



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**Determinación de la cinética de molienda de una pulpa de
barbotina considerando variación en la concentración de
sólidos.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
INGENIERA EN MINAS**

Autora

MARÍA AUXILIADORA ESPINOZA MONCAYO

Director

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2019

DEDICATORIA

A mi familia principalmente a mis padres María Elena y Rubén junto a mis hermanos: Fabiola, María Elena, Adriana y Rubén, que me han dado fuerza y apoyo incondicional.

De igual manera a Rafael y a mis amigos, que siempre me han alentado para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Siempre a Dios por ser mi luz y guía en este camino.

A la Universidad del Azuay y a sus docentes que fueron parte de mi formación académica, en especial a mi Director de Tesis Ing. Fernando Valencia quien fue paciente y siempre supo guiarme para la realización de este trabajo.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
INDICE DE CONTENIDOS.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	v
INDICE DE TABLAS.....	vii
INDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
 INTRODUCCIÓN.....	 1
 CAPITULO I: FUNDAMENTOS TEÒRICOS.....	 2
1.1. Tipos de molinos	2
1.2. Fuerzas dominantes en la trituración o molienda	3
1.2.1. Molienda convencional	4
1.2.2. Molienda no convencional	4
1.3. Molino de bolas	5
1.3.1. Movimiento de la carga en los molinos	6
1.4. Elementos importantes en la molienda.....	7
1.4.1. Velocidad de rotación	8
1.4.2. Velocidad crítica	9
1.4.3. Fracción de llenado	10
1.4.4. Tiempo de residencia del material	12
1.4.5. Relaciones entre los elementos variables	13
1.4.6. Consumo energético.....	14
1.5. Cinética de fractura.....	15

1.6. Molienda húmeda	17
1.7. Barbotina	20
CAPITULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	22
2.1. Composición de la barbotina	22
2.1.1. Caracterización mineralógica	23
2.2. Preparación de la muestra	25
2.2.1. Condiciones de operación del molino	29
2.2.2. Carga moledora	31
2.3. Factores de diseño	32
2.3.1. Preparación de la pulpa	32
CAPITULO III: RESULTADOS	36
3.1. Resultados del granulómetro láser	38
3.2. Análisis de los resultados	45
3.3. Análisis comparativos	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	61

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Tipo de molinos.....	2
Figura 1.2: Molino de bolas para cerámica.....	6
Figura 1.3: Movimiento en un molino de bolas a una velocidad normal.....	7
Figura 1.4: Esquema del efecto del impacto de las bolas en: a) Partícula frágil. b) Partícula dúctil.	10
Figura 2.1: Equipo de fluorescencia de Rayos X (FRX) Bruker S8 Tiger	23
Figura 2.2: Tendido de la muestra.....	25
Figura 2.3: Material Triturado.....	25
Figura 2.4: Trituradora de Mandíbulas	25
Figura 2.5: Método de cuarteo muestra de barbotina.....	26
Figura 2.6: Muestra de barbotina 1kg	26
Figura 2.7: Tamizado de la muestra.....	27
Figura 2.8: Curva Granulométrica de Alimento.	28
Figura 2.9: Molino de Bolas Cerámico.....	29
Figura 2.10: Diámetro de Bolas de alúmina.....	31
Figura 2.11: Volumen de agua necesario para la pulpa	33
Figura 2.12: Pesaje de la muestra.....	34
Figura 2.13: Pulpa homogenizada (550 cm ³).....	34
Figura 2.14: Pulpa con carga moledora.....	35
Figura 2.15: Molienda de barbotina	35
Figura 3.1: Difracción láser.....	37
Figura 3.2: Granulómetro Materizer 3000	37
Figura 3.3: Gráfica cinética de molienda 5 minutos	46
Figura 3.4: DTP a los 5 minutos con diferentes concentraciones de sólidos.....	47
Figura 3.5: Gráfica cinética de molienda 10 minutos	47
Figura 3.6: DTP a los 10 minutos con diferentes concentraciones de sólidos.....	48
Figura 3.7: Gráfica cinética de molienda 15 minutos	49
Figura 3.8: DTP a los 15 minutos con diferentes concentraciones de sólidos.....	50
Figura 3.9: Gráfica cinética de molienda 20 minutos	50
Figura 3.10: DTP a los 20 minutos con diferentes concentraciones de sólidos.....	51
Figura 3.11: Gráfica cinética de molienda en diferentes tiempos.....	52
Figura 3.12: Gráfica líneas de tendencia de las pulpas	53

Figura 3.13: Gráfica cinética de molienda 60% sólidos en pulpa.....	53
Figura 3.14: Cinética de molienda D80 vs Tiempo	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Escalones de la fragmentación.....	5
Tabla 1.2: Carga de molino	11
Tabla 1.3: Pulpas definición de parámetrosFuente: (Andrea, 2015).....	20
Tabla 2.1: Composición de la Barbotina.....	22
Tabla 2.2: Composición mineralógica.	24
Tabla 2.3: Distribucion granulométrica del alimento	27
Tabla 2.4: Especificaciones del Molino	29
Tabla 2.5: Factores operacionales del molino.....	30
Tabla 2.6: Factores de carga del molino	31
Tabla 2.7: Distribución de la carga moledora	32
Tabla 2.8: Matriz de variables.....	32
Tabla 2.9: Distribución de la concentración de sólidos en la pulpa.....	33
Tabla 3.1: Resultados del Granulómetro con 35% sólidos en pulpa.....	38
Tabla 3.2: Resultados del Granulómetro con 40% sólidos en pulpa.....	39
Tabla 3.3: Resultados del Granulómetro con 45% sólidos en pulpa.....	40
Tabla 3.4: Resultados del Granulómetro con 50% sólidos en pulpa.....	41
Tabla 3.5: Resultados del Granulómetro con 55% sólidos en pulpa.....	42
Tabla 3.6: Resultados del Granulómetro con 60% sólidos en pulpa.....	43
Tabla 3.7: Resultados del Granulómetro con 65% sólidos en pulpa.....	44
Tabla 3.8: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 5 minutos de molienda.....	46
Tabla 3.9: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 10 minutos de molienda.....	48
Tabla 3.10: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 15 minutos de molienda.....	49
Tabla 3.11: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 20 minutos de molienda.....	51
Tabla 3.12: Resultados obtenidos modelo Rosin Rammler diferentes tiempos.....	52

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Medición del diámetro de las bolas	61
Anexo 2: Granulometría por tamiz	61
Anexo 3: Tabla de pasante acumulado a diferentes tiempos de molienda.....	62
Anexo 4: Tabla para la traficación del modelo Rosin Rambler a diferentes tiempos de molienda.....	70
Anexo 5: Gráficas DTP modelo Rosin Rambler.....	78

DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA DE UNA PULPA DE BARBOTINA CONSIDERANDO VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS

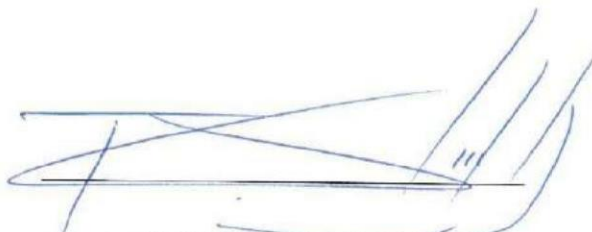
RESUMEN

El presente estudio trata de determinar la cinética de molienda de Barbotina con diferentes concentraciones de sólido en la pulpa, en diferentes tiempos de molienda para analizar el comportamiento de la fractura de la partícula.

La cinética de reducción de tamaño se graficó en curvas d_{80} vs tiempo, de esta manera se consiguió determinar la concentración de sólidos en pulpa, conveniente para un proceso de conminución competente.

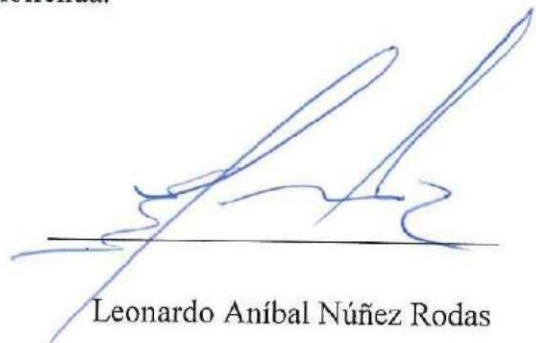
Se evidenció que la concentración de sólidos de la suspensión podría aumentar el rendimiento de la molienda, al disminuir el tamaño de partícula y consiguiendo una molienda adecuada para nuestro material evitando consumo energético innecesario.

Palabras clave: cinética, barbotina, pulpa, molienda.



Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



María Auxiliadora Espinoza Moncayo

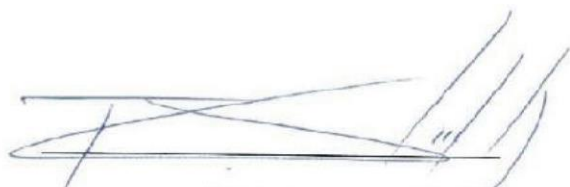
Autor

DETERMINATION OF THE MILLING KINETICS OF A BARBOTINE PULP CONSIDERING THE VARIATION IN THE CONCENTRATION OF SOLIDS

ABSTRACT

This study tries to determine the milling kinetics of Barbotine with different solid concentrations in the pulp and different milling times to analyze the behavior of the fractures of particles. The kinetics of size reduction were plotted in d80 vs. time curves. This enabled the measure in the concentration of solids in pulp suitable for a competent comminution process. It was evidenced that the solids concentration in the suspension could increase the grinding performance by decreasing the particle size and getting a suitable mill for the material, avoiding unnecessary energy consumption.

Keywords: kinetics, barbotine, pulp , milling.



Fernando Tulio Valencia Guaricla

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Anibal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



María Auxiliadora Espinoza Moncayo

Autor



UNIVERSIDAD DE
AZUAY
Dpto. Idioma^e



Translated by
Ing. Paul Arpi

María Auxiliadora Espinoza Moncayo

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela. Msc.

Junio 2019

INTRODUCCIÓN

El proceso de molienda de minerales en el país es un proceso muy importante, en muchas plantas este no es satisfactorio, generando gasto excesivo por el consumo energético, tiempo y obteniendo una baja productividad.

El motivo por el cual se desarrolló este trabajo es para analizar el proceso de la cinética de molienda al obtener una relación sólido-líquido de la pulpa eficiente, con un mayor control de tamaño y tiempo.

El proyecto se enfocará a la optimización de parámetros en la molienda, basándose en la concentración de sólidos de una pulpa de barbotina, de tal manera que esta pueda ser ajustada para diferentes granulometrías y tamaños de corte deseados.

Se pretende tomar muestras del mineral, a diferentes concentraciones de sólido, experimentar la molienda determinando la cinética de reducción de tamaño lo que se puede graficar en curvas d80 vs tiempo, de esta manera determinar cuál es la fracción de sólidos que permite un mejor tiempo de molienda lo que significaría menor consumo energético.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEÒRICOS

La molienda es una operación unitaria, que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado. Los métodos de reducción más empleados en las máquinas de molienda son compresión, impacto, frotamiento de cizalla y cortado (Alcántara Valladares , 2008).

Como describió (Austin & Concha, 1994) la reducción de tamaño de sólidos se lleva a cabo por distintos métodos y con fines diferentes. Los grandes bloques se desintegran hasta un tamaño manejable. La conminución del material aumenta la reactividad de los sólidos, permite la separación por métodos mecánicos de ingredientes no deseados.

Los productos obtenidos por molienda son más pequeños y de forma más regular que los surgidos de trituración. Generalmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1" (1" = 2.54 cm) siendo el grado de desintegración mayor al de trituración (Facultad de Ingenieria, 2012).

1.1. Tipos de molinos

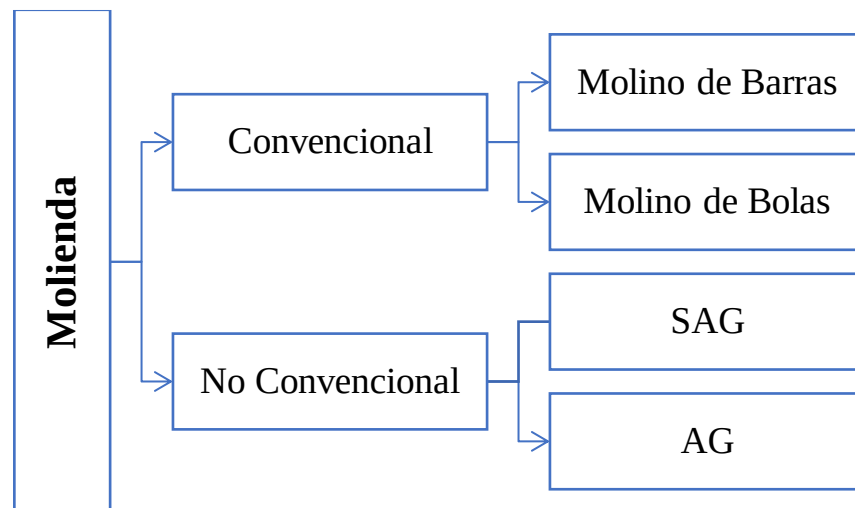


Figura 1.1: Tipo de molinos

1.2. Fuerzas dominantes en la trituración o molienda

Como hace referencia (Andrea, 2015) las máquinas utilizan una fuerza u otra de forma preferente y así según sea esta se considera el equipo y su función. Los materiales y las sustancias para fragmentar se caracterizan para esta función, entre otras, mediante las propiedades siguientes:

Molturabilidad: Aptitud o facilidad para la fragmentación, normalmente relacionada con la energía necesaria o con la dificultad para su fragmentación.

Abrasividad: Carácter más o menos agresivo en cuanto al desgaste de los equipos y de los materiales entre si (abrasión o atricción). Se mide, normalmente, por el contenido en sílice (SiO_2).

Pegajosidad: Cualidad de adherencia entre los materiales, que es función, normalmente, de la humedad y que se identifica también como pastosidad. No tiene relación directa con la viscosidad ya que esta última es una cualidad mensurable mediante ensayos normalizados y la pegajosidad es un concepto indicándose normalmente que aumenta o disminuye o afecta más o menos al proceso.

Las fuerzas que participan, normalmente, en un proceso de fragmentación son:

- Compresión.
- Cizallamiento.
- Percusión o impacto.
- Abrasión o atricción.

Según el predominio de una fuerza u otra en el equipo se considera:

Compresión discontinua: Cada bloque de mineral se ve sometido a compresión varias veces. Se utilizan máquinas como las trituradoras de mandíbulas, trituradoras giratorias y cono triturador. Este tipo de maquinaria es de carácter universal (se puede utilizar con cualquier mineral).

Compresión continua: El bloque sufre una única compresión variando la intensidad. Se utilizan trituradoras o molinos de cilindros o de rodillos se emplean para el tratamiento de minerales poco abrasivos y no muy duros como el carbón.

Choque impacto o percusión: Cada bloque recibe una energía elevada de forma brusca (choque). Se utilizan las trituradoras de impactos, de martillos y de caída libre o cascada en general no son aptas para materiales muy abrasivos (Andrea, 2015).

Choque: Esta componente adquiere importancia en los molinos cuando estos trabajan a velocidades altas, próximas a la velocidad crítica, y las bolas describen trayectorias parabólicas yendo a golpear en la zona del pie de carga.

Flexión: La fuerza que predomina es la flexión y el cizallamiento con un efecto de desgarro y generalmente acompañado por una compresión adicional. Se utilizan trituradoras de cilindros dentados o acanalados, trituradores de cilindro y placa. Son adecuados para materiales tenaces, pero poco abrasivos.

Mixto: El conjunto de fuerzas predominante es una mezcla de compresión, fricción e impacto. Se utilizan molinos de barras, bolas, SAG autógenos y de guijarros que tienen una molienda entre el propio mineral (Aguilar Titi, 2017) .

1.2.1. Molienda convencional

Molino de bolas o de guijarros lleva a cabo la mayor parte de la reducción por impacto. Cuando éste gira sobre su propio eje, provoca que las bolas caigan en cascada desde la altura máxima del molino. Esta acción causa un golpeteo sobre el material a moler; además de un buen mezclado del material. De esta manera la molienda es uniforme (Alcántara Valladares , 2008).

Molino de barras: Este equipo tiene en su interior barras de acero que son los elementos de molienda. El molino gira con el material y este se va moliendo por la acción del movimiento de las barras que se encuentran libres y que caen sobre el mineral.

1.2.2. Molienda no convencional

Molienda Autógena (AG): Cuando el mineral se fragmenta en el interior del molino sin ayuda de otro tipo de medios moledores que no sea el propio mineral. El mineral será Todo-Uno de mina o material previamente triturado en fragmentos gruesos.
Molienda Semi Autógena (SAG): Se provocará la fragmentación del mineral por el efecto combinado del propio mineral y de un pequeño porcentaje de bolas de acero.

Se diferencia en la tabla las denominaciones correspondientes a proceso, etapa y escalón.

Tabla 1.1: Escalones de la fragmentación

PROCESO	ETAPA	ESCALON	HUMEDAD	TIPO DE MOLIENDA
Fragmentación (Reducción de un bloque a tamaños menores)	Trituración (Etapa de la fragmentación. para tamaños gruesos)	Primaria Secundaria Terciaria	Seco o Húmedo	Trituradoras (Mandíbulas, conos, rodillos, martillos, etc.)
	Molienda (Etapa de la fragmentación. para tamaños finos)	Gruesa Media Fina Ultrafina	Seco o Húmedo	Molinos (Barras, bolas, SAG, autógenos y de guijarros)

1.3. Molino de bolas

Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su eje y en su interior existe una mezcla del material a moler junto con cuerpos moledores. Según sea la característica de estos cuerpos molturadores, cilindros metálicos (barras metálicas con una longitud muy superior al diámetro), bolas metálicas o de fundición, trozos gruesos del propio mineral a moler, compuestos de sílice o mezcla de componentes, así se puede denominar el molino (Andrea, 2015). Está transformando partículas grandes a partículas más pequeñas. Las bolas se mueven haciendo el efecto “de cascada”, rompiendo el material que se encuentra en la cámara de molienda mediante fricción percusión (Facultad de Ingeniería, 2012).

La acción principal en el interior de un molino es la abrasión o atrición que se produce porque al girar el cilindro, la masa que está en su interior se desplaza sobre si misma produciendo un gran roce entre las partículas y de éstas con los elementos molturadores. No es despreciable el efecto de impacto, función de la velocidad de rotación, de los cuerpos cuando son lanzados o por su caída en cascada o catarata por el efecto de giro y desplazamiento de masas. En general para producir partículas finas prepondera el efecto abrasivo y para tamaños mayores, el impacto empieza a tener relevancia, en función del tamaño de los cuerpos moledores. Los molinos pueden trabajar de forma discontinua, cerrando el equipo y haciéndolo girar por un tiempo determinado para después vaciar el contenido y separar el material molido de los cuerpos molturadores (bolas, guijarros, etc.), pero en minería y canteras el trabajo es, de forma general, en

continuo. Esta forma de trabajo, en continuo, hace que la granulometría producida siga un proceso estadístico donde el tiempo de residencia dentro del molino afecta a la granulometría. El cilindro gira sobre ejes o extremos huecos (Andrea, 2015).

El alimento ingresa al molino lo que raramente es de un solo tamaño y normalmente tiene una distribución granulométrica completa (Austin & Concha, 1994) , esta alimentación ingresa por un extremo del cilindro, es molido por fricción y percusión de los elementos moledores y sale por el extremo opuesto con un tamaño menor. Los cuerpos de molienda son grandes y pesados con relación a las partículas de mena.

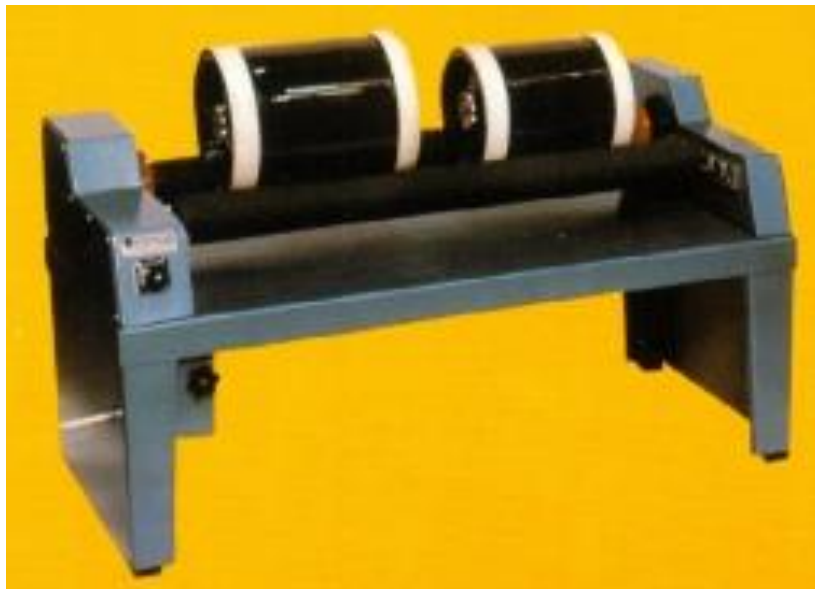


Figura 1.2: Molino de bolas para cerámica

Fuente: (Vicentiz, s.f.)

1.3.1. Movimiento de la carga en los molinos

Una característica distintiva de los molinos rotatorios es el uso de cuerpos de molienda que son grandes y pesados con relación a las partículas de mena, pero pequeñas con relación al volumen del molino, y que ocupan menos de la mitad del volumen del molino.

Cuando el molino gira, los medios de molienda son elevados en el lado ascendente del molino cayendo en cascada y en catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos, alrededor de una zona muerta donde ocurre poco movimiento hasta el “pie” de la carga del molino (Alcántara Valladares , 2008).

El diámetro del molino es uno de los factores que más influye sobre la capacidad del molino, determina la velocidad crítica de rotación del molino; mientras que la razón

L/D_m (largo de molino/diámetro interior del molino) controlan el transporte de mineral y por ende los tiempos de residencia (Austin & Concha, 1994).

El movimiento de cascada produce la acción normal de fractura de minerales dentro del molino y el número promedio de bolas que suben y voltean por revolución del molino y por unidad de volumen es constante independiente del diámetro del molino, pero el número promedio de impactos que una bola efectúa cuando cae en cascada en la carga del molino es proporcional a D_i . Sin embargo, a una determinada fracción de velocidad crítica el número de revoluciones del molino por unidad de tiempo es proporcional a $1/\sqrt{D_m}$ (Austin & Concha, 1994).

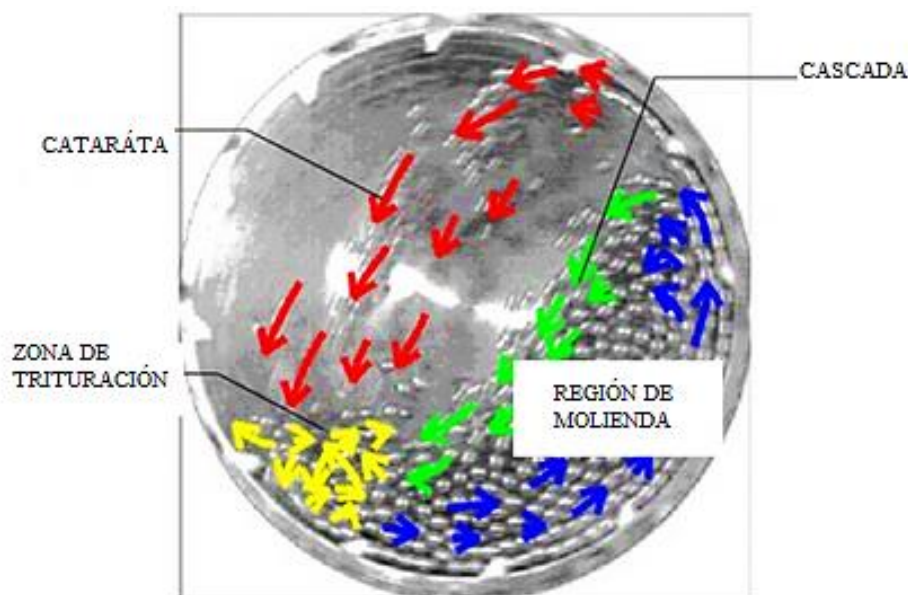


Figura 1.3: Movimiento en un molino de bolas a una velocidad normal.

1.4. Elementos importantes en la molienda

Dentro de las moliendas industriales más usadas una de las más populares es la molienda con bolas, la cual consiste en introducir el material en un cilindro rotatorio y cargarlo con bolas para que se vaya reduciendo de tamaño por acción del movimiento de las bolas en el interior. Esta operación depende de condiciones operacionales tales como las dimensiones del molino, su velocidad de giro, la fracción de llenado y tamaño de bolas, el tamaño de partícula del alimento y del producto que influyen en la molienda de los materiales (Mori, Mio, Kano, & Saito, 2004).

Estos son:

1.4.1. Velocidad de rotación

La velocidad de rotación del molino es un parámetro de importancia tanto en el consumo como en la operación de molienda que realiza. Este giro del molino sobre su eje produce el desplazamiento de la carga, hasta que el par resistente por el peso de la carga iguala al par motor transmitido, y produce el movimiento relativo de los elementos que la componen entre sí, produciéndose la fricción, choque, etc., que produce la molienda del mineral y el desgaste de los elementos molturadores que deben ser repuestos periódicamente (Andrea, 2015).

A una velocidad de rotación baja, las bolas presentan una acción de volteo relativamente suave y en efecto, existe una tendencia de la masa de bolas a ser levantada por la acción de rotación de las paredes del molino y a deslizarse hacia atrás como una masa compacta. A medida que se aumenta la velocidad, la acción de volteo aumenta y el lecho aparece como una superficie inclinada de la cual están emergiendo bolas rodando hacia abajo y reentrando en la superficie. El lecho de bolas se expande permitiendo a las partículas o a la pulpa penetrar entre las bolas. La serie de colisiones con otras bolas, mientras una bola da tumbos, es el método principal de transferir esfuerzos a las partículas. El lecho está en un estado de cascada. A una velocidad de rotación más alta una cantidad mayor de las bolas son lanzadas de la superficie a lo alto del molino, formando una catarata de bola (Austin & Concha, 1994).

La potencia requerida para mover el molino pasa a través de un máximo cuando la velocidad de rotación aumenta, correspondiendo a un máximo en la velocidad de elevamiento de las bolas y en el promedio de la altura de elevación. Para el caso de ruptura de partículas de tamaño normal, tales que al no ser demasiado grandes son completamente fracturadas, parece que el número mayor de impactos de bola-polvo-bola causados por el rodar en cascada es lo óptimo para la ruptura. Por consiguiente, las velocidades máximas de fractura se obtienen aproximadamente a la velocidad de máximo consumo de potencia, normalmente cerca de un 75% de la velocidad crítica, dependiendo de la carga de bolas y del tipo de barras levantadoras (Porrás Alzate, 2016).

1.4.2. Velocidad crítica

Se define como velocidad crítica del molino a la velocidad de rotación a la cual las bolas empiezan a centrifugar en las paredes del molino y no son proyectadas en el interior del molino. Haciendo un balance entre la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga sobre una bola en la pared del molino, la velocidad crítica resulta ser:

$$\text{Velocidad crítica} = \frac{76.6}{\sqrt{D - d}}$$

RMP; D, d en pies

$$= \frac{42.2}{\sqrt{D - d}}$$

RMP; D, d en metros

Donde D es el diámetro interno del molino y d es el diámetro máximo de las bolas. Es razonable esperar que el movimiento de volteo de la carga en un molino dependerá de la fracción de velocidad crítica a la cual el molino opera, de tal manera que la velocidad de rotación de éste normalmente se especifica por medio de ϕ_c , la fracción de velocidad crítica (Austin & Concha, 1994).

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda (Facultad de Ingeniería, 2012).

En otras palabras, la velocidad crítica es la velocidad del molino a la que la fuerza centrífuga mantiene todo el material en las paredes del molino y evita la acción de caída en catarata y cascada que se requiere para la molienda. El molino, entonces, deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica (Arriaga, 2013).

La fracción de velocidad crítica a la cual estos procesos ocurren depende de las condiciones de llenado y del tipo de medio moledores estos pueden llevar una fracción de las bolas hacia la formación de catarata, mientras que lánas de ondas o barras levantadoras dentadas requieren velocidades de rotación más elevadas para dar el mismo grado de catarata. El desgaste de las barras levantadoras puede cambiar el desempeño del molino con el tiempo (Austin & Concha, 1994).

1.4.3. Fracción de llenado

Las partículas frágiles, como son los cerámicos y metales frágiles, se reducen rápidamente en polvos finos y ultrafinos (figura 1.4 a.) Las partículas individuales dúctiles no se fracturan, sino que se deforman, de tal modo que experimentan un cambio de forma con poco o nada de cambio en su masa (figura 1.4 b.). Las partículas grandes de materiales frágiles se rompen en fragmentos, mientras que las partículas dúctiles se deforman, adquiriendo primero la forma de hojuela y después la forma de escama (Ramirez, 2006).

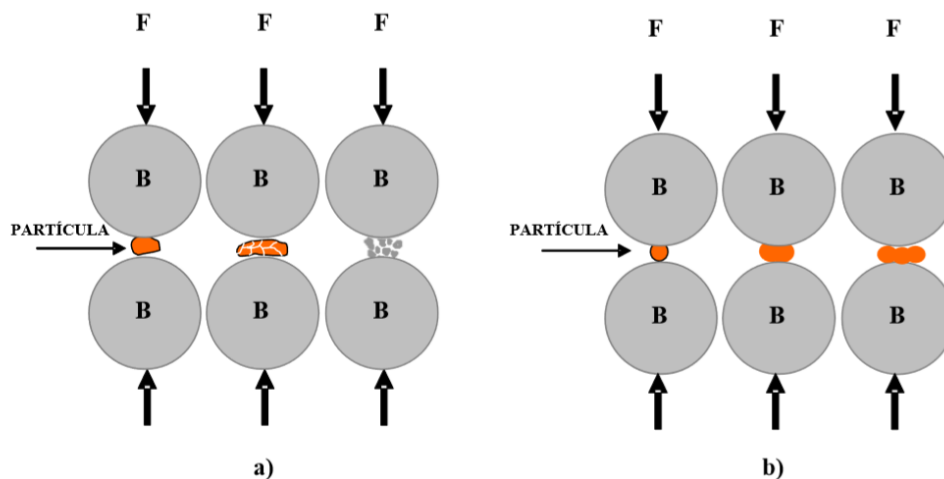


Figura 1.4: Esquema del efecto del impacto de las bolas en: a) Partícula frágil. b) Partícula dúctil.

Fuente: (Ramirez, 2006)

Generalmente, el tamaño y la densidad del medio de molienda se determinan por la deformación y la resistencia a la fractura de los polvos a moler. Para moler materiales frágiles, la resistencia a la fractura es el único criterio de selección de los medios de molienda. Los medios de molienda para partículas largas y densas deben ser grandes y resistentes, mientras que los medios de molienda de diámetro más pequeños son usados para molienda fina. Para la molienda de materiales resistentes y finos, se recomiendan medios de molienda duros, como el carburo de tungsteno. A menudo, se debe de realizar una selección de las bolas en tamaño y tipo de material (Ramirez, 2006).

El volumen o nivel de la carga de bolas está relacionado con la dureza del mineral y tonelaje de alimentación que puede tratar el molino para un mismo grado de molienda. Por ejemplo, un aumento del tonelaje a tratar involucra un menor tiempo de residencia, lo que se compensa con una mayor carga de bolas, a fin de aumentar la probabilidad

de contacto entre bolas y mineral. Lo mismo sucede frente a un mineral que presenta una mayor dureza (Alcántara Valladares , 2008).

Tamaños de alimento muy grande en comparación con la carga de cuerpos moledores, producen fenómenos de abrasión y astillamiento antes de que ocurra fractura, lo que hace que se pierda energía en un proceso ineficiente y para tamaños de alimentación muy pequeña comparada con los cuerpos moledores genera pérdida de energía por la baja posibilidad de captura entre bolas (Austin & Concha, 1994).

Representando la variación de la potencia consumida por el molino en función del grado de llenado se observa que tiene un máximo en el entorno del 50-55% de utilización del volumen interno. A partir de este valor disminuye la potencia demandada por el molino hasta hacerse nula (Andrea, 2015).

La acción de volteo de la carga y las velocidades de ruptura dependerán claramente de qué proporción del volumen del molino está lleno con bolas. La medida más precisa de esto es la fracción de volumen ocupado por las bolas. Sin embargo, en ensayos en molinos de gran tamaño, a menudo no es posible determinar el peso de las bolas, y por lo tanto, tampoco es posible determinar su volumen, pero sí es posible parar el molino y medir la altura desde la superficie de las bolas a la parte más alta del molino, lo que permite la estimación de la fracción del volumen que está lleno con el lecho de las bolas (Austin & Concha, 1994).

Tabla 1.2: Carga de molino

Elemento	% huecos	Peso de los elementos molturadores	Observaciones
Bolas	40	$P_{bolas} = V_{mol} \cdot 0,45 \cdot 0,6 \cdot \delta_b$	δ_b : Densidad de las bolas, material molturador, para el acero 7,85 kg/dm ³
Barras	20	$P_{barras} = V_{mol} \cdot 0,45 \cdot 0,8 \cdot \delta_b$	δ_b : Densidad de las barras
Carga del molino	0%	$P_{carga} = V_{mol} \cdot 0,45 \cdot (0,6 \cdot \delta_b + 0,4 \cdot \delta_m)$ $= V_{mol} \cdot 0,45 \cdot (0,8 \cdot \delta_b + 0,2 \cdot \delta_m)$	Molino de bolas Molino de barras δ_m : Densidad del mineral

Fuente: (Andrea, 2015)

Para convertir el volumen del lecho en la masa total de las bolas presentes, o viceversa, es necesario conocer la densidad aparente de la carga del lecho de bolas. La porosidad del lecho varía ligeramente dependiendo de la mezcla de tamaños de bolas, el relleno

de polvo, etc., sin embargo, se define una porosidad nominal constante para todos los cálculos. Diferentes industrias y fabricantes usan valores levemente distintos de porosidad. Nosotros usaremos una porosidad nominal de lecho de 0.4, el que da un valor de J de:

$$J = \left(\frac{\frac{\text{masa de bolas}}{\text{densidad de bolas}}}{\text{volumen del molino}} \right) * \left(\frac{1}{0.6} \right)$$

Este grado de llenado, en la práctica está comprendido entre el 40% y el 55%, habitualmente el 45%, y lo forman bolas o barras (elementos molturadores) y el propio mineral a moler.

Por otro lado, los diámetros de las bolas, debe ser tal que provoque fracturas en la región normal, y esto depende estrechamente de la relación entre tamaño de la partícula y el tamaño de bola (Austin & Concha, 1994), puesto que mientras más grandes sean las partículas con respecto al diámetro de bola, menores serán las velocidades de fractura específica; sin embargo, a medida que las partículas llegan al tamaño de la bola, los trozos de material empezarán a actuar como un medio de molienda haciendo que las partículas sufran astillamiento mientras esperan un impacto fuerte que las fracture (Porras Alzate, 2016).

El consumo de bolas varía considerablemente con su aplicación y depende de factores tales como la dureza del material, el tamaño de la alimentación y del producto deseado (Austin & Concha, 1994).

Cuando las partículas se reducen con respecto al tamaño de bola los finos pueden acumularse y provocar un revestimiento en las bolas causando que éstas tengan un amortiguamiento provocando una reducción en el impacto de fractura.

Los elementos moledores no tienen todo el mismo tamaño, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de estos en tamaños inferiores.

1.4.4. Tiempo de residencia del material

El talón de Aquiles de las máquinas de trituración y molienda es su alto consumo de energía. El equipamiento disponible para la trituración y molienda de minerales, carece de un principio organizador que le permita aprovechar al máximo la energía suministrada para el rompimiento de las partículas minerales. En la molienda, por

ejemplo, la energía de rompimiento se imprime al material en forma desmedida, el grado de liberación necesario se alcanza a costa de una alta remolienda de uno o varios de los minerales participantes, de ahí su baja eficiencia (Velazquez Coello & Tijonov, 2001).

El tiempo de residencia viene afectado por el tamaño del cilindro, volumen útil, y el caudal circulado por lo que la variación del caudal es una forma de regulación granulométrica y de adaptación del molino a necesidades cambiantes. Dentro de un molino, tanto de barras como de bolas, se pueden definir diferentes zonas según el grado de llenado y la velocidad de rotación que son dos elementos fundamentales en la operación de molienda. Junto con las anteriores variables, adquiere una importancia relevante el grado de humedad del material a moler que condiciona el tipo de molienda y los resultados de ésta (Andrea, 2015).

A mayor tiempo de molienda más finas serán las partículas, y a menor tiempo no se molerán completamente por lo que existiría material relativamente grueso lo que se debe evitar:

Submolienda: Una submolienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso el cual puede resultar poco útil para el proceso productivo.

Sobremolienda: Reduce de tamaño innecesariamente de los finos que llegaron a una granulometría ya desea. Además, se pierde mucha energía, que encarece el proceso.

1.4.5. Relaciones entre los elementos variables

El diámetro del molino, su velocidad, y el diámetro de los elementos moledores son los elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplean elementos moledores de distintos tamaños, las relaciones entre los elementos variables son (Facultad de Ingeniería, 2012):

- A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión).
- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

1.4.6. Consumo energético

Desde los primeros años de aplicación industrial de los procesos de conminución al campo del beneficio de minerales, se pudo constatar la importancia del consumo de energía específico como parámetro controlante de la reducción de tamaño y granulometría final del producto en cada etapa de conminución.

En términos generales, la energía consumida en los procesos de trituración y molienda se encuentra estrechamente ligada al grado de reducción de tamaño alcanzado por las partículas en la correspondiente etapa de conminución, incluso a pesar de que la eficiencia energética de estos procesos rara vez supera el 10% del total de energía mecánica suministrada a los mismos.

Austin (1964) citado en (Velazquez Coello & Tijonov, 2001) establece que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera 3 % de toda la energía consumida por el molino; por su parte, Beke (1964) determina que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no sobrepasa 0,6 %. Con independencia de la diferencia en los resultados de ambos, debemos estar de acuerdo con que la energía que se consume en el rompimiento la partícula mineral es sumamente pequeña. Las principales pérdidas de energía están dadas, en forma de calor y ruido, en las transmisiones del accionamiento del molino. Las restantes tienen lugar durante la fricción entre partículas sin su consecuente rompimiento.

Los investigadores Rose y Sullivan demostraron que en las etapas de trituración y molienda convencional la energía mecánica transferida a las partículas de un mineral supera entre 100 y 1000 veces el consumo teórico de energía requerida para crear nuevas superficies. Así, menos del 1% del total de la energía suministrada al equipo de conminución es efectivamente empleada en la fragmentación de las partículas (Rodríguez Álvarez, 2010).

Parte de la energía consumida en el proceso de molienda serán citadas a continuación:

- Deformaciones elásticas de las partículas antes de romperse.
- Deformaciones plásticas de las partículas, que pueden originar posteriormente la fragmentación de las mismas.
- Fricción entre las partículas.
- Vencimiento de la inercia de las piezas de la máquina.

- Deformaciones elásticas de la máquina.
- Disipamiento de la energía en forma de ruido, calor o vibraciones en la instalación.
- Generación de electricidad.
- Roce entre partículas y piezas de la máquina.
- Pérdidas de eficiencia en la transmisión de energía eléctrica y mecánica

1.5. Cinética de fractura

Fred Bond, el investigador que mayores aportes hizo en este 25 aspecto durante los años sesenta, define la conminución como “El proceso en el cual la energía cinética mecánica de una máquina es transferida a un material produciendo en él fricciones internas y calor que originan su ruptura”.

La velocidad a la cual las partículas se fracturan en un equipo de molienda depende del tamaño de partículas y otras variables. A diferencia de un reactor químico simple que convierte un reactivo "A" en producto "B", la alimentación al molino es de diferentes tamaños de partículas obteniendo un tamaño máximo, y los productos obtenidos también son de diferentes tamaños, pero el tamaño máximo es menor con respecto a la alimentación, o el porcentaje de los tamaños menores se va incrementando. En forma semejante a un reactor químico, el conocimiento de la velocidad a la cual cada tamaño se fractura permite la predicción de la rapidez de desaparición de estas partículas de la carga del molino (Abad & Martínez, 2009).

En cualquier molino rotatorio de bolas, bajo condiciones normales, todos estos mecanismos de reducción de tamaño de partículas estarán operando. Los valores mensurables de la velocidad específica de ruptura son el efecto neto de la suma de estos mecanismos. Los valores medidos de la distribución de la progenie primaria serán el promedio total de los fragmentos producidos por cada mecanismo. Debido a la extensa variedad de tipos de impacto presentes en este tipo de molino, cargado con pesadas bolas, es aún posible que los mecanismos se traslapen formando una acción continua de ruptura (Austin & Concha, 1994).

Es así que, para comprender el funcionamiento interno de un molino es necesario conocer la distribución de tamaño de la “progenie” o fractura primaria, esto es; la distribución de tamaños de las partículas resultantes de la reducción de un fragmento. Definen la fractura primaria de la siguiente manera: “si un material se rompe y los

fragmentos producidos se mezclan de nuevo con la masa de polvo en el molino, y si esta distribución de fragmentos pudiese ser medida antes que algunos de ellos sean fracturados, entonces el resultado obtenido sería la distribución de fractura primaria”.

Si un material de tamaño j es fracturado, la fracción en peso del producto de tamaño i se denomina $b_{i,j}$, la matriz de estos tamaños describe la fractura de todos los tamaños de interés. En general, las distribuciones de partículas se trabajan de manera acumulada, así $B_{i,j}$ es la fracción en peso acumulativa de material fracturado del tamaño j que es menor que el tamaño superior del intervalo de tamaño i (Austin & Concha, 1994).

$$B_{i,j} = b_{n,j} + b_{n-1,j} + b_{i,j} = \sum_{k=i}^n b_{k,j}$$

Los valores de B_{ij} se determinan mediante pruebas con monotamaños a tiempos de molienda corto y a condiciones de operación normal.

Si se realiza la analogía entre un reactor y un molino, los reactivos son las partículas gruesas que ingresan al molino y los productos son las partículas finas que salen, es decir que la velocidad específica de ruptura de un tamaño es equivalente a una constante de velocidad de reacción química de primer orden. Del mismo modo que en un reactor, si las condiciones de operación del molino cambian (carga de cuerpos molidores, velocidad de rotación, granulometría de alimentación, entre otras), la velocidad de ruptura también cambiará (Austin & Concha, 1994).

La velocidad de desaparición de partículas de determinado tamaño es proporcional a la masa de partículas de ese tamaño presentes en el molino en determinado tiempo. Si se considera W como la cantidad de masa disponible para fragmentarse en el molino y $w_1(t)$ es la fracción de tamaño i , la velocidad de desaparición de la masa de la fracción de tamaño i en un intervalo de tiempo es:

$$\frac{d[w_1(t)]}{dt} = -w_1(t)W$$

Como la masa retenida en el molino W constante, es posible plantear la ecuación anterior como:

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 w_1(t)$$

Donde S_1 es la de velocidad específica de fractura y puede ser determinado mediante la técnica de monotamaño para unas condiciones de molienda y un W fijo.

La velocidad de producción de un tamaño es posible representarla en términos de S_j y b_i, j , ya que ésta depende de la velocidad de aparición de tamaño i por la fractura de tamaños mayores y de la velocidad de desaparición de los tamaños i por fractura.

La correlación entre las condiciones de operación óptimas y la cinética de fractura permitirán conocer las variables que mayor influencia tienen en el proceso de reducción de tamaño y así, determinar las acciones de control para disminuir la variabilidad del proceso y estabilizar el consumo específico de energía.

Sin embargo, a escala de laboratorio también es posible obtener curvas de distribución de tamaños de partículas (DTP) que conservan los parámetros de distribución.

Esto implica que se caracteriza la DTP por una ecuación empírica tipo Rosin - Rammler, según ecuación:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{KRR} \right)^m \right]$$

Es así donde, la cinética se puede calcular a partir de las relaciones entre los parámetros de la ecuación (1.11), y obtener la información de la reducción de tamaño del mineral (Austin & Concha, 1994).

$$\frac{KRR(t)}{KRR(0)}$$

1.6. Molienda húmeda

En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas. Sin embargo, a pesar de su importancia, en los últimos años la concentración de sólidos y la viscosidad de la pulpa han sido parámetros que han cobrado importancia al momento de determinar las condiciones de operación (Facultad de Ingeniería, 2012).

Puede notarse, que en el proceso de molienda estarán ocurriendo los dos eventos; deformación y flujo de las suspensiones en la cámara de molienda y fractura de las partículas sólidas, y, por lo tanto, es posible plantear que estos dos procesos disipativos

estén ligados fenomenológicamente, porque ambos se fundamentan en transferencia energética de procesos fuertemente disipativos de energía mecánica.

Una suspensión consiste en un sistema compuesto por partículas discretas distribuidas aleatoriamente en un fluido. Generalmente se puede dividir las suspensiones en tres categorías: partículas sólidas en un fluido (suspensión o dispersión), gotas de fluido dentro de un medio líquido inmiscible (emulsión) y burbujas de gas dispersas en un líquido (espuma). Los sistemas surfactante-agua-aceite pueden presentarse bajo diferentes formas; pueden ser monofásicos como las soluciones micelares o las microemulsiones o polifásicas con la presencia de varias fases líquidas (macroemulsiones difásicas o polifásicas), y de mesofases como los cristales líquidos. En las microemulsiones es frecuente que una de las fases sea una solución micelar o una microemulsión (Salager, 1998).

Pastas naturales, industriales y suspensiones son materiales granulares compuestos generalmente por un gran número de elementos como gotas, burbujas, minerales, polímeros o partículas de diferente clase, tamaños y formas, todas sumergidas en un medio líquido o gas. Una forma de estudiar el comportamiento de estas pastas y suspensiones es mediante la caracterización reológica, donde se analiza la deformación y el flujo, además de lo concerniente a la interacción entre esfuerzo de cizalla, tasa de cizalladura y tiempo de prueba. Se esperaría que, con esta gama de factores y características de los materiales, existieran muchos comportamientos reológicos, sin embargo, estos sistemas compuestos exhiben características de flujo dentro de ciertos rangos, debido principalmente a la presencia de cualidades similares entre las interacciones que ocurren entre el medio continuo y el medio discreto [2]. El comportamiento reológico de suspensiones minerales indica el nivel de [interacción inter-partícula o agregación, y por lo tanto éste puede ser usado como parámetro de control dentro de su procesamiento industrial (Bustamante Rua, 2015).

Si se observa el comportamiento reológico de un fluido al cual se le han agregado partículas, se puede verificar fácilmente que la presencia de éstas modifica substancialmente la disipación de energía mecánica a medida que se deforman permanentemente los fluidos a una tasa de cizalladura determinada (Bustamante, 1999).

Las pulpas son mezclas de sólidos y líquidos en forma de suspensiones de esta manera sus características y comportamiento se pueden estudiar, en lo que a minería se refiere, como un fluido homogéneo. Es un fluido formado por la suspensión de uno o varios minerales en agua. En la industria se obtienen pulpas con diferentes procesos, procedimientos y composiciones, pero en minería, salvo excepciones puntuales (Ej.: uso de aceites para extracción), se usa el agua por su disponibilidad, coste y características físico-químicas de densidad, estabilidad, etc. Las pulpas se identifican industrialmente por parámetros como la densidad, viscosidad, capacidad abrasiva, etc.; pero el más relevante es la densidad media de la pulpa y esta, bajo la consideración de utilizar agua como fluido principal, tendrá los márgenes siguientes:

- Densidad del líquido (agua): 1 kg/l (t/m^3).
- Densidad de los sólidos (minerales o rocas): entre 1,6 y 9.
- Densidad media de las pulpas: Intermedia entre la del agua y la del sólido en suspensión, está en el rango de 1,5 y 4,5 t/m^3 .
- Los límites son 1 para el valor inferior y el correspondiente al mineral como límite superior.

La densidad es una característica intrínseca de los cuerpos homogéneos, propia del cuerpo o fluido analizado, y es independiente de la cantidad. El tamaño de las partículas en suspensión es muy variable según el proceso pero se puede dar una referencia (Andrea, 2015).

La alimentación del agua se controla tomando la densidad de descarga de los molinos, esta densidad debe de estar entre ciertos límites, si ésta es demasiado baja quiere decir que en el molino hay una mayor cantidad de agua que la requerida, por lo tanto el molino no muele ya que las partículas de mineral tienen una mayor velocidad de desplazamiento saliendo la pulpa con mucha rapidez y así no le permite al molino entregar un producto de las especificaciones en malla requerida; cuando hay muy poco agua quiere decir que la densidad es muy alta, tal que la carga avanza muy lentamente en el molino perdiendo capacidad, lo que motivará estar más bajo de lo normal. Por otro lado, cuando la alimentación de agua es deficiente el barro se vuelve muy espeso alrededor de las bolas o barras impidiendo buenos golpes porque el barro los amortigua, por lo tanto, no habrá buena molienda (León, 2013).

Se dan en el cuadro adjunto los componentes principales para una pulpa formada por un líquido y un sólido.

Tabla 1.3: Pulpas definición de parámetros

Elemento	Volumen (l)	Peso (kg)	Densidad (kg/l) ó (t/m ³)	Caso particular $V_{(pulpa)} = 1$; liq: agua
Pulpa	V	P	d	$d = P$
Líquido	V_l	P_l	d_l	$d_l = 1$; $V_l = P_l$
Sólido	V_s	P_s	d_s	$d_s = P_s / V_s$

Fuente: (Andrea, 2015)

Fracción de sólidos en peso, que corresponde al tanto por uno de sólidos en la pulpa y se formula por la relación del peso de los sólidos que contiene respecto al peso total de la pulpa (sólido más líquido) la densidad es un parámetro fundamental en la formulación de la pulpa.

1.7. Barbotina

Los materiales arcillosos son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua y los agentes atmosféricos, la temperatura y la presión durante millones de años. El término arcilla no corresponde a una composición química o mineralógica definida, las arcillas son mezclas de diversas especies minerales según la composición de la roca matriz y el proceso sufrido por estar a la intemperie.

La mezcla de los materiales arcillosos se realiza en húmedo para obtener la máxima homogeneidad en la composición, en la distribución de las partículas, de las cuales dependen las características deseadas del producto final, así como para el transporte de materia prima y el proceso de conformado de cuerpos cerámicos.

La barbotina y/o pasta cerámica es el nombre que se le da a la mezcla de los materiales arcillosos con agua, los sistemas de la materia prima son heterogéneos, por lo que cada material según su composición química y mineralógica interactuará de una manera particular con el agua, por ejemplo, las diferentes arcillas se hidratan en distinto grado y con distinta cinética, en tanto el cuarzo y el feldespato reaccionan mucho menos.

Por lo anterior es muy importante la relación de sólidos y líquido de la mezcla, de acuerdo con las necesidades en las diferentes etapas de los procesos, por si se requiere

que el material fluya o manifieste una mayor resistencia al flujo, así como características que los materiales por su naturaleza presentan (Meléndez, 2002).

La propiedad física que caracteriza la resistencia al flujo de los fluidos es la viscosidad sin embargo en el caso de las pastas cerámicas esto no es directo ya que la estabilidad de la barbotina cerámica se basa en la interacción de las partículas coloidales de la suspensión con el agua.

El grado de ordenamiento y la separación entre las partículas dependen de la cantidad de agua presente, de lo cual se dice que entre mayor sea la separación existente entre las partículas la viscosidad resultará menor.

La importancia de la relación entre sólidos y líquido que constituyen a la barbotina y uno de los principales factores que afectan la viscosidad recae en la cantidad de masa por la unidad de volumen de la suspensión acuosa, la cual es definida como gravedad específica.

La defloculación de una barbotina por medio de electrolitos permiten lograr la condición de estabilidad y fluidez necesaria en una pasta cerámica con un contenido mínimo de agua (Meléndez, 2002) .

CAPITULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se realizaron las respectivas pruebas y ensayos en el laboratorio, con los factores operacionales indicados, basándose en el material a utilizar teniendo en cuenta nuestra variable de sólidos en la pulpa.

- Preparación del mineral de trabajo
- Caracterización de la barbotina
- Diseño experimental.
- Caracterización de los productos del proceso de molienda a diferentes tiempos y concentración de sólidos
- Pruebas de molienda

2.1. Composición de la barbotina

El material para procesar se denomina barbotina la que es de uso cerámico formado por una mezcla de varios materiales como:

Tabla 2.1: Composición de la Barbotina.

COMPOSICIÓN DE LA BARBOTINA			
Ítem	Material	Humedad	% Material
1	Puzolana	16%	15
2	Tinajillas	29%	6
3	Vcl-57	18%	5
4	Tigre	12%	5
5	Recuperado	65%	4
6	Rosado	6%	24
7	Cofradía	12%	16
8	Vintimilla Rojo	14%	22
9	Chamota Pt	0	3
Total		14.125%	100

La humedad inicial de los materiales arcillosos fue del 14%

La densidad del material se sacó mediante el método del picnómetro.

Cálculos:

$$\text{Peso muestra} = 0.2937\text{gr}$$

$$V1 = 9.9802\text{gr}$$

$$V2 = 10.1545\text{gr}$$

$$d = \frac{m}{v2 - v1}$$

$$d = \frac{0.2937}{10.1545 - 9.9802} = 1.68\text{gr/cm}^3$$

2.1.1. Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica se obtuvo mediante un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX).

Mediante una técnica espectroscópica utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra (Universidad de Alicante, s.f.).



Figura 2.1: Equipo de fluorescencia de Rayos X (FRX) Bruker S8 Tiger

Tabla 2.2: Composición mineralógica.

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	
Sample	Barbotina
CalibrationMethod	Oxides
Sum (%)	87.8
Compton (%)	85.737
SiO2 (%)	55.2
Al2O3 (%)	19.35
Fe2O3 (%)	4.55
CaO (%)	2.26
K2O (%)	2.23
Na2O (%)	2.21
MgO (%)	1.01
TiO2 (%)	0.5
P2O5 (%)	0.11
SO3 (%)	0.1
BaO (%)	0.08
MnO (%)	0.07
V2O5 (%)	0.03
SrO	0.0003
Cl (%)	0.02
ZrO2	0.0001
ZnO	0.0001
Rb2O	99 PPM
Sc2O3 (PPM)	80
CuO	65 PPM
Ga2O3 (PPM)	30

2.2. Preparación de la muestra

El material para utilizar siguió el siguiente proceso:

1. El material se colocó sobre una lona con la finalidad de que esta se seque aproximadamente 10 días.



Figura 2.2: Tendido de la muestra

2. Se trituro el material en la trituradora de mandíbulas del laboratorio para obtener el tamaño ideal para la alimentación del molino de bolas.



Figura 2.4: Trituradora de Mandíbulas



Figura 2.3: Material Triturado

3. Con la muestra ya procesada se homogenizo con el método de cuarteo para la selección de la muestra.



Figura 2.5: Método de cuarteo muestra de barbotina

4. La muestra con un tamaño inferior a malla#10(2mm) seca, se tomó 1 kg.



Figura 2.6: Muestra de barbotina 1kg

5. El material es tamizado para obtener una curva granulométrica de alimento para el proceso de molienda.



Figura 2.7: Tamizado de la muestra

Tabla 2.3: Distribucion granulométrica del alimento

DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DEL ALIMENTO				
# Malla	Tamaño (μm)	Retenido	Retenido Acumulado	Pasante Acumulado
10	2000	0%	0%	100%
20	850	27%	27%	73%
30	600	11%	38%	62%
40	425	12%	51%	49%
50	300	12%	62%	38%
80	180	15%	77%	23%
100	150	5%	82%	18%
200	75	10%	92%	8%
Fondo		8%	100%	0%

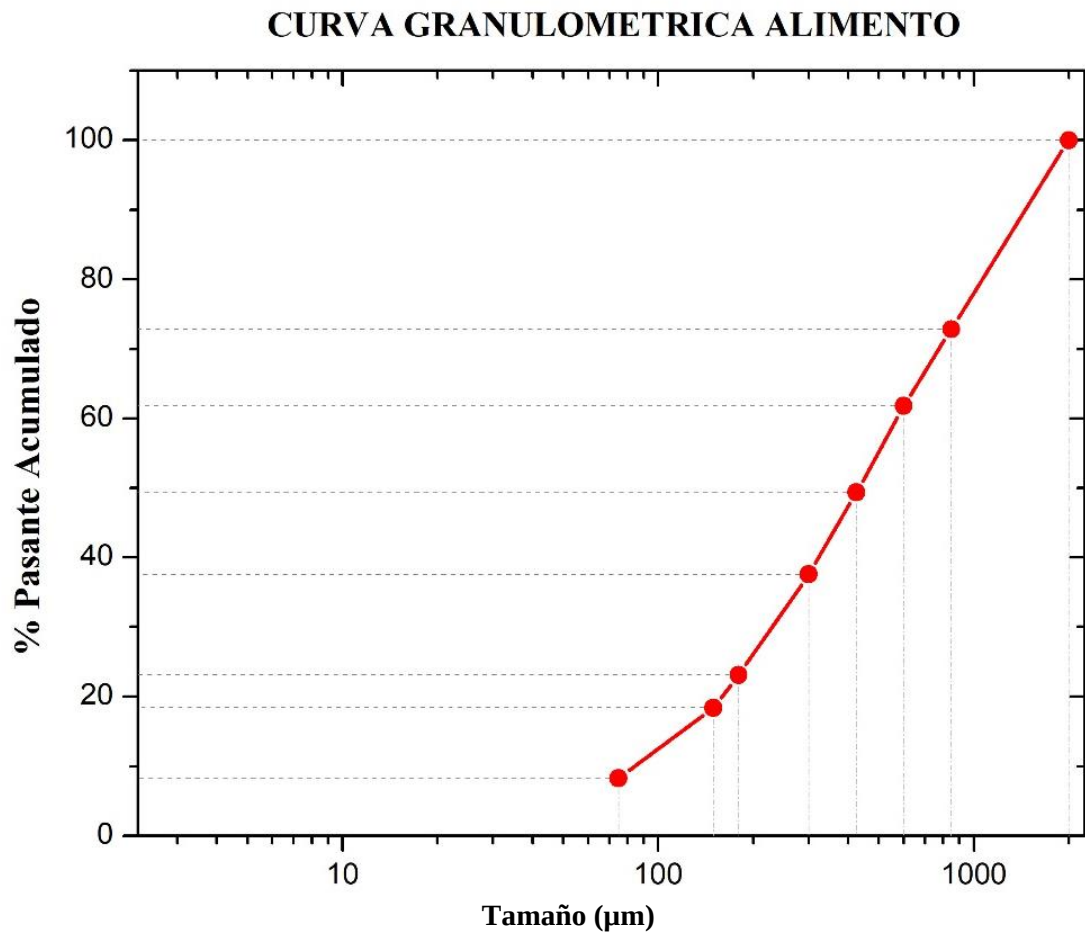


Figura 2.8: Curva Granulométrica de Alimento.

El equipo para utilizar es un molino que consta de dos rodillos, el uno motor y el otro conducido, los cuales están recubiertos por una camisa de recauchutado especial de un elastómero resistente y rectificado, que hace girar los jarros los rodillos no necesitan engrase posee un sistema de transmisión altamente silencioso.

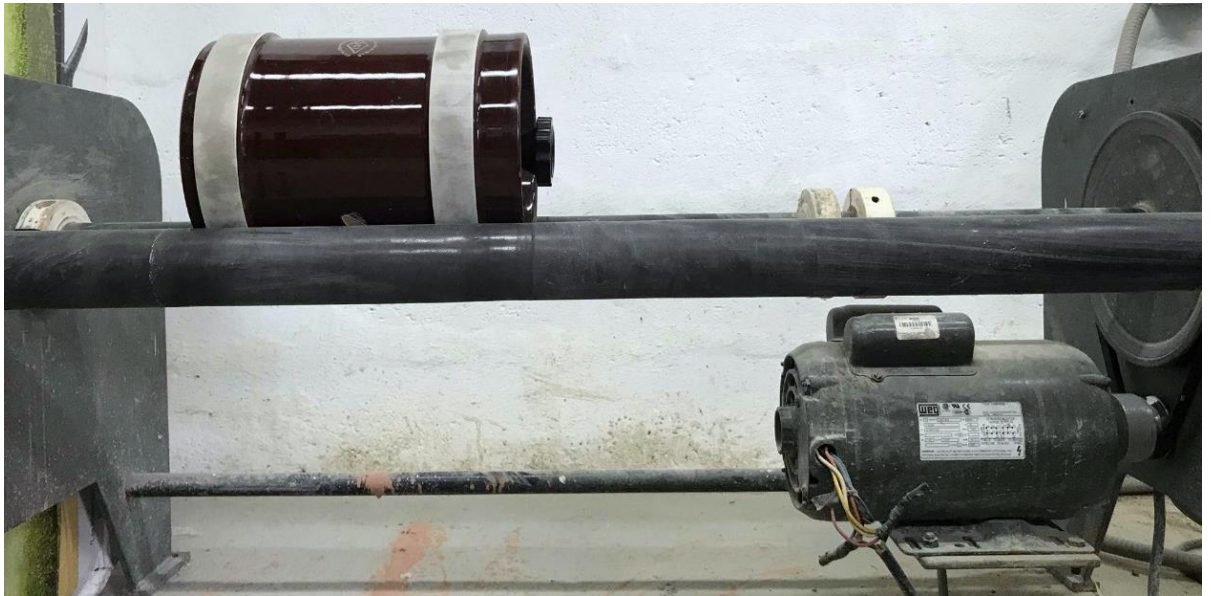


Figura 2.9: Molino de Bolas Cerámico

Tabla 2.4: Especificaciones del Molino

ESPECIFICACIONES DEL MOLINO	
Longitud	17 cm
Diámetro	15 cm
Volumen	3000 cm ³
Potencia del Motor	1.5 kW
Velocidad del Molino	122 rpm

2.2.1. Condiciones de operación del molino

El molino requiere variaciones y parámetros para su operación, en el caso de estudio se realizó las pruebas con los siguientes parámetros guiados en la bibliografía correspondiente.

- Velocidad critica del molino utilizando la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{D - d}}$$

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{0.15 - 0.04}} = 127.23 \text{ rpm}$$

- Fracción de llenado de medios moledores:

$$J = \left(\frac{\text{masa de bolas}}{\text{densidad de bolas}} \right) * \left(\frac{1}{1 - \text{Porosidad del lecho}} \right)$$

$$J = \left(\frac{\frac{2789}{4.2}}{3000} \right) * \left(\frac{1}{1 - 0.4} \right) = 0.4$$

- Fracción de llenado de materia:

$$FC = \left(\frac{\text{masa del mineral}}{\text{densidad del mineral}} \right) * \left(\frac{1}{1 - \text{Porosidad del lecho}} \right)$$

$$FC = \left(\frac{\frac{924}{1.68}}{3000} \right) * \left(\frac{1}{1 - 0.4} \right) = 0.30$$

- Fracción de huecos se trabajó con:

$$U = 1.1$$

En esta etapa se fijan las condiciones de operación del molino, como velocidad crítica, factor de llenado, diámetro de bola, número de bolas, entre otros. Los parámetros que se mantuvieron constantes son descritos en la tabla:

Tabla 2.5: Factores operacionales del molino

MOLINO	
Diámetro interno (cm)	15
Largo interno (cm)	17
Volumen interno (cm ³)	3000
Velocidad crítica (rpm)	127.23
Fracción de velocidad crítica (%)	95%
Fracción de huecos (U)	1.1
Porosidad del lecho	0.4

Tabla 2.6: Factores de carga del molino

CARGA MEDIOS MOLEDORES	
Carga activa	bola alúmina
Fracción de llenado de bolas (J)	0.4
Diámetro (m)	4cm
Numero de bolas (unidades)	63
Densidad (gr/cm ³)	4.2
Peso total de bola (kg)	2.789
MINERAL	
Material	barbotina
Densidad (gr/ cm ³)	1.68
Fracción de llenado de la materia	0.3
Tamaño de partícula pasante(mm)	>2

2.2.2. Carga moledora

Para la selección del tamaño de bolas se tomó en cuenta cuatro tamaños los cuales fueron medidos con un calibrador, el volumen que ocupan las bolas es de 650cm³ tiene una masa de 2.789 kg con una densidad 4.2gr/cm³.



Figura 2.10: Diámetro de Bolas de alúmina

Tabla 2.7: Distribución de la carga moledora

DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA MOLEDORA			
Tamaño (cm)	%	Peso (Kg)	Unidades
4	38	1.057	9
3.2	29	0.803	13
2.8	21	0.589	14
2	12	0.34	27
Total	100	2.789	63

2.3. Factores de diseño

Con base en pruebas preliminares se determinó que los tiempos a evaluar son 5, 10, 15 y 20 minutos y fracción volumétricas de 35, 40, 45, 50, 55, 60 y 65 estos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.8: Matriz de variables

VARIABLES				
Fracción Volumétrica De Sólidos %	Tiempo(minutos)			
35	5	10	15	20
40	5	10	15	20
45	5	10	15	20
50	5	10	15	20
55	5	10	15	20
60	5	10	15	20
65	5	10	15	20

2.3.1. Preparación de la pulpa

Basándose en la matriz de variables de la tabla 5, se procedió a la preparación de la pulpa que va a ser sometida al proceso de molienda.

Volumen de alimento: 550 cm³

Densidad del mineral: 1.68 gr/ cm³

Tabla 2.9: Distribución de la concentración de sólidos en la pulpa

FRACCIÓN DE SÓLIDOS EN LA PULPA			
Volumen Agua (cm ³)	Peso Mineral (gr)	Volumen Mineral (cm ³)	% Solido
358	323	192.5	35%
330	370	220	40%
303	416	247.5	45%
275	462	275	50%
248	508	302.5	55%
220	554	330	60%
193	601	357.5	65%

Con los datos de concentración de sólidos en la pulpa se realizó el siguiente proceso de preparación de la misma.

1. Se midió el volumen correspondiente de líquido que conforma la pulpa en una probeta.

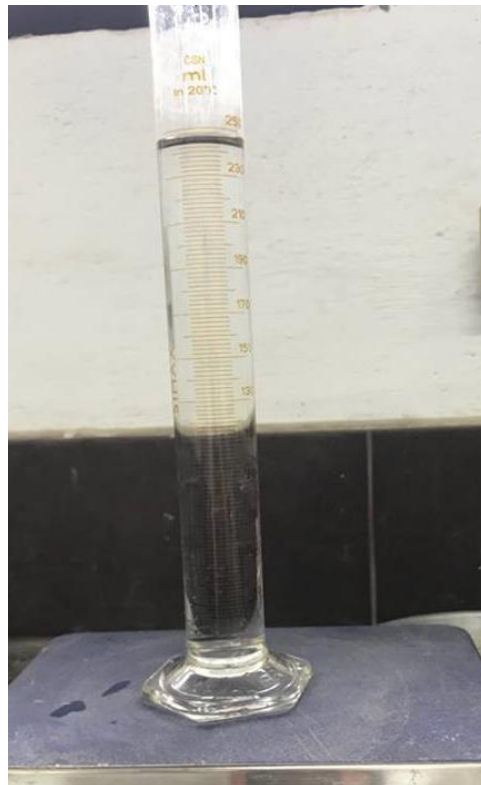


Figura 2.11: Volumen de agua necesario para la pulpa

1. Pesaje de la muestra del mineral en la balanza electrónica.



Figura 2.12: Pesaje de la muestra

2. Se mezcló los sólidos (mineral) y el líquido (agua) elementos que forman la pulpa y se homogenizó los elementos.



Figura 2.13: Pulpa homogenizada (550 cm³)

3. Seguidamente se colocó la pulpa y las bolas de alúmina que tienen un volumen total de 1200 cm^3 .



Figura 2.14: Pulpa con carga moledora

4. Se comenzó la molienda durante el tiempo correspondiente según las variables planteadas.



Figura 2.15: Molienda de barbotina

CAPITULO III

RESULTADOS

Se realizó la evaluación granulométrica en un granulómetro láser Masterizer 3000 el cual fueron calibrados sus diferentes parámetros, para una medición precisa de nuestro material, esta calibración fue comprobada mediante una medición granulométrica por tamices (Anexo 2).

El equipo trabaja a través de difracción láser proporcionando distribuciones de tamaño de partículas rápidas y precisas. Este mide gamas de tamaños de partículas desde nanométricas a milimétricas, cuenta con un rendimiento excepcional en el tamaño de superficie y proporciona mediciones computarizadas que ofrece el software del equipo (Malvern, 2016).

La técnica de difracción láser es uno de los métodos de empleo más común para medir tamaños de partícula y distribuciones de tamaño de 0,1 a 3500 μm . Su aplicación es muy difundida debido a su amplio intervalo dinámico, precisión, y su facilidad de uso. Las mediciones se hacen exponiendo la muestra a un haz de luz y detectando los patrones angulares de luz dispersada por partículas de distintos tamaños. Debido a que los patrones producidos del tamaño de partícula son muy característicos, un análisis matemático de ellos puede producir una medición reproducible exacta de la distribución de tamaño. En la figura 3.1 se muestra un diagrama típico de difracción láser. El haz proveniente de un láser de onda continua es colimado y se hace pasar por la muestra donde las partículas provocan la dispersión. El haz se enfoca después sobre una serie de detectores donde se mide el patrón de dispersión, que se muestra en la como un patrón de difracción. El patrón de dispersión se analiza entonces de acuerdo con modelos teóricos para dar la distribución del tamaño de partículas (Abad & Martínez, 2009).

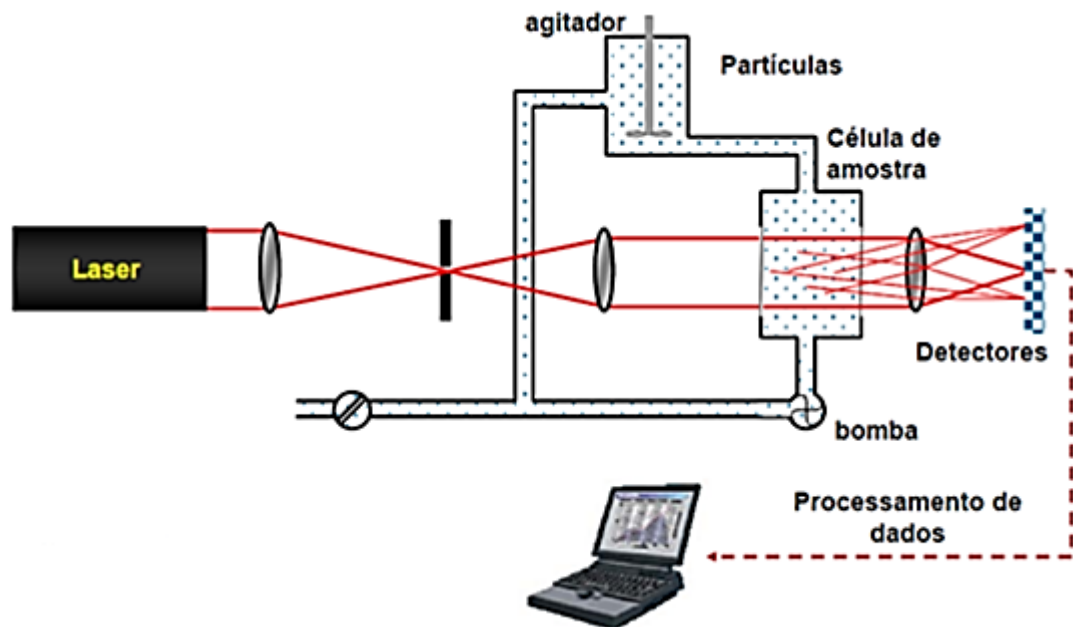


Figura 3.1: Difracción láser

Fuente: (Muñoz Gárate, 2017)



Figura 3.2: Granulómetro Materizer 3000

3.1. Resultados del granulómetro láser.

Tabla 3.1: Resultados del Granulómetro con 35% sólidos en pulpa.

PULPA 35% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0136 % Anchura 2.211 Uniformidad 0.770 Area de Superficie 139.5 m ² /kg Específica. D [3,2] 37.4 μm D [4,3] 188 μm Dv (10) 19.6 μm Dv (50) 148 μm Dv (90) 347 μm	Concentración 0.0030 % Anchura 2.999 Uniformidad 1.770 Area de Superficie 281.3 m ² /kg Específica. D [3,2] 18.5 μm D [4,3] 141 μm Dv (10) 8.63 μm Dv (50) 63.1 μm Dv (90) 198 μm
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0010 % Anchura 6.022 Uniformidad 2.895 Area de Superficie 323.7 m ² /kg Específica. D [3,2] 16.1 μm D [4,3] 177 μm Dv (10) 7.66 μm Dv (50) 53.3 μm Dv (90) 329 μm	Concentración 0.0064 % Anchura 3.340 Uniformidad 1.236 Area de Superficie 171.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 30.5 μm D [4,3] 211 μm Dv (10) 13.8 μm Dv (50) 128 μm Dv (90) 440 μm

Tabla 3.2: Resultados del Granulómetro con 40% sólidos en pulpa.

PULPA 40% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0077 % Anchura 2.299 Uniformidad 0.702 Area de Superficie 190.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 27.4 µm D [4,3] 112 µm Dv (10) 13.9 µm Dv (50) 94.7 µm Dv (90) 232 µm	Concentración 0.0040 % Anchura 2.488 Uniformidad 0.772 Area de Superficie 267.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 19.5 µm D [4,3] 76.0 µm Dv (10) 9.83 µm Dv (50) 61.2 µm Dv (90) 162 µm
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0046 % Anchura 2.520 Uniformidad 0.779 Area de Superficie 209.6 m ² /kg Específica. D [3,2] 24.9 µm D [4,3] 123 µm Dv (10) 11.8 µm Dv (50) 101 µm Dv (90) 266 µm	Concentración 0.0044 % Anchura 2.344 Uniformidad 0.717 Area de Superficie 221.6 m ² /kg Específica. D [3,2] 23.5 µm D [4,3] 108 µm Dv (10) 11.4 µm Dv (50) 90.9 µm Dv (90) 225 µm

Tabla 3.3: Resultados del Granulómetro con 45% sólidos en pulpa.

PULPA 45% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0006 % Anchura 2.677 Uniformidad 0.828 Area de Superficie 372.4 m ² /kg Específica. D [3,2] 14.0 µm D [4,3] 68.6 µm Dv (10) 6.27 µm Dv (50) 54.9 µm Dv (90) 153 µm	Concentración 0.0081 % Anchura 3.011 Uniformidad 1.093 Area de Superficie 164.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 31.8 µm D [4,3] 201 µm Dv (10) 16.0 µm Dv (50) 131 µm Dv (90) 409 µm
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0016 % Anchura 2.922 Uniformidad 0.911 Area de Superficie 349.7 m ² /kg Específica. D [3,2] 14.9 µm D [4,3] 65.8 µm Dv (10) 7.25 µm Dv (50) 48.6 µm Dv (90) 149 µm	Concentración 0.0015 % Anchura 2.454 Uniformidad 0.770 Area de Superficie 358.9 m ² /kg Específica. D [3,2] 14.5 µm D [4,3] 75.5 µm Dv (10) 6.38 µm Dv (50) 64.1 µm Dv (90) 164 µm

Tabla 3.4: Resultados del Granulómetro con 50% sólidos en pulpa.

PULPA 50% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0038 % Anchura 2.566 Uniformidad 0.817 Area de Superficie 253.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 20.6 µm D [4,3] 182 µm Dv (10) 8.35 µm Dv (50) 152 µm Dv (90) 399 µm	Concentración 0.0006 % Anchura 2.886 Uniformidad 0.950 Area de Superficie 497.1 m ² /kg Específica. D [3,2] 10.5 µm D [4,3] 76.0 µm Dv (10) 4.19 µm Dv (50) 60.0 µm Dv (90) 177 µm
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0005 % Anchura 3.725 Uniformidad 1.202 Area de Superficie 582.0 m ² /kg Específica. D [3,2] 8.96 µm D [4,3] 65.3 µm Dv (10) 3.56 µm Dv (50) 42.7 µm Dv (90) 163 µm	Concentración 0.0003 % Anchura 4.607 Uniformidad 1.474 Area de Superficie 608.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 8.58 µm D [4,3] 79.0 µm Dv (10) 3.29 µm Dv (50) 44.3 µm Dv (90) 208 µm

Tabla 3.5: Resultados del Granulómetro con 55% sólidos en pulpa.

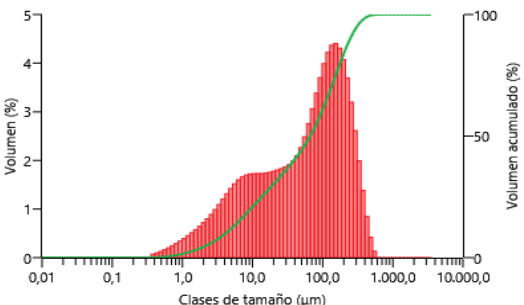
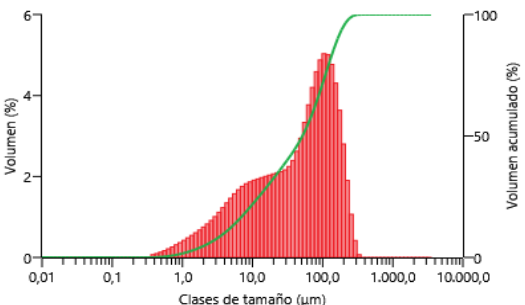
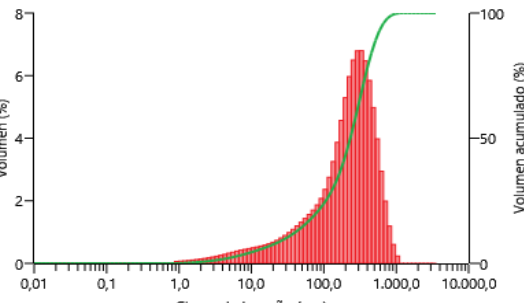
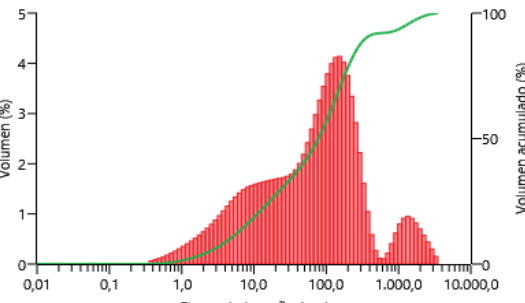
PULPA 55% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0004 % Anchura 3.641 Uniformidad 1.174 Area de Superficie 501.0 m ² /kg Específica. D [3,2] 10.4 µm D [4,3] 98.4 µm Dv (10) 4.11 µm Dv (50) 66.3 µm Dv (90) 246 µm	Concentración 0.0006 % Anchura 3.098 Uniformidad 1.005 Area de Superficie 532.0 m ² /kg Específica. D [3,2] 9.81 µm D [4,3] 68.6 µm Dv (10) 3.95 µm Dv (50) 51.3 µm Dv (90) 163 µm
	
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0071 % Anchura 2.169 Uniformidad 0.666 Area de Superficie 110.9 m ² /kg Específica. D [3,2] 47.0 µm D [4,3] 262 µm Dv (10) 29.6 µm Dv (50) 231 µm Dv (90) 532 µm	Concentración 0.0012 % Anchura 4.447 Uniformidad 2.393 Area de Superficie 450.1 m ² /kg Específica. D [3,2] 11.6 µm D [4,3] 211 µm Dv (10) 4.64 µm Dv (50) 77.7 µm Dv (90) 350 µm
	

Tabla 3.6: Resultados del Granulómetro con 60% sólidos en pulpa.

PULPA 60% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0007 % Anchura 4.105 Uniformidad 1.345 Area de Superficie 610.5 m ² /kg Específica. D [3,2] 8.55 µm D [4,3] 69.4 µm Dv (10) 3.41 µm Dv (50) 41.6 µm Dv (90) 174 µm	Concentración 0.0005 % Anchura 4.213 Uniformidad 1.317 Area de Superficie 790.6 m ² /kg Específica. D [3,2] 6.60 µm D [4,3] 33.1 µm Dv (10) 3.00 µm Dv (50) 19.2 µm Dv (90) 83.8 µm
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0006 % Anchura 36.429 Uniformidad 9.661 Area de Superficie 702.1 m ² /kg Específica. D [3,2] 7.43 µm D [4,3] 164 µm Dv (10) 3.53 µm Dv (50) 16.2 µm Dv (90) 593 µm	Concentración 0.0004 % Anchura 4.155 Uniformidad 1.618 Area de Superficie 815.7 m ² /kg Específica. D [3,2] 6.40 µm D [4,3] 31.9 µm Dv (10) 3.09 µm Dv (50) 15.3 µm Dv (90) 66.8 µm

Tabla 3.7: Resultados del Granulómetro con 65% sólidos en pulpa.

PULPA 65% CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS	
Molienda 5 minutos	Molienda 10 minutos
Concentración 0.0008 % Anchura 2.846 Uniformidad 0.993 Area de Superficie 520.6 m ² /kg Específica. D [3,2] 10.0 µm D [4,3] 63.2 µm Dv (10) 4.20 µm Dv (50) 46.2 µm Dv (90) 136 µm	Concentración 0.0008 % Anchura 4.070 Uniformidad 1.331 Area de Superficie 713.0 m ² /kg Específica. D [3,2] 7.32 µm D [4,3] 45.2 µm Dv (10) 2.95 µm Dv (50) 26.7 µm Dv (90) 112 µm
Molienda 15 minutos	Molienda 20 minutos
Concentración 0.0003 % Anchura 3.201 Uniformidad 1.012 Area de Superficie 564.1 m ² /kg Específica. D [3,2] 9.25 µm D [4,3] 51.9 µm Dv (10) 3.85 µm Dv (50) 37.3 µm Dv (90) 123 µm	Concentración 0.0003 % Anchura 3.328 Uniformidad 1.432 Area de Superficie 424.2 m ² /kg Específica. D [3,2] 12.3 µm D [4,3] 123 µm Dv (10) 5.04 µm Dv (50) 68.3 µm Dv (90) 232 µm

3.2. Análisis de los resultados

Existen muchas formas de registrar los resultados, el más común es representar gráficamente el pasante acumulado en porcentaje en función del tamaño de partícula. Esto puede hacerse en escala cartesiana–cartesiana, pero tiene la desventaja de que los puntos en la región de los finos tiendan a congestionarse; para evitar eso, se realiza el cambio de escala a logaritmo– cartesiana (Rodríguez Álvarez, 2010).

Como se puede observar (Figuras 3.1;3.3;3.5;3.7) los datos requeridos para la elaboración de estas graficas están en (Anexo 3).

En la distribución tipo Rosin Rammler, a partir del análisis granulométrico se obtiene un conjunto de datos tales como: tamaño de partículas, su respectivo porcentaje de pasante acumulado, y se ajustarán a la distribución de Rosin Rammler este modelo se ajusta mejor a una molienda fina , consta de los parámetros de la siguiente ecuación:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{KRR} \right)^m \right]$$

$F(x)$ = % acumulado pasante

Krr = Constante de Rosin Rammler (Tamaño característico de la distribución)

m =Parámetro de distribución de tamaño

Para utilizar el Modelo de Rosin - Rammler se grafica $\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-(F_x)} \right) \right)$ vs $\ln(x)$ y se realiza una linealización del tramo recto de la gráfica, tomando en referencia la ecuación de la recta:

$$Y = mx + B$$

Y se resume en la siguiente ecuación :

$$\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-(F_x)} \right) \right) \text{ vs } \ln(x) = m \ln(x) - m \ln Krr$$

Los parámetros de distribución de Rosin-Rammler (m y krr) se obtienen de la pendiente de la línea recta y de la intersección de la recta con la línea horizontal correspondiente .Los datos obtenidos por excel se observar junto con las Gráficas correspondientes (Anexo 4 y 5).

En base al modelo Rosin Rammler que se ajusta mejor a molienda fina , se determina el D80 este se refiere al tamaño que permite pasar al 80% de la poblacion de particulas.

La curva se representa mediante una polilínea. Como en el presente estudio sólo interesa conocer un valor (d80), los cálculos se simplifican al tener que calcular solamente la línea que pasa por dicho valor las estas graficas se pueden observar (Figuras 3.2;3.4;3.6;3.8).

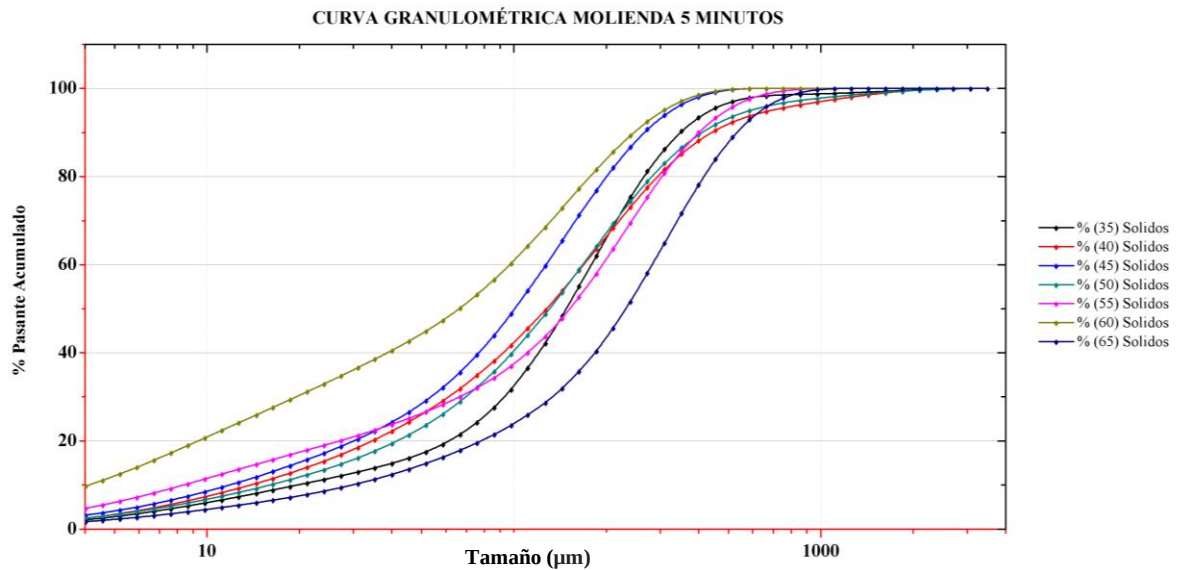


Figura 3.3: Gráfica cinética de molienda 5 minutos

Tabla 3.8: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 5 minutos de molienda

MODELO ROSIN RAMMLER					
Concentración de sólidos en la pulpa	Ecuación de la recta	Pendiente (m)	B	Krr(µm)	D80(µm)
35% Sólidos	$y = 0.9793x - 6.2432$	0.9793	6.2432	587.08	954.42
40% Sólidos	$y = 0.9888x - 5.2976$	0.9888	5.2976	212.21	343.38
45% Sólidos	$y = 1.1335x - 5.3785$	1.1335	5.3785	115.01	175.01
50% Sólidos	$y = 0.9914x - 5.3177$	0.9914	5.3177	213.54	345.10
55% Sólidos	$y = 0.9693x - 4.8709$	0.9693	4.8709	152.19	248.66
60% Sólidos	$y = 0.9618x - 4.1714$	0.9618	4.1714	76.48	125.43
65% Sólidos	$y = 1.0632x - 5.902$	1.0632	5.902	257.53	402.91

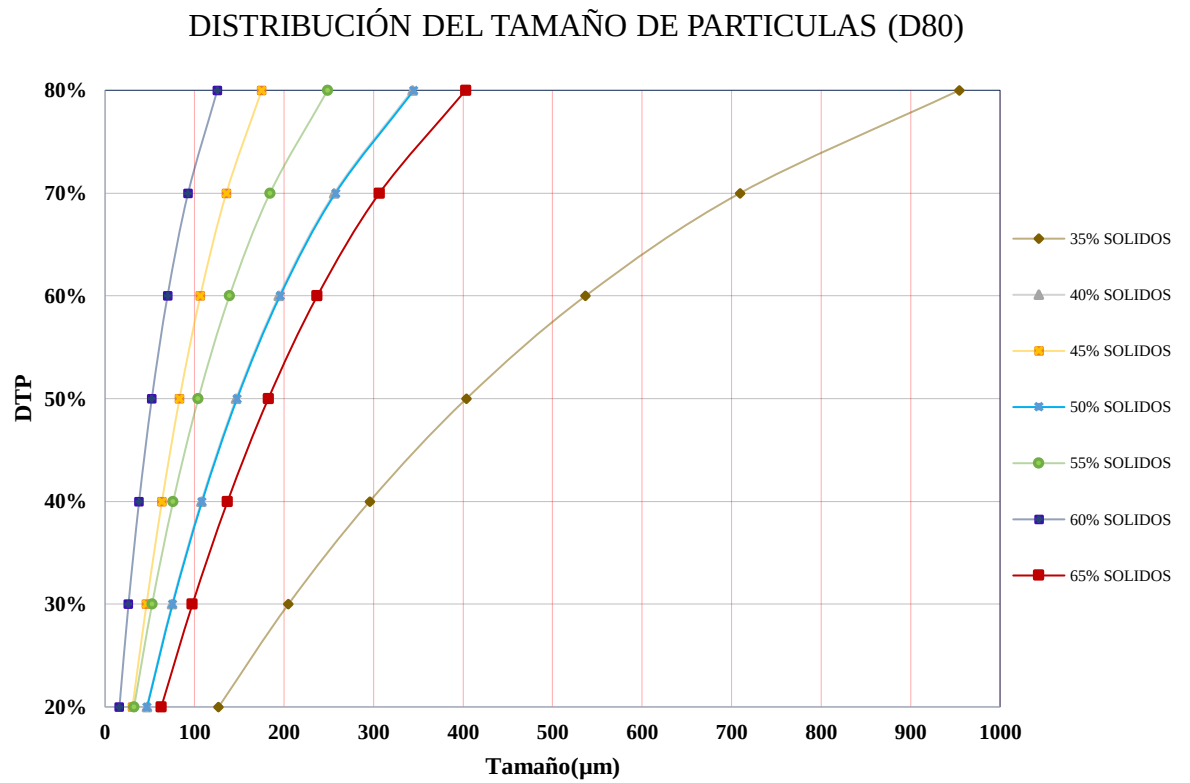


Figura 3.4: DTP a los 5 minutos con diferentes concentraciones de sólidos

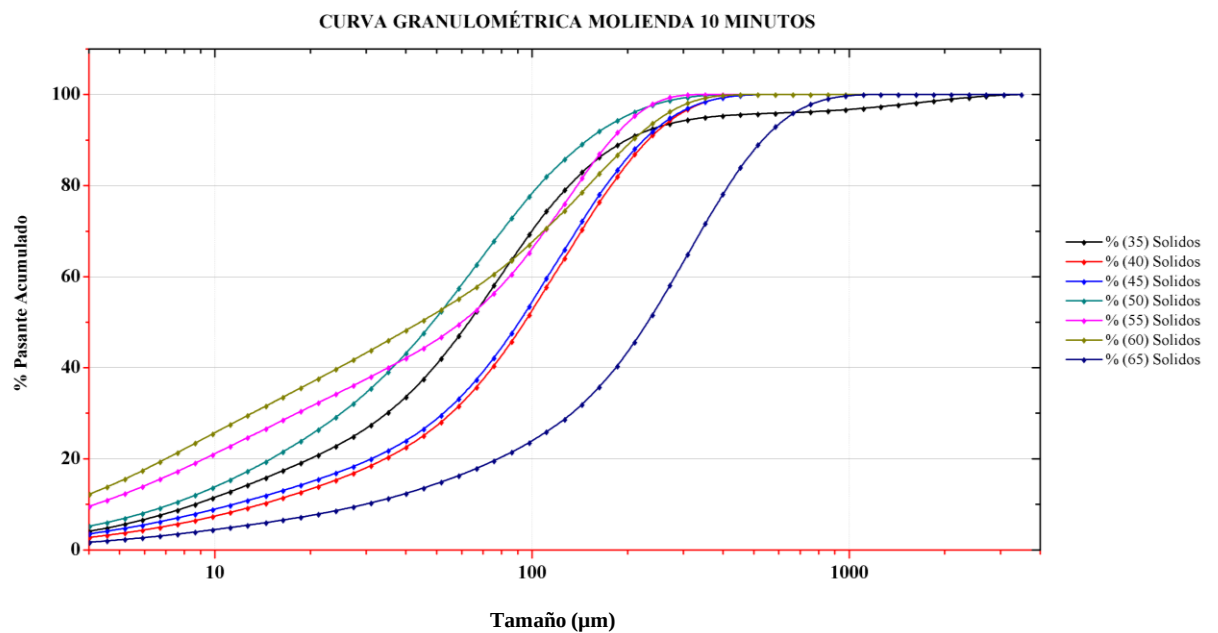


Figura 3.5: Gráfica cinética de molienda 10 minutos

Tabla 3.9: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 10 minutos de molienda.

MODELO ROSIN RAMMLER					
Concentración de sólidos en la pulpa	Ecuación de la recta	Pendiente (m)	B	Krr(μm)	D80(μm)
35% Sólidos	$y = 0.9313x - 4.6831$	0.9313	4.6831	152.71	254.55
40% Sólidos	$y = 1.1888x - 5.5821$	1.1888	5.5821	109.46	163.34
45% Sólidos	$y = 1.144x - 5.3114$	1.144	5.3114	103.83	165.92
50% Sólidos	$y = 1.1704x - 4.8609$	1.1704	4.8609	63.63	95.55
55% Sólidos	$y = 1.0367x - 4.2757$	1.0367	4.2757	61.82	97.83
60% Sólidos	$y = 0.9739x - 3.9861$	0.9739	3.9861	59.91	97.65
65% Sólidos	$y = 0.7982x - 4.0256$	0.7982	4.0256	154.98	286.76

DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (D80)

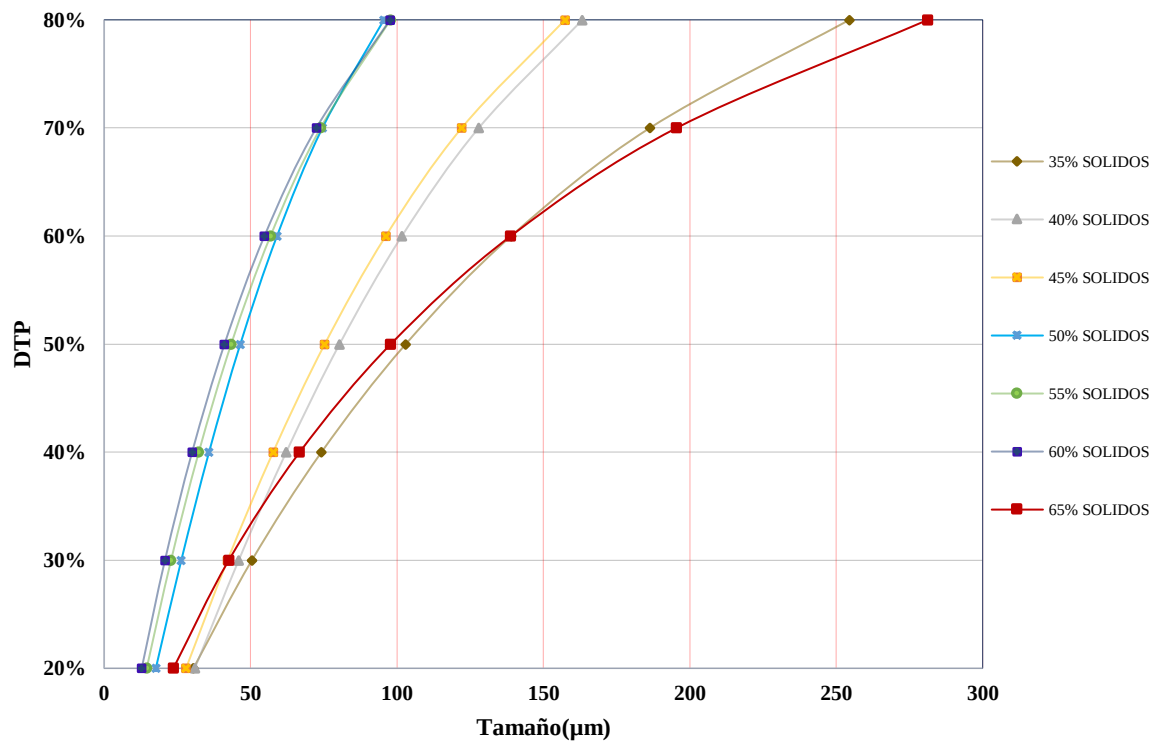


Figura 3.6: DTP a los 10 minutos con diferentes concentraciones de sólidos

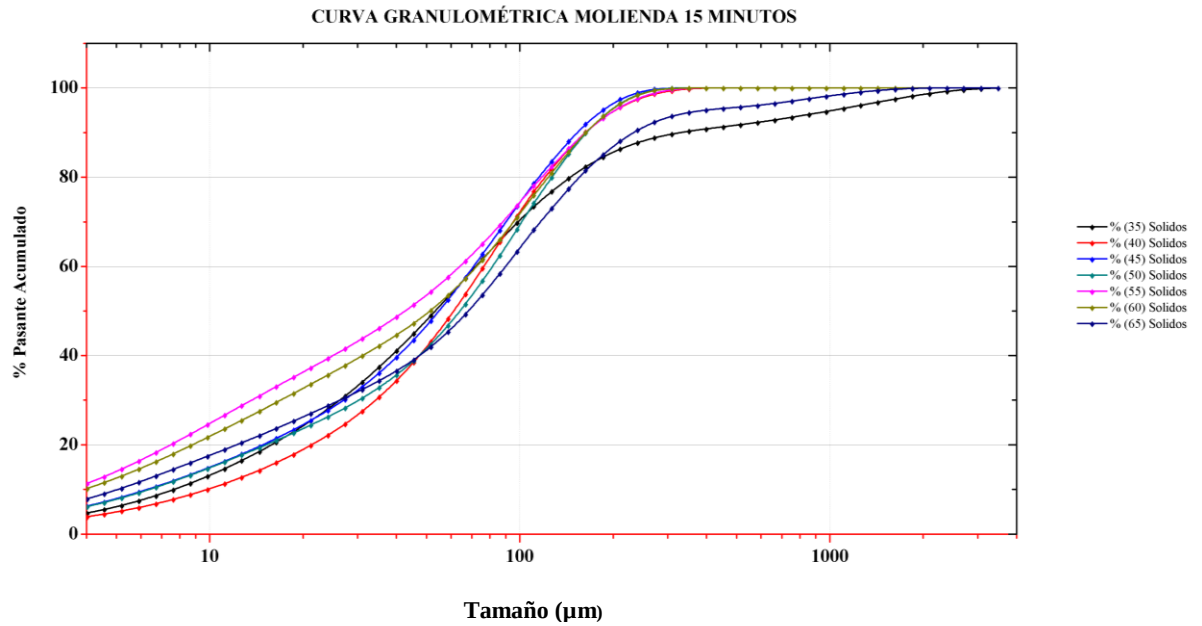


Figura 3.7: Gráfica cinética de molienda 15 minutos

Tabla 3.10: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 15 minutos de molienda.

MODELO ROSIN RAMMLER					
Concentración de sólidos en la pulpa	Ecuación de la recta	Pendiente (m)	B	Krr(μm)	D80(μm)
35% Sólidos	$y = 0.8895x - 4.4897$	0.8895	4.4897	155.62	265.71
40% Sólidos	$y = 1.211x - 5.2303$	1.211	5.2303	75.11	111.26
45% Sólidos	$y = 1.1405x - 4.7243$	1.1405	4.7243	62.94	95.53
50% Sólidos	$y = 1.123x - 4.7466$	1.123	4.7466	68.49	104.63
55% Sólidos	$y = 1.0287x - 4.0867$	1.0287	4.0867	53.12	84.36
60% Sólidos	$y = 1.047x - 4.2155$	1.047	4.2155	56.05	88.30
65% Sólidos	$y = 0.8788x - 4.1585$	0.8788	4.1585	113.52	195.09

DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULAS (D80)

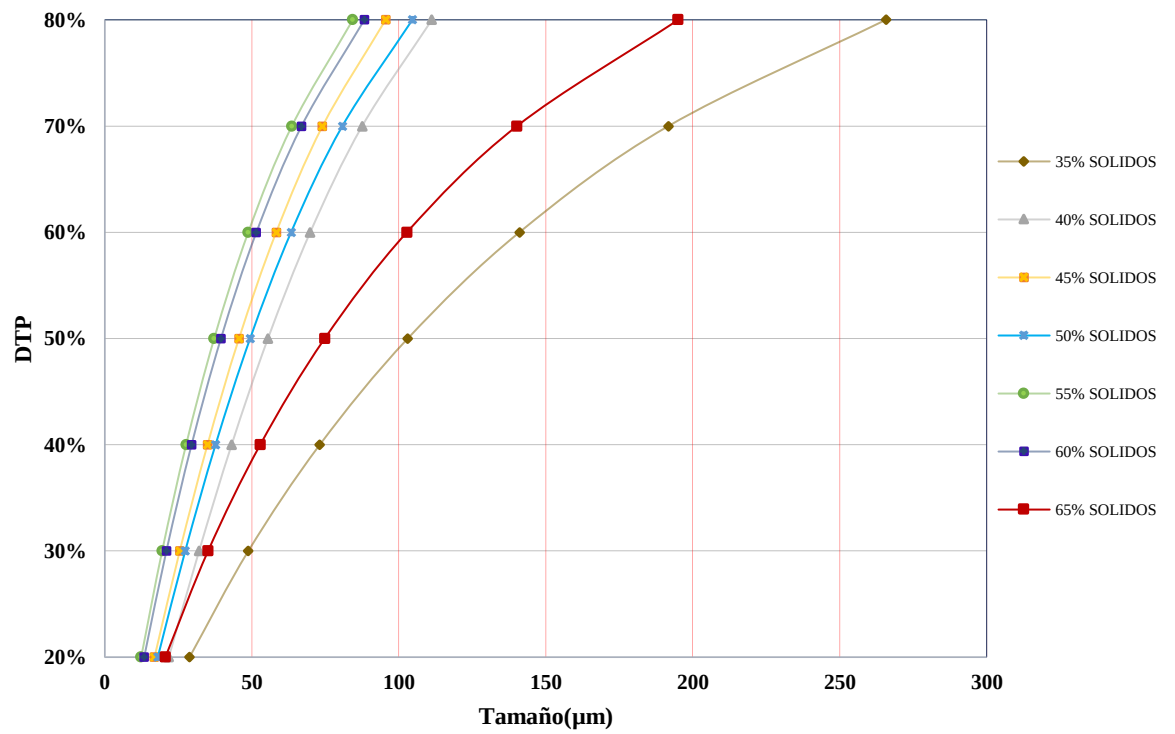


Figura 3.8: DTP a los 15 minutos con diferentes concentraciones de sólidos

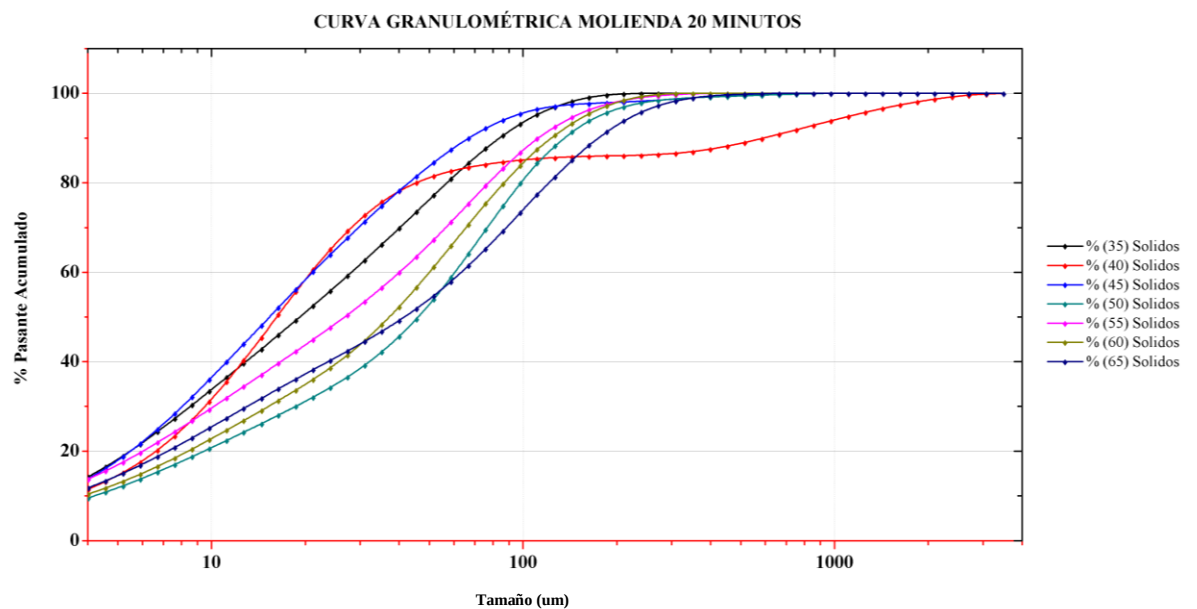


Figura 3.9: Gráfica cinética de molienda 20 minutos

Tabla 3.11: Resultados obtenidos por el modelo Rosin Rammler de 20 minutos de molienda.

MODELO ROSIN RAMMLER					
Concentración de sólidos en la pulpa	Ecuación de la recta	Pendiente (m)	B	Krr(μm)	D80(μm)
35% Sólidos	$y = 1.1541x - 3.9465$	1.1541	3.9465	30.55	46.14
40% Sólidos	$y = 0.7662x - 3.5115$	0.76662	3.5115	97.56	181.49
45% Sólidos	$y = 1.0198x - 3.7414$	1.0198	3.7414	39.20	60.37
50% Sólidos	$y = 1.0086x - 4.2049$	1.0086	4.2049	64.65	101.62
55% Sólidos	$y = 1.0522x - 3.9004$	1.0522	3.9004	40.72	64.00
60% Sólidos	$y = 1.0898x - 4.1826$	1.0898	4.1826	46.43	71.85
65% Sólidos	$y = 0.9923x - 4.0328$	0.9923	4.0328	58.21	94.03

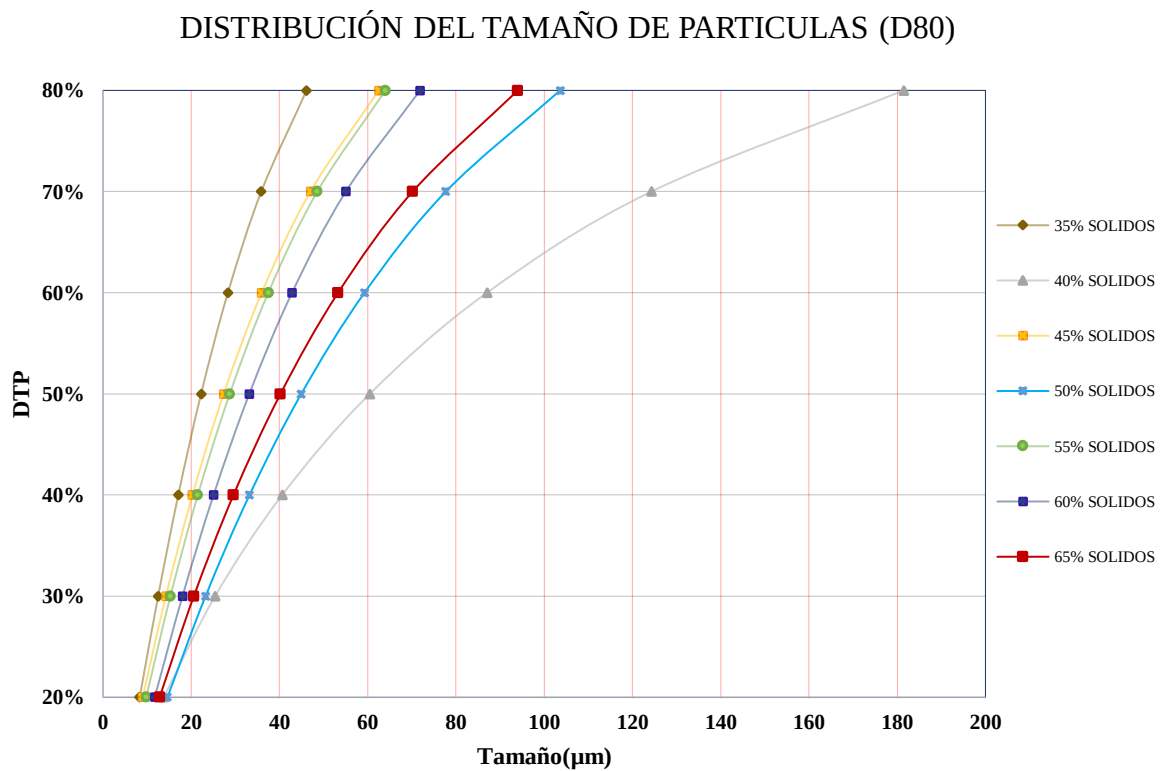


Figura 3.10: DTP a los 20 minutos con diferentes concentraciones de sólidos

3.3. Análisis comparativos

Con los resultados cuantitativos se pudo realizar una comparación entre la cinética de la molienda con las variables expuestas en tiempo y concentración de sólido en la pulpa, la gráfica a continuación se realizó tomando en cuenta las concentraciones que nos dieron un Krr menor en los diferentes tiempos ver (Tabla 3.12).

La gráfica de las líneas de tendencia ayudó a observar mejor su pendiente, teniendo una idea clara del parámetro de distribución de tamaño que siguieron las curvas (Figura 3.11).

El d80 cambia con el tiempo de molienda, aunque esté formado por una concentración de sólidos igual ver (Figura 3.13).

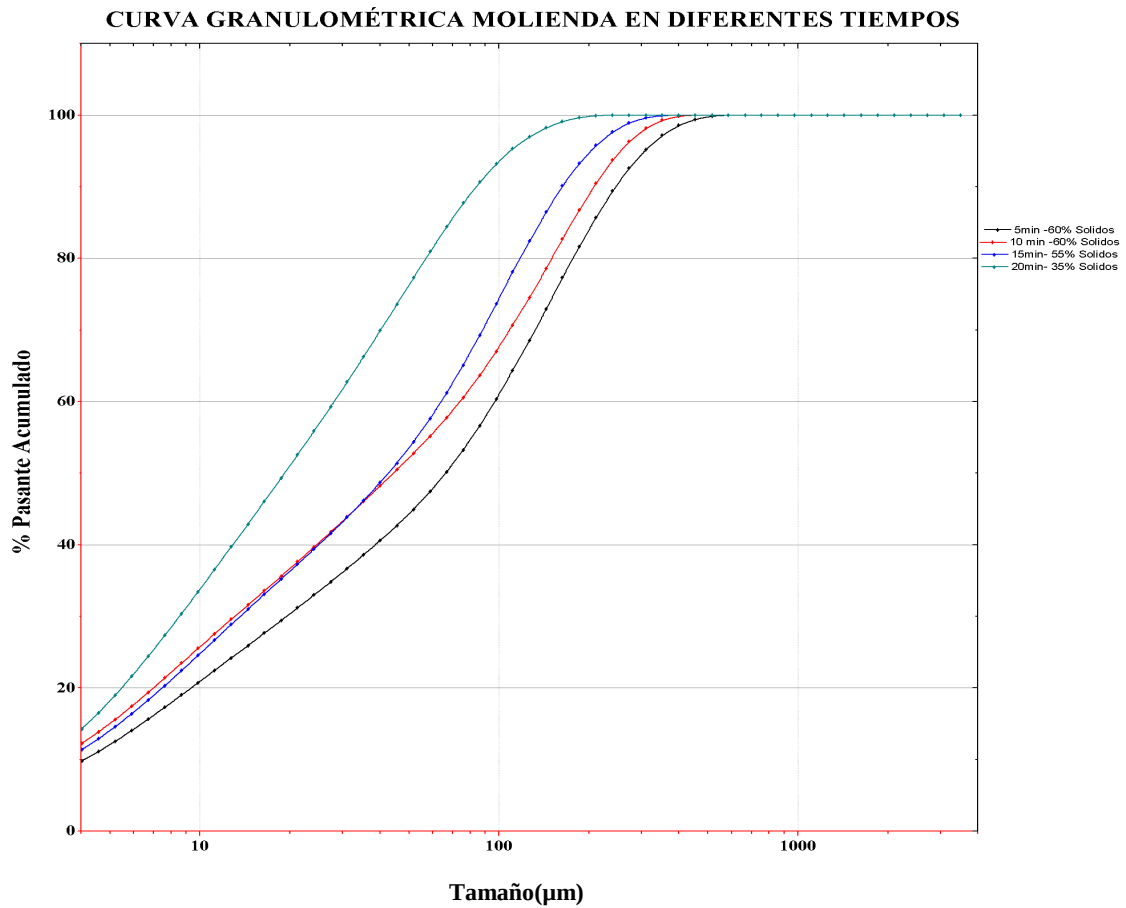


Figura 3.11: Gráfica cinética de molienda en diferentes tiempos

Tiempo Minutos	Concentración de sólidos en la pulpa	Ecuación de la recta	Pendiente (m)	B	Krr(μm)
5	60% Sólidos	$y = 0.9618x - 4.1714$	0.9618	4.1714	76.4835982
10	60% Sólidos	$y = 0.939x - 3.9861$	0.9739	3.9861	59.91490776
15	55% Sólidos	$y = 1.0287x - 4.0867$	1.0287	4.0867	53.1269307
20	35% Sólidos	$y = 1.1541x - 3.9465$	1.1541	3.9465	30.5555916

Tabla 3.12: Resultados obtenidos modelo Rosin Rammler diferentes tiempos

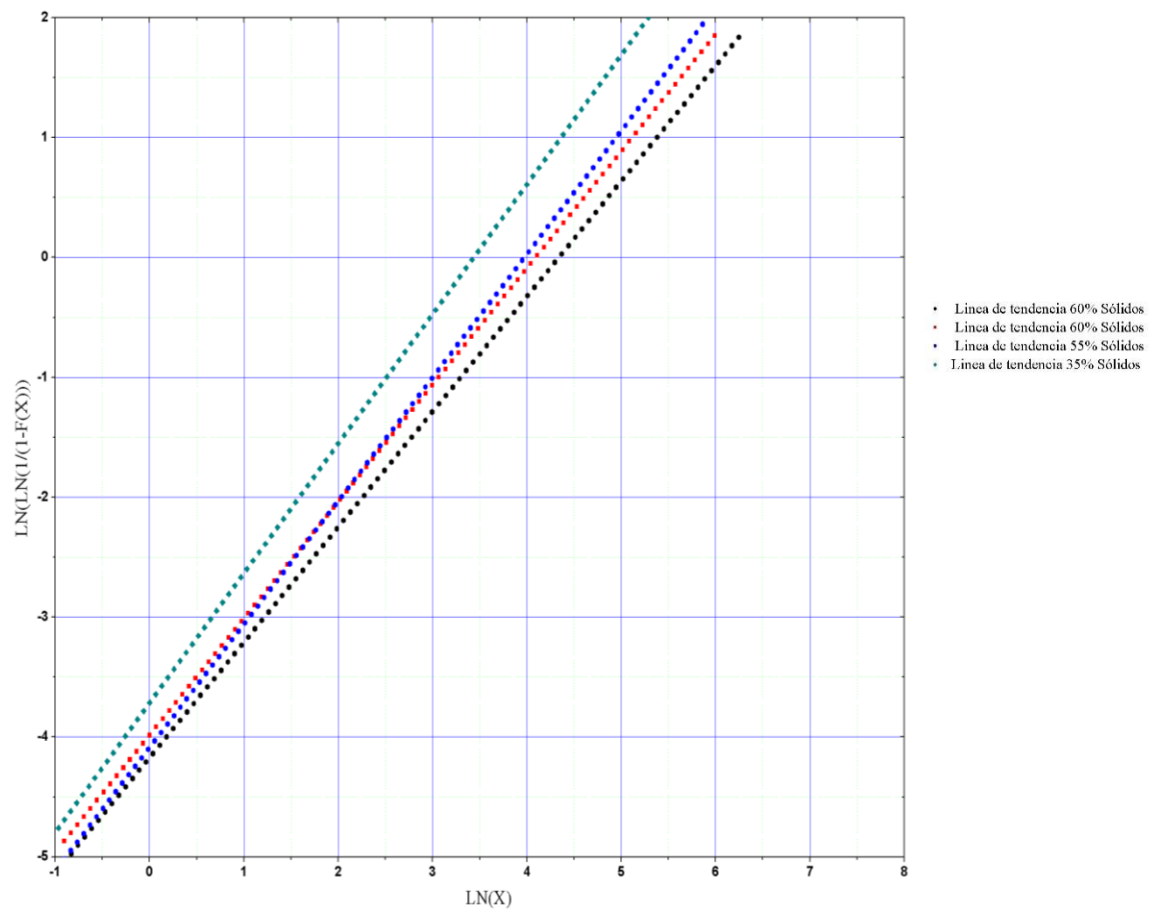


Figura 3.12: Gráfica líneas de tendencia de las pulpas

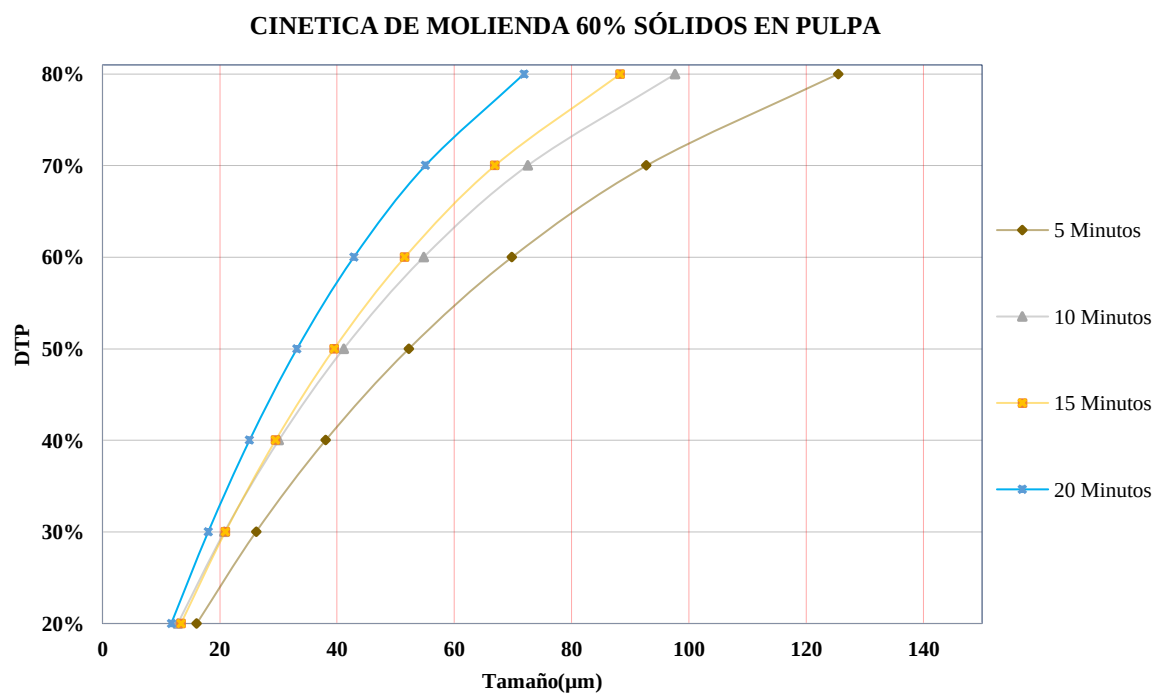


Figura 3.13: Gráfica cinética de molienda 60% sólidos en pulpa.

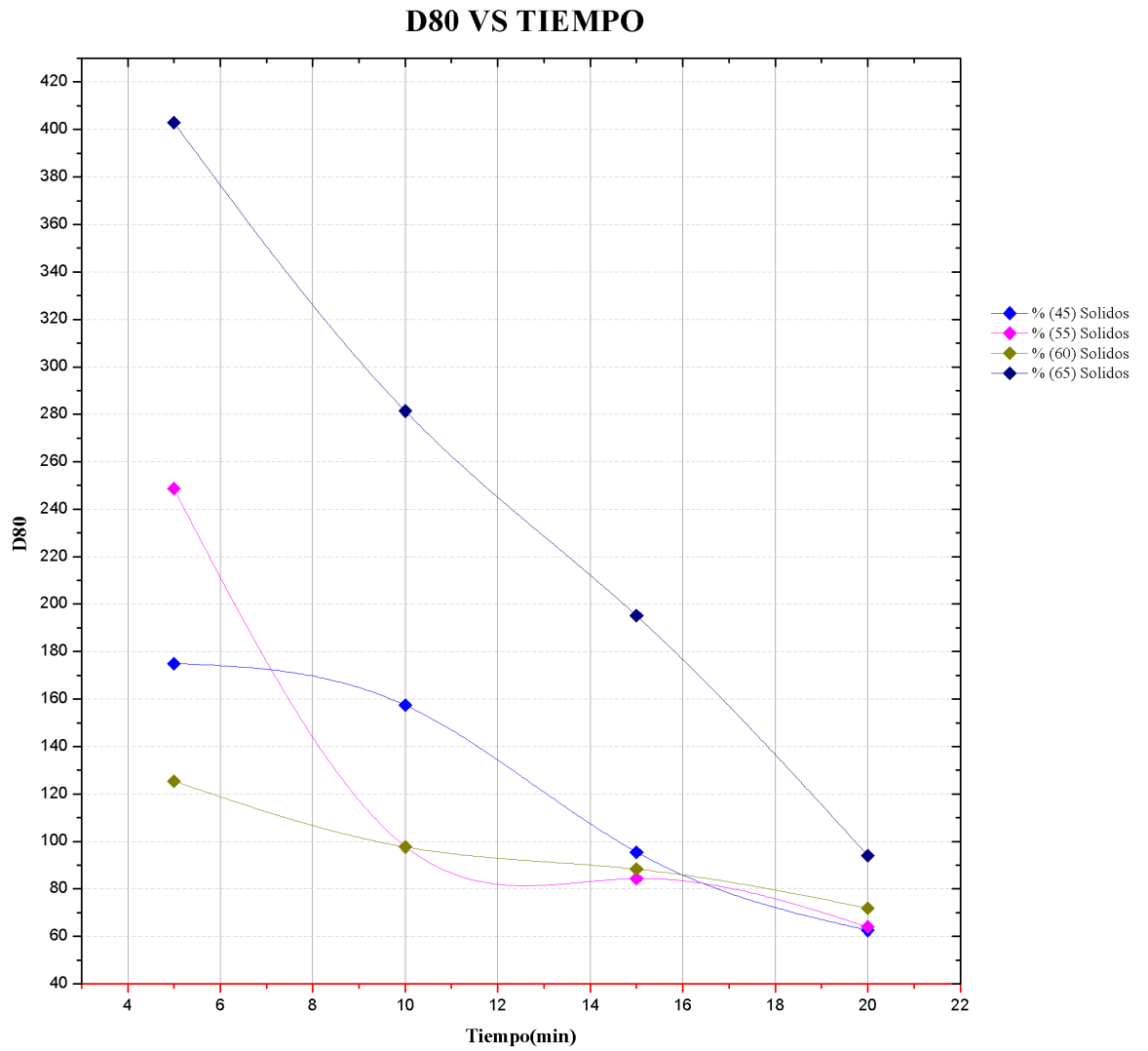


Figura 3.14: Cinética de molienda D80 vs Tiempo

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Al evaluar el impacto que tenía cada uno de los parámetros de molienda (fracción de velocidad crítica del molino, DTP de alimento y producto, fracción volumétrica de la suspensión mineral) sobre la eficiencia energética del proceso, se evidenció que la concentración de sólidos en pulpa influyen en el mismo, se puede observar en la cinética de molienda a los 5 minutos, tenemos una pulpa con 35% de sólidos y el análisis nos refleja Krr de 587 μm mientras que al mismo tiempo pero en diferente concentración de sólidos como fue en el caso de una pulpa con 60% de sólidos se obtuvo un Krr 76.48 μm esta es más o menos 7 veces más pequeño el tamaño de partícula.
- En la industria cerámica la barbotina se considera eficiente cuando esta pasa la malla#200 (75 μm) en un tiempo de 20 minutos y una concentración de sólidos en pulpa al 60% se obtuvo un D80=71.85 (μm) es eficiente porque en el volumen de ingreso de pulpa tiene una cantidad alta de mineral en comparación con las demás concentraciones y eso ayuda a una mejor productividad.
- La cinética de molienda de una pulpa al 60% de sólidos indicó un mejor control de tamaño en sus diferentes tiempos.
- La velocidad de molienda para tamaños mayores a 71(μm) los tiempos son muy influyentes mientras que para tamaños inferiores, éste no lo es, es decir se puede obtener un rango entre 12-16 (μm) que es un molienda muy fina en 5 minutos como se puede tener un resultado muy similar a 20 minutos, para este caso se debe tomar en cuenta el consumo de energía innecesaria que se puede provocar.
- Para tiempos de molienda mayores a 15 minutos, la molienda de barbotina muestra resultados significativos en el aumento de la fragmentación de la partícula y se puede observar en el 35% de concentrado de solido en la pulpa muestra un Krr de 30.55 μm a diferencia de el gran tamaño que muestra en tiempos inferiores.
- El modelo proporciona una herramienta en la optimización de la molienda, desde el punto de vista del consumo de energía, tiempo y su relación a la cinética de fractura.

- Puede usarse para planear y controlar la operación de los molinos con relación al contenido de sólidos y tiempos de molienda para que esta no provoque una sub o sobre molienda y tener un control adecuado del tamaño de partículas.

Recomendaciones:

- Al realizar las pruebas experimentales se debe adaptar los parámetros operacionales correspondientes a nuestro material y tipo de molienda.
- Tener un control de la granulometría de alimento, debido que la carga moledora está ligada al tamaño de las partículas de entrada al molino.
- Tener el dato preciso de la densidad del mineral, ya que este influye en la elaboración de la pulpa nos indica el dato de la masa que debe existir en la misma.
- Tener un control minucioso de los tiempos de molienda, para que estos puedan ser comparados con las diferentes variables.
- En la medición granulométrica ajustar el Masterizer con los parámetros adecuados para nuestro tipo de muestra.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, K. d., & Martínez, W. A. (2009). "INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE MOLIENDA, PARA LA PREDICCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I. Lima.
- Aguilar Titi, E. E. (2017). OPTIMIZACIÓN DE MOLINOS SEMI-AUTOGENOS. Arequipa.
- Alcántara Valladares , J. R. (2008). DISEÑO PRÁCTICO DE UN MOLINO DE BOLAS . Mexico.
- Andrea, E. (2015). Bloque i – capítulo 3. pulpas. Cantabria. Obtenido de https://www.academia.edu/25428050/BLOQUE_I_CAP%C3%8DTULO_1._INTRODUCCI%C3%93N_A_LA_MINERALURGIA
- Andrea, E. (2015). CAPITULO 8: MOLIENDA. Obtenido de https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8._molienda.pdf
- Arriaga, M. A. (2013). Curso de Molienda Primera Parte.
- Austin, L., & Concha, F. (1994). Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación. Chile.
- Basurto Contreras, C. M. (2011). Modelo “Cebaco” aplicado al control de procesos en el circuito de Molienda-Clasificación en una planta concentradora de minerales mediante el software LabVIEW. Lima.
- Bustamante Rua, M. O. (2015). Efecto del material fino en la reología de suspensiones de caolín. Medellín.
- Bustamante, O. (1999). VISCOSIDAD DE SUSPENSIONES MINERALES BAJO UNA. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/12750/37/71584869.1999.pdf>
- Facultad de Ingeniería, U. (2012). Molienda Industria 1. Buenos Aires. Obtenido de http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/Antiguo/2013-1C/06_Apunte%20Molienda.pdf
- León, A. (2013). “AUTOMATIZACIÓN DEL AREA DE MOLIENDA EN UNA PLANTA CONCENTRADORA Pb-Ag y Zn”. Lima.

- Malvern. (2016). Malvern Panalytica. Obtenido de <http://www.malvern.com/es/products/product-range/mastersizerrange/mastersizer-3000/>
- Meléndez, F. (2002). Desarrollo de una barbotina cerámica para vaciado de alta presión mediante el uso de la determinación de la permeabilidad en el filtro baroid. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/5303/1/1020148982.PDF>
- Mori, H., Mio, H., Kano, J., & Saito, F. (2004). Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591004001731>
- Muñoz Gárate, C. E. (2017). “ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL CEMENTO POR EL. Cuenca.
- Porras Alzate, L. M. (2016). ESTUDIO DEL CONSUMO DE ENERGIA EN MOLIENDA HUMEDA DE UN MINERAL CONSIDERANDO REOLOGIA DE SUSPENSIONES. Medellin.
- procesaminerales.blogspot.com. (s.f.).
- Ramirez, R. (2006). “EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE BOLA EN LA MOLIENDA DE Cu, CuO Y EL ALEADO MECÁNICO DE Cu – 15 % ATÓMICO DE Al EN UN MOLINO HORIZONTAL DE BOLAS” . Pachuca.
- Rodríguez Álvarez, B. (2010). ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS EN LA DETERMINACIÓN DE CONSUMOS ENERGÉTICOS EN MOLIENDA MEDIANTE EL MÉTODO DE BOND. Oviedo.
- Salager, J. L. (1998). FORMULACION HLB, PIT, R de Winsor. Venezuela. Obtenido de <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S210.pdf>
- Universidad de Alicante. (s.f.). Obtenido de <https://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x/espectroscopia-de-fluorescencia-de-rayos-x.html>
- Velazquez Coello, A., & Tijonov, O. (2001). MOLIENDA DE MINERALES MULTICOMPONENTES: MODELO ÍNTEGRO-DIFERENCIAL PARA LA VALORACIÓN DE LA ENERGÍA.

Vicentiz, J. (s.f.). vicentiz.com. Obtenido de
<http://www.vicentiz.com/productos/maquinaria/molinos.html>

ANEXOS

Anexo 1: Medición del diámetro de las bolas



Anexo 2: Granulometría por tamiz



Anexo 3: Tabla de pasante acumulado a diferentes tiempos de molienda

	PASANTE ACUMULADO 5 MINUTOS DE MOLIENDA						
Tamaño (μm)	35% Sólidos	40% Sólidos	45% Sólidos	50% Sólidos	55% Sólidos	60% Sólidos	65% Sólidos
3500	1	1	1	1	1	1	1
3080	1	1	1	1	1	1	1
2710	0.9993	0.9992	1	0.9991	1	1	1
2390	0.9983	0.9979	1	0.9978	1	1	1
2100	0.997	0.996	1	0.9961	1	1	1
1850	0.9955	0.9935	1	0.994	1	1	1
1630	0.9937	0.99	1	0.9914	1	1	1
1430	0.9919	0.9857	1	0.9884	1	1	1
1260	0.9901	0.9807	1	0.9851	1	1	1
1110	0.9887	0.9751	1	0.9816	1	1	1
976	0.9876	0.9692	1	0.9776	1	1	0.9976
859	0.9867	0.963	1	0.9731	0.9984	1	0.9916
756	0.9857	0.9561	1	0.9674	0.9949	1	0.9797
666	0.9837	0.948	1	0.9601	0.9882	1	0.9598
586	0.9794	0.9377	1	0.9503	0.9769	1	0.9303
516	0.9711	0.924	0.9979	0.9369	0.9593	0.9986	0.8905
454	0.9569	0.9058	0.9924	0.919	0.9341	0.9944	0.8407
400	0.935	0.8821	0.9818	0.8957	0.9006	0.986	0.7822
352	0.904	0.8524	0.9647	0.8665	0.8586	0.9721	0.7175
310	0.8632	0.8169	0.9402	0.8311	0.8092	0.9522	0.6495
272	0.8129	0.7762	0.9079	0.7901	0.7541	0.926	0.5816
240	0.7543	0.7315	0.868	0.7441	0.6958	0.894	0.5166
211	0.6894	0.6843	0.8213	0.6944	0.6369	0.8571	0.4569
186	0.6209	0.636	0.7692	0.6424	0.5799	0.8164	0.4039
163	0.5517	0.588	0.7134	0.5898	0.5268	0.7733	0.3582
144	0.4846	0.5415	0.6557	0.538	0.4789	0.7293	0.3195
127	0.4222	0.4974	0.598	0.4881	0.437	0.6856	0.287
111	0.3661	0.456	0.5421	0.4412	0.4009	0.6433	0.2595
98.1	0.3173	0.4175	0.4891	0.3977	0.3701	0.6034	0.2358
86.4	0.2762	0.382	0.4402	0.3579	0.3437	0.5664	0.215
76	0.2422	0.3494	0.3959	0.3221	0.3208	0.5326	0.1963
66.9	0.2149	0.3193	0.3565	0.29	0.3008	0.5019	0.1793
58.9	0.193	0.2918	0.322	0.2615	0.2829	0.4743	0.1636
51.8	0.1754	0.2667	0.2919	0.2364	0.2666	0.4495	0.1493
45.6	0.1612	0.2436	0.2658	0.2142	0.2517	0.4269	0.1361
40.1	0.1494	0.2226	0.2429	0.1947	0.238	0.4059	0.1241
35.3	0.1392	0.2033	0.2228	0.1774	0.2251	0.3861	0.1132
31.1	0.1299	0.1856	0.2046	0.1619	0.213	0.367	0.1034
27.4	0.1213	0.1693	0.188	0.1479	0.2015	0.3483	0.0944
24.1	0.1129	0.1542	0.1726	0.1351	0.1904	0.33	0.0863
21.2	0.1048	0.1403	0.158	0.1233	0.1796	0.312	0.0789
18.7	0.0969	0.1273	0.1442	0.1124	0.1689	0.2942	0.0721

16.4	0.089	0.1151	0.131	0.1021	0.1581	0.2767	0.0659
14.5	0.0813	0.1037	0.1184	0.0925	0.1473	0.2593	0.06
12.7	0.0738	0.093	0.1065	0.0834	0.1363	0.242	0.0545
11.2	0.0665	0.0829	0.0952	0.0749	0.1252	0.2247	0.0492
9.86	0.0594	0.0734	0.0847	0.0669	0.1141	0.2074	0.0442
8.68	0.0527	0.0646	0.0748	0.0594	0.1032	0.1902	0.0395
7.64	0.0462	0.0563	0.0658	0.0524	0.0925	0.1732	0.035
6.72	0.0403	0.0487	0.0575	0.0459	0.0822	0.1566	0.0308
5.92	0.0347	0.0417	0.05	0.04	0.0725	0.1406	0.0269
5.21	0.0297	0.0354	0.0433	0.0346	0.0634	0.1254	0.0233
4.58	0.0252	0.0298	0.0372	0.0297	0.0551	0.1112	0.0201
4.03	0.0212	0.025	0.0319	0.0253	0.0476	0.0981	0.0171
3.55	0.0177	0.0207	0.0272	0.0214	0.0408	0.0861	0.0145
3.12	0.0146	0.0171	0.0231	0.018	0.0347	0.0751	0.0122
2.75	0.012	0.014	0.0195	0.0149	0.0294	0.0653	0.0102
2.42	0.0097	0.0114	0.0163	0.0123	0.0247	0.0564	0.0084
2.13	0.0078	0.0092	0.0136	0.01	0.0206	0.0483	0.0068
1.88	0.0061	0.0073	0.0112	0.008	0.017	0.0411	0.0054
1.65	0.0047	0.0057	0.0091	0.0063	0.0138	0.0347	0.0042
1.45	0.0034	0.0044	0.0073	0.0048	0.0111	0.0289	0.0031
1.28	0.0024	0.0032	0.0057	0.0035	0.0088	0.0238	0.0021
1.13	0.0015	0.0022	0.0043	0.0024	0.0068	0.0193	0.0013
0.991	0.0007	0.0014	0.0032	0.0015	0.0052	0.0153	0.0006
0.872	0	0.0006	0.0022	0.0007	0.0037	0.0119	0
0.767	0	0	0.0013	0	0.0025	0.009	0
0.675	0	0	0.0006	0	0.0015	0.0066	0
0.594	0	0	0	0	0.0007	0.0046	0
0.523	0	0	0	0	0	0.003	0
0.46	0	0	0	0	0	0.0017	0
0.405	0	0	0	0	0	0.0007	0
0.357	0	0	0	0	0	0	0

	PASANTE ACUMULADO 10 MINUTOS DE MOLIENDA						
Tamaño (μm)	35% Sólidos	40% Sólidos	45% Sólidos	50% Sólidos	55% Sólidos	60% Sólidos	65% Sólidos
3500	1	1	1	1	1	1	1
3080	0.9989	1	1	1	1	1	1
2710	0.9968	1	1	1	1	1	1
2390	0.9937	1	1	1	1	1	1
2100	0.99	1	1	1	1	1	1
1850	0.9859	1	1	1	1	1	1
1630	0.9816	1	1	1	1	1	1
1430	0.9774	1	1	1	1	1	1
1260	0.9735	1	1	1	1	1	1
1110	0.9699	1	1	1	1	1	1
976	0.9668	1	1	1	1	1	0.9976
859	0.9642	1	1	1	1	1	0.9916
756	0.9621	1	1	1	1	1	0.9797
666	0.9605	1	1	1	1	1	0.9598
586	0.9591	1	1	1	1	1	0.9303
516	0.9577	1	1	1	1	1	0.8905
454	0.9561	0.9987	0.9982	1	1	1	0.8407
400	0.9537	0.9943	0.9937	1	1	0.9985	0.7822
352	0.95	0.9848	0.9851	0.9984	1	0.9932	0.7175
310	0.9446	0.9685	0.9707	0.9945	1	0.9819	0.6495
272	0.9367	0.9443	0.9493	0.9877	0.9947	0.9634	0.5816
240	0.9256	0.9114	0.9197	0.9772	0.9804	0.9375	0.5166
211	0.9102	0.8698	0.8815	0.9627	0.9546	0.9049	0.4569
186	0.8898	0.8204	0.8351	0.9438	0.9172	0.8675	0.4039
163	0.8634	0.7646	0.7816	0.9204	0.8702	0.8272	0.3582
144	0.8306	0.7041	0.7226	0.892	0.8169	0.786	0.3195
127	0.791	0.6411	0.6603	0.8587	0.7609	0.7455	0.287
111	0.745	0.5778	0.5971	0.8202	0.7055	0.7067	0.2595
98.1	0.6936	0.5162	0.5351	0.7769	0.6532	0.6703	0.2358
86.4	0.6384	0.4582	0.4763	0.7295	0.6057	0.6366	0.215
76	0.5813	0.405	0.4223	0.679	0.5636	0.6057	0.1963
66.9	0.5246	0.3576	0.3741	0.627	0.527	0.5776	0.1793
58.9	0.4704	0.3163	0.332	0.575	0.4955	0.5519	0.1636
51.8	0.4204	0.2809	0.296	0.5244	0.468	0.5279	0.1493
45.6	0.3756	0.251	0.2656	0.4765	0.4437	0.505	0.1361
40.1	0.3364	0.2256	0.24	0.4321	0.4216	0.4826	0.1241
35.3	0.3028	0.204	0.2184	0.3915	0.4009	0.4607	0.1132
31.1	0.2741	0.1852	0.1998	0.3548	0.381	0.4391	0.1034
27.4	0.2495	0.1686	0.1834	0.3217	0.3616	0.4179	0.0944
24.1	0.228	0.1535	0.1688	0.2916	0.3425	0.397	0.0863
21.2	0.2088	0.1396	0.1553	0.2643	0.3235	0.3764	0.0789
18.7	0.1912	0.1267	0.1427	0.2391	0.3046	0.3561	0.0721
16.4	0.1745	0.1145	0.1309	0.2157	0.2856	0.336	0.0659

14.5	0.1586	0.1031	0.1196	0.1938	0.2665	0.3161	0.06
12.7	0.1432	0.0925	0.1088	0.1733	0.2474	0.296	0.0545
11.2	0.1283	0.0825	0.0985	0.1543	0.2283	0.2758	0.0492
9.86	0.114	0.0733	0.0886	0.1366	0.2095	0.2554	0.0442
8.68	0.1005	0.0648	0.0793	0.1203	0.191	0.2348	0.0395
7.64	0.0879	0.057	0.0705	0.1055	0.173	0.2143	0.035
6.72	0.0763	0.0498	0.0622	0.0921	0.1557	0.1941	0.0308
5.92	0.0658	0.0434	0.0545	0.0803	0.1393	0.1746	0.0269
5.21	0.0565	0.0376	0.0475	0.0698	0.1238	0.156	0.0233
4.58	0.0483	0.0324	0.0411	0.0605	0.1094	0.1386	0.0201
4.03	0.0412	0.0277	0.0354	0.0524	0.0961	0.1225	0.0171
3.55	0.0351	0.0236	0.0303	0.0453	0.0839	0.1078	0.0145
3.12	0.0298	0.02	0.0258	0.0391	0.0728	0.0945	0.0122
2.75	0.0254	0.0168	0.0218	0.0336	0.0628	0.0824	0.0102
2.42	0.0215	0.014	0.0183	0.0288	0.0538	0.0716	0.0084
2.13	0.0182	0.0115	0.0152	0.0246	0.0457	0.0617	0.0068
1.88	0.0153	0.0094	0.0125	0.0208	0.0385	0.0527	0.0054
1.65	0.0128	0.0075	0.0102	0.0175	0.0322	0.0446	0.0042
1.45	0.0107	0.0059	0.0081	0.0145	0.0266	0.0372	0.0031
1.28	0.0087	0.0045	0.0064	0.012	0.0218	0.0305	0.0021
1.13	0.0071	0.0033	0.0049	0.0097	0.0176	0.0246	0.0013
0.991	0.0056	0.0023	0.0036	0.0078	0.014	0.0193	0.0006
0.872	0.0043	0.0014	0.0024	0.0061	0.0109	0.0147	0
0.767	0.0032	0.0007	0.0015	0.0047	0.0083	0.0108	0
0.675	0.0022	0	0.0007	0.0034	0.0062	0.0076	0
0.594	0.0013	0	0	0.0023	0.0044	0.0051	0
0.523	0.0006	0	0	0.0014	0.0029	0.0031	0
0.46	0	0	0	0.0007	0.0017	0.0017	0
0.405	0	0	0	0	0.0008	0.0007	0
0.357	0	0	0	0	0	0	0

	PASANTE ACUMULADO 15 MINUTOS DE MOLIENDA						
Tamaño (μm)	35% Sólidos	40% Sólidos	45% Sólidos	50% Sólidos	55% Sólidos	60% Sólidos	65% Sólidos
3500	1	1	1	1	1	1	1
3080	0.9987	1	1	1	1	1	1
2710	0.9963	1	1	1	1	1	1
2390	0.9926	1	1	1	1	1	1
2100	0.9878	1	1	1	1	1	1
1850	0.982	1	1	1	1	1	0.999
1630	0.9754	1	1	1	1	1	0.9973
1430	0.9684	1	1	1	1	1	0.9945
1260	0.9612	1	1	1	1	1	0.9909
1110	0.9542	1	1	1	1	1	0.9865
976	0.9473	1	1	1	1	1	0.9815
859	0.9408	1	1	1	1	1	0.976
756	0.9344	1	1	1	1	1	0.9706
666	0.9285	1	1	1	1	1	0.9654
586	0.9229	1	1	1	1	1	0.961
516	0.9178	1	1	1	1	1	0.9574
454	0.9131	1	1	1	1	1	0.9542
400	0.9085	1	1	1	1	1	0.9507
352	0.9033	0.9984	1	1	0.9994	1	0.9455
310	0.897	0.9945	1	1	0.9964	0.9993	0.9372
272	0.8888	0.9871	0.9977	0.9962	0.9894	0.9951	0.9244
240	0.8779	0.9752	0.9902	0.9859	0.9769	0.9845	0.9061
211	0.8637	0.9576	0.9752	0.9669	0.9581	0.9654	0.8817
186	0.8459	0.9335	0.9518	0.9381	0.933	0.9374	0.8513
163	0.824	0.9025	0.92	0.8997	0.9017	0.901	0.8155
144	0.7982	0.8644	0.8809	0.853	0.8651	0.8579	0.7749
127	0.7684	0.8195	0.836	0.7999	0.8244	0.8102	0.7304
111	0.735	0.7688	0.7869	0.7427	0.7811	0.7602	0.6829
98.1	0.6983	0.7135	0.735	0.6836	0.7368	0.7099	0.6336
86.4	0.6589	0.6554	0.6817	0.6249	0.693	0.6611	0.5843
76	0.6176	0.5964	0.6283	0.5685	0.6511	0.6152	0.5368
66.9	0.5751	0.5384	0.576	0.516	0.6121	0.5732	0.493
58.9	0.5325	0.4832	0.526	0.4683	0.5762	0.5355	0.4539
51.8	0.4905	0.4319	0.479	0.4259	0.5437	0.5021	0.42
45.6	0.4499	0.3855	0.4357	0.389	0.5141	0.4727	0.3909
40.1	0.4113	0.344	0.3966	0.3569	0.4871	0.4464	0.3659
35.3	0.375	0.3075	0.3616	0.3291	0.4619	0.4225	0.344
31.1	0.3411	0.2753	0.3304	0.3047	0.4383	0.4	0.3244
27.4	0.3098	0.247	0.3026	0.2829	0.4158	0.3784	0.306
24.1	0.2809	0.2219	0.2777	0.2631	0.3942	0.3572	0.2882
21.2	0.2541	0.1993	0.255	0.2446	0.373	0.3363	0.2709
18.7	0.2294	0.1789	0.2342	0.2271	0.3521	0.3157	0.2538
16.4	0.2064	0.1603	0.2149	0.2102	0.3311	0.2953	0.2371

14.5	0.1851	0.1432	0.1968	0.1938	0.31	0.2753	0.2209
12.7	0.1652	0.1276	0.1798	0.1778	0.2887	0.2556	0.2052
11.2	0.1468	0.1133	0.1636	0.1622	0.2672	0.2362	0.1899
9.86	0.1298	0.1003	0.1483	0.147	0.2457	0.2171	0.175
8.68	0.114	0.0885	0.1337	0.1323	0.2244	0.1984	0.1602
7.64	0.0996	0.0778	0.1198	0.1182	0.2035	0.1802	0.1455
6.72	0.0866	0.0682	0.1067	0.105	0.1833	0.1627	0.1309
5.92	0.0749	0.0596	0.0943	0.0926	0.164	0.146	0.1167
5.21	0.0644	0.0519	0.0829	0.0813	0.1459	0.1302	0.1032
4.58	0.0553	0.0451	0.0724	0.0709	0.1291	0.1156	0.0905
4.03	0.0473	0.0391	0.0628	0.0616	0.1137	0.1021	0.079
3.55	0.0404	0.0337	0.0543	0.0532	0.0996	0.0898	0.0686
3.12	0.0345	0.0289	0.0467	0.0458	0.0868	0.0787	0.0595
2.75	0.0295	0.0246	0.04	0.0392	0.0753	0.0685	0.0515
2.42	0.0252	0.0208	0.0342	0.0334	0.0649	0.0594	0.0445
2.13	0.0215	0.0175	0.029	0.0283	0.0556	0.0511	0.0384
1.88	0.0183	0.0145	0.0245	0.0238	0.0472	0.0436	0.0329
1.65	0.0155	0.0119	0.0206	0.0199	0.0397	0.0368	0.028
1.45	0.013	0.0097	0.0171	0.0165	0.033	0.0307	0.0236
1.28	0.0109	0.0078	0.0141	0.0135	0.0271	0.0253	0.0195
1.13	0.0089	0.0061	0.0115	0.0109	0.0219	0.0204	0.0159
0.991	0.0072	0.0046	0.0091	0.0087	0.0173	0.0162	0.0126
0.872	0.0057	0.0034	0.0071	0.0067	0.0134	0.0125	0.0097
0.767	0.0044	0.0024	0.0054	0.0051	0.0101	0.0094	0.0072
0.675	0.0032	0.0015	0.0039	0.0037	0.0074	0.0068	0.005
0.594	0.0022	0.0007	0.0026	0.0025	0.0051	0.0046	0.0033
0.523	0.0014	0	0.0016	0.0015	0.0033	0.0029	0.0019
0.46	0.0006	0	0.0007	0.0007	0.0019	0.0016	0.0008
0.405	0	0	0	0	0.0008	0.0007	0
0.357	0	0	0	0	0	0	0
0.314	0	0	0	0	0	0	0
0.276							0

	PASANTE ACUMULADO 20 MINUTOS DE MOLIENDA						
Tamaño (μm)	35% Sólidos	40% Sólidos	45% Sólidos	50% Sólidos	55% Sólidos	60% Sólidos	65% Sólidos
3500	1	1	1	1	1	1	1
3080	1	0.9987	1	1	1	1	1
2710	1	0.9962	1	1	1	1	1
2390	1	0.9924	1	1	1	1	1
2100	1	0.9874	1	1	1	1	1
1850	1	0.9814	1	1	1	1	1
1630	1	0.9743	1	1	1	1	1
1430	1	0.9664	1	1	1	1	1
1260	1	0.9577	1	1	1	1	1
1110	1	0.9484	1	1	1	1	1
976	1	0.9387	1	1	1	1	1
859	1	0.9287	1	0.9994	1	1	1
756	1	0.9187	1	0.9984	1	1	1
666	1	0.9088	0.9993	0.9972	1	1	1
586	1	0.8991	0.9982	0.9958	1	1	0.9994
516	1	0.8901	0.9967	0.9945	1	1	0.9984
454	1	0.882	0.9948	0.9932	1	1	0.9969
400	1	0.8752	0.9925	0.9919	1	1	0.9944
352	1	0.8697	0.99	0.9903	0.9991	1	0.9902
310	1	0.8658	0.9872	0.988	0.9975	1	0.9834
272	1	0.8632	0.9846	0.9845	0.9949	0.998	0.9731
240	1	0.8617	0.9823	0.979	0.9909	0.9933	0.9585
211	0.9992	0.8609	0.9805	0.9703	0.9848	0.985	0.9391
186	0.9966	0.8603	0.979	0.9575	0.976	0.9725	0.9146
163	0.9913	0.8595	0.9775	0.9393	0.9638	0.9554	0.8851
144	0.9827	0.8583	0.9753	0.9147	0.9473	0.9337	0.8513
127	0.9702	0.8565	0.9715	0.8832	0.9261	0.907	0.814
111	0.9536	0.854	0.9649	0.8445	0.8997	0.8755	0.7742
98.1	0.9324	0.8507	0.9549	0.7994	0.8685	0.8392	0.7333
86.4	0.9069	0.8465	0.9408	0.7491	0.8329	0.7985	0.6924
76	0.8774	0.8413	0.9226	0.6958	0.7943	0.7542	0.6526
66.9	0.8446	0.8349	0.9004	0.6418	0.7538	0.7076	0.615
58.9	0.8095	0.8266	0.8747	0.5893	0.713	0.6599	0.5799
51.8	0.7729	0.8157	0.8462	0.5402	0.6732	0.6125	0.5479
45.6	0.7358	0.8012	0.8154	0.4958	0.6352	0.5666	0.5188
40.1	0.699	0.7823	0.7829	0.4566	0.5996	0.5233	0.4924
35.3	0.6628	0.7582	0.7491	0.4224	0.5662	0.4835	0.4683
31.1	0.6274	0.7285	0.7141	0.3926	0.535	0.4474	0.4458
27.4	0.5928	0.693	0.6778	0.3663	0.5055	0.4153	0.4243
24.1	0.5589	0.6521	0.6404	0.3427	0.4773	0.3866	0.4033
21.2	0.5257	0.6065	0.6019	0.321	0.4501	0.3607	0.3825
18.7	0.493	0.5575	0.5624	0.3005	0.4235	0.3366	0.3614
16.4	0.4608	0.5063	0.5221	0.2808	0.3973	0.3137	0.34

14.5	0.4288	0.4546	0.4815	0.2617	0.3713	0.2913	0.3183
12.7	0.3971	0.404	0.4408	0.2429	0.3454	0.2692	0.2963
11.2	0.3657	0.3558	0.4004	0.2244	0.3196	0.2474	0.2742
9.86	0.3345	0.3111	0.3606	0.2061	0.2939	0.226	0.2522
8.68	0.3038	0.2705	0.322	0.1882	0.2686	0.2051	0.2304
7.64	0.2737	0.2344	0.2849	0.1708	0.2439	0.1852	0.2091
6.72	0.2444	0.2028	0.25	0.154	0.2201	0.1664	0.1887
5.92	0.2164	0.1756	0.2175	0.1379	0.1973	0.1489	0.1692
5.21	0.1899	0.1523	0.188	0.1228	0.176	0.1328	0.151
4.58	0.1654	0.1323	0.1616	0.1088	0.1562	0.118	0.134
4.03	0.1429	0.1153	0.1384	0.0958	0.1379	0.1045	0.1184
3.55	0.1228	0.1006	0.1184	0.084	0.1213	0.0922	0.1042
3.12	0.1049	0.0878	0.1012	0.0733	0.1061	0.081	0.0912
2.75	0.0893	0.0766	0.0866	0.0636	0.0924	0.0707	0.0795
2.42	0.0758	0.0665	0.0743	0.0549	0.08	0.0614	0.0689
2.13	0.0642	0.0575	0.0638	0.0471	0.0688	0.0529	0.0592
1.88	0.0543	0.0493	0.0548	0.0402	0.0587	0.0452	0.0505
1.65	0.0459	0.0419	0.0471	0.034	0.0497	0.0382	0.0427
1.45	0.0387	0.0353	0.0403	0.0285	0.0416	0.0319	0.0357
1.28	0.0326	0.0293	0.0344	0.0236	0.0344	0.0262	0.0295
1.13	0.0274	0.024	0.0291	0.0193	0.0281	0.0213	0.024
0.991	0.0229	0.0194	0.0244	0.0156	0.0225	0.0169	0.0191
0.872	0.019	0.0153	0.0202	0.0124	0.0178	0.0131	0.015
0.767	0.0157	0.0119	0.0165	0.0096	0.0137	0.0099	0.0115
0.675	0.0128	0.009	0.0132	0.0073	0.0103	0.0072	0.0085
0.594	0.0104	0.0065	0.0104	0.0053	0.0074	0.005	0.0061
0.523	0.0082	0.0046	0.0079	0.0037	0.0051	0.0033	0.0041
0.46	0.0064	0.003	0.0058	0.0024	0.0033	0.0019	0.0026
0.405	0.0048	0.0017	0.0041	0.0014	0.0019	0.0008	0.0015
0.357	0.0035	0.0007	0.0027	0.0006	0.0008	0	0.0006
0.314	0.0023	0	0.0016	0	0	0	0
0.276	0.0014	0	0.0007	0	0	0	0
0.243	0.0006	0	0	0	0	0	0

Anexo 4: Tabla para la traficación del modelo Rosin Rambler a diferentes tiempos de molienda

MOLIENDA 5 MINUTOS							
	LN(LN(1/(1-F(X))))						
LN(X)	F(X) 35%	F(X) 40%	F(X) 45%	F(X) 50%	F(X) 55%	F(X) 60%	F(X) 65%
8.161	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8.033	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.905	1.983	1.964	#DIV/0!	1.948	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.779	1.853	1.819	#DIV/0!	1.811	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.650	1.759	1.709	#DIV/0!	1.713	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.523	1.687	1.617	#DIV/0!	1.632	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.396	1.623	1.527	#DIV/0!	1.559	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.265	1.572	1.446	#DIV/0!	1.494	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.139	1.529	1.373	#DIV/0!	1.437	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.012	1.500	1.306	#DIV/0!	1.385	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.883	1.479	1.247	#DIV/0!	1.335	#DIV/0!	#DIV/0!	1.797
6.756	1.463	1.193	#DIV/0!	1.285	1.862	#DIV/0!	1.564
6.628	1.446	1.140	#DIV/0!	1.231	1.664	#DIV/0!	1.360
6.501	1.415	1.084	#DIV/0!	1.170	1.491	#DIV/0!	1.167
6.373	1.356	1.021	#DIV/0!	1.099	1.327	#DIV/0!	0.980
6.246	1.265	0.947	1.819	1.016	1.164	1.883	0.794
6.118	1.146	0.860	1.585	0.922	1.000	1.646	0.608
5.991	1.006	0.760	1.388	0.816	0.837	1.451	0.421
5.864	0.852	0.649	1.207	0.700	0.671	1.275	0.234
5.737	0.688	0.529	1.036	0.576	0.505	1.112	0.047
5.606	0.516	0.403	0.869	0.445	0.338	0.957	-0.138
5.481	0.339	0.274	0.706	0.310	0.174	0.808	-0.319
5.352	0.156	0.142	0.544	0.170	0.013	0.666	-0.494
5.226	-0.031	0.011	0.383	0.028	-0.142	0.528	-0.659
5.094	-0.220	-0.120	0.223	-0.115	-0.290	0.395	-0.813
4.970	-0.411	-0.249	0.064	-0.259	-0.428	0.268	-0.955
4.844	-0.601	-0.374	-0.093	-0.401	-0.554	0.146	-1.084
4.710	-0.786	-0.496	-0.247	-0.541	-0.669	0.030	-1.203
4.586	-0.963	-0.615	-0.398	-0.679	-0.772	-0.078	-1.313
4.459	-1.129	-0.731	-0.544	-0.814	-0.865	-0.180	-1.419
4.331	-1.283	-0.844	-0.685	-0.945	-0.950	-0.274	-1.521
4.203	-1.419	-0.955	-0.819	-1.072	-1.028	-0.361	-1.622
4.076	-1.540	-1.064	-0.945	-1.194	-1.101	-0.442	-1.722
3.947	-1.646	-1.171	-1.064	-1.310	-1.171	-0.516	-1.822
3.820	-1.739	-1.276	-1.174	-1.423	-1.238	-0.586	-1.922
3.691	-1.821	-1.379	-1.279	-1.530	-1.303	-0.653	-2.021
3.564	-1.898	-1.482	-1.378	-1.633	-1.366	-0.718	-2.119
3.437	-1.972	-1.583	-1.474	-1.734	-1.429	-0.782	-2.215
3.311	-2.046	-1.685	-1.569	-1.832	-1.492	-0.848	-2.311
3.182	-2.122	-1.787	-1.664	-1.930	-1.555	-0.915	-2.405
3.054	-2.201	-1.889	-1.760	-2.028	-1.620	-0.984	-2.499
2.929	-2.284	-1.994	-1.860	-2.127	-1.687	-1.054	-2.593
2.797	-2.373	-2.101	-1.963	-2.228	-1.760	-1.127	-2.686

MOLIENDA 10 MINUTOS							
	LN(LN(1/(1-F(X))))						
LN(X)	F(X) 35%	F(X) 40%	F(X) 45%	F(X) 50%	F(X) 55%	F(X) 60%	F(X) 65%
8.161	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8.033	1.919	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.905	1.748	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.779	1.623	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.650	1.527	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.523	1.450	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.396	1.385	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.265	1.332	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.139	1.289	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.012	1.254	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.883	1.225	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.797
6.756	1.203	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.564
6.628	1.186	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.360
6.501	1.173	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.167
6.373	1.162	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0.980
6.246	1.152	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0.794
6.118	1.140	1.894	1.844	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0.608
5.991	1.123	1.642	1.623	#DIV/0!	#DIV/0!	1.872	0.421
5.864	1.097	1.432	1.437	1.862	#DIV/0!	1.608	0.234
5.737	1.062	1.241	1.261	1.649	#DIV/0!	1.389	0.047
5.606	1.015	1.060	1.093	1.481	1.656	1.196	-0.138
5.481	0.955	0.885	0.925	1.330	1.369	1.020	-0.319
5.352	0.880	0.712	0.757	1.191	1.129	0.856	-0.494
5.226	0.791	0.541	0.589	1.057	0.913	0.704	-0.659
5.094	0.688	0.369	0.420	0.929	0.714	0.563	-0.813
4.970	0.574	0.197	0.249	0.800	0.529	0.433	-0.955
4.844	0.448	0.024	0.077	0.671	0.358	0.314	-1.084
4.710	0.312	-0.148	-0.095	0.540	0.201	0.204	-1.203
4.586	0.168	-0.320	-0.267	0.406	0.057	0.104	-1.313
4.459	0.017	-0.490	-0.436	0.268	-0.072	0.012	-1.419
4.331	-0.139	-0.655	-0.600	0.128	-0.187	-0.072	-1.521
4.203	-0.296	-0.815	-0.758	-0.014	-0.289	-0.149	-1.622
4.076	-0.453	-0.967	-0.908	-0.156	-0.380	-0.220	-1.722
3.947	-0.606	-1.109	-1.047	-0.297	-0.460	-0.287	-1.822
3.820	-0.753	-1.241	-1.175	-0.435	-0.534	-0.352	-1.922
3.691	-0.891	-1.364	-1.293	-0.569	-0.602	-0.417	-2.021
3.564	-1.020	-1.478	-1.401	-0.700	-0.669	-0.482	-2.119
3.437	-1.138	-1.586	-1.501	-0.825	-0.735	-0.548	-2.215
3.311	-1.248	-1.689	-1.596	-0.946	-0.801	-0.614	-2.311
3.182	-1.352	-1.792	-1.688	-1.065	-0.869	-0.682	-2.405
3.054	-1.452	-1.895	-1.779	-1.181	-0.940	-0.750	-2.499
2.929	-1.550	-1.999	-1.871	-1.297	-1.013	-0.820	-2.593
2.797	-1.651	-2.107	-1.964	-1.415	-1.090	-0.893	-2.686
2.674	-1.756	-2.218	-2.061	-1.535	-1.171	-0.968	-2.783

MOLIENDA 15 MINUTOS							
	LN(LN(1/(1-F(X))))						
LN(X)	F(X) 35%	F(X) 40%	F(X) 45%	F(X) 50%	F(X) 55%	F(X) 60%	F(X) 65%
8.161	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8.033	1.894	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.905	1.723	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.779	1.591	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.650	1.483	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.523	1.391	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.933
7.396	1.310	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.777
7.265	1.240	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.649
7.139	1.178	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.547
7.012	1.126	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.460
6.883	1.079	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.384
6.756	1.039	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.316
6.628	1.002	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.260
6.501	0.970	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.213
6.373	0.941	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.177
6.246	0.916	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.149
6.118	0.893	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.126
5.991	0.872	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.102
5.864	0.849	1.862	#DIV/0!	#DIV/0!	2.004	#DIV/0!	1.068
5.737	0.821	1.649	#DIV/0!	#DIV/0!	1.728	1.983	1.018
5.606	0.787	1.470	1.804	1.718	1.514	1.671	0.949
5.481	0.743	1.307	1.532	1.450	1.327	1.427	0.861
5.352	0.690	1.151	1.307	1.226	1.155	1.213	0.758
5.226	0.626	0.997	1.109	1.023	0.994	1.019	0.645
5.094	0.552	0.845	0.927	0.833	0.841	0.838	0.525
4.970	0.470	0.692	0.755	0.651	0.695	0.668	0.400
4.844	0.380	0.538	0.592	0.476	0.554	0.508	0.271
4.710	0.284	0.381	0.436	0.306	0.418	0.356	0.138
4.586	0.181	0.223	0.284	0.140	0.289	0.213	0.004
4.459	0.073	0.063	0.135	-0.020	0.166	0.079	-0.130
4.331	-0.039	-0.097	-0.010	-0.174	0.052	-0.046	-0.262
4.203	-0.156	-0.257	-0.153	-0.321	-0.054	-0.161	-0.387
4.076	-0.274	-0.415	-0.292	-0.459	-0.153	-0.266	-0.503
3.947	-0.394	-0.570	-0.428	-0.589	-0.243	-0.360	-0.607
3.820	-0.515	-0.720	-0.558	-0.708	-0.326	-0.446	-0.702
3.691	-0.635	-0.864	-0.683	-0.818	-0.404	-0.525	-0.786
3.564	-0.755	-1.001	-0.801	-0.918	-0.479	-0.600	-0.864
3.437	-0.874	-1.133	-0.914	-1.012	-0.550	-0.672	-0.936
3.311	-0.992	-1.260	-1.021	-1.101	-0.621	-0.743	-1.007
3.182	-1.109	-1.383	-1.123	-1.186	-0.691	-0.817	-1.079
3.054	-1.227	-1.504	-1.223	-1.271	-0.762	-0.892	-1.152
2.929	-1.345	-1.624	-1.321	-1.356	-0.835	-0.969	-1.228
2.797	-1.465	-1.745	-1.419	-1.444	-0.911	-1.050	-1.307
2.674	-1.586	-1.867	-1.518	-1.535	-0.991	-1.133	-1.388

2.542	-1.712	-1.991	-1.618	-1.631	-1.077	-1.220	-1.471
2.416	-1.840	-2.118	-1.722	-1.732	-1.168	-1.311	-1.558
2.288	-1.973	-2.247	-1.829	-1.839	-1.266	-1.408	-1.648
2.161	-2.112	-2.379	-1.941	-1.953	-1.370	-1.509	-1.745
2.033	-2.255	-2.513	-2.059	-2.073	-1.480	-1.616	-1.850
1.905	-2.402	-2.650	-2.182	-2.199	-1.597	-1.728	-1.964
1.778	-2.553	-2.790	-2.312	-2.331	-1.720	-1.846	-2.087
1.651	-2.710	-2.932	-2.447	-2.468	-1.847	-1.970	-2.217
1.522	-2.867	-3.076	-2.588	-2.610	-1.979	-2.097	-2.355
1.394	-3.027	-3.222	-2.736	-2.755	-2.114	-2.228	-2.497
1.267	-3.188	-3.373	-2.885	-2.906	-2.255	-2.363	-2.644
1.138	-3.349	-3.529	-3.040	-3.060	-2.399	-2.501	-2.791
1.012	-3.508	-3.693	-3.199	-3.219	-2.547	-2.646	-2.940
0.884	-3.668	-3.862	-3.358	-3.382	-2.702	-2.793	-3.090
0.756	-3.829	-4.037	-3.526	-3.551	-2.861	-2.948	-3.240
0.631	-3.992	-4.226	-3.697	-3.726	-3.029	-3.110	-3.398
0.501	-4.159	-4.425	-3.872	-3.907	-3.206	-3.284	-3.561
0.372	-4.336	-4.631	-4.060	-4.096	-3.395	-3.468	-3.735
0.247	-4.514	-4.850	-4.254	-4.298	-3.595	-3.664	-3.928
0.122	-4.717	-5.096	-4.460	-4.514	-3.810	-3.882	-4.133
-0.009	-4.930	-5.379	-4.695	-4.740	-4.048	-4.115	-4.368
-0.137	-5.164	-5.682	-4.944	-5.002	-4.306	-4.376	-4.631
-0.265	-5.424	-6.031	-5.219	-5.276	-4.590	-4.662	-4.930
-0.393	-5.743	-6.502	-5.545	-5.598	-4.903	-4.987	-5.296
-0.521	-6.118	-7.264	-5.951	-5.990	-5.276	-5.379	-5.712
-0.648	-6.571	#¡NUM!	-6.437	-6.502	-5.712	-5.842	-6.265
-0.777	-7.418	#¡NUM!	-7.264	-7.264	-6.265	-6.437	-7.130
-0.904	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	-7.130	-7.264	#¡NUM!

MOLIENDA 20 MINUTOS							
	LN(LN(1/(1-F(X))))						
LN(X)	F(X) 35%	F(X) 40%	F(X) 45%	F(X) 50%	F(X) 55%	F(X) 60%	F(X) 65%
8.161	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8.033	#DIV/0!	1.894	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.905	#DIV/0!	1.718	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.779	#DIV/0!	1.585	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.650	#DIV/0!	1.476	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.523	#DIV/0!	1.382	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.396	#DIV/0!	1.298	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.265	#DIV/0!	1.222	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.139	#DIV/0!	1.152	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7.012	#DIV/0!	1.087	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.883	#DIV/0!	1.027	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.756	#DIV/0!	0.971	#DIV/0!	2.004	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.628	#DIV/0!	0.920	#DIV/0!	1.862	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.501	#DIV/0!	0.873	1.983	1.771	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
6.373	#DIV/0!	0.830	1.844	1.700	#DIV/0!	#DIV/0!	2.004
6.246	#DIV/0!	0.792	1.743	1.649	#DIV/0!	#DIV/0!	1.862
6.118	#DIV/0!	0.759	1.660	1.608	#DIV/0!	#DIV/0!	1.754
5.991	#DIV/0!	0.733	1.588	1.572	#DIV/0!	#DIV/0!	1.646
5.864	#DIV/0!	0.712	1.527	1.534	1.948	#DIV/0!	1.532
5.737	#DIV/0!	0.697	1.472	1.487	1.790	#DIV/0!	1.411
5.606	#DIV/0!	0.688	1.429	1.427	1.664	1.827	1.285
5.481	#DIV/0!	0.682	1.395	1.352	1.547	1.611	1.158
5.352	1.964	0.679	1.371	1.257	1.432	1.435	1.029
5.226	1.738	0.677	1.352	1.150	1.316	1.279	0.900
5.094	1.557	0.674	1.333	1.030	1.200	1.135	0.772
4.970	1.400	0.670	1.309	0.901	1.079	0.998	0.645
4.844	1.257	0.663	1.269	0.764	0.957	0.865	0.520
4.710	1.122	0.654	1.209	0.621	0.833	0.734	0.398
4.586	0.991	0.643	1.131	0.474	0.707	0.603	0.279
4.459	0.865	0.628	1.039	0.324	0.582	0.471	0.165
4.331	0.741	0.610	0.940	0.174	0.458	0.339	0.056
4.203	0.622	0.588	0.836	0.026	0.338	0.207	-0.047
4.076	0.506	0.561	0.731	-0.117	0.222	0.076	-0.142
3.947	0.394	0.525	0.627	-0.252	0.112	-0.053	-0.231
3.820	0.286	0.480	0.524	-0.379	0.008	-0.179	-0.313
3.691	0.183	0.422	0.424	-0.494	-0.089	-0.300	-0.389
3.564	0.083	0.350	0.324	-0.600	-0.180	-0.414	-0.459
3.437	-0.013	0.265	0.225	-0.696	-0.267	-0.522	-0.527

Anexo 5: Gráficas DTP modelo Rosin Rambler

