del producto.

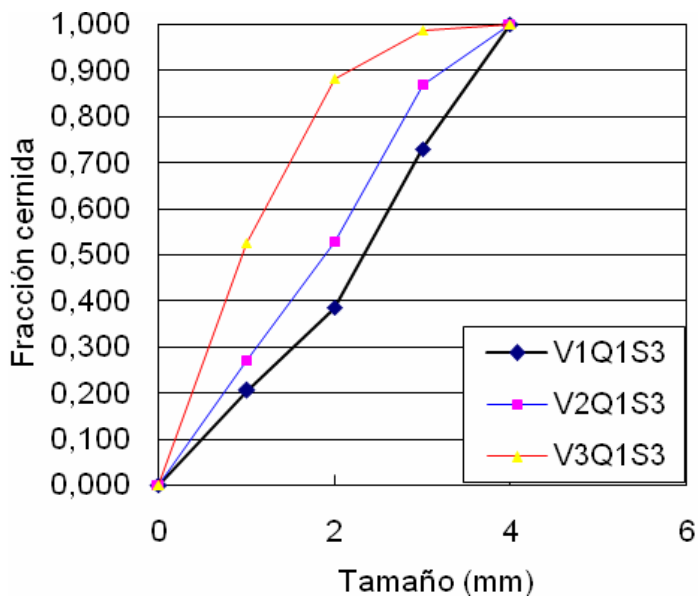


Figura 3.9. Influencia de la velocidad de impacto a productividad mínima y regulación de salida máxima en la distribución de tamaño del producto.

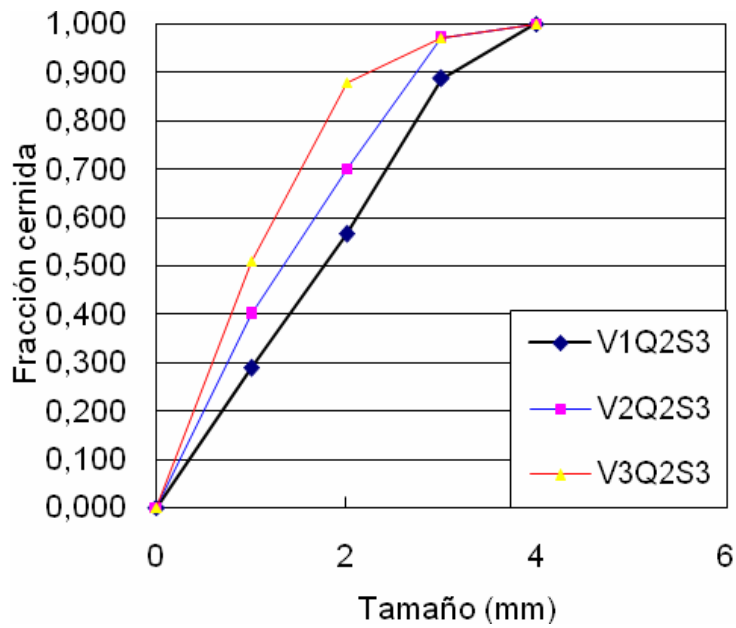


Figura 3.10. Influencia de la velocidad de impacto a productividad media y regulación de salida máxima en la distribución de tamaño del producto.

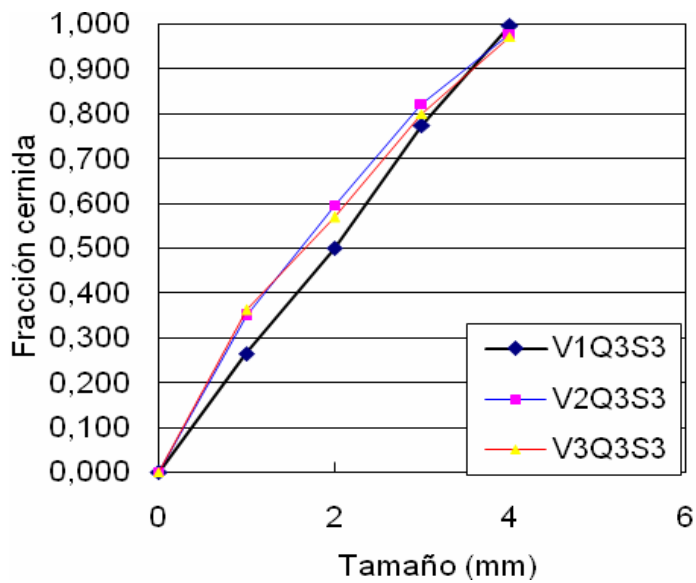


Figura 3.11. Influencia de la velocidad de impacto a productividad máxima y regulación de salida máxima en la distribución de tamaño del producto.

Al analizar los gráficos de estos experimentos se aprecia la influencia de la Energía en el comportamiento de la distribución de tamaño del producto donde de esta forma se puede concluir que el incremento de la velocidad conduce a la obtención de una distribución con un producto más fino lo cual concuerda con los reportes de Guevara (2008).

La diferencia entre los resultados de Guevara y los obtenidos en este trabajo radica en la obtención de productos más finos. Esto ocurre para similares valores de la productividad y de la velocidad de impacto que los experimentados en ese reporte. El producto más fino se debe a la presencia de regulación del tamaño de salida. Debido a esto resulta evidente que existirá más de un proceso de impacto es decir un proceso de fragmentación múltiple.

En las figuras 3.12 a la 3.20 se representa gráficamente la influencia de las diferentes regulaciones de salida de la trituradora, en la función de distribución de la fragmentación, donde se varían en cada gráfico la velocidad de la trituradora y la productividad de la misma.

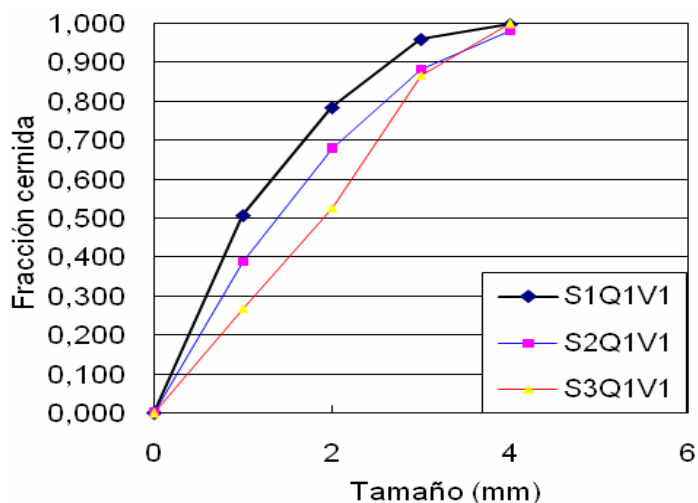


Figura 3.12. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad mínima y velocidad de impacto mínima.

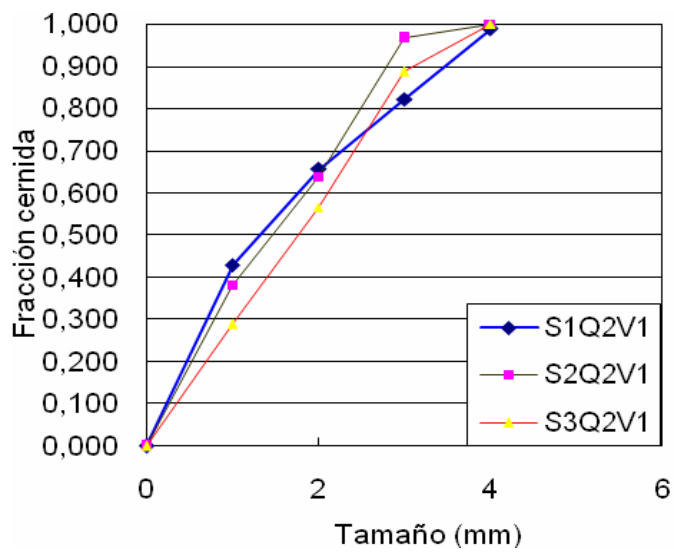


Figura 3.13 Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad media y velocidad de impacto mínima.

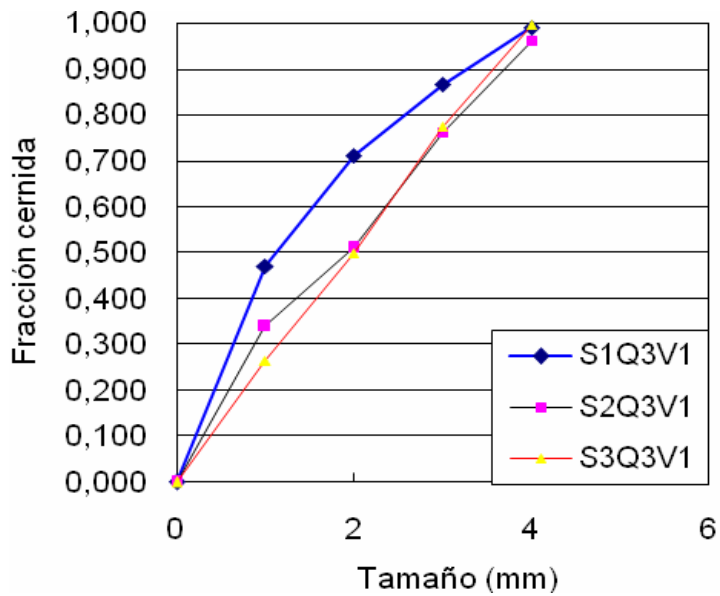


Figura 3.14 Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad máxima y velocidad de impacto mínima.

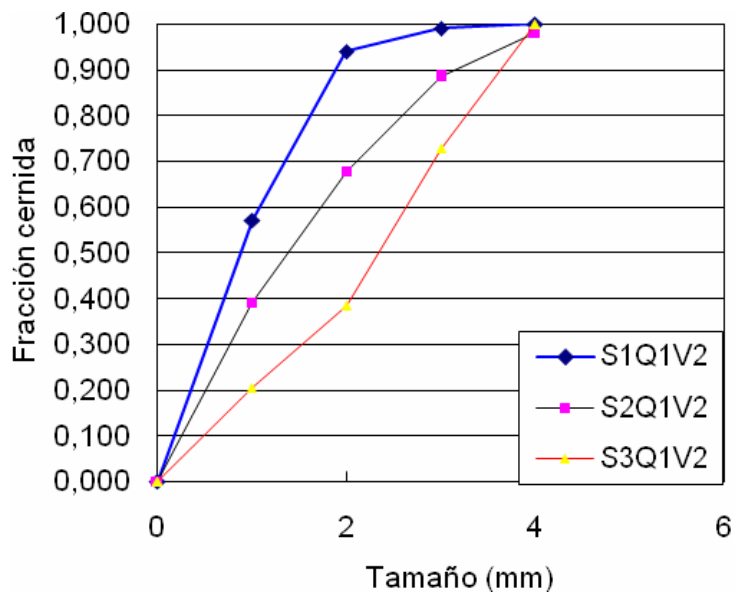


Figura 3.15. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad mínima y velocidad de impacto media.

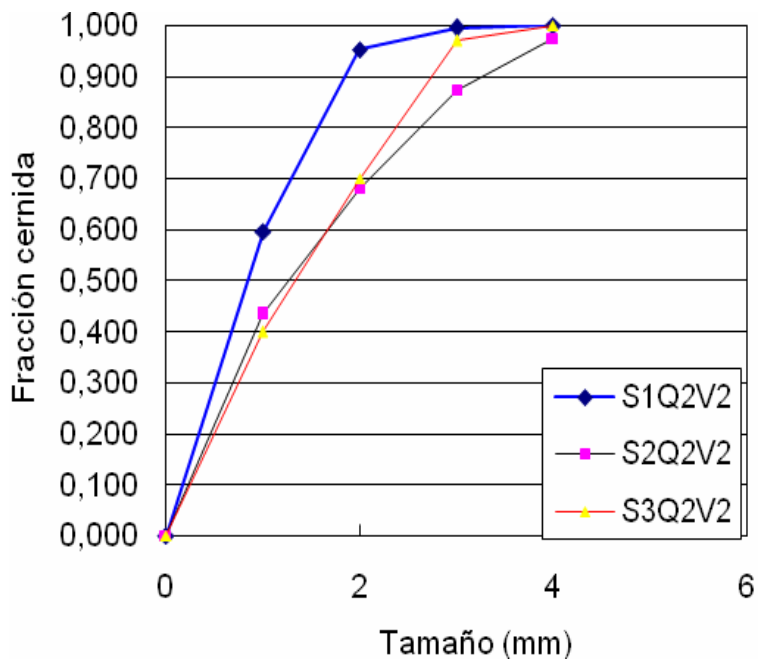


Figura 3.16 Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad media y velocidad de impacto media.

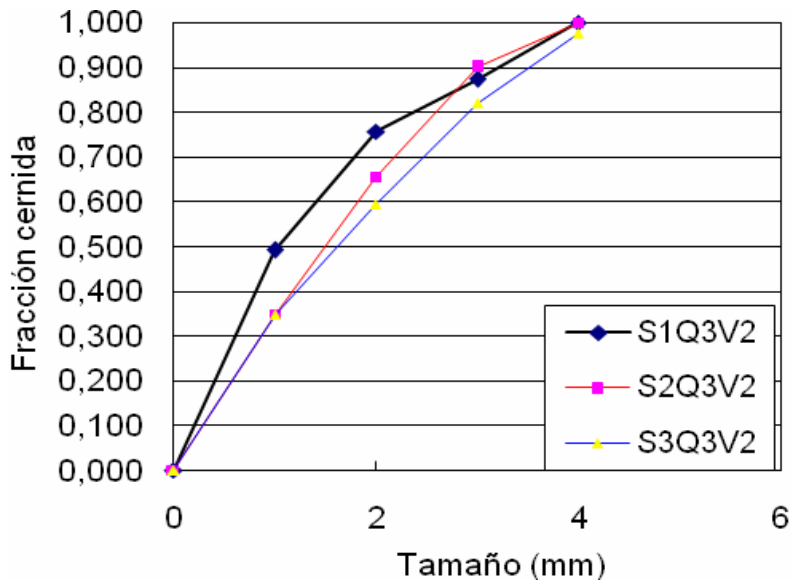


Figura 3.17. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad máxima y velocidad de impacto media.

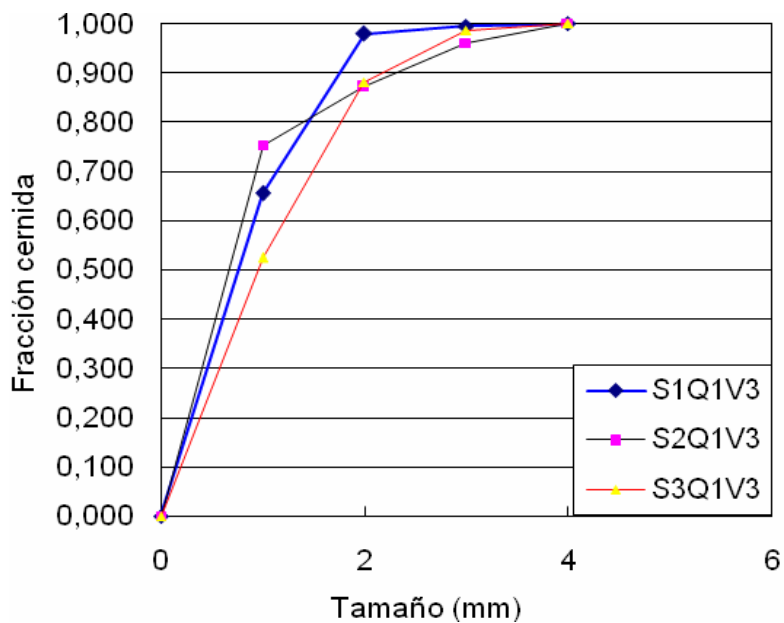


Figura 3.18 Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad mínima y velocidad de impacto máxima.

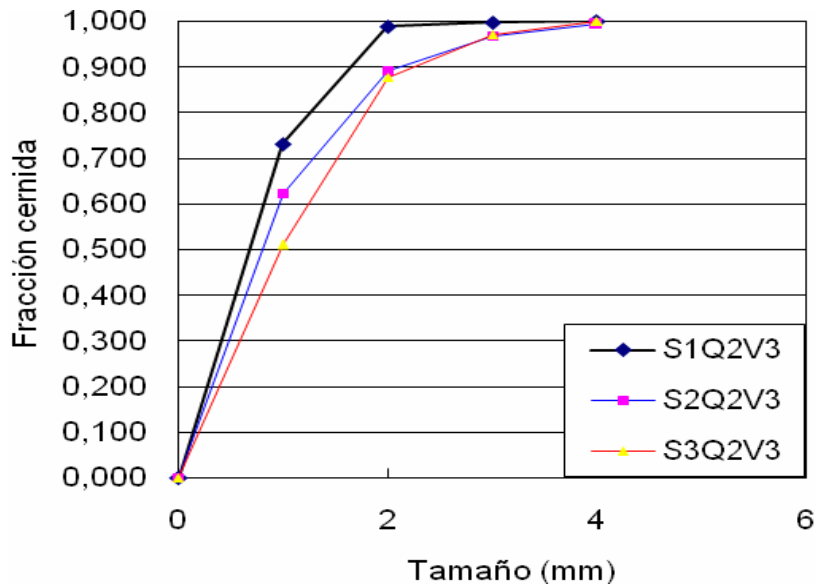


Figura 3.19. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad media y velocidad de impacto máxima.

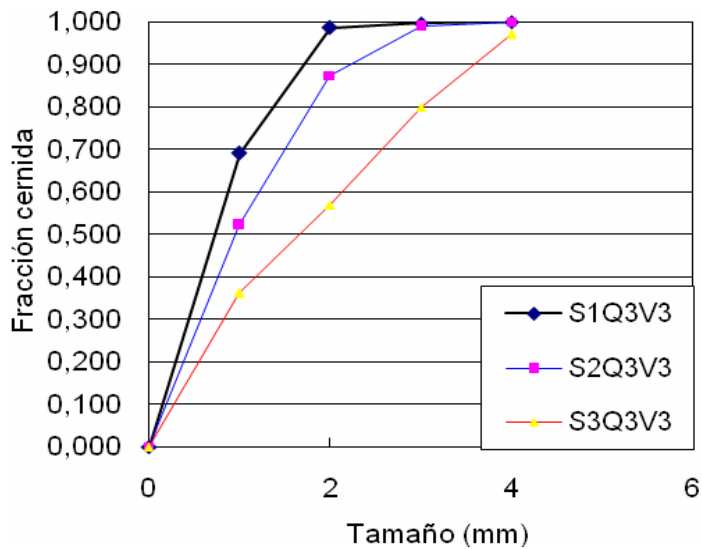


Figura 3.20. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad máxima y velocidad de impacto máxima.

Al analizar los gráficos de estos experimentos se aprecia la influencia de la regulación de salida de la trituradora en el comportamiento de la distribución de tamaño del producto ya que al disminuir el tamaño de la regulación de salida de la trituradora, esto conduce a la obtención de una distribución con un producto más fino, lo cual concuerda con similares tendencias reportadas por Tagart (1950).

Para el mineral de zeolita de San Andrés, este comportamiento no había sido determinado hasta ahora. El mismo resulta de gran importancia para la futura modelación y simulación del proceso.

3.3 Descripción Matemática del Comportamiento de la Distribución de Tamaño del Producto.

Descripción matemática del Proceso de trituración

La aproximación de las curvas de distribución de tamaño del producto obtenido durante los experimentos presenta un buen ajuste a modelos polinómico de tercer orden. Estos resultados concuerdan con lo reportado por [Ballar \(2006\)](#) en todas las etapas de trituración del mineral de San Andrés a escala industrial. Por tanto esta distribución debe ser característica de la fragmentación de este mineral, independientemente del método de trituración utilizado.

En las figuras siguientes se representan el ajuste de las diferentes curvas granulométricas y su comportamiento en función de la velocidad de impacto para diferentes valores de las variables productividad y regulación de salida.

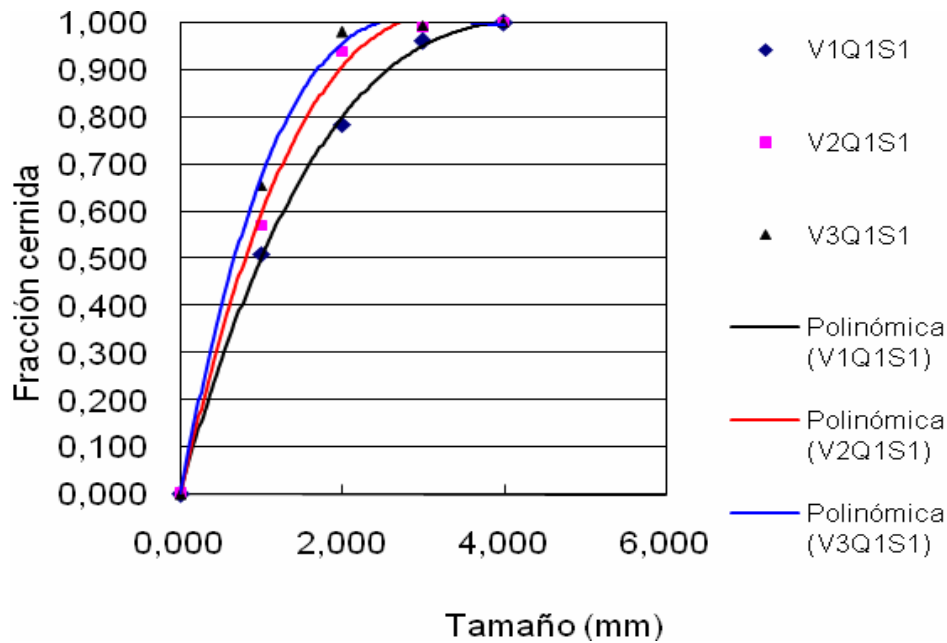


Figura 3.21. Influencia de la velocidad de impacto a productividad y regulación de salida mínima en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

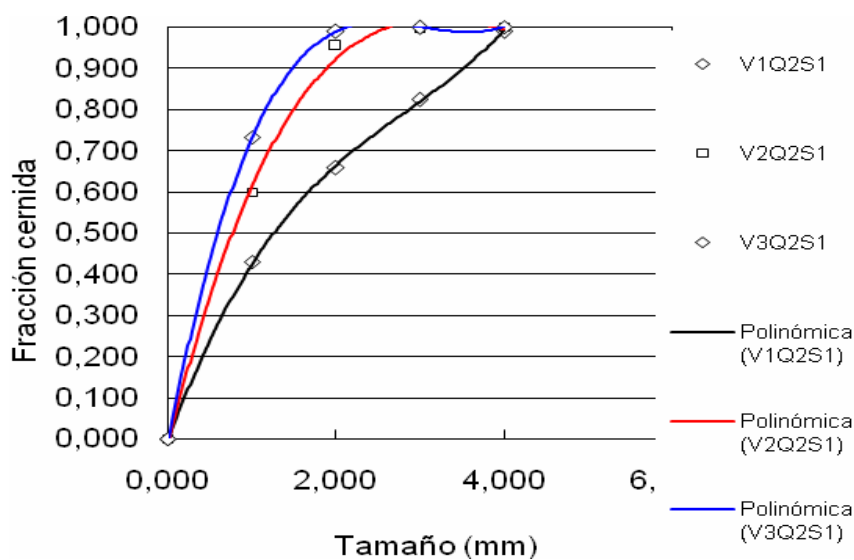


Figura 3.22. Influencia de la velocidad de impacto a productividad media y regulación de salida mínima en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

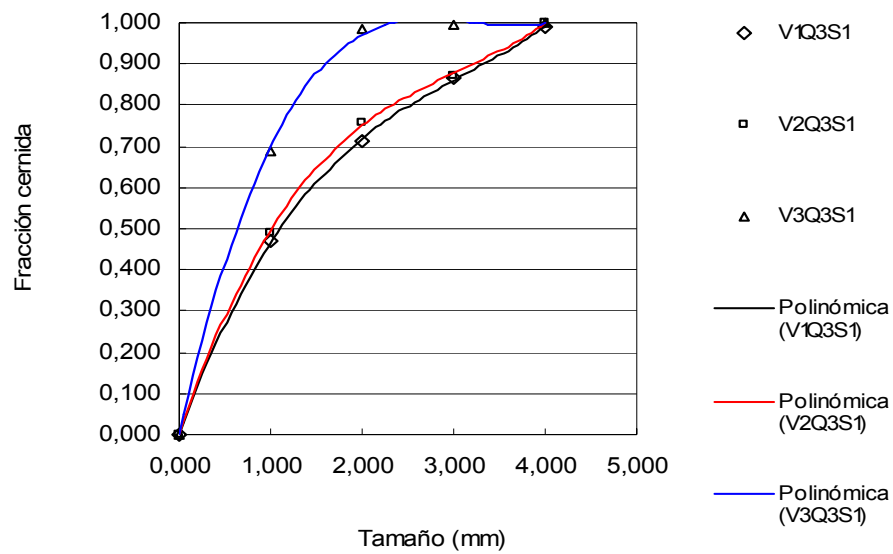


Figura 3.23. Influencia de la velocidad de impacto a productividad máxima y regulación de salida mínima en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

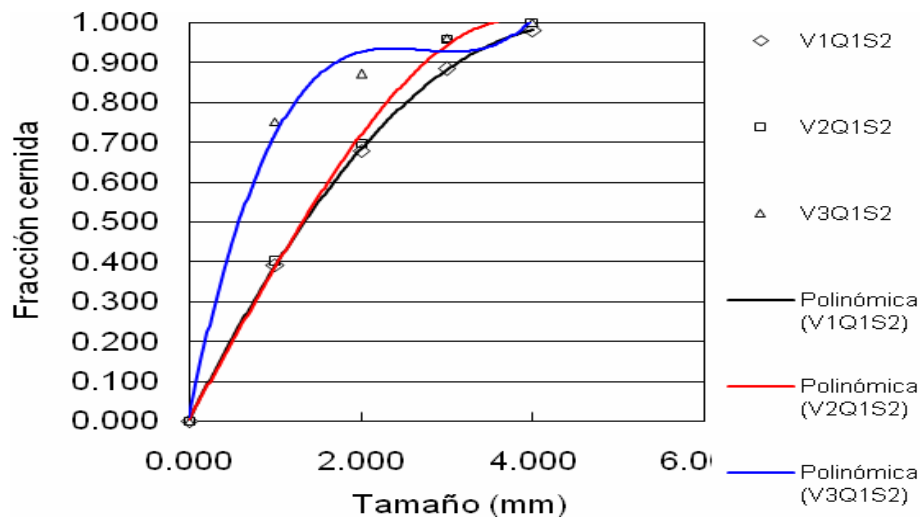


Figura 3.24. Influencia de la velocidad de impacto a productividad mínima y regulación de salida media en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

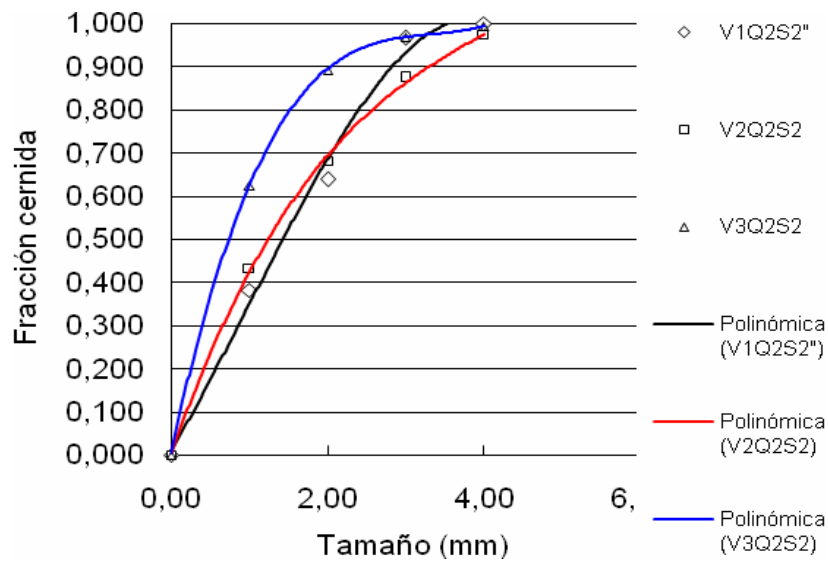


Figura 3.25. Influencia de la velocidad de impacto a productividad media y regulación de salida media en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

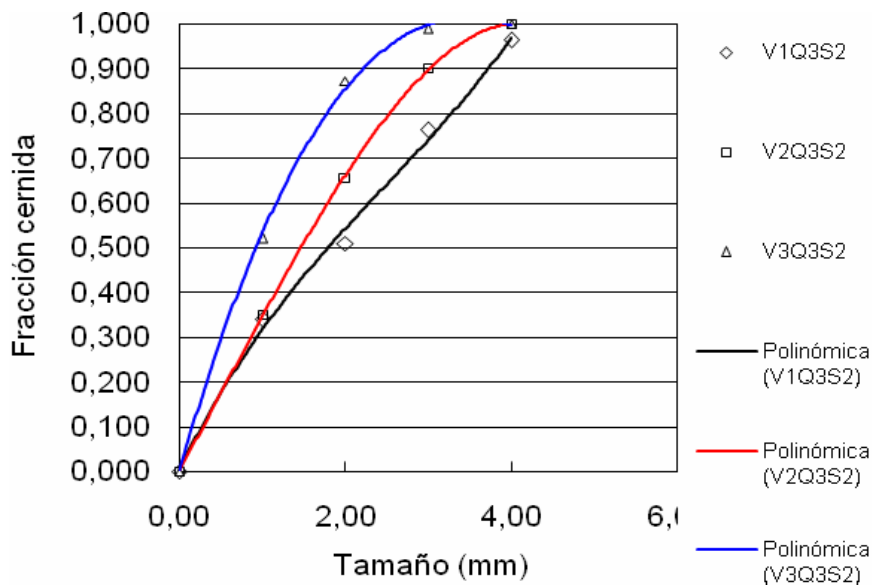


Figura 3.26. Influencia de la velocidad de impacto a productividad máxima y regulación de salida media en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

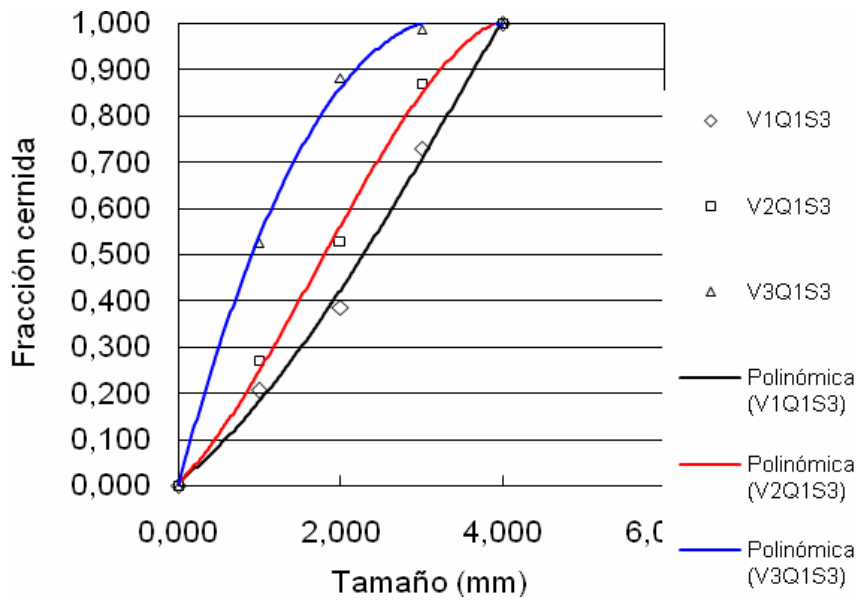


Figura 3.27. Influencia de la velocidad de impacto a productividad mínima y regulación de salida máxima en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

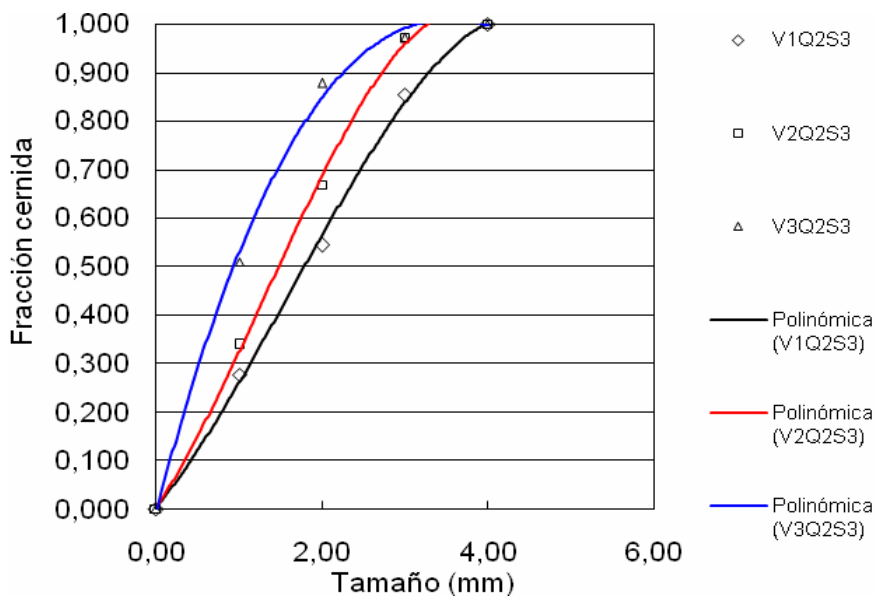


Figura 3.28. Influencia de la velocidad de impacto a productividad media y regulación de salida máxima en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

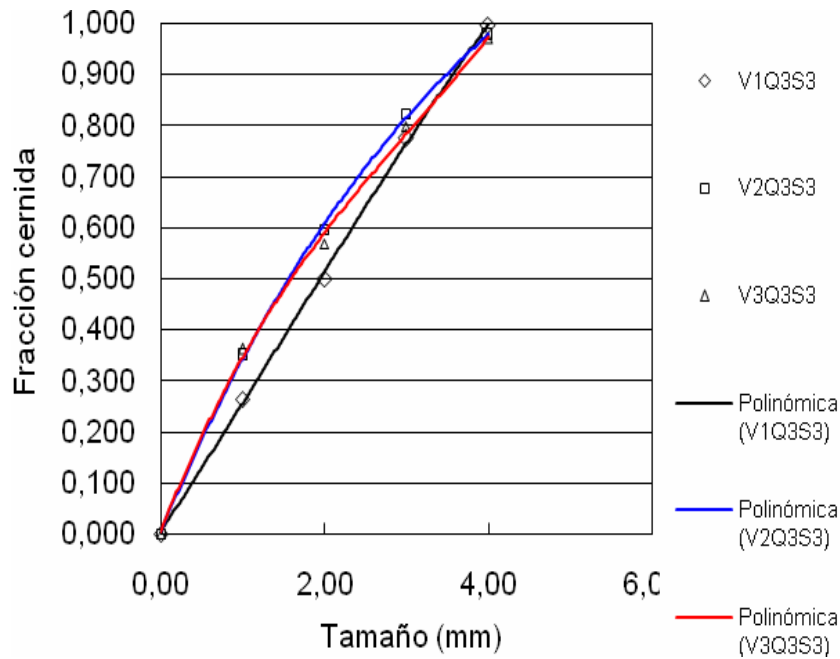


Figura 3.29. Influencia de la velocidad de impacto a productividad máxima y regulación de salida máxima en la distribución de tamaño del producto, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

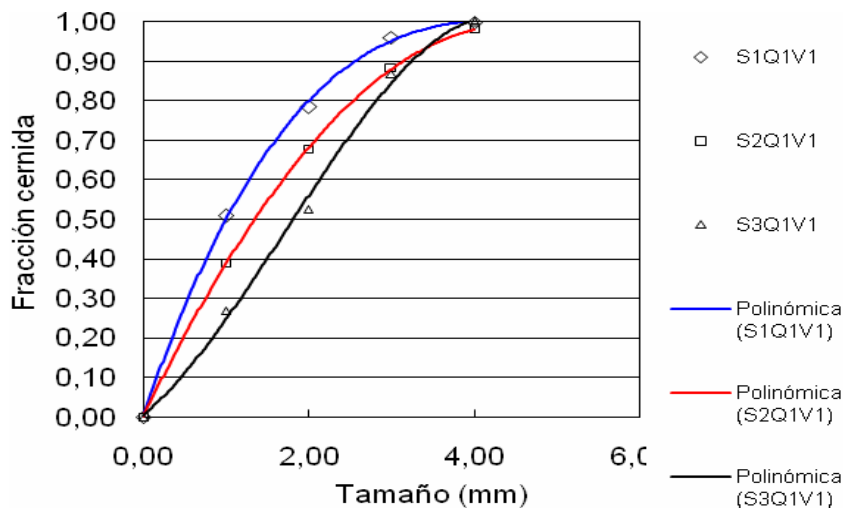


Figura 3.30. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad mínima y velocidad de impacto mínima, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

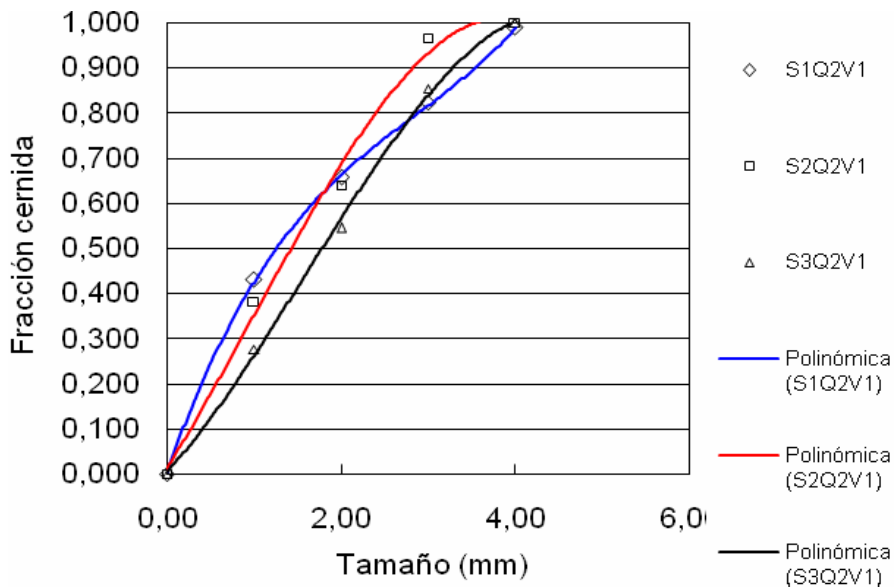


Figura 3.31. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad media y velocidad de impacto mínima, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

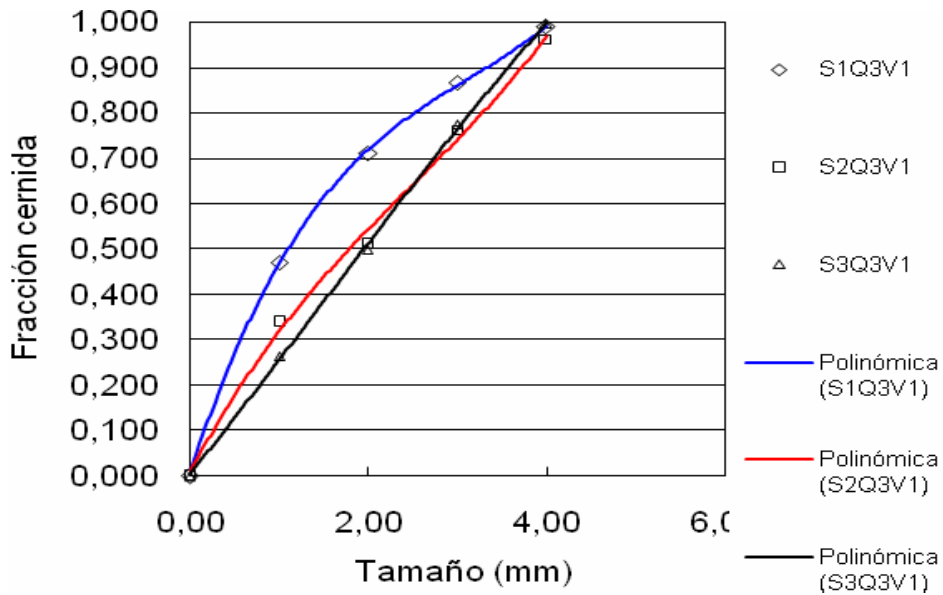


Figura 3.32. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad máxima y velocidad de impacto mínima, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

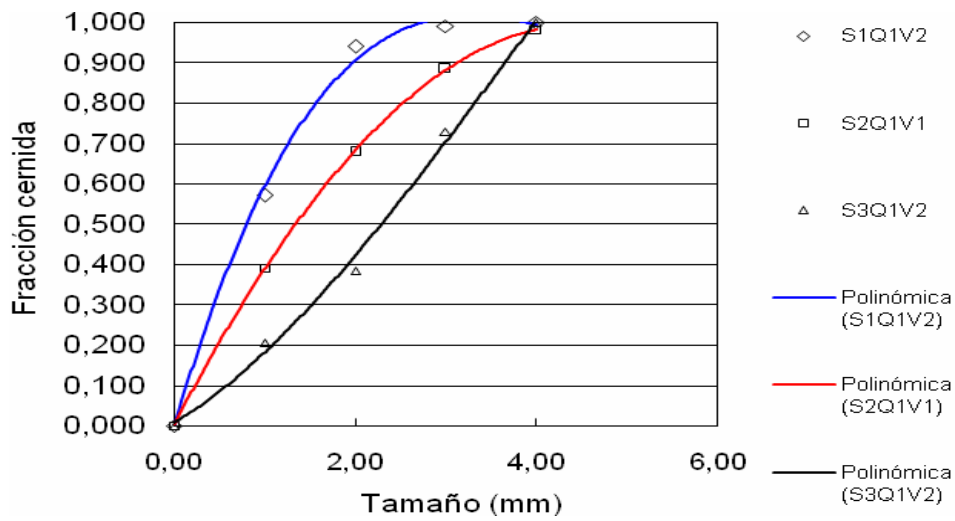


Figura 3.33. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad mínima y velocidad de impacto media, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

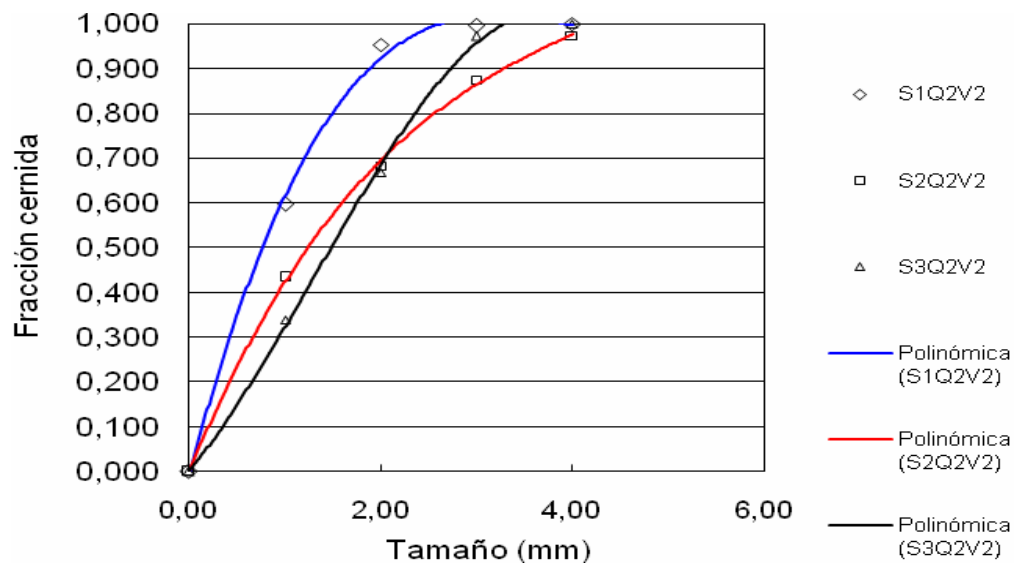


Figura 3.34 Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad media y velocidad de impacto media, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

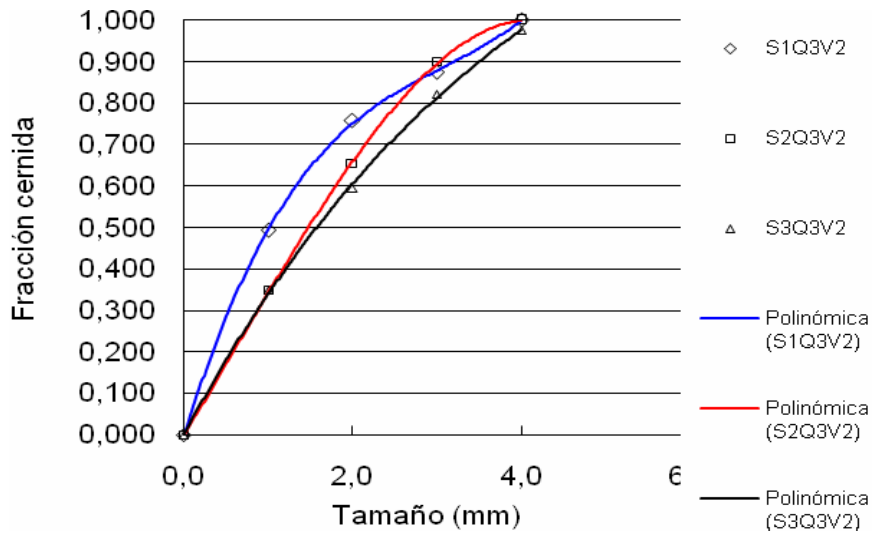


Figura 3.35. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad máxima y velocidad de impacto media, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

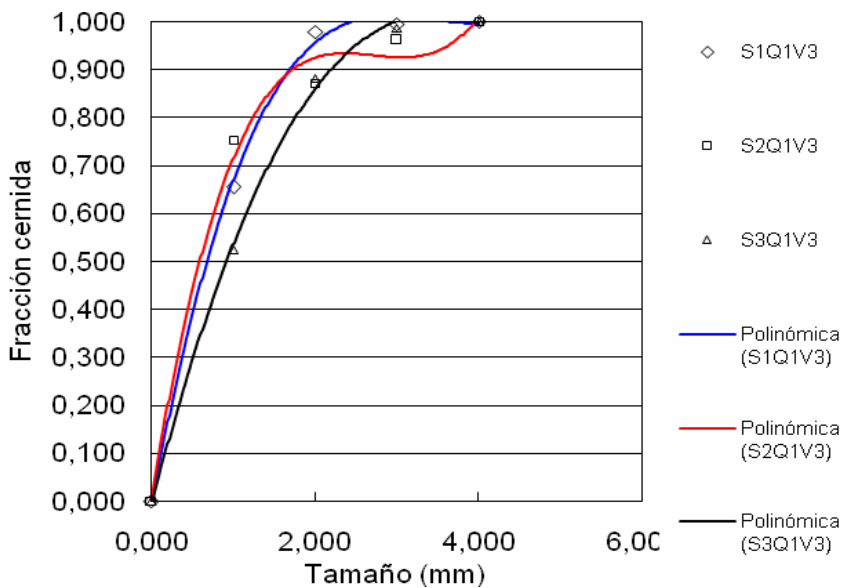


Figura 3.36. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad mínima y velocidad de impacto máxima, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

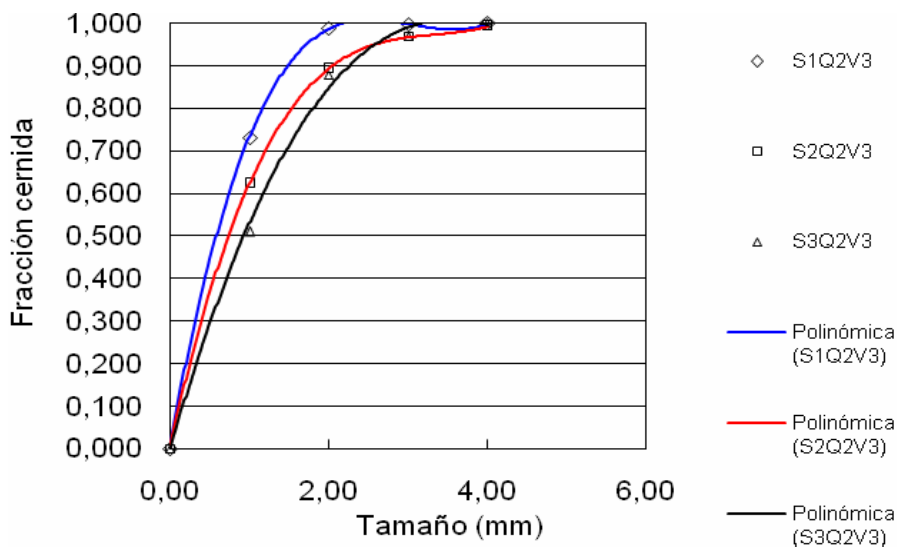


Figura 3.37. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad media y velocidad de impacto máxima, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

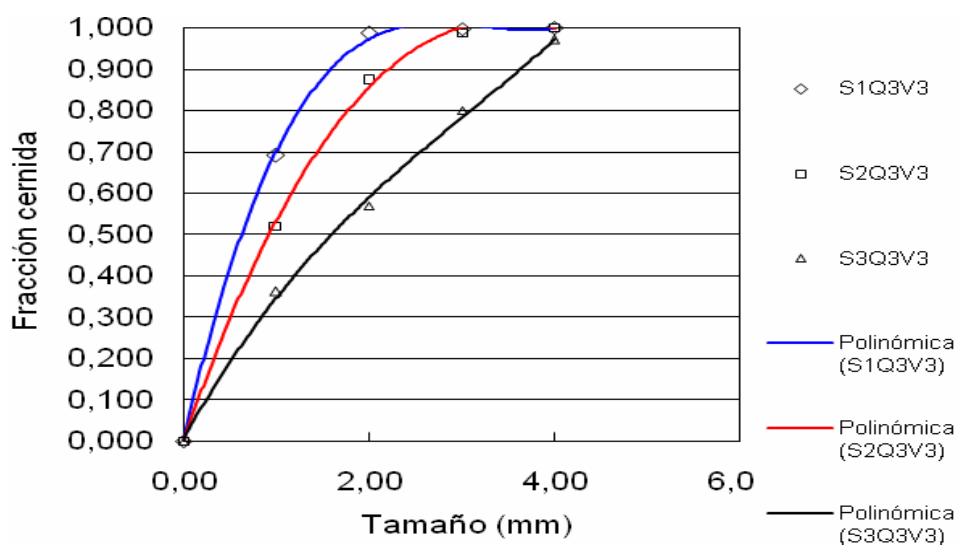


Figura 3.38. Influencia de la regulación de salida en la distribución de tamaño del producto a productividad máxima y velocidad de impacto máxima, ajustada a un modelo matemático (polinómico).

En la tabla se representan los coeficientes del modelo polinomial y el coeficiente de correlación R cuadrado para todas las curvas granulométricas que representan el producto obtenido en las diferentes condiciones de operación.

A partir de los resultados presentados en la tabla 3.6 resulta posible obtener el comportamiento de los coeficientes del modelo polinomial en función de la velocidad del equipo y de la regulación de salida de la trituradora, lo cual no representa un modelo general de trituración por impacto pero describe el comportamiento de los resultados obtenidos experimentalmente.

Tabla 3.6 Coeficientes del modelo polinomial.

Regulación salida	Productividad	Velocidad	X ³	X ²	X	Término Independ	R ²
S1	Q1	V1	0,008	-0,123	0,612	0,002	0,999
S1	Q1	V2	0,013	-0,183	0,769	-0,006	0,997
S1	Q1	V3	0,008	-0,123	0,612	0,002	0,999
S1	Q2	V1	0,017	-0,144	0,551	0,001	1,000
S1	Q2	V2	0,017	-0,209	0,814	-0,005	0,998
S1	Q2	V3	0,039	-0,355	1,049	-0,003	1,000
S1	Q3	V1	0,017	-0,156	0,604	0,001	1,000
S1	Q3	V2	0,020	-0,182	0,660	-0,001	1,000
S1	Q3	V3	0,032	-0,313	0,983	-0,024	1,000
S2	Q1	V1	-0,001	-0,045	0,433	0,001	1,000
S2	Q1	V2	-0,010	0,005	0,386	0,004	0,999
S2	Q1	V3	0,048	-0,395	1,053	0,009	0,992
S2	Q2	V1	-0,014	0,039	0,317	0,008	0,994
S2	Q2	V2	0,008	-0,099	0,513	0,002	0,999
S2	Q2	V3	0,025	-0,250	0,847	0,000	1,000
S2	Q3	V1	0,010	-0,072	0,374	0,006	0,996
S2	Q3	V2	-0,001	0,011	0,342	0,001	1,000
S2	Q3	V3	0,005	-0,122	0,651	-0,003	0,999

Tabla 3.6 (continuación)

Regulación salida	Productividad	Velocidad	X3	X2	X	Término Independ	R2
S3	Q1	V1	-0,004	0,044	0,134	0,006	0,996
S3	Q1	V2	-0,016	0,084	0,175	0,005	0,997
S3	Q1	V3	0,006	-0,128	0,664	-0,004	0,999
S3	Q2	V1	-0,013	0,062	0,209	0,004	0,999
S3	Q2	V2	-0,022	0,087	0,257	0,003	0,999
S3	Q2	V3	0,007	-0,128	0,655	-0,049	0,998
S3	Q3	V1	0,002	0,009	0,245	0,002	0,999
S3	Q3	V2	0,008	-0,073	0,407	0,004	0,998
S3	Q3	V3	0,003	-0,044	0,380	0,002	1,000

CONCLUSIONES.

En el transcurso de la investigación se estudiaron las principales regularidades que sigue la distribución de tamaño del producto en función de las variables de regulación de tamaño de salida, energía de impacto y productividad durante la trituración por impacto del mineral de San Andrés donde se demostró que:

La influencia de la regulación de salida de la trituradora en el comportamiento de la distribución de tamaño del producto ya que al disminuir el tamaño de la regulación de salida de la trituradora y al incrementar de la energía de impacto, esto conduce a la obtención de una distribución con un producto más fino.

Las curvas de distribución de tamaño del producto presentan un mejor ajuste a los modelos polinómicos de tercer orden lo cual resulta característico del mineral.

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 third 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, JJ., 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 Turruellas 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 Materials". 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 quee governing la finer del carbon purverulento).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. Guevara J, A. "Discusión Experimental del modelo de Nikolov para trituradores de Martillo".
Trabajo de Diploma ISMM. Moa. 2007.
26. Ballar O, J. "Análisis del Proceso de Trituración en la Planta de Zeolita de San Andrés".
Trabajo de Diploma ISMM. Moa. 2007.
27. Hernández B, H R. "Análisis del Proceso de Trituración en la Planta de Zeolita de San Andrés".
Trabajo de Diploma ISMM. Moa. 2007.

ANEXO I



Figura 1 Representación del Triturador



Figura 2 Representación de los martillos del triturador

ANEXO II

Tabla 1: Distribución de tamaño del producto en función de las diferentes condiciones de operación según el retenido (gramos).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0	Total
1.1	3	0.15	0.3	0	101	508	846	1545	3000
1.2	3	0.15	0.3	5	132	542	811	1510	3000
1.3	3	0.15	0.3	0	107	536	827	1531	3000
2.1	3	0.15	0.6	31	502	502	709	1256	3000
2.2	3	0.15	0.6	37	498	488	656	1321	3000
2.3	3	0.15	0.6	23	506	479	690	1302	3000
3.1	3	0.15	2.3	21	395	528	718	1338	3000
3.2	3	0.15	2.3	35	355	401	721	1488	3000
3.3	3	0.15	2.3	21	372	543	702	1362	3000
4.1	3	0.30	0.3	0	17	168	1006	1810	3000
4.2	3	0.30	0.3	0	39	135	1210	1616	3000
4.3	3	0.30	0.3	0	26	159	1050	1765	3000
5.1	3	0.30	0.6	0	17	134	1064	1785	3000
5.2	3	0.30	0.6	0	12	120	1072	1796	3000
5.3	3	0.30	0.6	0	18	125	1067	1791	3000
6.1	3	0.30	2.3	0	383	362	787	1468	3000
6.2	3	0.30	2.3	0	376	338	802	1485	3000
6.3	3	0.30	2.3	0	404	367	758	1471	3000
7.1	3	0.45	0.3	0	15	50	974	1960	3000
7.2	3	0.45	0.3	0	12	43	975	1970	3000
7.3	3	0.45	0.3	0	20	35	975	1970	3000
8.1	3	0.45	0.6	0	10	31	825	2134	3000
8.2	3	0.45	0.6	0	6	23	720	2251	3000
8.3	3	0.45	0.6	0	5	38	769	2187	3000
9.1	3	0.45	2.3	0	10	31	935	2024	3000
9.2	3	0.45	2.3	0	11	33	838	2119	3000
9.3	3	0.45	2.3	0	16	43	863	2077	3000
10.1	5	0.15	0.3	60	299	629	868	1144	3000
10.2	5	0.15	0.3	55	282	606	857	1200	3000
10.3	5	0.15	0.3	67	329	610	848	1146	3000
11.1	5	0.15	0.6	0	103	983	776	1138	3000
11.2	5	0.15	0.6	0	100	981	764	1155	3000
11.3	5	0.15	0.6	0	183	1575	1242	1800	4800

Tabla 1 (Continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0	Total
12.1	5	0.15	2.3	92	564	770	494	1080	3000
12.2	5	0.15	2.3	149	568	742	563	978	3000
12.3	5	0.15	2.3	95	673	759	482	990	3000
13.1	5	0.30	0.3	0	105	789	895	1211	3000
13.2	5	0.30	0.3	0	145	781	887	1186	3000
13.3	5	0.30	0.3	0	119	812	881	1188	3000
14.1	5	0.30	0.6	87	285	530	760	1338	3000
14.2	5	0.30	0.6	76	313	611	785	1215	3000
14.3	5	0.30	0.6	68	309	588	686	1349	3000
15.1	5	0.30	2.3	0	304	667	891	1138	3000
15.2	5	0.30	2.3	0	296	798	951	956	3000
15.3	5	0.30	2.3	0	233	703	819	1246	3000
16.1	5	0.45	0.3	0	127	287	325	2261	3000
16.2	5	0.45	0.3	0	103	258	387	2252	3000
16.3	5	0.45	0.3	0	118	255	360	2266	3000
17.1	5	0.45	0.6	29	64	235	842	1830	3000
17.2	5	0.45	0.6	15	82	222	773	1907	3000
17.3	5	0.45	0.6	10	95	254	796	1846	3000
18.1	5	0.45	2.3	0	21	373	1036	1570	3000
18.2	5	0.45	2.3	0	28	338	1083	1551	3000
18.3	5	0.45	2.3	0	44	358	1027	1570	3000
19.1	6	0.15	0.3	0	402	1039	775	784	3000
19.2	6	0.15	0.3	0	390	1004	770	836	3000
19.3	6	0.15	0.3	0	408	1020	796	776	3000
20.1	6	0.15	0.6	0	311	984	762	943	3000
20.2	6	0.15	0.6	0	366	948	902	784	3000
20.3	6	0.15	0.6	0	429	1371	1200	0	3000
21.1	6	0.15	2.3	7	592	912	592	897	3000
21.2	6	0.15	2.3	16	742	737	821	685	3000
21.3	6	0.15	2.3	16	597	955	637	796	3000
22.1	6	0.30	0.3	0	892	1000	545	563	3000
22.2	6	0.30	0.3	0	737	1065	529	670	3000
22.3	6	0.30	0.3	0	814	1002	564	620	3000
23.1	6	0.30	0.6	0	100	711	811	1379	3000
23.2	6	0.30	0.6	0	84	912	989	1015	3000
23.3	6	0.30	0.6	0	80	739	798	1383	3000
24.1	6	0.30	2.3	104	446	658	792	1000	3000
24.2	6	0.30	2.3	37	483	702	689	1089	3000
24.3	6	0.30	2.3	75	455	669	811	989	3000

Tabla 1 (Continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0	Total
25.1	6	0.45	0.3	0	42	301	1024	1634	3000
25.2	6	0.45	0.3	0	37	329	1124	1510	3000
25.3	6	0.45	0.3	0	48	300	1043	1609	3000
26.1	6	0.45	0.6	0	99	305	1069	1527	3000
26.2	6	0.45	0.6	0	79	253	1137	1532	3000
26.3	6	0.45	0.6	0	145	266	1066	1523	3000
27.1	6	0.45	2.3	107	516	709	615	1053	3000
27.2	6	0.45	2.3	72	514	676	626	1113	3000
27.3	6	0.45	2.3	121	583	674	583	1040	3000

Tabla 2: Fracción retenida.

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0	Total
1,1	3	0,15	0,3	0,00	0,03	0,17	0,28	0,52	1
1,2	3	0,15	0,3	0,00	0,04	0,18	0,27	0,50	1
1,3	3	0,15	0,3	0,00	0,04	0,18	0,28	0,51	1
2,1	3	0,15	0,6	0,01	0,17	0,17	0,24	0,42	1
2,2	3	0,15	0,6	0,01	0,17	0,16	0,22	0,44	1
2,3	3	0,15	0,6	0,01	0,17	0,16	0,23	0,43	1
3,1	3	0,15	2,3	0,01	0,13	0,18	0,24	0,45	1
3,2	3	0,15	2,3	0,01	0,12	0,13	0,24	0,50	1
3,3	3	0,15	2,3	0,01	0,12	0,18	0,23	0,45	1
4,1	3	0,30	0,3	0,00	0,01	0,06	0,34	0,60	1
4,2	3	0,30	0,3	0,00	0,01	0,05	0,40	0,54	1
4,3	3	0,30	0,3	0,00	0,01	0,05	0,35	0,59	1
5,1	3	0,30	0,6	0,00	0,01	0,04	0,35	0,59	1
5,2	3	0,30	0,6	0,00	0,00	0,04	0,36	0,60	1
5,3	3	0,30	0,6	0,00	0,01	0,04	0,36	0,60	1
6,1	3	0,30	2,3	0,00	0,13	0,12	0,26	0,49	1
6,2	3	0,30	2,3	0,00	0,13	0,11	0,27	0,50	1
6,3	3	0,30	2,3	0,00	0,13	0,12	0,25	0,49	1
7,1	3	0,45	0,3	0,00	0,01	0,02	0,32	0,65	1
7,2	3	0,45	0,3	0,00	0,00	0,01	0,33	0,66	1
7,3	3	0,45	0,3	0,00	0,01	0,01	0,33	0,66	1
8,1	3	0,45	0,6	0,00	0,00	0,01	0,27	0,71	1
8,2	3	0,45	0,6	0,00	0,00	0,01	0,24	0,75	1
8,3	3	0,45	0,6	0,00	0,00	0,01	0,26	0,73	1
9,1	3	0,45	2,3	0,00	0,00	0,01	0,31	0,67	1
9,2	3	0,45	2,3	0,00	0,00	0,01	0,28	0,71	1
9,3	3	0,45	2,3	0,00	0,01	0,01	0,29	0,69	1
10,1	5	0,15	0,3	0,02	0,10	0,21	0,29	0,38	1
10,2	5	0,15	0,3	0,02	0,09	0,20	0,29	0,40	1
10,3	5	0,15	0,3	0,02	0,11	0,20	0,28	0,38	1
11,1	5	0,15	0,6	0,00	0,03	0,33	0,26	0,38	1
11,2	5	0,15	0,6	0,00	0,03	0,33	0,25	0,38	1
11,3	5	0,15	0,6	0,00	0,06	0,53	0,41	0,60	1
12,1	5	0,15	2,3	0,03	0,19	0,26	0,16	0,36	1
12,2	5	0,15	2,3	0,05	0,19	0,25	0,19	0,33	1
12,3	5	0,15	2,3	0,03	0,22	0,25	0,16	0,33	1
13,1	5	0,30	0,3	0,00	0,04	0,26	0,30	0,40	1

Tabla 2: Fracción retenida (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0	Total
13,2	5	0,30	0,3	0,00	0,05	0,26	0,30	0,40	1
13,3	5	0,30	0,3	0,00	0,04	0,27	0,29	0,40	1
14,1	5	0,30	0,6	0,03	0,09	0,18	0,25	0,45	1
14,2	5	0,30	0,6	0,03	0,10	0,20	0,26	0,41	1
14,3	5	0,30	0,6	0,02	0,10	0,20	0,23	0,45	1
15,1	5	0,30	2,3	0,00	0,10	0,22	0,30	0,38	1
15,2	5	0,30	2,3	0,00	0,10	0,27	0,32	0,32	1
15,3	5	0,30	2,3	0,00	0,08	0,23	0,27	0,42	1
16,1	5	0,45	0,3	0,00	0,04	0,10	0,11	0,75	1
16,2	5	0,45	0,3	0,00	0,03	0,09	0,13	0,75	1
16,3	5	0,45	0,3	0,00	0,04	0,09	0,12	0,76	1
17,1	5	0,45	0,6	0,01	0,02	0,08	0,28	0,61	1
17,2	5	0,45	0,6	0,01	0,03	0,07	0,26	0,64	1
17,3	5	0,45	0,6	0,00	0,03	0,08	0,27	0,62	1
18,1	5	0,45	2,3	0,00	0,01	0,12	0,35	0,52	1
18,2	5	0,45	2,3	0,00	0,01	0,11	0,36	0,52	1
18,3	5	0,45	2,3	0,00	0,01	0,12	0,34	0,52	1
19,1	6	0,15	0,3	0,00	0,13	0,35	0,26	0,26	1
19,2	6	0,15	0,3	0,00	0,13	0,33	0,26	0,28	1
19,3	6	0,15	0,3	0,00	0,14	0,34	0,27	0,26	1
20,1	6	0,15	0,6	0,00	0,10	0,33	0,25	0,31	1
20,2	6	0,15	0,6	0,00	0,12	0,32	0,30	0,26	1
20,3	6	0,15	0,6	0,00	0,14	0,46	0,40	0,00	1
21,1	6	0,15	2,3	0,00	0,20	0,30	0,20	0,30	1
21,2	6	0,15	2,3	0,01	0,25	0,25	0,27	0,23	1
21,3	6	0,15	2,3	0,01	0,20	0,32	0,21	0,27	1
22,1	6	0,30	0,3	0,00	0,30	0,33	0,18	0,19	1
22,2	6	0,30	0,3	0,00	0,25	0,35	0,18	0,22	1
22,3	6	0,30	0,3	0,00	0,27	0,33	0,19	0,21	1
23,1	6	0,30	0,6	0,00	0,03	0,24	0,27	0,46	1
23,2	6	0,30	0,6	0,00	0,03	0,30	0,33	0,34	1
23,3	6	0,30	0,6	0,00	0,03	0,25	0,27	0,46	1
24,1	6	0,30	2,3	0,03	0,15	0,22	0,26	0,33	1
24,2	6	0,30	2,3	0,01	0,16	0,23	0,23	0,36	1
24,3	6	0,30	2,3	0,03	0,15	0,22	0,27	0,33	1
25,1	6	0,45	0,3	0,00	0,01	0,10	0,34	0,54	1
25,2	6	0,45	0,3	0,00	0,01	0,11	0,37	0,50	1
25,3	6	0,45	0,3	0,00	0,02	0,10	0,35	0,54	1

Tabla 2: Fracción retenida (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0	Total
26,1	6	0,45	0,6	0,00	0,03	0,10	0,36	0,51	1
26,2	6	0,45	0,6	0,00	0,03	0,08	0,38	0,51	1
26,3	6	0,45	0,6	0,00	0,05	0,09	0,36	0,51	1
27,1	6	0,45	2,3	0,04	0,17	0,24	0,20	0,35	1
27,2	6	0,45	2,3	0,02	0,17	0,23	0,21	0,37	1
27,3	6	0,45	2,3	0,04	0,19	0,22	0,19	0,35	1

Tabla 3: Pasante Acumulativo.

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
1,1	3	0,15	0,3	1,000	0,966	0,797	0,515	0
1,2	3	0,15	0,3	0,998	0,954	0,774	0,503	0
1,3	3	0,15	0,3	1,000	0,964	0,786	0,510	0
2,1	3	0,15	0,6	0,990	0,822	0,655	0,419	0
2,2	3	0,15	0,6	0,988	0,822	0,659	0,440	0
2,3	3	0,15	0,6	0,992	0,824	0,664	0,434	0
3,1	3	0,15	2,3	0,993	0,862	0,685	0,446	0
3,2	3	0,15	2,3	0,988	0,870	0,736	0,496	0
3,3	3	0,15	2,3	0,993	0,869	0,688	0,454	0
4,1	3	0,30	0,3	1,000	0,994	0,939	0,603	0
4,2	3	0,30	0,3	1,000	0,987	0,942	0,539	0
4,3	3	0,30	0,3	1,000	0,991	0,938	0,588	0
5,1	3	0,30	0,6	1,000	0,994	0,950	0,595	0
5,2	3	0,30	0,6	1,000	0,996	0,956	0,599	0
5,3	3	0,30	0,6	1,000	0,994	0,953	0,597	0
6,1	3	0,30	2,3	1,000	0,872	0,752	0,489	0
6,2	3	0,30	2,3	1,000	0,875	0,762	0,495	0
6,3	3	0,30	2,3	1,000	0,865	0,743	0,490	0
7,1	3	0,45	0,3	1,000	0,995	0,978	0,653	0
7,2	3	0,45	0,3	1,000	0,996	0,982	0,657	0
7,3	3	0,45	0,3	1,000	0,993	0,982	0,657	0
8,1	3	0,45	0,6	1,000	0,997	0,986	0,711	0
8,2	3	0,45	0,6	1,000	0,998	0,991	0,750	0
8,3	3	0,45	0,6	1,000	0,998	0,985	0,729	0
9,1	3	0,45	2,3	1,000	0,997	0,986	0,675	0

Tabla 3: Pasante Acumulativo (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
9,2	3	0,45	2,3	1,000	0,996	0,985	0,706	0
9,3	3	0,45	2,3	1,000	0,995	0,980	0,692	0
10,1	5	0,15	0,3	0,980	0,880	0,671	0,381	0
10,2	5	0,15	0,3	0,982	0,888	0,686	0,400	0
10,3	5	0,15	0,3	0,978	0,868	0,665	0,382	0
11,1	5	0,15	0,6	1,000	0,966	0,638	0,379	0
11,2	5	0,15	0,6	1,000	0,967	0,640	0,385	0
11,3	5	0,15	0,6	1,000	0,939	0,414	0,000	0
12,1	5	0,15	2,3	0,969	0,781	0,524	0,360	0
2,2	5	0,15	2,3	0,950	0,761	0,514	0,326	0
12,3	5	0,15	2,3	0,968	0,744	0,491	0,330	0
13,1	5	0,30	0,3	1,000	0,965	0,702	0,404	0
13,2	5	0,30	0,3	1,000	0,952	0,691	0,395	0
13,3	5	0,30	0,3	1,000	0,960	0,690	0,396	0
14,1	5	0,30	0,6	0,971	0,876	0,699	0,446	0
14,2	5	0,30	0,6	0,975	0,870	0,667	0,405	0
14,3	5	0,30	0,6	0,977	0,874	0,678	0,450	0
15,1	5	0,30	2,3	1,000	0,899	0,676	0,379	0
15,2	5	0,30	2,3	1,000	0,901	0,635	0,319	0
15,3	5	0,30	2,3	1,000	0,922	0,688	0,415	0
16,1	5	0,45	0,3	1,000	0,958	0,862	0,754	0
16,2	5	0,45	0,3	1,000	0,966	0,880	0,751	0
16,3	5	0,45	0,3	1,000	0,961	0,876	0,755	0
17,1	5	0,45	0,6	0,990	0,969	0,891	0,610	0
17,2	5	0,45	0,6	0,995	0,967	0,893	0,636	0
17,3	5	0,45	0,6	0,997	0,965	0,881	0,615	0
18,1	5	0,45	2,3	1,000	0,993	0,869	0,523	0
18,2	5	0,45	2,3	1,000	0,991	0,878	0,517	0
18,3	5	0,45	2,3	1,000	0,985	0,866	0,523	0
19,1	6	0,15	0,3	1,000	0,866	0,520	0,261	0
19,2	6	0,15	0,3	1,000	0,870	0,535	0,279	0
19,3	6	0,15	0,3	1,000	0,864	0,524	0,259	0
20,1	6	0,15	0,6	1,000	0,896	0,568	0,314	0
20,2	6	0,15	0,6	1,000	0,878	0,562	0,261	0
20,3	6	0,15	0,6	1,000	0,857	0,400	0,000	0
21,1	6	0,15	2,3	0,998	0,800	0,496	0,299	0
21,2	6	0,15	2,3	0,995	0,747	0,502	0,228	0
21,3	6	0,15	2,3	0,995	0,796	0,477	0,265	0
22,1	6	0,30	0,3	1,000	0,703	0,369	0,188	0
22,2	6	0,30	0,3	1,000	0,754	0,400	0,223	0
22,3	6	0,30	0,3	1,000	0,729	0,395	0,207	0

Tabla 3: Pasante Acumulativo (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
23,1	6	0,30	0,6	1,000	0,967	0,730	0,460	0
23,2	6	0,30	0,6	1,000	0,972	0,668	0,338	0
23,3	6	0,30	0,6	1,000	0,973	0,727	0,461	0
24,1	6	0,30	2,3	0,965	0,817	0,597	0,333	0
24,2	6	0,30	2,3	0,988	0,827	0,593	0,363	0
24,3	6	0,30	2,3	0,975	0,823	0,600	0,330	0
25,1	6	0,45	0,3	1,000	0,986	0,886	0,545	0
25,2	6	0,45	0,3	1,000	0,988	0,878	0,503	0
25,3	6	0,45	0,3	1,000	0,984	0,884	0,536	0
26,1	6	0,45	0,6	1,000	0,967	0,865	0,509	0
26,2	6	0,45	0,6	1,000	0,974	0,889	0,511	0
26,3	6	0,45	0,6	1,000	0,952	0,863	0,508	0
27,1	6	0,45	2,3	0,964	0,792	0,556	0,351	0
27,2	6	0,45	2,3	0,976	0,805	0,580	0,371	0
27,3	6	0,45	2,3	0,960	0,766	0,541	0,347	0

Tabla 4: Pasante acumulativo (valores promedio).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
1,1	3	0,15	0,3	1,000	0,966	0,797	0,515	0
1,2	3	0,15	0,3	0,998	0,954	0,774	0,503	0
1,3	3	0,15	0,3	1,000	0,964	0,786	0,510	0
media				0,999	0,960	0,785	0,509	0
2,1	3	0,15	0,6	0,990	0,822	0,655	0,419	0
2,2	3	0,15	0,6	0,988	0,822	0,659	0,440	0
2,3	3	0,15	0,6	0,992	0,824	0,664	0,434	0
media				0,989	0,822	0,657	0,429	0
3,1	3	0,15	2,3	0,993	0,862	0,685	0,446	0
3,2	3	0,15	2,3	0,988	0,870	0,736	0,496	0
	3	0,15	2,3	0,993	0,869	0,688	0,454	0
Media				0,991	0,866	0,711	0,471	0
4,1	3	0,30	0,3	1,000	0,994	0,939	0,603	0
4,2	3	0,30	0,3	1,000	0,987	0,942	0,539	0
4,3	3	0,30	0,3	1,000	0,991	0,938	0,588	0
Media				1,000	0,991	0,940	0,571	0

Tabla 4: Pasante acumulativo (valores promedio) (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
5,1	3	0,30	0,6	1,000	0,994	0,950	0,595	0
5,2	3	0,30	0,6	1,000	0,996	0,956	0,599	0
5,3	3	0,30	0,6	1,000	0,994	0,953	0,597	0
Media				1,000	0,995	0,953	0,597	0
6,1	3	0,30	2,3	1,000	0,872	0,752	0,489	0
6,2	3	0,30	2,3	1,000	0,875	0,762	0,495	0
6,3	3	0,30	2,3	1,000	0,865	0,743	0,490	0
Media				1,000	0,874	0,757	0,492	0
7,1	3	0,45	0,3	1,000	0,995	0,978	0,653	0
7,2	3	0,45	0,3	1,000	0,996	0,982	0,657	0
7,3	3	0,45	0,3	1,000	0,993	0,982	0,657	0
Media				1,000	0,995	0,980	0,655	0
8,1	3	0,45	0,6	1,000	0,997	0,986	0,711	0
8,2	3	0,45	0,6	1,000	0,998	0,991	0,750	0
8,3	3	0,45	0,6	1,000	0,998	0,985	0,729	0
media				1,000	0,997	0,988	0,731	0
9,1	3	0,45	2,3	1,000	0,997	0,986	0,675	0
9,2	3	0,45	2,3	1,000	0,996	0,985	0,706	0
9,3	3	0,45	2,3	1,000	0,995	0,980	0,692	0
media				1,000	0,996	0,986	0,690	0
10,1	5	0,15	0,3	0,980	0,880	0,671	0,381	0
10,2	5	0,15	0,3	0,982	0,888	0,686	0,400	0
10,3	5	0,15	0,3	0,978	0,868	0,665	0,382	0
Media				0,981	0,884	0,678	0,391	0
11,1	5	0,15	0,6	1,000	0,966	0,638	0,379	0
11,2	5	0,15	0,6	1,000	0,967	0,640	0,385	0
11,3	5	0,15	0,6	1,000	0,939	0,414	0,000	0
media				1,000	0,966	0,639	0,382	0
12,1	5	0,15	2,3	0,969	0,781	0,524	0,360	0
12,2	5	0,15	2,3	0,950	0,761	0,514	0,326	0
12,3	5	0,30	2,3	0,968	0,744	0,491	0,330	0
media				0,963	0,762	0,510	0,339	0
13,1	5	0,30	0,3	1,000	0,965	0,702	0,404	0
13,2	5	0,30	0,3	1,000	0,952	0,691	0,395	0
13,3	5	0,30	0,3		0,960	0,690	0,396	0
Media				1,000	0,958	0,697	0,400	0
14,1	5	0,30	0,6	0,971	0,876	0,699	0,446	0
14,2	5	0,30	0,6	0,975	0,870	0,667	0,405	0

Tabla 4: Pasante acumulativo (valores promedio) (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
14,3	5	0,30	0,6	0,977	0,874	0,678	0,450	0
media				0,974	0,874	0,681	0,434	0
15,1	5	0,45	2,3	1,000	0,899	0,676	0,379	0
15,2	5	0,45	2,3	1,000	0,901	0,635	0,319	0
15,3	5	0,45	2,3	1,000	0,922	0,688	0,415	0
media				1,000	0,900	0,656	0,349	0
16,1	5	0,45	0,3	1,000	0,958	0,862	0,754	0
16,2	5	0,45	0,3	1,000	0,966	0,880	0,751	0
16,3	5	0,45	0,3	1,000	0,961	0,876	0,755	0
media				1,000	0,962	0,871	0,752	0
17,1	5	0,45	0,6	0,990	0,969	0,891	0,610	0
17,2	5	0,45	0,6	0,995	0,967	0,893	0,636	0
17,3	5	0,45	0,6	0,997	0,965	0,881	0,615	0
media				0,993	0,968	0,892	0,623	0
18,1	6	0,15	0,6	1,000	0,990	0,991	0,880	0
18,2	6	0,15	0,6	1,000	0,991	0,878	0,517	0
18,3	6	0,15	0,6	1,000	0,985	0,866	0,523	0
media				1,000	0,988	0,872	0,520	0
19,1	6	0,15	0,3	1,000	0,866	0,520	0,261	0
19,2	6	0,15	0,3	1,000	0,870	0,535	0,279	0
19,2	6	0,15	0,3	1,000	0,864	0,524	0,259	0
media				1,000	0,868	0,527	0,270	0
20,1	6	0,15	0,6	1,000	0,896	0,568	0,314	0
20,2	6	0,15	0,6	1,000	0,878	0,562	0,261	0
20,3	6	0,15	0,6	1,000	0,857	0,400	0,000	0
media				1,000	0,887	0,565	0,288	0
21,1	6	0,30	2,3	0,998	0,800	0,496	0,299	0
21,2	6	0,30	2,3	0,995	0,747	0,502	0,228	0
21,3	6	0,30	2,3	0,995	0,796	0,477	0,265	0
media				0,996	0,774	0,499	0,264	0
22,1	6	0,30	0,3	1,000	0,703	0,369	0,188	0
22,2	6	0,30	0,3	1,000	0,754	0,400	0,223	0
22,3	6	0,30	0,3	1,000	0,729	0,395	0,207	0
media				1,000	0,729	0,384	0,205	0
23,1	6	0,30	0,6	1,000	0,967	0,730	0,460	0
23,2	6	0,30	0,6	1,000	0,972	0,668	0,338	0
23,3	6	0,30	0,6	1,000	0,973	0,727	0,461	0
media				1,000	0,969	0,699	0,399	0

Tabla 4: Pasante acumulativo (valores promedio) (continuación).

No exp	S (mm)	E (j/kg)	Q (t/h)	4	3	2	1	0
24,1	6	0,45	2,3	0,965	0,817	0,597	0,333	0
24,2	6	0,45	2,3	0,988	0,827	0,593	0,363	0
24,3	6	0,45	2,3	0,975	0,823	0,600	0,330	0
media				0,977	0,822	0,595	0,348	0
25,1	6	0,45	0,3	1,000	0,986	0,886	0,545	0
25,2	6	0,45	0,3	1,000	0,988	0,878	0,503	0
25,3	6	0,45		1,000	0,984	0,884	0,536	0
media				1,000	0,987	0,882	0,524	0
26,1	6	0,45	0,6	1,000	0,967	0,865	0,509	0
26,2	6	0,45	0,6	1,000	0,974	0,889	0,511	0
26,3	6	0,45	0,6	1,000	0,952	0,863	0,508	0
media				1,000	0,970	0,877	0,510	0
27,1	6	0,45	2,3	0,964	0,792	0,556	0,351	0
27,2	6	0,45	2,3	0,976	0,805	0,580	0,371	0
27,3	6	0,45	2,3	0,960	0,766	0,541	0,347	0
media				0,970	0,799	0,568	0,361	0