



MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA - QUÍMICA

CINÉTICA DE LA MOLIENDA DEL CARBÓN BITUMINOSO

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

Malakia Namindo Namindo

Moa

2015



MINISTERIO DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA - QUÍMICA

CINÉTICA DE LA MOLIENDA DEL CARBÓN BITUMINOSO

TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES.

Autor: Malakia Namindo Namindo

Tutor: Prof. Tít. Ing. Alfredo L. Coello Velázquez, Dr.C.

Académico Titular

Moa

2015



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Malakia Namindo Namindo

Autor de este trabajo de diploma titulado: "Cinética de la molienda del carbón bituminoso" certifico su propiedad intelectual a favor del instituto superior minero metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez" el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Firma: Fecha:.....

Autor: Malakia Namindo Namindo

Firma: Fecha:.....

Tutor: Prof. Tít. Alfredo L. Coello Velázquez, Dr. C.



PENSAMIENTO

“La Educación es el pasaporte hacia el futuro, el mañana pertenece a aquellos que se preparan para él en el día de hoy”.

- Malcolm X

“Todos y cada uno de nosotros paga puntualmente su cuota de sacrificio consciente de recibir el premio en la satisfacción del deber cumplido, consiente de avanzar con todos hacia el hombre nuevo que se vislumbra en el horizonte”.

-El Che

“Serás lo que debas ser o no serás nada”.

-San Martín

“Dar siempre gracias a Nuestro Padre Dios por todo en nombre del nuestro señor Jesús Cristo”.

Efesios: 5,19 - 20



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma:

En primer lugar a la memoria de mis padres, Suzan Martines Ndahambela y Lazaruz Sageus Namindo Shipwikineni que en paz descanse.

A mi familia en especial a mi querida abuela Apollonia Filippus por la educación desde niño y su enseña de ser culto y bien educado, por el amor incondicional y por todo el apoyo que me han dado.

A mis futuros hijos que sea un ejemplo para ellos.

A todas aquellas personas que han contribuido de una forma u otra a mi formación profesional y porque de alguna forma han estado a mi lado.



AGRADECIMIENTO

Agradezco...

A Dios por haberme permitido vivir, tener salud y por su bendición, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, y agradezco a mi familia.

Les agradezco el gobierno Namibio por brindarme la oportunidad de estudiar, la revolución cubana que hizo realidad mi sueño de formarme como Ingeniero Metalúrgico y Materiales.

A mi tutor el Dr.C Alfredo L. Coello Velázquez, que supo a guiarme y dedicarme parte de su preciado tiempo, por inculcar en mí su conocimiento y su experiencia para de esta forma lograr la realización de este trabajo, también al profesor Ms.C. Rodney Martínez Rojas y Ms.C Roger Samuel Almenares Reyes por su ayuda. A Los profesores del Departamento de Metalurgia y Química y los trabajadores del centro de investigación CEDNIQUE en especial Camilo Frómeta.

Un agradecimiento especial a mi novia Yuslaidis Castillo Pérez, a su mama Yonaglis Pérez Rivera y su familia por su apoyo, por ser una parte muy importante de mi vida en Cuba.

A mis compañeros del aula, a mis compatriotas y colegas de la residencia.

En fin a todos lo que de una forma u otra han colaborado en la realización de este trabajo. ¡Muchísimas Gracias!



RESUMEN

El carbón bituminoso se plantea como alternativa energética en el proyecto de Ferroníquel S.A. Por los requisitos técnicos de su empleo, se hace necesario el estudio de la cinética del proceso de molienda y la determinación del modelo cinético acumulativo. La empresa Ferroníquel Minera S.A. suministró las muestras en un tanque hermético, la cual fue homogeneizada por el método del anillo y el cono y sometida a la trituración en dos etapas hasta un tamaño menor de 3.15 mm. Tanto el material triturado de la primera etapa como el de la segunda etapa (antes de la molienda) se sometieron a un análisis granulométrico por vía húmeda usando los siguientes tamaños; para la trituración (30; 25; 20; 16; 12,7; 10; 8; 5; 3,15) mm y para la molienda (3,15; 1,98; 1,4; 1,0; 0,803; 0,59; 0,4; 0,25; 0,20; 0,147; 0,125; 0,088 y 0,074). Los ensayos de la cinética se realizaron en un molino de bolas de laboratorio con un diámetro de 19,5 y una longitud 24 cm, localizado en el laboratorio de beneficio del ISMM. A partir de los resultados de la molienda, usando un fichero en Microsoft Excel elaborado para tal efecto, se obtuvieron los valores de los coeficientes k_i , C y n del modelo cinético-acumulativo. Como resultado del trabajo se expone las curvas de la cinética del proceso de molienda para las clases granulométricas estudiadas y los valores de los coeficientes de modelo cinético-acumulativo.

Palabras claves: Carbón bituminoso. Cinética de molienda. Modelo cinético-acumulativo



ABSTRACT

The bituminous coal is planned as energy alternative in Ferroníquel SA project. For the technical requirements of their use, it becomes necessary the study of kinetics grinding process and the kinetic accumulative model determination. The mining Company Ferroníquel S.A., gave the samples in a hermetic tank, which was homogenized by the method of the ring and the cone and subjected to the trituration in two stages until a size smaller than 3.15 mm. The crushed material of the first stage as well that of the second stage (before the mill) they underwent an analysis of size characteristics by via wet method using the following sizes; for the trituration (30; 25; 20; 18; 12,7; 10; 8; 6; 4,47; 3,15) mm and for the mill (3,15; 1,98; 1,4; 1,0; 0,803; 0,59; 0,4; 0,25; 0,20; 0,147; 0,125; 0,088 and 0,074). The experiment of the kinetics were carried out in a laboratory ball mill with a diameter of 19,5 and a longitude 24 cm, located in the laboratory of mineral processing at ISMM. From the experimental result, using Microsoft Excel file elaborated for such effect, the values of the coefficients k_i , C and n of the kinetic-accumulative model was obtained. As a result of the work it is exposed the curves of the kinetics of the grinding process for the classes of size characteristic studied and the coefficients values of kinetic-accumulative model.

Keywords: Bituminous coal. Kinetic of grinding. Kinetic-accumulative model.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. ELEMENTOS PRINCIPALES DEL CARBÓN BITUMINOSO	4
1.1.1. Usos y aplicación de Carbón.....	6
1.2. ASPECTOS FUNDAMENTALES SOBRE PREPARACIÓN MECÁNICA	7
1.2.1. Proceso de trituración	9
1.2.2. Procesos de molienda	10
1.3. CINÉTICA DE MOLIENDA	12
1.4. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS FENÓMENOS DE FRACTURA DE MATERIALES.....	13
1.4.1. Funciones de distribución de tamaño.....	14
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO.....	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1. TOMA Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	17
2.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	20
2.3. MÉTODOS PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL MATERIAL	25
2.3.1. Metodología para la determinación de la composición granulométrica	25
2.3.2. Cálculo de la carga de bolas y la masa de material para alimentar al molino	28
2.3.3. Obtención del Modelo cinético acumulativo	33
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO	34
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL OBTENIDO EN LA PRIMERA ETAPA DE TRITURACIÓN	36
3.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL OBTENIDO EN LA SEGUNDA ETAPA DE TRITURACIÓN	36
3.3. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL MOLINO	38



3.4.	RESULTADOS DE LA MOLIENDA.....	39
3.5.	MODELO CINÉTICO ACUMULATIVO	42
3.6.	VALIDACIÓN DEL MODELO CINÉTICO ACUMULATIVO	46
	CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO	46
	CONCLUSIONES GENERALES	47
	RECOMENDACIONES	48
	BIBLIOGRAFÍA	49
	ANEXOS	



Introducción

La crisis económica en el mundo ha provocado la introducción de nuevas prácticas industriales, cuya finalidad es adecuar los recursos de las empresas en un mundo moderno considerablemente dinámico y competitivo. Las industrias representan las principales pérdidas económicas al utilizar en su tecnología materiales relativamente costosas. La modernización del proceso o el empleo de combustibles más baratos son algunas de las alternativas para disminuir los costos.

La competencia en el mercado ha obligado a la industria extractiva a realizar producciones de alto valor agregado a bajos costos. En el caso particular de la industria del níquel los costos constituyen la partida decisiva en la producción. En este sentido, el empleo de insumos energéticos más baratos aparece como una línea de desarrollo en esta industria. A causa del alto consumo de energía y el elevado costo del petróleo, su uso como combustible sería una vía de generar menores costos debido a su bajo precio en el mercado mundial.

Los carbones se muestran como alternativas interesantes al evaluarlos no solo en el proyecto de Ferroníquel SA, sino también en la tecnología carbonato-amoniaco. El empleo del carbón bituminoso en la industria de níquel pasa por la decisión de la evaluación de la molienda en bolas como una variante tecnológica en su preparación.

La molienda de minerales constituye una de las operaciones más costosas desde el punto de vista energético (Coello, 1999). De ahí que el estudio del desarrollo del proceso en el tiempo (cinética del proceso) constituye uno de los principales parámetros a investigar en su evaluación como proceso de preparación de minerales. La importancia de este elemento se hace más pertinente, debido al desarrollo teórico alcanzado en el campo de la molienda al asumir el molino como un reactor químico. Toda la teoría moderna de la molienda basa sus postulados en esta asunción (Austin et al 1976, 1984).



Situación problemática:

La necesidad de determinar las regularidades del comportamiento de la molienda en molinos de bolas para obtener un producto con las características granulométricas adecuadas para ser empleado como material alternativo en la generación de energía en la industria de níquel.

Problema de investigación:

El estado actual del conocimiento de la cinética de proceso de molienda del carbón bituminoso, limita su empleo como alternativa energética en la industria extractiva del níquel.

Objeto de investigación: Cinética de la molienda del carbón bituminoso.

Campo de Acción:

Parámetros de molibilidad del proceso de molienda del carbón bituminoso.

Objetivo general:

Determinar las regularidades de la cinética del proceso de molienda del carbón bituminoso para su posible empleo como material alternativo en la generación de energía en la industria extractiva del níquel.

Objetivos específicos:

- Caracterizar granulométricamente el material inicial y los productos del proceso de molienda.
- Determinar los parámetros de molibilidad del modelo cinético acumulativo para la estimación del contenido de las clases en el tiempo.

Hipótesis:

La caracterización granulométrica de los productos de la molienda y su desarrollo en el tiempo, permitirá determinar los parámetros del modelo cinético acumulativo del carbón bituminoso y plantear las pautas para su procesamiento y posterior utilización



como material alternativo en la generación de energía en la industria extractiva del níquel.

Tareas de investigación:

- Toma y preparación de muestras.
- Determinación de la composición granulométrica de los productos triturados y molidos.
- Determinación de la cinética de molienda en 1; 2; 3; 4; 5; 7; 10 y 12 minutos.
- Determinación de los parámetros del modelo cinético acumulativo.

Métodos de investigación:

Para el diagnóstico del objeto de investigación y la formulación del problema se hizo uso del método histórico – lógico, además de los procedimientos teóricos del análisis y se emplearon los métodos empíricos, tales como las técnicas estadísticas y procedimientos propios del área de investigación.



1. Marco teórico

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos que resultan de vital importancia para el desarrollo de la investigación, incluyendo los principales trabajos que han sido tratados sobre el tema en cuestión, para aprovechar sus principales aportes y experiencias. Son tratados temas relacionados con las características generales del carbón bituminoso, de la preparación mecánica, del proceso de molienda, así como las características del equipo utilizado para llevar a cabo esta operación. Por otra parte se analiza la cinética de la molienda y el modelo cinético acumulativo.

1.1. Elementos principales del carbón bituminoso

El carbón no es un mineral desde el punto de vista geológico (Wills, 2006), es un combustible fósil que en los últimos años ha tenido gran aplicación en la industria metalúrgica como portador de calor. Hace aproximadamente de 190 a 345 millones de años se estima el surgimiento del carbón o carbón mineral, que es una “roca” muy rica en carbono utilizada como combustible fósil. La mayor cantidad de carbón se formó en el período carbonífero (Mayans, 2012). Grandes extensiones del planeta estaban cubiertas por una extensa vegetación que crecía en pantanos. Al morir las plantas, quedaban sumergidas por el agua y se producía la descomposición anaeróbica de la materia orgánica.

Existen diversos tipos de carbón, la clasificación general y básica es por rango o categoría, carbón bituminoso es uno de ellos. Los principales yacimientos explotados comercialmente del carbón bituminoso se encuentran en Estados Unidos, China y Rusia. En Cuba no existen yacimientos de este tipo de combustible, sin embargo es utilizado en el país el carbón bituminoso aunque no con fines energéticos.



La fórmula empírica del carbón bituminoso es $C_{137}H_{97}O_9NS$ (Brian H, 2008). El carbón bituminoso es un carbón relativamente duro que contiene betún, de mejor calidad que el lignito pero peor que la antracita por por ciento de carbono que contiene. Suele ser de color negro, a veces marrón oscuro, presentando a menudo unas bandas bien definidas de material brillante y mate. Las vetas de carbón bituminoso se identifican estratigráficamente por la distintiva secuencia de bandas brillantes y oscuras. Es una roca sedimentaria orgánica formada por la compresión diagenética y sub-metamórfica de material turboso, de forma que sus componentes principales son macérales: vitrinita, exinita, etcétera. Entre los tipos de carbón, el carbón bituminoso es el más común en el mercado internacional, contiene entre 60 y 80 % de carbono, siendo el resto agua, aire, hidrógeno y azufre que no ha sido repelido de los macérales. Se diferencia del lignito, por su mayor poder calorífico, entre 30 y 36 MJ/kg. Es el carbón con mayor poder calorífico aunque es muy contaminante. Las normas ASTM fijan un estándar en la clasificación de carbones. Esta norma define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, o base húmeda sea menor a 6, 390 kcal/kg (26, 754 kJ/kg), en este rango están los carbones denominados sub bituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 6, 390 kcal/kg (26, 754 kJ/kg), se incluyen los carbones bituminosos y antracitas (German, 2007).

Los carbones bajos o bituminosos se clasifican según su reflectancia, humedad, contenido volátil, plasticidad y contenido de ceniza. Generalmente, los carbones bituminosos de mayor valor tienen un grado mínimo de plasticidad, volatilidad y bajo contenido en ceniza, especialmente con bajo contenido en carbonatos, fósforo y azufre (Ariztimuño, 2010).

Los carbones bajos en ceniza, azufre y carbonatos son apreciados para la generación de energía porque no producen demasiada escoria y no exigen demasiado esfuerzo para eliminar las partículas en suspensión de los gases de combustión. Los carbonatos son dañinos pues tienden a adherirse a la caldera. El



contenido sulfuroso también es dañino en cierta medida por ser emitido a la atmósfera y contribuir a la formación de smog y lluvia ácida.

1.1.1. Usos y aplicación de Carbón

Los usos han variado ampliamente de acuerdo con su grado, pero son tres los campos en que se ha distinguido. Su uso de mayor importancia ha sido como combustible para generar electricidad y calor (plantas termoeléctricas, uso industrial, doméstico y ferrocarrilero). Un porcentaje considerable del uso mundial del carbón bituminoso que tenga las propiedades adecuadas ha sido la manufactura de coque de grado metalúrgico, que es el producto residual en la destilación de la hulla, y también es utilizado para la reducción de óxidos metálicos en metalurgia extractiva.

Hace años se utilizó en forma extensa para la producción de gas, y las nuevas investigaciones parecen indicar la tendencia hacia un desarrollo importante en la conversión del mismo en combustibles líquidos y gaseosos para reemplazar el petróleo y gas natural. Fue una de las fuentes principales de numerosos y variados productos químicos antes de ser suplantado en gran parte por el petróleo y gas; pero los nuevos desarrollos pueden renovar en el futuro su importancia en la misma forma como sucede con su conversión a combustibles líquidos y gaseosos. Por su forma de uso, el carbón bituminoso se conoce como carbón coquizables, usados en procesos de obtención tanto del acero y los carbones térmicos usados en la producción de vapor para generación de energía.

A partir de 1980, se empezaron las investigaciones para desarrollar gasolina a partir de carbón. El alto coste en la producción de gasolina de este modo, hace que no sea competitivo con el método "tradicional", aunque el hecho de que las reservas petrolíferas esté disminuyendo y que los pozos son cada vez más pequeños e inaccesibles hace que vuelva a estar en auge esta posibilidad (Ariztimuño, 2010).



Se investigan varios métodos, que deberán demostrar su compatibilidad con el medio ambiente. El que más desarrollado está en estos momentos es el llamado proceso de extracción por disolvente líquido, donde se diluye el carbón en un solvente derivado del proceso. A continuación se filtra la ceniza y la materia mineral no disuelta, dando lugar a un material limpio, libre de ceniza y minerales, en estado líquido a la temperatura del proceso. A partir de ahí, este extracto se trata mediante procesos de refinado de petróleo más o menos tradicionales, hidrogenando el material para producir líquidos destilados que pueden refinarse hasta obtener una fracción de gasolina y de gasóleo.

1.2. Aspectos fundamentales sobre preparación mecánica

La preparación mecánica constituye la base fundamental para el desarrollo de diversos procesos tanto metalúrgicos como de la vida diaria, de aquí su importancia. Debido a que la mayoría de los minerales están finamente diseminados e íntimamente asociados a la ganga (mineral estéril), antes de la separación, estos tienen que ser debidamente liberados; esto significa que tanto los granos del componente útil como el estéril deben quedar libres en la mezcla mineral. El objetivo principal de la preparación mecánica es relacionado con la liberación del componente útil del estéril y el aumento de la superficie de contacto, el material pulverizado aumenta su eficiencia energética debido al incremento del área por unidad de volumen (Hojas, 2006). Ambos fines se logran mediante la reducción sucesiva, hasta lograr que el grano mineral sea monofásico, o mono-componente, lo cual en la práctica es verdaderamente difícil (Coello, 1999).

La trituración y la molienda son procesos de disminución de las dimensiones de los trozos (granos) de los minerales, mediante la destrucción de los mismos por acción de fuerzas exteriores que superan las fuerzas interiores de cohesión, las que unen entre ellos las partículas del cuerpo sólido. En esencia los procesos de trituración y molienda no se diferencian entre sí. Comúnmente se considera que de la trituración



se obtiene un producto preferentemente grueso y de la molienda más fino de 5 mm (Andreev et al. 1980).

El proceso de trituración va acompañado de la compresión del material contra superficies rígidas, o por impactos contra superficies también rígidas. En la molienda, es característica la abrasión y el impacto o golpe del mineral por elementos libres como las bolas o las barras.

La diferencia entre trituradoras y molinos consiste en que en las primeras no existe punto de contacto entre los elementos trituradores, ya que consta una holgura que los separa, la cual es ocupada por el material durante el proceso de rompimiento, a esta holgura se le conoce como cámara o zona de trituración. No ocurre de igual manera en los molinos, en estos los elementos percusores sí logran el choque o impacto de unos con otros (Coello, 1999). Las piezas de trituración de los molinos tienen contacto directo entre sí durante la marcha en vacío. Durante el trabajo bajo carga se dividen por una capa del material o pueden estar en contacto parcialmente (Andreev et al. 1980).

La trituración y la molienda en las fábricas de enriquecimiento, sirven de operaciones preparatorias antes del enriquecimiento y tienen como destino la separación (apertura) de los granos de distintos minerales contenidos en las rocas, fuertemente entremezclados y afines químicamente. Cuanto más se abren (se liberan uno de otro) los minerales en la trituración y la molienda, tanto más exitoso resultará el posterior enriquecimiento de los minerales. Desde hace muchos años los procedimientos de trituración, molienda y cribado son utilizados con amplitud por el hombre en su actividad productiva. Es difícil indicar una rama industrial o economía nacional en la que de una u otra, no se utilicen estos procesos (Andreev et al. 1980). El fin tecnológico de proceso de trituración y molienda consiste en reducir el tamaño de partículas más gruesas en un tamaño mínimo para su posterior utilización en otros procesos.



1.2.1. Proceso de trituración

Para el tratamiento industrial de rocas y minerales, es necesario ejercer una preparación mecánica de los mismos. Dentro de esa preparación normalmente se requiere efectuar una reducción de tamaño. Durante la trituración se reduce el tamaño de los minerales de grandes tamaño hasta un 10 mm de la clase de tamaño. La trituración es también denominada desintegración y las máquinas que la producen trituradoras, desintegradoras, quebrantadoras o machacadoras.

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

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

El método de trituración se debe seleccionar teniendo en cuenta que:



- La trituración para partículas gruesa, media y fina de las rocas duras y frágiles se ejecuta generalmente por compresión, las duras y viscosas por compresión combinado con la fricción.
- La partícula gruesa de las rocas blandas y frágiles se realiza normalmente por penetración y la media y fina por choque.

1.2.2. Procesos de molienda

La molienda es la última operación de preparación mecánica, en la cual las partículas son reducidas en un tamaño por combinación de impacto o por abrasión, esta se puede llevar a cabo por vía seca o húmeda (Wills, 2006), el mismo se puede realizar en diferente etapa de desmenuzamiento; la preparación del mineral tiene lugar en etapas sucesivas de trituración y molienda con el intercalamiento de las operaciones de cribado y clasificación (Coello, 1999).

Los procesos de preparación mecánica en especial la molienda, son operaciones de mucho consumo de energía (Laborde et al. 2000). En el I proceso de molienda se emplean cerca de la mitad de la energía gastada por la fábrica de enriquecimiento (Wills, 2006). Por esta razón se debe tratar, en la medida de lo posible, de reducir el volumen de material sometido a estas operaciones (Lynch, 1977). El proceso de molienda se lleva a cabo en lo que se llama los molinos dando volteretas. Los diferentes tipos de molinos son de que da volteretas o rotativo lo cual incluye de la vara, de bolas, del guijarro, el autógeno, y del tubo.

En los materiales sometidos a la molienda siempre se tienen trozos (granos) más pequeños o más grandes que el tamaño deseado. Estos pedazos son separados del material inicial antes de la molienda con el empleo de cribas. Su rendimiento depende del material a triturar, del grosor del producto molido y el grado de morbilidad del mineral, de la construcción del molino, de sus dimensiones, de la forma del revestimiento, como también de las condiciones de explotación del molino, los molinos pueden trabajar en ciclo cerrado o abierto.



El término molino de bolas está restringido a la relación entre el largo y el diámetro, la cual debe ser de 1 a 1,5. El tambor se llena aproximadamente hasta la mitad del volumen interior con los elementos moledores. Con la colocación cúbica de las bolas de iguales dimensiones, cuando contiguas se sitúan en el espacio por los vértices del cubo, entonces llenan el 52 % del volumen ocupado por la carga. El restante 48 % del volumen corresponde a los espacios entre las bolas. Con la colocación tetraédrica, cuando ellos contiguas se sitúan en el espacio por los vértices del tetraedro, llenan el 74 % del volumen de la carga de bolas y los espacios entre ellos constituyen el 26 % del volumen. Para una carga de bolas de dimensiones variadas, que se encuentran colocadas sin orden en el interior del molino, se determinó por vía de pruebas que la mezcla de tales bolas llena cerca del 60 – 62 % de todo el volumen de la carga de elementos moledores lo que constituye el punto medio entre el llenado del volumen con la colocación cúbica y tetraédrica de iguales dimensiones. A la parte de los espacios entre las bolas corresponde el 38 – 40 % del volumen (Andreev et al. 1980).

Durante la rotación del tambor, los elementos moledores, gracias a la fricción, se elevan hasta la altura que corresponde al equilibrio dinámico y caen en forma de parábola, o se deslizan hacia abajo en forma de capas. La magnitud del elevamiento que sufren los medios de molienda depende de la velocidad de rotación del molino y del tipo de revestimiento del molino. A velocidades relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva. La caída en cascada produce una molienda más fina, con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de aterrizar en el “pie” de la carga. La caída en catarata produce conminución por impacto y un producto más grueso con menos desgaste del revestimiento. Los molinos se caracterizan por las dimensiones del diámetro interior y el largo del tambor. La carga de bolas, es uno de los factores que influyen de forma considerable en el proceso de molienda ya que



define el área superficial de los medios moledores. El trabajo efectivo del molino de bolas requiere que la carga de bolas contenga bastante cantidad no sólo de las bolas grandes para triturar pedazos grandes del material, sino también de las bolas de tamaño medio y pequeñas para el rompimiento de granos pequeños.

1.3. Cinética de molienda

Se denomina cinética de molienda a la regularidad de la variación de la composición granulométrica del material que se somete a la molienda, o sea, es la regularidad de la disminución de la clase gruesa de tamaño en el proceso de molienda (Coello, 1993). Para dirigir el proceso de molienda en el molino de bolas y para escoger condiciones de su trabajo más útiles es necesario conocer cómo se efectúa el proceso dado, en el tiempo (Coello et al. 2008), propuso que la velocidad de variación de la clase gruesa es directamente proporcional a la cantidad de esta clase en el momento t en el interior del molino.

Dentro de intervalo determinado de tiempo durante el trabajo del molino de bolas se toman muestras del material molido y se determinan en ellas la masa de la clase gruesa, es posible representar los resultados en un gráfico obteniéndose líneas curvas que indican la dependencia de la masa de la clase gruesa de la duración del desmenuzamiento. La forma de las curvas depende de las propiedades del material que se desmenuza y de las condiciones del desmenuzamiento. Por eso (Andreev et al. 1980) recomiendan la investigación de las curvas como parte del estudio de la cinética del proceso de molienda.

El tiempo en que se lleva a cabo el proceso de molienda, a tener un producto de molienda depende de factores importantes como el tipo de molino y la característica principal del mineral, contenido de clase grueso y las características granulométricas.

Velocidad crítica del molino



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 ejercer fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda. El molino entonces deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica. La velocidad crítica es función de la inversa de la raíz cuadrada del diámetro del molino.

1.4. Fundamentos físicos de los fenómenos de fractura de materiales

El termino fractura implica fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más cuerpos bajo la acción de tensión. Se observan dos tipos principales de modo de la fractura en los sólidos. El primero es fractura dúctil, que es el fracaso de un material después de que ha sufrido una cantidad considerable de deformación plástica. El otro es fractura frágil, que es el fracaso de un material sin sufrir prácticamente cualquier deformación plástica.

La fractura es denominada la separación de un sólido, apartando en dos o más partes por la extensión de un crujido, y llevando a una reducción en la capacidad carga-productiva de poner a cero. Los crujidos causan la concentración local de tensión para lograr los valores tan altos como el teórico de la fuerza de cohesión; lo cual produce la propagación de elementos así cruje y en el futuro ocurre la fractura del material de una manera inestable (Gupta, 2003). Para que la fractura y rompimiento ocurra, la energía correspondiente con la energía de la superficie de fractura debe aumentar para garantizar su fractura, ya que mientras más pequeña es la partículas, mayor sea es la energía necesaria para su rompimiento.



1.4.1. Funciones de distribución de tamaño

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

Lo anterior implica la necesidad de representar la magnitud de los fragmentos por una dimensión que generalmente se denomina; diámetro de la partícula o fragmento. Aunque las formas geométricas convencionales resultan muy raramente presentes en la práctica, en algunas aproximaciones se la utilizan para describir el tamaño de las partículas. Los fragmentos de forma esférica se utilizan el diámetro de la misma. Para fragmentos de forma cúbica, por diámetro se considera la longitud de la arista del cubo y la que tiene formas irregulares, el diámetro se determina por las dimensiones principales de un paralelepípedo. Utilizando diferentes fórmulas, según el procedimiento de medición y los objetivos para los cuales se determina la magnitud para conocer la caracterización granulométricas.

En la mayoría de los casos la caracterización granulométrica se realiza con la ayuda de cribas. Con el objetivo de determinar las dimensiones de una masa de granos, utilizando el método de análisis de cribas por diámetro de los mismos, se utiliza generalmente la dimensión del orificio cuadrado más pequeño por el cual estos granos pueden pasar. Debido a la presencia de una amplia gama de tamaños, en la mayoría de los materiales utilizados en la práctica resulta necesaria la utilización de varios tamices, para obtener una mayor información sobre la caracterización del tamaño de materiales. La representación detallada de la composición granulométrica de una masa de material se denomina: característica del grosor o características granulométricas.

Las características del grosor representa la composición granulométrica de un material, es decir los por cientos o fracciones de masa de la muestra que se enmarcan en los intervalos de dimensiones establecidos convenientemente,

seleccionando para ello los tamices correspondientes. Las mismas se pueden representar en forma individual o sumaria (acumulativa). La característica individual se representa como el por ciento o fracción de la masa analizada que corresponde a tamaños determinados por separados.

La característica sumaria o acumulativa expresa el por ciento o la fracción de la masa total que se encuentra por encima o por debajo de una dimensión de tamizada, de la cual se obtienen por diferencias los resultados que ofrecen la característica individual. La forma de la característica sumaria de tamaño caracteriza el predominio de los diferentes intervalos de tamaño en el material analizado, esta puede ser; cóncava, convexa o rectilínea. La curva convexa se obtiene cuando en el material predominan los granos gruesos, la cóncava cuando predominan los granos finos y la recta cuando la distribución presenta una distribución de tamaño casi uniforme (Coello, 1993).

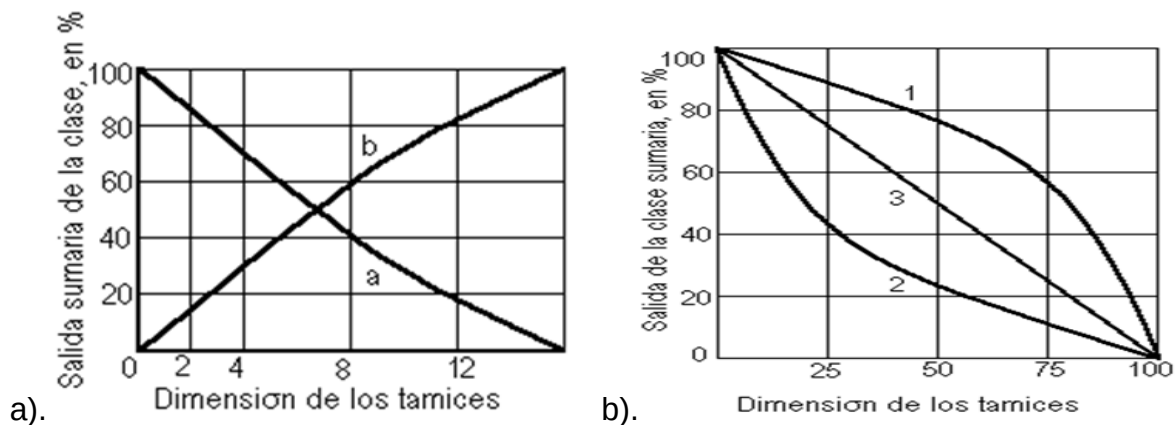


Figura 1.1: Diferentes formas de la característica sumaria o acumulativa.

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



logarítmica, con el fin de evitar que los gráficos resulten excesivamente grandes y han tratado de representar matemáticamente, funciones que describan las distribuciones de tamaño de los minerales, lo cual pueden ser de forma continua o discreta.

Conclusiones parciales del capítulo

- Como resultado de la revisión bibliográfica relacionada con la temática desarrollada, se comprobó que no existe suficiente información técnica, sobre la cinética de molienda de carbón bituminoso.
- Los parámetros fundamentales que se consideran durante los procesos de molienda de mineral son: El tamaño de partículas, grado de reducción, tiempo de molienda y parámetros del modelo cinético-acumulativo.



2. Materiales y Métodos

El éxito de una investigación científica está basada en la fiabilidad de los resultados, para esto se requieren herramientas apropiadas para su validación. La adecuada selección de los métodos y de los materiales empleados es fundamental en todos los trabajos de investigación. Su correcta selección valida los resultados obtenidos y por tanto en el presente capítulo se señalan los principales métodos, materiales, equipos, toma de muestras, los análisis granulométricos realizados. Determinación de cinética de la molienda. Así como el manejo de los resultados obtenidos. Los objetivos específicos de este capítulo son:

1. Exponer la metodología de la investigación.
2. Caracterizar los principales equipos, medios de medición, y materiales empleados durante el desarrollo del trabajo.
3. Exponer las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental.

2.1. Toma y preparación de las muestras

La investigación se realizó a escala de laboratorio. El material se encuentra en el laboratorio de beneficio de mineral del Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM) de Moa, Dr. Antonio Núñez Jiménez, es suficiente para garantizar la conformación de las muestras representativas y necesarias para los ensayos de muestreo realizado durante un mes, la masa de la muestra tomada fue de 40 kg con fragmentos de 47 mm aproximadamente. La misma es sometida a un proceso de reducción de tamaño mediante dos etapas de trituración en trituradoras de mandíbulas, las cuales tienen un diámetro de alimentación de 100 y 25 mm y descarga de 25 y 3 mm, respectivamente. Los trituradores se muestran en la figura 2,3 y 2,4 respectivamente. En la descarga de la primera y segunda etapa de trituración se utilizó la operación de cribado de control con un tamiz de 3,15 mm. El material que pasa a través del tamiz de control es sometido al proceso de molienda, y el retenido es recirculado en la



segunda etapa de trituración. Durante la preparación previa del material, con el objetivo de lograr una mayor representatividad, el material es homogenizado mediante el método de cuarteo del anillo y el cono.

El método de cuarteo de anillo y el cono consiste en que el material, mediante una pala, se vierte en el vértice de un montón que adquiere la forma de cono, y se distribuye uniformemente por todos sus lados. El menudo restante se barre minuciosamente y también se arroja en el vértice del cono. Después se coloca una tabla delgada de madera en el vértice del cono y se introduce a presión en el material, aproximadamente a una profundidad equivalente al ancho de la tabla. Luego, conservando la posición de la tabla paralela a la posición inicial, y por tanto, a la base, dicha tabla se desplaza a un lado. Con esto el material arrastrado por la tabla se distribuirá por la superficie lateral de la mitad del cono. Después la tabla en la misma posición, se mueve en dirección contraria y se desplaza la segunda mitad del material desde el vértice del cono hacia la superficie lateral de la otra mitad del cono truncado. La operación de nivelación se repite hasta que se obtenga una capa de mineral cómoda para el cuarteo, la cual debe ser no mayor de 100 a 150 mm y tener un diámetro no menor que las mayores partículas del material. Se puede nivelar el cono con una pala, desplazando gradualmente el material desde el eje del mismo, por los radios hacia la periferia. El cuarteo se realiza después de nivelar el montón con la arista de esa misma tabla. En la capa del material se hacen dos surcos mutuamente perpendiculares, los cuales se cruzan en proyección del vértice, así el montón se divide en cuatro partes. Posteriormente dos cuartos opuestos se unen siendo estos la mitad de la muestra. Una mitad de ésta se desecha, y con la otra, se repiten las operaciones de cuarteo. Esta operación se repite de 4 – 5 veces hasta lograr la homogenización. Entonces se cuarteo por el procedimiento explicado. Uno de los cuartos quedará como testigo, el resto seguirá el tratamiento de acuerdo al esquema de preparación de la muestra.

El proceso de homogeneización y preparación del material se muestra en la figura 2,1 y 2,2, respectivamente.

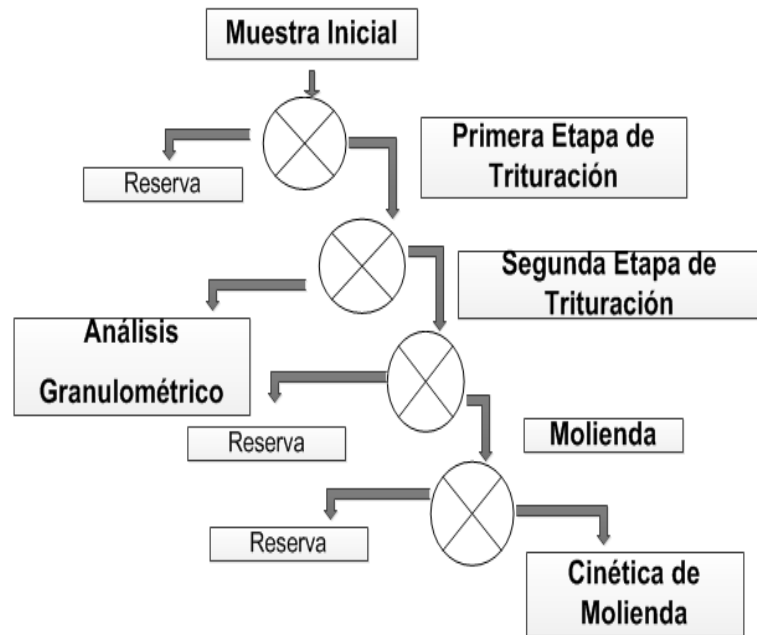


Figura 2.1. Esquema de homogenización y cuarteo de la muestra del carbón bituminoso.

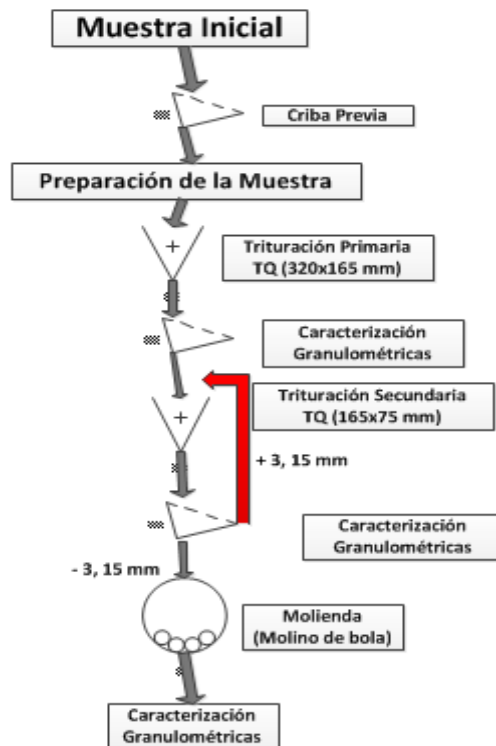


Figura 2.2. Esquema de preparación del material para la molienda.

2.2. Equipos e instrumentos utilizados

Para la realización de los experimentos fue necesario emplear un conjunto de instrumentos y equipos de laboratorio, los cuales son:

1. Trituradora de quijada de mandíbulas

Trituradora de quijada 320x165 mm para la primera etapa, que se muestra en la figura 2.3, cuyas características técnicas de la misma son:

Longitud de la quijada: 320 mm.

Boca de alimentación:

- Ancho: 100 mm.
- Largo: 165 mm.

Boca de descarga: 30 mm.



Figura. 2.3: Vista de la trituradora de quijada 320x165 mm.

El producto obtenido como resultado de la primera etapa de trituración fue sometido a una segunda etapa de trituración en una trituradora de quijada 150x75 mm. Las características técnicas aparecen a continuación:

Longitud de la quijada: 150 mm.

Boca de alimentación:

- Ancho: 55 mm.
- Largo: 75 mm.

Boca de descarga: 6,3 mm.



Figura. 2.4: Vista de la trituradora de quijada 150x75 mm.



Con el tipo de trituradora utilizada es posible fijar la granulometría requerida, por lo que en este caso se reguló de manera tal que todo el material a utilizar estuviera por debajo de 3,15 mm.

2. Juego de tamices

Los tamices son escogidos utilizando el estándar de Taylor, en el tamaño de la tela metálica posterior en $\sqrt{2}$ veces.

3. Balanza técnica

Características:

Rango de peso: 1 – 1000 g.

Error = 0,1 g.

4. Molino de bola

Molino utilizado para determinar la cinética de la molienda.

Características:

Diámetro = 19,5 cm.

Longitud = 24,5 cm.

Velocidad = 92 rpm.



Figura. 2.5: Vista del molino de bola

5. Tacómetro

Instrumento utilizado para medir la velocidad de rotación del molino de bolas.



Figura. 2.5: Tipo del tacómetro utilizado.

6. Reloj cronómetro



7. Pie de Rey

En el anexo 15 aparecen las fotos del tipo de la estufa, balanza, cronometro y pie de rey utilizado en el experimento.

El análisis del tamizado consiste en cernir la muestra a través de un juego estándar de tamices, y en determinar el porcentaje de residuos en cada uno de estos, con respecto a la muestra de la masa inicial. Los materiales de un grosor superior a 25 mm se laboran en cribas horizontales, osciladoras y de mano y los materiales de un grosor inferior a 25 mm, en cribas de laboratorio (Andreev et al. 1980).

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

Con frecuencia durante el cernido seco, sobre todo a través de los tamices menores de 1 mm, no se logra evitar la aglomeración y prácticamente la obstrucción completa de estos. En este caso se procede a la diseminación en medio acuosa (tamizado húmedo). Las muestras se tamizan por el método húmedo o seco en dependencia del grosor del material a lo que se quiere llegar y la exactitud necesaria de los resultados del análisis (Giralt et al. 2006).

Los resultados obtenidos del análisis de tamices se anotan en una tabla. Se determinan las salidas sumarias, equivalente a la suma de salida de todas las clases más gruesas (salida sumaria por más) y menos gruesa (salida sumaria por menos) que los orificios de dicha criba. Las muestras se tamizan por el método seco en dependencia del grosor del material a lo que se quiere llegar y la exactitud necesaria de los resultados del análisis.

Método húmedo de tamizado



La humedad superficial en el material provoca la formación de aglomerados de partículas finas y la adhesión de estos en los granos gruesos, dando lugar a la contaminación del retenido con partículas finas. La práctica industrial del cribado ha demostrado que para la mayoría de los materiales la humedad crítica varía de 6 – 15 %; provoca que la efectividad del cribado decrece hasta niveles de 30 – 40 % y menos. Sin embargo la influencia real de la humedad de cualquier mineral debe ser valorada solo de forma experimental. (Coello, 1999).

En el caso en que la muestra contiene una cantidad considerable de material fino, siendo necesaria una efectividad alta del análisis, o cuando el mineral se aglomera sobre la superficie tamizante, se utiliza el método por vía húmeda. La muestra se deposita en un tamiz con orificios de menor dimensión, y las partículas más diminutas (de lodo) se lavan con un chorro débil. El lavado se realiza hasta que el agua se pone clara. El resto de la muestra que queda en la criba se seca y se pesa de modo que por las diferencias entre las muestras se determina la masa de lodo lavado. Para recoger la masa del material que constituye el retenido en el tamiz se procedió del siguiente modo: 1.) se inclinó el tamiz sobre un recipiente. 2.) si queda material en las paredes del tamiz este se inclina nuevamente y se rocía ligeramente con agua por detrás del mismo hasta que no quede nada.

2.3. Métodos para determinar las características físicas del material

2.3.1. Metodología para la determinación de la composición granulométrica

La caracterización granulométrica inicial del material se realizó mediante el análisis de tamices, donde las muestras fueron caracterizadas inicialmente desde el punto de vista granulométrico. El procedimiento se basa en la determinación de las fracciones granulométricas del material, por medio de un movimiento lateral y vertical del juego de tamices, acompañado de una acción de sacudida de manera que el material se mueva continuamente sobre la superficie de los tamices. La masa mínima de la



muestra necesaria para los ensayos de granulometría se determinó como se demuestra en la ecuación 2.1.

En el análisis granulométrico del material obtenido en la primera trituración se realizó por vía seca empleando la escala de tamices de 30; 25; 20; 18; 12,7; 10; 8; 6; 4,47; 3,15 mm y para el producto obtenido en la segunda etapa trituración y en la molienda el análisis granulométrico se realizó mediante la serie de tamices de 3,15; 1,98; 1,4; 1,0; 0,803; 0,59; 0,4; 0,25; 0,20; 0,147; 0, 125; 0,088 y 0, 074 mm respectivamente.

El material obtenido por cada clase de tamaño es pesado de forma independiente para luego determinar los diferentes índices tecnológicos, se calculó el porcentaje de salida sumaria de la cantidad de material cernido y retenido según los diferentes tipos de granulometrías, para determinar las características parciales y acumulativas del material. Al igual que para el producto de la segunda etapa de trituración, el proceso de tamizado para el material molido. Las clases de tamaño obtenidas son secadas y pesadas en una balanza digital. El producto obtenido en las etapas de trituración primaria, secundaria y de molienda se separó utilizando las clases de tamaño que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clases de tamaño para la caracterización del carbón bituminoso

Primera Trituración Clase de Tamaño (mm)	Segunda Trituración Clase de Tamaño (mm)	Molienda Clase de Tamaño (mm)
-30 +25	-3,15 +1,89	-3,15 +1,89
-25 + 20	-1,89 +1,4	-1,89 +1,4
-20 + 18	-1,4+1,0	-1,4+1,0
-18+ 12,7	-1,0 +0,803	-1,0 +0,803
-12,7 + 10	-0,803 +0,59	-0,803 +0,59
-8 + 6	-0,59 +0,4	-0,59 +0,4
-6+ 4,47	-0,4 + 0,25	-0,4 + 0,25
- 4,47+ 3,15	-0,25 + 0,20	-0,25 + 0,20
- 3,15 + 0	-0,20 + 0,147	-0,20 + 0,147
-	-0,147 + 0,125	-0,147 + 0,125
-	-0,125 + 0,088	-0,125 + 0,088
-	-0,088 + 0,074	-0,088 + 0,074
-	-0,074 + 0	-0,074 + 0

Para la trituradora (150x75) mm, la masa mínima se determinó por la fórmula (2.1) que es la masa mínima para los ensayos resultante de la ecuación.

$$Q_{min} = 0,04 \cdot d^2 + 0,5d \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde:



d- diámetro del trozo máximo del mineral, mm.

$Q_{\min}$ - masa mínima de muestra para realizar análisis granulométrico., kg.

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

La carga de bola consiste en colocar las bolas de distintos tamaños hasta cubrir aproximadamente la mitad del volumen del tambor. Para que el funcionamiento del molino sea efectivo deberán cargarse tanto bolas gruesas para triturar bloques gruesos del material, como también bolas de tamaño medio y pequeño para reducir por abrasión el grano de menor dimensión. Durante el trabajo continuo las bolas poco a poco se desgastan (disminuyendo su diámetro y peso), lo que conlleva al descenso del consumo de energía y de la capacidad del molino. Para compensar el desgaste es necesario periódicamente añadir bolas al molino, manteniendo una determinada correlación entre las bolas de diferentes tamaños (Kasatkin, 1971).

El número de choque de las bolas en el molino crece al disminuir su tamaño, debido a que permaneciendo la misma masa total de bolas su número crece. Por lo tanto, es recomendable la aplicación de un tamaño mínimo cuando estas todavía son capaces de moler bien un tamaño de grosor y resistencia dada. Para determinar el diámetro de la bola máxima en la carga de bola se utiliza la fórmula de Razumov (1975).

$$D = 28 \cdot \sqrt[3]{d} \dots\dots\dots (2.2)$$

donde:

D: diámetro máximo de las bolas, mm.

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

Sustituyendo en la ecuación (2.2) el tamaño máximo de las partículas alimentadas al molino que es de 3,15 mm, se obtiene:

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



$$D = 41 \text{ mm}$$

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

$$V_{mol} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \text{ cm}^3 \dots\dots\dots (2.3)$$

donde:

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

L: longitud del molino, (24 cm)

Sustituyendo las dimensiones principales del molino en la expresión (2.3), se obtiene:

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

$$V_{mol} = 7163,9 \text{ cm}^3$$

La masa total de bolas a añadir al molino se calculó teniendo en cuenta el criterio de que el equipo alcanza su mayor rendimiento cuando la carga de bolas ocupa el 45 % de su volumen interior, la densidad de bola $\gamma = (7,5 \div 7,8) \cdot 0,6 = 4,5 - 4,68 \text{ t/m}^3$, en promedio de 4,6 t/m³ y las dimensiones del molino (Andreev et al. 1980). La masa de la carga de bola se determinó mediante la expresión:

$$M_{cb} = 4,6 \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \cdot \theta, \text{ kg} \dots\dots\dots (2.4)$$

donde:

θ , grado de llenado del molino con la carga de bolas

γ , densidad de las bolas, kg/m²

V , el volumen interior del molino (cm³)

$$M_{cb} = 4600 \cdot 0,0071639 \cdot 0,45, \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m}^3$$

$$M_{cb} = 14,8 \text{ kg}$$

Para $V = 7163,9$ y $\theta = 0,45$ se obtiene $M_{cb} = 15 \text{ kg}$.

La distribución de los tamaños y las cantidades de bolas cargadas al molino se muestran en la tabla 2.2, en referencia de la distribución de carga de bolas recomendada por Bond finalmente (Giralt et al. 2006).

Tabla 2.2. Distribución de bolas recomendadas por Bond finalmente

Tamaño de bola (cm)	No. De bola	Peso (kg)	Salida parcial (%)
3,81	18	8,803	43,7
3,175	29	7,206	35,8
2,54	44	0,672	3,3
2,223	69	2,011	10,0
1,905	93	1,433	7,1
Total:	285	20,125	100,0

A partir de estos valores es posible determinar la masa de las bolas que se emplearon en este experimento. A partir de la siguiente expresión:

$$M_1 = M_{cb} \cdot \gamma \dots\dots\dots (2.5)$$

Tabla 2.3. Masa de las bolas a partir de las empleadas por Bond.

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
6,5	5,3	0,5	1,5	1,1

Tabla 2.4. Características de la carga de bolas seleccionado.

Diámetro de las bolas (mm)	Cantidad de bolas	Peso de una bola de cada tipo (kg)	Peso de todas las bolas (kg)	Salida, %
38	18	0,35	6,5	43,91
31	29	0,18	5,3	35,81
25	44	0,01	0,4	2,70
22	50	0,03	1,5	10,13
19,05	69	0,02	1,1	7,43
TOTAL	210	0,59	14,80	100

Es necesario determinar la cantidad de material a añadir al molino y como se partió de que el volumen ocupado por las bolas es el 45 % del volumen total del molino tenemos:

$$V_{cb} = M_{mol} \cdot 0,45 \dots\dots\dots (2.6)$$

donde;



V_{cb} , es el volumen espacial de la carga de bola; cm^3

Al tomar como criterio fundamental, trabajar con una carga de material tal que garantice un valor constante de la función razón específica de la fragmentación, es preciso que el volumen que el mineral ocupa deber ser del 60 al 110 % de los espacios entre las bolas, el cual permite desarrollar el proceso sin que ocurra una sobrecarga del molino (esta ocurre a partir del 110 % de llenado de los intersticios con mineral (Rodríguez, 2011).

Se determina el volumen de material en la siguiente expresión:

$$V_{mat} = (0,6 - 1,1) \cdot V_{seb} \dots\dots\dots (2.7)$$

Siendo V_{seb} , volumen de los espacios entre las bolas; cm^3

$$V_{seb} = V_{cb} \cdot V_{tb} \dots\dots\dots (2.8)$$

Siendo V_{tb} , volumen total de las bolas; cm^3

$$V_{tb} = \sum V_b \dots\dots\dots (2.9)$$

Siendo V_b , volumen de cada bola; cm^3

Sustituyendo en la ecuación (2.8), se determina el volumen de los espacios entre las bolas.

Mediante la sustitución del valor del volumen de los espacios entre bolas en la expresión (2.8), y considerando que el material ocupa el 70 % de dichos espacios, se obtiene el volumen de material

Para determinar la masa de material a alimentar al molino se utiliza la expresión:



$$M_{ali} = \rho_{mat} \cdot V_{mat} \dots\dots\dots (2.10)$$

donde ;

ρ_{mat} : es la masa del volumen del material, g/cm³

M_{ali} : es la masa que se alimenta al molino para los ensayos de cinética, kg

La masa alimentada al molino se obtiene multiplicando el volumen que ocupa el material entre los espacios de las bolas y su peso volumétrico de 1,4 g/cm³.

2.3.3. Obtención del Modelo cinético acumulativo

Para la determinación de los parámetros de los modelos de los materiales ensayados, primeramente fue investigada la granulométrica inicial del material (para $t=0$) y luego se procedió a realizar la molienda de las muestras para diferentes tiempos. En todos los casos las muestras fueron de 1000 g.

El proceso de molienda en molinos de bolas es definido por la ecuación siguiente, Menéndez et al (2006):

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot e^{-k \cdot t} \dots\dots\dots (2.12)$$

donde;

$W(x,t)$, es la fracción de material de tamaño x , retenida en un tiempo

$W(x,0)$, es la fracción de material de tamaño x , antes de ser molido

k , es el parámetro cinético, min⁻¹

Los valores de k se obtienen por medio de la regresión lineal a partir de la expresión 2.13, resultado de la linealización de la expresión 2.12 (Beyris et al. 2013).

$$\ln (W(x,0)) - \ln (W(x,t)) = k \cdot t \quad (2.13)$$

Como resultado de este modelo, es posible relacionar matemáticamente el parámetro cinético k con el tamaño de las partículas mediante la siguiente ecuación:

$$k = C \cdot x^n \quad (2.14)$$

Los valores de C y n para cada tamaño se determinan a partir de los valores de k estableciendo una regresión lineal, con ajuste de la forma:

$$\ln k = \ln C + n \cdot \ln x \quad (2.15)$$

Donde los parámetros C y n dependen de las condiciones del proceso de molienda y de las características del material respectivamente.

Como resultado de la combinación de las ecuaciones 2.12 y 2.14 se obtiene:

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot e^{-C \cdot x^n \cdot t} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Una vez conocidos los valores de C y n , la ecuación 2.16 puede ser utilizada para estimar el peso acumulado de las partículas de tamaño x en un tiempo t . La aplicación de este modelo fue estudiada anteriormente por Finch y Ramírez – Castro y Akasani y Sonmez (Menéndez et al. 2005).

Conclusiones parciales del Capítulo

- La aplicación de técnicas y de métodos reconocidos así como el empleo de equipos e instrumentos de medición en perfecto estado técnico y certificados, garantizan la calidad y la veracidad de los resultados.
- A través de la metodología descrita es posible realizar el estudio cinético de la molienda del carbón bituminoso en molinos de bolas, así como determinar su



función de fragmentación y selección como herramienta para el estudio del comportamiento de carbón bituminoso durante el proceso molienda.

- Las técnicas y métodos empleados en la investigación se complementan con una actualizada base experimental y adecuado equipamiento lo que garantiza la confiabilidad de los resultados.



3. Análisis de los resultados y Discusión

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos mediante la caracterización granulométrica del material en estudio, tanto durante su etapa preparatoria, como para el material producto del proceso de molienda en un tiempo variable. A través de la base de datos obtenida, se establece y válida mediante pruebas estadísticas del modelo cinético acumulativo, el cual constituye una herramienta útil para la estimación de las clases de tamaño en función del tiempo de molienda.

3.1. Resultados de la caracterización granulométrica para el material obtenido en la primera etapa de trituración

Los resultados de la caracterización granulométrica de la muestra triturada en la primera etapa aparecen en la figura 3.1. Según Andreev et al (1980), a juzgar por la forma de la curva granulométrica, prevalece la tendencia a la presencia de granos gruesa en la distribución de tamaño. El contenido de la clase de tamaño mayor a 3,15 mm es de 71,5 %. Esta distribución de tamaño ocurre de forma no homogénea. Este comportamiento puede ser resultado de la gran variedad de tamaño y forma de los trozos de material alimentados al proceso.

3.2. Resultados de la caracterización granulométrica para el material obtenido en la segunda etapa de trituración

El material producto de la primera etapa de trituración con tamaño superior a 3,15 mm es sometido a una segunda etapa de trituración, hasta que el producto final se encuentre por debajo de 3,15 mm. Luego de ser triturado el material de clase de tamaño mayor de 3,15 mm, es realizado un nuevo proceso de homogenización y cuarteo junto a las partículas de las clases menores de 3, 15 mm.

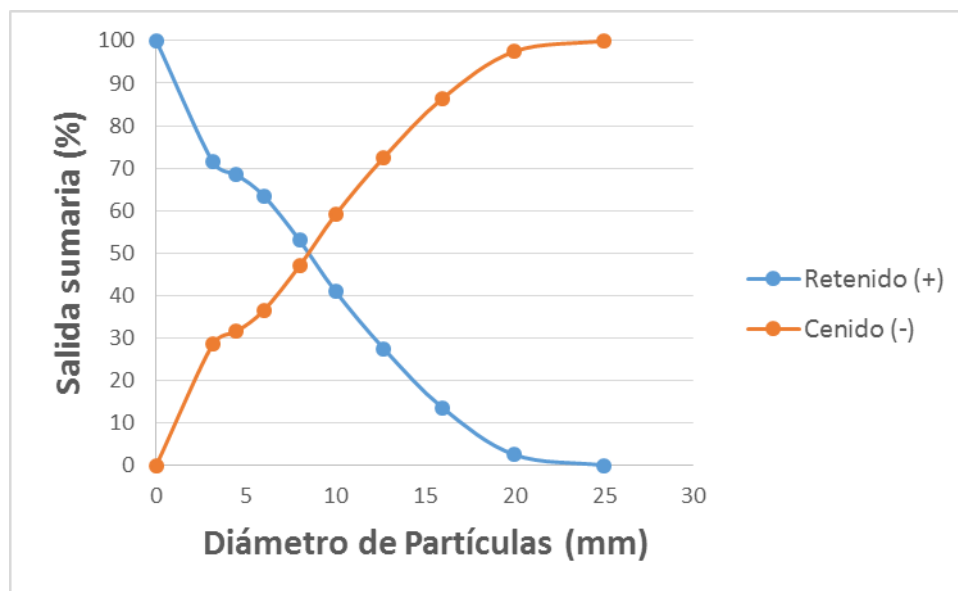


Figura 3.1.-Composición granulométrica de la muestra triturada en la trituración primaria en la trituradora de mandíbula (360x165) mm.

La composición granulométrica del material producto de esta etapa de reducción de tamaño se muestra en el Anexo 1. Se observa que la mayor cantidad de partículas se corresponde a la clase de tamaño menor que 3, 15 mm, además de existir una distribución no homogénea, igual que para el producto obtenido en la primera etapa de trituración. Esta distribución no homogénea del material puede estar relacionada con la variabilidad existente, en cuanto al tamaño de las partículas alimentadas en cada proceso y con la forma de los granos, destacándose la presencia de granos alargados y planos.



3.3. Resultados del cálculo del molino

Para el proceso de molienda se utilizará un molino de bola existente en el laboratorio de beneficio del Instituto Superior Minero Metalúrgico, para el mismo se usaron bolas de acero fundido con los tamaños siguientes:

Tabla 3.1. Carga de bolas del molino

Diámetro de las bolas (cm)	Peso de cada bola (kg)	Cantidad de bolas a utilizar	Peso total de las bolas (kg)
3.81	0.35	18	6.5
3.175	0.18	29	5.3
2.223	0.01	44	0.5
1.905	0.03	50	1.5
13.653	0.02	69	1.1
Total		210	14.8

A partir de las características de las bolas usadas, y según la metodología establecida en el epígrafe 2.3.3. Los resultados de los cálculos del molino utilizado aparecen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Cálculo del molino

Parámetros	Resultados	Unidad de medida
Diámetro de la bola máxima	D = 4.1	cm
Volumen del molino	Vmol = 7163.9	cm ³
Masa de la carga de bolas	Mcb = 14.8	kg



Volumen de la carga de bolas	Vcb = 3223.8	cm ³
Volumen total de las bolas	Vtb = 1929.7	cm ³
Volumen de los espacios entre bolas	Veeb = 1294.1	cm ³
Volumen del material en el molino	Vmat = 776.4	cm ³
Masa que se alimenta al molino	Malim = 1.1	kg

En la tabla 3,2 se puede comprobar que el molino de bolas tiene un volumen de 7136, 9 cm³ permitiendo utilizar una masa de carga de las bolas igual a 14,8 kg para una masa de alimentación del material igual a 1 kg.

3.4. Resultados de la Molienda

Los resultados promedios de las corridas de la cinética de molienda se muestran en los anexos 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10. A modo de representación, en la tabla 3.3 aparecen los resultados para el tiempo de 12 minutos de molienda

Tabla 3.3. Análisis de los resultados después de la molienda para 12 minutos

Clase (mm)	Réplicas			Promedio	Salida (%)	Acumulado (%)	
	1 ^{ra} Peso (g)	2 ^{da} Peso (g)	3 ^{ra} Peso (g)	Peso (g)		retenido (+)	cernido (-)
1.98	0	0	0	0.0	0.00	0.00	100.00
1.4	0	0	0	0.0	0.00	0.00	100.00
1	14	14.5	14	14.2	1.42	1.42	100.00
0.803	16	16	16	16.0	1.60	3.02	98.58
0.59	6	6.5	6	6.2	0.62	3.63	96.98
0.4	17.5	17.5	17.5	17.5	1.75	5.38	96.37
0.25	21	20.5	21	20.8	2.08	7.47	94.62
0.208	14.8	14.8	14.8	14.8	1.48	8.95	92.53
0.147	39	38.5	39	38.8	3.88	12.83	91.05
0.125	23	23	23	23.0	2.30	15.13	87.17
0.088	32	32	32.3	32.1	3.21	18.34	84.87
0.074	25.2	25.2	25.2	25.2	2.52	20.86	81.66
0	791.5	791.5	791.2	791.4	79.14	100.00	79.14



Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		
-------	------	------	------	---------	--------	--	--

Como se observa en la tabla, el contenido de la clase de tamaño menos de 0.074 alcanza el valor de 79.67 %. El comportamiento de esta clase para los diferentes tiempos aparece en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados para cada tiempos de molienda

Tiempo de Molienda (min)	1	2	3	4	5	7	10	12
Salida de la clase < 0,074mm (%)	24.50	26.98	28.44	29.18	40.29	54.14	64.75	79.67

En la figura 3.2 se muestra el comportamiento de las clases granulométricas en la molienda. La desaparición de las clases gruesas comienza desde el primer minuto de molienda. En este intervalo tan pequeño de tiempo, el contenido de la clase +1,98 mm disminuye en aproximadamente 3 %. En el caso particular de la clase 0,088 mm, su desaparición también comienza a partir del primer minuto, en este sentido, su contenido disminuye en casi 10 %.

Los resultados de la cinética se muestran en la figura 3.3. A juzgar por la forma de la curva, de manera general, estos resultados siguen las mismas regularidades de los estudios cinéticos realizados por Reineris e Idermis (2006) y Rodríguez (2011), Pole (2005) y Andreev et al (1980), aunque la molienda ocurre a una menor velocidad de molienda.

Como era de esperar, a medida que aumenta el tiempo, se observa una disminución de la cantidad de material retenido en dicho tamiz, aunque el mismo ocurre en pequeñas proporciones y bruscamente en otro tiempo.

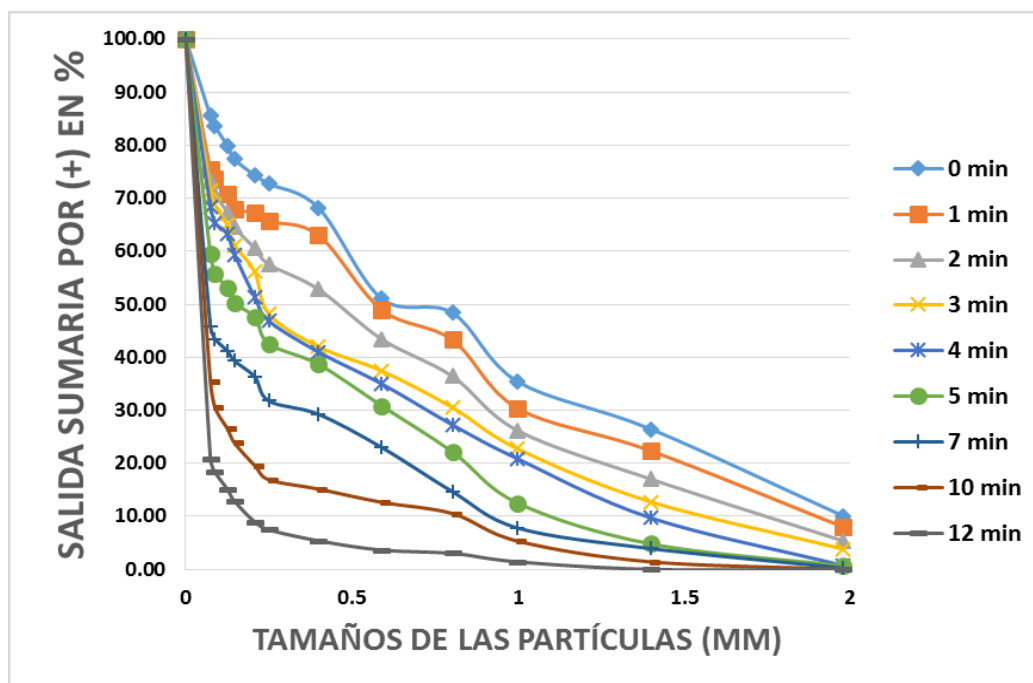


Figura 3.2. Comportamiento de la desaparición de las clases de tamaño.

Como se muestra en la figura 3.3, para un tiempo de molienda de 1 minuto se obtuvo un retenido de 75, 42 % del material en el tamice de clase de 0, 074 mm y sin embargo en el tiempo de 12 minutos de molienda se retiene solo el 20, 86 % para la misma clase de tamaño, a medida que aumenta el tiempo de molienda, hay un incremento de la cantidad de material reducido, lo cual permite un mayor contacto entre las partículas.

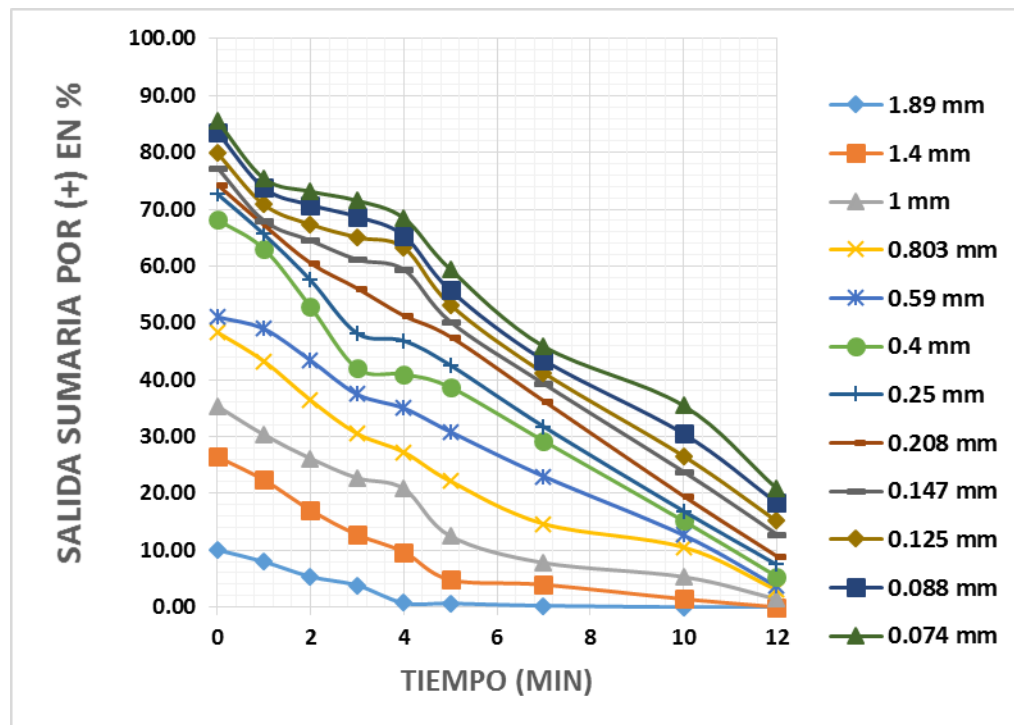


Figura 3.3. Cinética de la molienda del carbón bituminoso "salida por (+) vs. t (min.)".

3.5. Modelo Cinético Acumulativo

A partir de los resultados obtenidos de los análisis granulométricos del material molido, se aplicó la metodología para determinar los parámetros del modelo cinético acumulativo según se expone en el epígrafe 2.3.3.

De los análisis realizados en los tiempos de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 y 12 minutos, se obtuvo la caracterización granulométrica para cada producto obtenido (retenido) en cada clase, que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos para la molienda a diferentes tiempos, W (t)

Tamaño, (mm).	Tiempos, (min)								
	0	1	2	3	4	5	7	10	12
1.98	10.05	7.98	5.34	3.82	0.71	0.64	0.24	0.00	0.00
1.4	26.45	22.36	17.02	12.74	9.70	4.80	3.92	1.42	0.00
1	35.37	30.32	26.14	22.71	20.83	12.47	7.79	5.31	1.42
0.803	48.36	43.27	36.41	30.52	27.25	22.16	14.64	10.52	3.02
0.59	51.05	48.94	43.41	37.44	34.98	30.84	23.00	12.64	3.63
0.4	68.16	63.01	52.80	41.97	40.97	38.67	29.23	15.14	5.38
0.25	72.72	65.61	57.52	48.18	46.85	42.55	31.77	16.90	7.47
0.208	74.35	67.24	60.53	56.09	51.28	47.56	36.28	19.54	8.95
0.147	77.32	68.01	64.50	61.14	59.39	50.20	39.31	23.82	12.83
0.125	79.91	70.82	67.33	65.04	63.26	53.18	41.21	26.56	15.13
0.088	83.58	73.75	70.75	68.70	65.36	55.73	43.46	30.49	18.34
0.074	85.54	75.42	73.12	71.52	68.44	59.42	45.86	35.44	20.86
0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

A partir de la tabla anterior, se pueden realizar los cálculos de $\ln(W(x,t) - \ln(W(x,0))$ recogidos en la tabla 3.6., en el anexo 12 se muestran los valores de $\ln(w(t_i)/w(t_0))$

Tabla 3.6. Cálculos realizados para $w(t_i)/w(t_0)$

Clase		Tiempo								
Mm	d, micrones	0	1	2	3	4	5	7	10	12
1.98	1980.00	1	0.79403	0.531675	0.380431	0.088972	0.06335	0.030075	0	0
1.4	1400.00	1	0.845369	0.643604	0.481664	0.433959	0.219282	0.175462	0.053686	0
1	1000.00	1	0.857224	0.73895	0.613514	0.53529	0.352653	0.256926	0.150127	0.040053
0.808	808.00	1	0.894817	0.752826	0.631169	0.588122	0.458161	0.338392	0.217604	0.062379
0.59	590.00	1	0.958733	0.850343	0.733333	0.714772	0.402351	0.469863	0.247666	0.071172
0.4	400.00	1	0.924442	0.774697	0.615806	0.650161	0.567293	0.463895	0.222173	0.078981
0.25	250.00	1	0.902228	0.790933	0.662495	0.714017	0.585121	0.484174	0.232352	0.102677
0.2	200.00	1	0.904371	0.814078	0.75436	0.762592	0.639677	0.539609	0.262766	0.120332
0.147	147.00	1	0.879634	0.834152	0.79074	0.873162	0.649207	0.577926	0.308027	0.165934
0.125	125.00	1	0.886205	0.842615	0.813957	0.893245	0.66554	0.581972	0.332332	0.189338
0.088	88.00	1	0.882348	0.846494	0.821927	0.886323	0.666746	0.58936	0.36476	0.21943
0.074	74.00	1	0.881732	0.854805	0.836139	0.907456	0.694646	0.608079	0.41427	0.243863
0	0.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Los valores del parámetro cinético k , para cada tamaño, fueron determinados a partir de una regresión lineal de los valores del retenido de material para cada tiempo de ensayos, lo mismo se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Valores obtenidos del cálculo de los coeficientes k_i

d, mm	d, micrones	k, 1/min.	ln(d)	Ln(K)
1.98	1980.00	-0.5554	7.590852	-0.58807
1.40	1400.00	-0.2917	7.244228	-1.23203
1.00	1000.00	-0.2454	6.907755	-1.40487
0.81	808.00	-0.2055	6.688355	-1.58231
0.59	590.00	-0.1964	6.380123	-1.6276
0.40	400.00	-0.1888	5.991465	-1.66707
0.25	250.00	-0.1737	5.521461	-1.75043
0.20	200.00	-0.1617	5.298317	-1.82201
0.15	147.00	-0.1385	4.990433	-1.97688
0.13	125.00	-0.1294	4.828314	-2.04485
0.088	88.00	-0.1178	4.477337	-2.13877
0.074	74.00	-0.1073	4.304065	-2.23213
0	0.00	0	0	0

Aplicando la metodología establecida, para cada clase de tamaño, se obtuvieron las respectivas ecuaciones de regresión para el coeficiente k , que refleja la velocidad y desaparición de las clases de tamaño. A modo de ejemplo en figura.3.4 se ilustra para la clase 0, 074mm. El resto de las clases se muestran en el anexo 13.

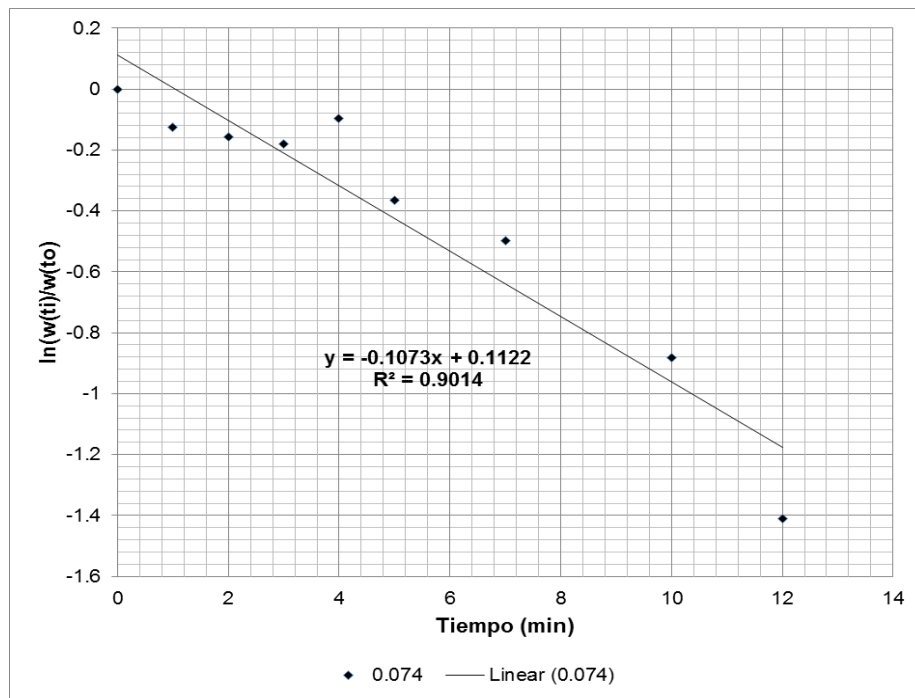


Figura.3.4. Ecuación de regresión para el tamaño correspondiente a las 74 μm .

En la figura 3.5 se muestra la regresión del coeficiente k con el tamaño de la clase granulométrica.

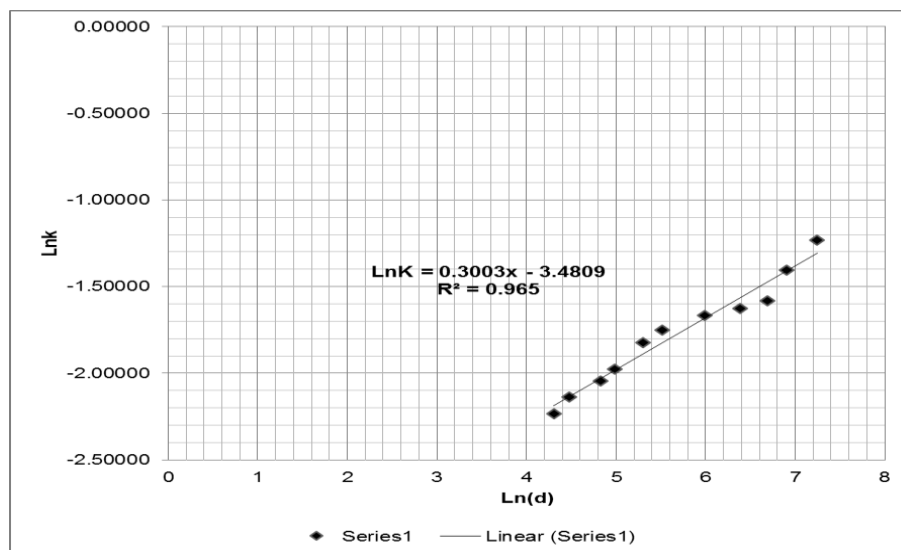


Figura. 3.5. Ecuación de regresión para determinar los parámetros del modelo cinético acumulativo.

El valor de n , es la pendiente de la ecuación de la recta mostrada en la figura anterior, y teniendo en cuenta que $\ln(K) = \ln(C) + n\ln(x)$, se obtiene el valor de C . Finalmente los valores de los parámetros $\ln C$ y n del modelo son -3,4809 y 0,3003 respectivamente. El valor de C es 0,03078.

De modo que el modelo cinético acumulativo para el material estudiado, queda de la forma.

$$W(x,t) = W(x,0) \cdot e^{-0,03078 x^{-0,3003} t}$$

3.6. Validación del modelo cinético acumulativo

En el anexo 13 puede observarse que el error no sobrepasa el 5 % solo para las clases de tamaño. Esto, unido a los resultados que se muestran en tabla 3,6 y 3,7 demuestra que los valores experimentales y estimados son menores que sus respectivos valores críticos. Los valores de chi cuadrado (anexo 14) no superan el valor de este parámetro de la tabla para una probabilidad de 95 % y un grado de libertad de 7 ($\chi^2(0,95; 7) = 12,6$). Todo esto permite afirmar que el modelo cinético obtenido, constituye una herramienta válida para la estimación del contenido de las clases de tamaño al cabo de un tiempo determinado de molienda.

Conclusiones parciales del Capítulo

- Para el carbón bituminoso producto de la primera y segunda etapa de trituración se obtiene un 28,50 y 23,60 % para la clase menor de 3,15 y 0,074 mm respectivamente, siendo estas las clases predominantes.
- A partir de los resultados experimentales de la caracterización granulométrica del material obtenido para los diferentes tiempos de molienda, se determinó el modelo cinético acumulativo.



Conclusiones generales

- La muestra de carbón bituminoso entregada al laboratorio de Beneficio de minerales del ISMMMoa, desde el punto de vista granulométrico, es poco homogénea y con tendencia a la prevalencia de granos gruesos.
- La cinética de la molienda del material investigado muestra que la desaparición de las clases gruesas comienza desde el primer minuto. De forma general, las distribuciones granulométricas siguen las regularidades de la molienda de las tobas vítreas y las zeolitas de la región de Caimanes y el Pícao.
- Se establece el modelo cinético acumulativo que permite la estimación de las clases granulométricas en el proceso de molienda del carbón bituminoso en el tiempo. La velocidad de desaparición de las clases (k) depende del tamaño de partículas minerales, el coeficiente de regresión es de 0,965. Los valores de los coeficientes C y n son de -0,03078 y 0,3003 respectivamente.



Recomendaciones

- Realizar estudios sobre la función de rompimiento y selección para el carbón bituminoso.
- Obtener la Modelación y simulación del proceso a partir de los resultados obtenidos en el trabajo.



Bibliografía

1. ANDREEV, E.; PEROV, V. & ZVERIEVICH, V. 1980: *Trituración, desmenuzamiento y cribado de los minerales*. Editorial Mir, Moscú, 547p.
2. AUSTIN, L.; SHOJI, K.; JINDAL, V.; SAVAGE, K., & KLIMPEL, R. 1976: *Some results on the description of size reduction as a rate process in various mills*. Ind. Eng. Chem. Process. Des Devel, 187-196p
3. AUSTIN L.; KIMPLEL, R. & LUCKIE, T. 1984: *Process Engineering of size reduction*: Ball mill. AIME publ. NY, 458-471 p.
4. AJIT, J.; STANLEY, J. & LIN-SIEN, H. 2001: *Particle Size Characterization*. Special Publication 960-1. National Institute of Standard and Technology.
5. ARIZTIMUÑO, A.; GONZALEZ, R. & RISUEÑO, V. 2010: El carbón como materia prima. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial.
6. BEYRIS, M.; LABORDE, R. & LEGRÁ, A. 2013: Determinación de los parámetros del modelo cinético Acumulativo del proceso de molienda en la empresa Comandante Ernesto che Guevara. *V Simposio Minería y Metalurgia (MINIMETAL)*, MIN5-P12.
7. BRIAN, B. & MARTY, W. 2008: Coal characteristics. *Indiana Center for Coal Technology Research*. Disponible en <http://www.purdue.edu/dp/energy/CCTR/> 04/04/2015.
8. COELLO-VELÁZQUEZ, A. 2009: Aportes al conocimiento de la molienda de las menas lateríticas, *Minería y Geología*.
9. COELLO-VELÁZQUEZ, A. 1993: Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos. *Minería y Geología*. Vol. I (1): p. 53-56,
10. COELLO, A. 1999: Curso de preparación mecánica de menas y minerales.



11. COELLO-VELÁZQUEZ, A. 2012: Evaluación de materias primas en una planta de beneficio de arena de sílice para aumentar la eficiencia energética del proceso de molienda, *Minería y Geología*, 100p.
12. COELLO, A. V., J. A. MENÉNDEZ, et al. 2008: Grindability of Laterite nickel ores in Cuba. Powder technology, *Elsevier*. Vol. 182, issue 1.
13. COELLO-VELÁZQUEZ, A. 2001: Molienda de minerales multicomponentes: Modelo integro-diferencial para la valoración de la energía, *Minería y Geología* XVII (3-4), pp. 49-53.
14. COELLO-VELÁZQUEZ, A. & TIJONOV, N. 2001: Modelo integro - diferencial para la valoración de la energía en la molienda de minerales multicomponentes. *Minería y Geología*. Vol. II (4): p. 14-20.
15. COELLO-VELÁZQUEZ, A. & TIJONOV, N. 1996: Regularidad en la molienda de los minerales lateríticos. *Minería y Geología*. XIII (3): 57-60.
16. GERMAN, A. 2007: Carbón en América Latina.
17. GILART, R.; & RODRÍGUEZ, T. 2006: Determinación de los parámetros básicos de la molienda del vidrio volcánico de la zona de El Picao. Trabajo de diploma. ISMM Moa.
18. GUPTA, K. 2003: Chemical Metallurgy: Principles and Practice. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 3-527-30376-6.
19. HOJAS. J. A. 2006: Diseño de un sistema para molienda del carbón mineral para ser usado como combustible industrial, Trabajo de diploma, Escuela superior politécnica del Litoral, Guayaquil – Ecuador. 269 p.
20. KASATKIN, A. 1971: *Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química*. La Habana, Editorial Pueblo y Educación.
21. LABORDE, R. B., A. V. COELLO, et al. (2000). "Productivity and energetic efficiency in the milling process of the Lateritic mineral." *Revista Minería y Geología*. XVII (2).



22. LYNCH, J. 1980: Circuitos de trituración y molienda de minerales. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, ,192p.
23. LYNCH, A. 1977: Mineral processing and grinding circuits: their simulation, optimization. Design and control. *Elseiver*. Amsdertam, Oxf. NY.
24. MARTINS, F. 2005: Caracterización de las zeolitas de Caimanes para su preparación mecánica. Tesis de Maestría. ISMM, Moa. 35 p.
25. MAYANS, T. 2012: Determinación de las pérdidas de la planta de preparación de carbón antracita de Cayo Guam, trabajo de diploma. ISMM Moa.
26. MENÉNDEZ, J A, A. V. COELLO, et al. 2005: Determination of work index in a common laboratory mill.
27. MENÉNDEZ, J. A., A. V. COELLO et al. 2006: Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant. Powder technology, *Elseiver*. 157p
28. MENÉNDEZ, A. & COELLO, A. 2006: *Process models for simulation of Bond Test*. Mineral processing and Extractive 115(2).
29. RODRÍGUEZ, Y. 2011: Cinética de molienda de las tobas vítreas del yacimiento Sagua de Tánamo. Trabajo de diploma, ISMM Moa.
30. RÁZUMOV, A. & PEROV, A. 1985: *.Proyectos de fábricas de preparación de minerales*. Editorial Mir, Moscú, 544 p.
31. ROWLAND, C. & KJOS, D. 1978: *Rod and ball mill in Mineral Procesing Plant Design*. Ed. Mular and Bhappu, AIME, NY.
32. SUÁREZ, J. R. (2009). Cinética de molienda del rechazo del cieno carbonatado de la Empresa Pedro Soto Alba. Moa, ISMM: 61p.
33. WILLS, A. & NAPIER-MUNN, T. 2006: *An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Mineral Processing Technology. Pub. Date, ISBN: 0750644508.



Anexos

Anexo 1. Composición granulométrica del producto triturado en la TQ (320x165 mm)

				Acumulado (%)	
Clases de tamaño (mm)	peso (g)	peso (kg)	Salida (%)	retenido	cernido
(+25)	0	0	0.00	0	100
(-25+20)	1000	1	2.50	2.50	97.50
(-20+16)	4400	4.4	11.00	13.50	86.50
(-16+12.7)	5600	5.6	14.00	27.50	72.50
(-12.7+10)	5400	5.4	13.50	41.00	59.00
(-10+8)	4800	4.8	12.00	53.00	47.00
(-8+6)	4200	4.2	10.50	63.50	36.50
(-6+4.75)	2000	2	5.00	68.50	31.50
(-4.75+3.15)	1200	1.2	3.00	71.50	28.50
(-3.15 + 0)	11400	11.4	28.50	100.00	0.00
Total	40000	40	100.00		

Anexo 2. Composición granulométrica del producto triturado en la TQ (150x75 mm)

			Acumulado (%)	
Clase de Tamaño (mm)	Peso (g)	Salida (%)	retenido	cernido
(+3.15)	0	0.00	0.00	100.00
(-3.15+1.98)	288	14.60	14.60	85.40
(-1.98+1.4)	150	7.61	22.21	77.79
(-1.4+1)	180	9.13	31.34	68.66
(-1+0.803)	130	6.59	37.93	62.07
(-8.03+0.59)	125	6.34	44.27	55.73
(-0.59+0.4)	105	5.32	49.59	50.41
(-0.4+0.25)	90	4.56	54.16	45.84
(-0.25+0.20)	87	4.41	58.57	41.43
(-0.20+0.147)	105	5.32	63.89	36.11
(-0.147+0.125)	137	6.95	70.84	29.16
(-0.125+0.074)	95	4.82	75.66	24.34
(-0.074 + 0)	480	24.34	100.00	0.00
TOTAL	1972	100.00		



Anexo 3. Composición granulométrica del material para material inicial de molienda

Análisis granulométrico para 1000 g. (t=0)				
Clase (mm)	Peso (g)	Peso (%)	(+)	(-)
1.98	100.5	10.05	10.05	100.00
1.4	164	16.40	26.45	89.95
1	89.2	8.92	35.37	73.55
0.803	129.9	12.99	48.36	64.63
0.59	26.9	2.69	51.05	51.64
0.4	171.1	17.11	68.16	48.95
0.25	45.6	4.56	72.72	31.84
0.208	16.3	1.63	74.35	27.28
0.147	29.7	2.97	77.32	25.65
0.125	25.9	2.59	79.91	22.68
0.088	36.7	3.67	83.58	20.09
0.074	19.6	1.96	85.54	16.42
0	144.6	14.46	100.00	14.46
Total	1000	100.00		

Anexo 4. Composición granulométrica del material para 1 minutos de molienda

Clase (mm)	Réplicas			Promedio	Salida (%)	Acumulado (%)	
	1ra Peso (g)	2da Peso (g)	3ra Peso (g)	Peso (g)		retenido (+)	cernido (-)
1.98	79.8	80	79.6	79.8	7.98	7.98	100.00
1.4	143.8	143.4	144.2	143.8	14.38	22.36	92.02
1	79.6	79.1	80.2	79.6	7.96	30.32	77.64
0.803	129.5	130	129	129.5	12.95	43.27	69.68
0.59	56.7	56.7	56.7	56.7	5.67	48.94	56.73
0.4	140.7	142	139.4	140.7	14.07	63.01	51.06
0.25	26	27	25	26.0	2.60	65.61	36.99
0.208	16.3	15	17.5	16.3	1.63	67.24	34.39
0.147	7.7	8	7.5	7.7	0.77	68.01	32.76
0.125	28.1	28	28	28.0	2.80	70.82	31.99
0.088	29.3	29.3	29.3	29.3	2.93	73.75	29.18
0.074	16.7	16	17.6	16.8	1.68	75.42	26.25
0	245.8	245.5	246	245.8	24.58	100.00	24.58
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		



Anexo 5. Composición granulométrica del material para 2 minutos de molienda

	Réplicas			Promedio		Acumulado (%)	
Clase (mm)	1 ra Peso (g)	2 da Peso (g)	3 ra Peso (g)	Peso (g)	Salida (%)	retenido (+)	cernido (-)
1.98	53.3	53.6	53.4	53.4	5.34	5.34	100.00
1.4	116.9	117	116.5	116.8	11.68	17.02	94.66
1	91.4	91	91	91.1	9.11	26.14	82.98
0.803	102.5	103	102.6	102.7	10.27	36.41	73.86
0.59	69.9	70.2	70	70.0	7.00	43.41	63.59
0.4	93.8	94	94	93.9	9.39	52.80	56.59
0.25	47.4	47	47	47.1	4.71	57.52	47.20
0.208	29.9	30	30.4	30.1	3.01	60.53	42.48
0.147	39.4	40	39.7	39.7	3.97	64.50	39.47
0.125	28.7	28	28.4	28.4	2.84	67.33	35.50
0.088	34.5	34	34	34.2	3.42	70.75	32.67
0.074	23.4	23.7	24	23.7	2.37	73.12	29.25
0	268.9	268.5	269	268.8	26.88	100.00	26.88
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		

Anexo 6. Composición granulométrica del material para 3 minutos de molienda

	Réplicas			Promedio		Acumulado (%)	
Clase (mm)	1 ra Peso (g)	2 da Peso (g)	3 ra Peso (g)	Peso (g)	Salida (%)	retenido (+)	cernido (-)
1.98	38.3	38	38.4	38.2	3.82	3.82	100.00
1.4	89.4	89	89.1	89.2	8.92	12.74	96.18
1	99.8	100	99.3	99.7	9.97	22.71	87.26
0.803	78.4	78	78	78.1	7.81	30.52	77.29
0.59	69.3	69.1	69	69.1	6.91	37.44	69.48
0.4	45.9	45	45.2	45.4	4.54	41.97	62.56
0.25	62	62.1	62	62.0	6.20	48.18	58.03
0.208	79	79.3	79	79.1	7.91	56.09	51.82
0.147	50.4	50.9	50.3	50.5	5.05	61.14	43.91
0.125	38.9	39	39.2	39.0	3.90	65.04	38.86
0.088	36.3	36.8	36.5	36.5	3.65	68.70	34.96
0.074	27.9	28	28.9	28.3	2.83	71.52	31.30
0	284.4	284.8	285.1	284.8	28.48	100.00	28.48
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		



Anexo 7. Composición granulométrica del material para 4 minutos de molienda

	Réplicas			Promedio		Acumulado (%)	
Clase (mm)	1 ra Peso (g)	2 da Peso (g)	3 ra Peso (g)	Peso (g)	Salida (%)	retenido (+)	cernido (-)
1.98	7.5	6.5	7.3	7.1	0.71	0.71	100.00
1.4	89.8	90.4	89.6	89.9	8.99	9.70	99.29
1	110.2	112.5	111.2	111.3	11.13	20.83	90.30
0.803	62.4	61.4	68.7	64.2	6.42	27.25	79.17
0.59	78.4	76.7	76.9	77.3	7.73	34.98	72.75
0.4	58.4	59.9	61.2	59.8	5.98	40.97	65.02
0.25	60	56.8	59.6	58.8	5.88	46.85	59.03
0.208	42.2	44.9	45.8	44.3	4.43	51.28	53.15
0.147	83.1	80.4	79.8	81.1	8.11	59.39	48.72
0.125	39.4	38.7	38	38.7	3.87	63.26	40.61
0.088	20.7	22	20.5	21.1	2.11	65.36	36.74
0.074	32.5	33.4	26.5	30.8	3.08	68.44	34.64
0	315.4	316.4	314.9	315.6	31.56	100.00	31.56
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		

Anexo 8. Composición granulométrica del material para 5 minutos de molienda

	Réplicas			Promedio		Acumulado (%)	
Clase (mm)	1 ra Peso (g)	2 da Peso (g)	3 ra Peso (g)	Peso (g)	Salida (%)	retenido (+)	cernido (-)
1.98	6.5	6.4	6.2	6.4	0.64	0.64	100.00
1.4	41.3	41.7	42	41.7	4.17	4.80	99.36
1	78.5	76	75.6	76.7	7.67	12.47	95.20
0.803	96.7	96.8	97	96.8	9.68	22.16	87.53
0.59	86.9	87	86.7	86.9	8.69	30.84	77.84
0.4	78	78.3	78.4	78.2	7.82	38.67	69.16
0.25	38.8	38.7	39	38.8	3.88	42.55	61.33
0.208	49.5	50.1	50.7	50.1	5.01	47.56	57.45
0.147	26.2	26.4	26.5	26.4	2.64	50.20	52.44
0.125	29.8	30.1	29.7	29.9	2.99	53.18	49.80
0.088	25.9	25.4	25	25.4	2.54	55.73	46.82
0.074	36.4	37	37.4	36.9	3.69	59.42	44.27
0	405.5	406.1	405.8	405.8	40.58	100.00	40.58
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		



Anexo 9. Composición granulométrica del material para 7 minutos de molienda

	Réplicas			Promedio		Acumulado (%)	
Clase (mm)	1 ra Peso (g)	2 da Peso (g)	3 ra Peso (g)	Peso (g)	Salida (%)	retenido (+)	cernido (-)
1.98	1.8	2.4	3	2.4	0.24	0.24	100.00
1.4	38.5	36.8	35.2	36.8	3.68	3.92	99.76
1	35	33.5	47.5	38.7	3.87	7.79	96.08
0.803	69.8	67.8	68	68.5	6.85	14.64	92.21
0.59	84.2	83.9	82.5	83.5	8.35	23.00	85.36
0.4	63.2	61.4	62.4	62.3	6.23	29.23	77.00
0.25	26	24.9	25.2	25.4	2.54	31.77	70.77
0.208	46.8	45.2	43.5	45.2	4.52	36.28	68.23
0.147	31.5	29.8	29.4	30.2	3.02	39.31	63.72
0.125	18.7	20.1	18.4	19.1	1.91	41.21	60.69
0.088	21.9	23.5	22.1	22.5	2.25	43.46	58.79
0.074	23.5	24.6	23.9	24.0	2.40	45.86	56.54
0	539.1	546.1	538.9	541.4	54.14	100.00	54.14
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		

Anexo 10. Composición granulométrica del material para 10 minutos de molienda

	Réplicas			Promedio		Acumulado (%)	
Clase (mm)	1 ra Peso (g)	2 da Peso (g)	3 ra Peso (g)	Peso (g)	Salida (%)	retenido (+)	cernido (-)
1.98	0	0	0	0.0	0.00	0.00	100.00
1.4	14.3	14	14.3	14.2	1.42	1.42	100.00
1	38.9	38.9	38.9	38.9	3.89	5.31	98.58
0.803	52.3	52.3	51.8	52.1	5.21	10.52	94.69
0.59	21.2	21.4	21	21.2	2.12	12.64	89.48
0.4	25	25	25	25.0	2.50	15.14	87.36
0.25	17	18	17.6	17.5	1.75	16.90	84.86
0.208	26.4	26.4	26.4	26.4	2.64	19.54	83.10
0.147	42.8	42.8	42.8	42.8	4.28	23.82	80.46
0.125	27.4	27.4	27.4	27.4	2.74	26.56	76.18
0.088	39.3	39.3	39.3	39.3	3.93	30.49	73.44
0.074	49.5	49.5	49.5	49.5	4.95	35.44	69.51
0	645.9	645	646	645.6	64.56	100.00	64.56
Total	1000	1000	1000	1000.00	100.00		

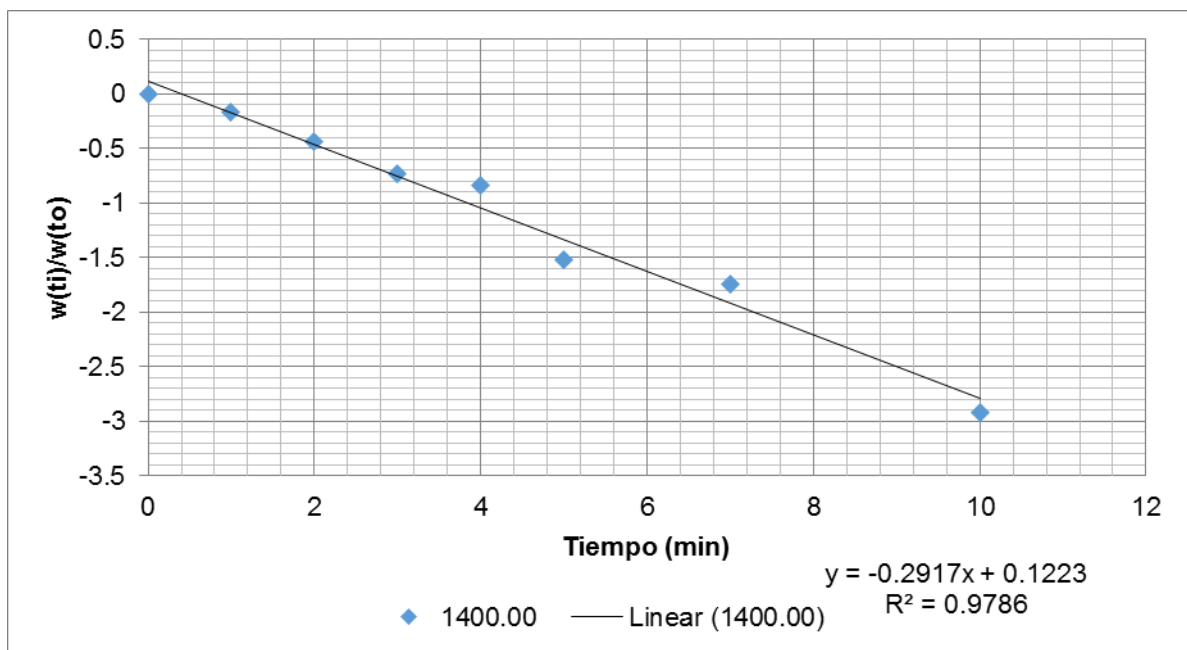
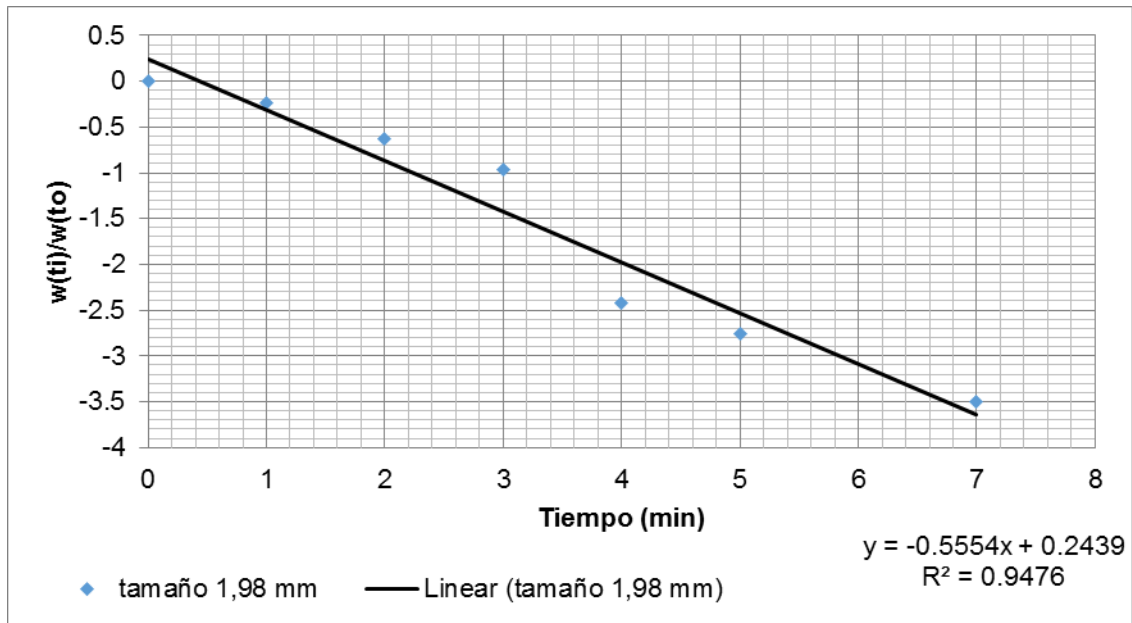


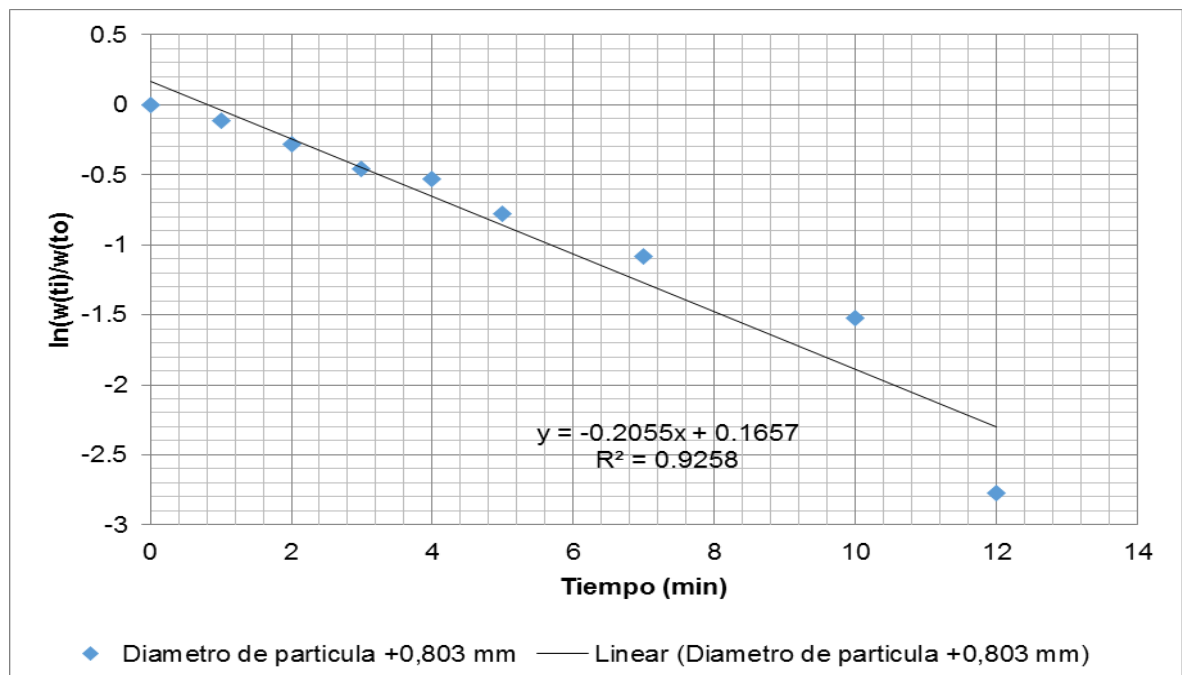
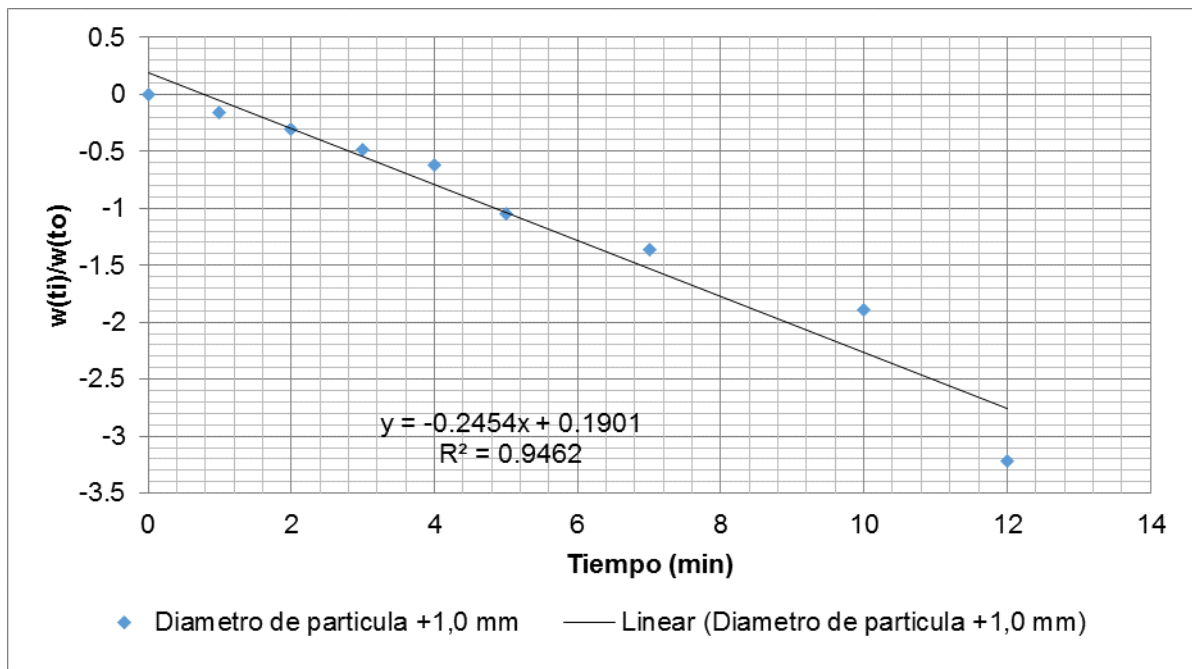
Anexo 11. Resultados obtenidos del $\ln(w(t_i)/w(t_0))$

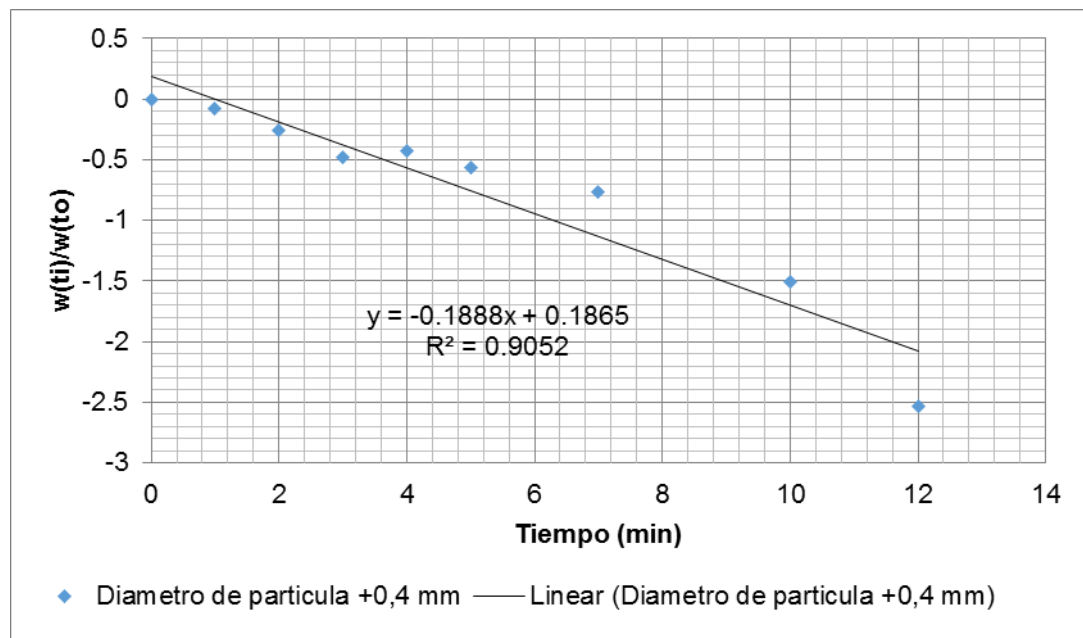
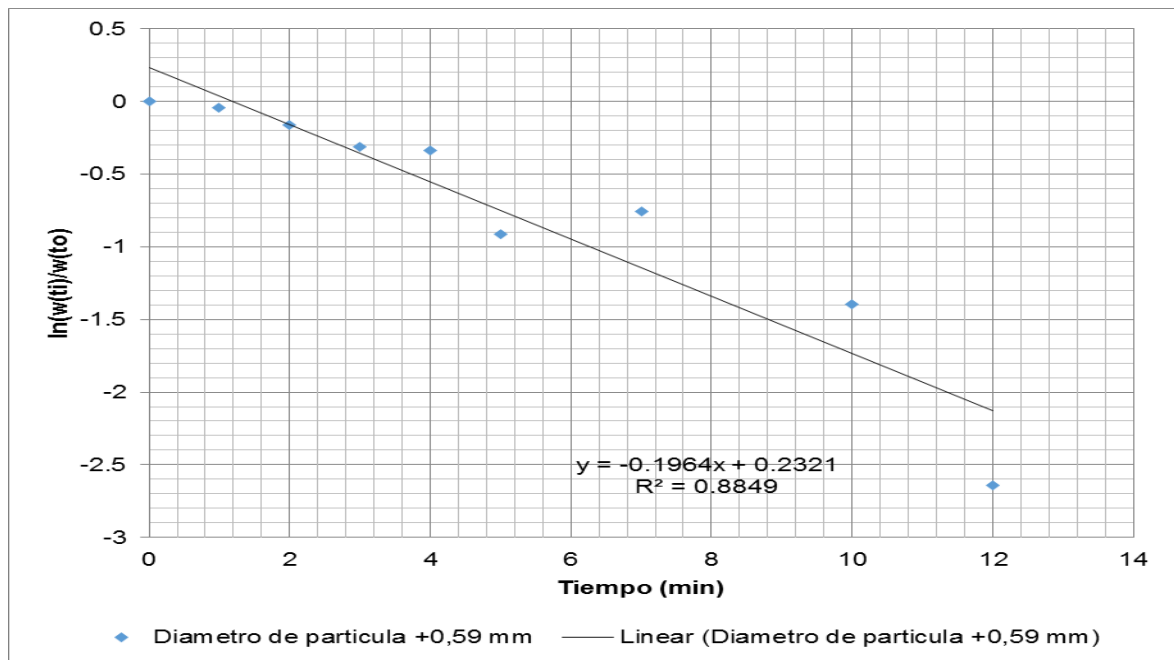
	Tiempo								
d, micrones	0	1	2	3	4	5	7	10	12
1980.00	0	-0.230634	-0.631723	-0.966450	-2.419429	-2.759082	-3.504055	#NUM!	#NUM!
1400.00	0	-0.167983	-0.440671	-0.730510	-0.834804	-1.517398	-1.740332	-2.924599	#NUM!
1000.00	0	-0.154056	-0.302525	-0.488552	-0.624946	-1.042271	-1.358967	-1.896272	-3.217557
808.00	0	-0.111136	-0.283921	-0.460182	-0.530821	-0.780535	-1.083551	-1.525078	-2.774521
590.00	0	-0.042142	-0.162116	-0.310155	-0.335791	-0.910431	-0.755314	-1.395675	-2.642655
400.00	0	-0.078564	-0.255284	-0.484823	-0.430535	-0.566880	-0.768098	-1.504297	-2.538550
250.00	0	-0.102888	-0.234542	-0.411742	-0.336848	-0.535937	-0.725311	-1.459500	-2.276168
200.00	0	-0.100515	-0.205700	-0.281886	-0.271033	-0.446792	-0.616910	-1.336491	-2.117503
147.00	0	-0.128249	-0.181339	-0.234786	-0.135634	-0.432004	-0.548310	-1.177567	-1.796166
125.00	0	-0.120807	-0.171246	-0.205847	-0.112894	-0.407156	-0.541333	-1.101620	-1.664221
88.00	0	-0.125168	-0.166652	-0.196104	-0.120674	-0.405345	-0.528718	-1.008515	-1.516720
74.00	0	-0.125867	-0.156882	-0.178960	-0.097111	-0.364353	-0.497451	-0.881237	-1.411151
0.00									

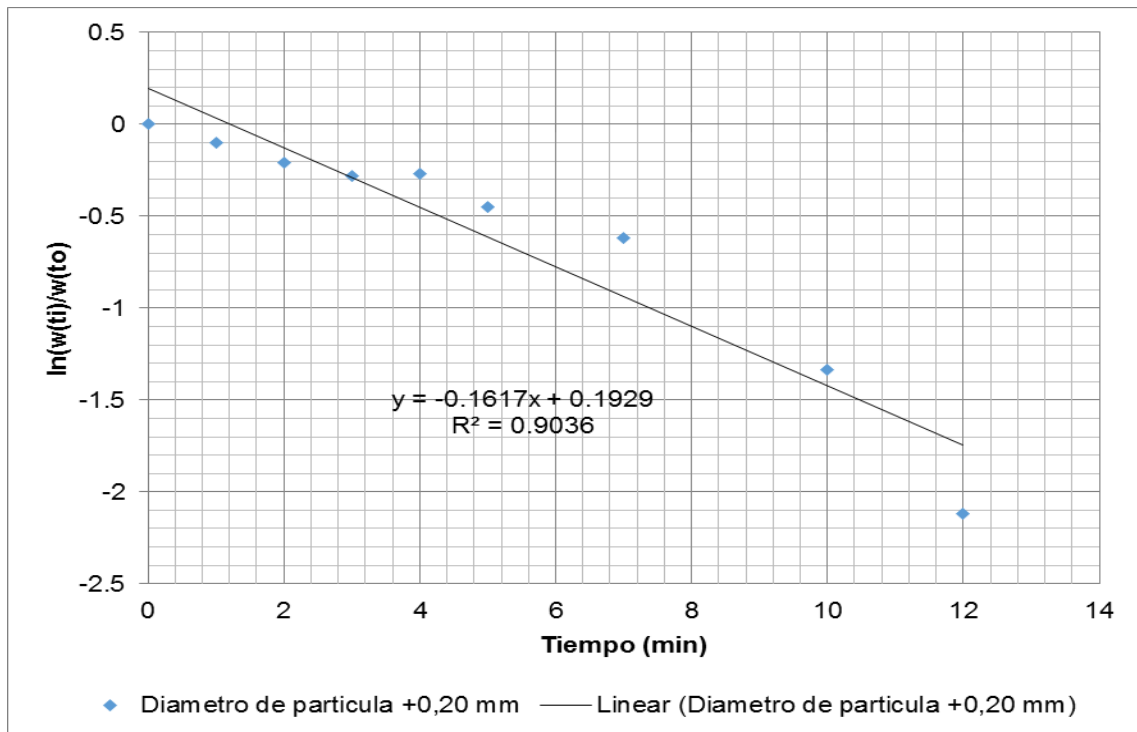
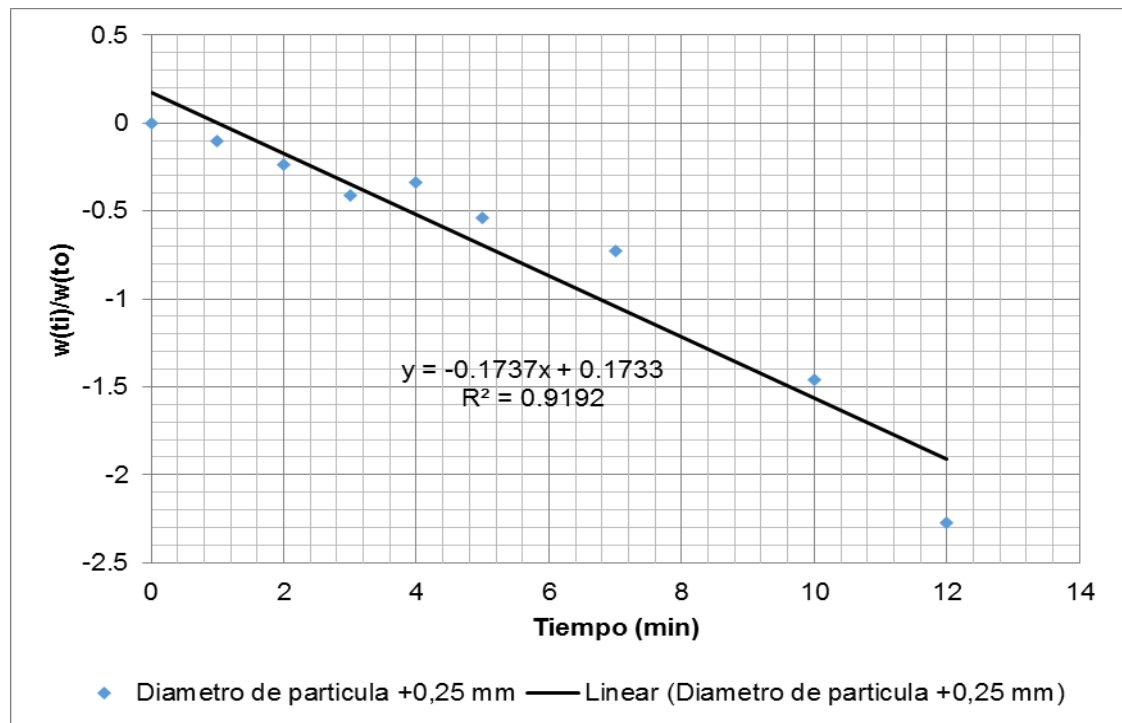


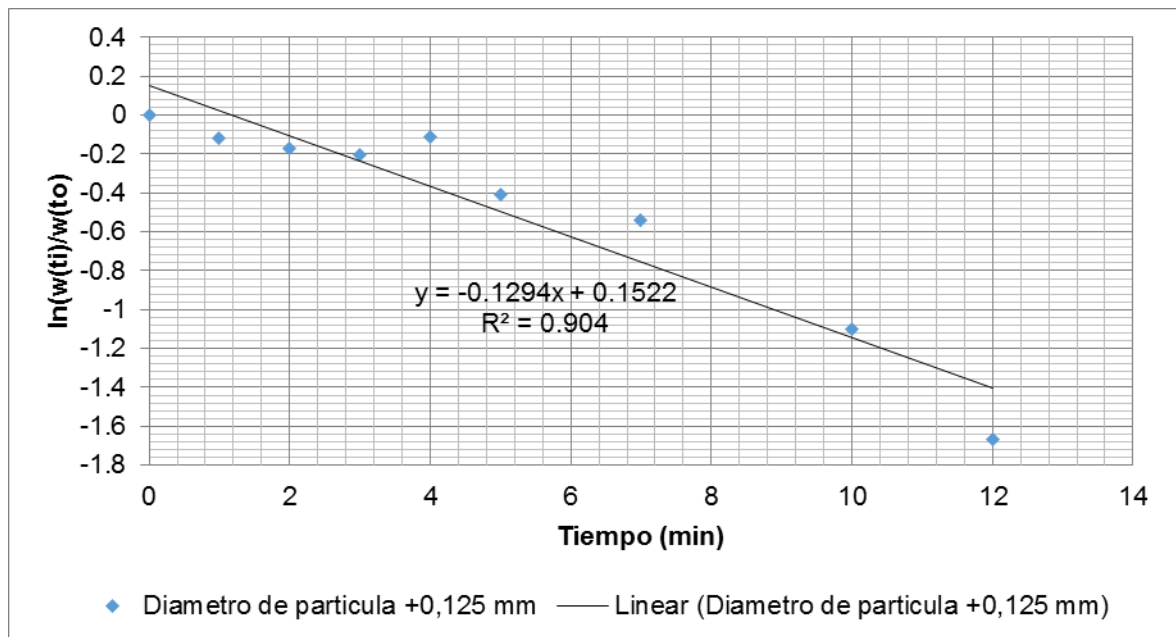
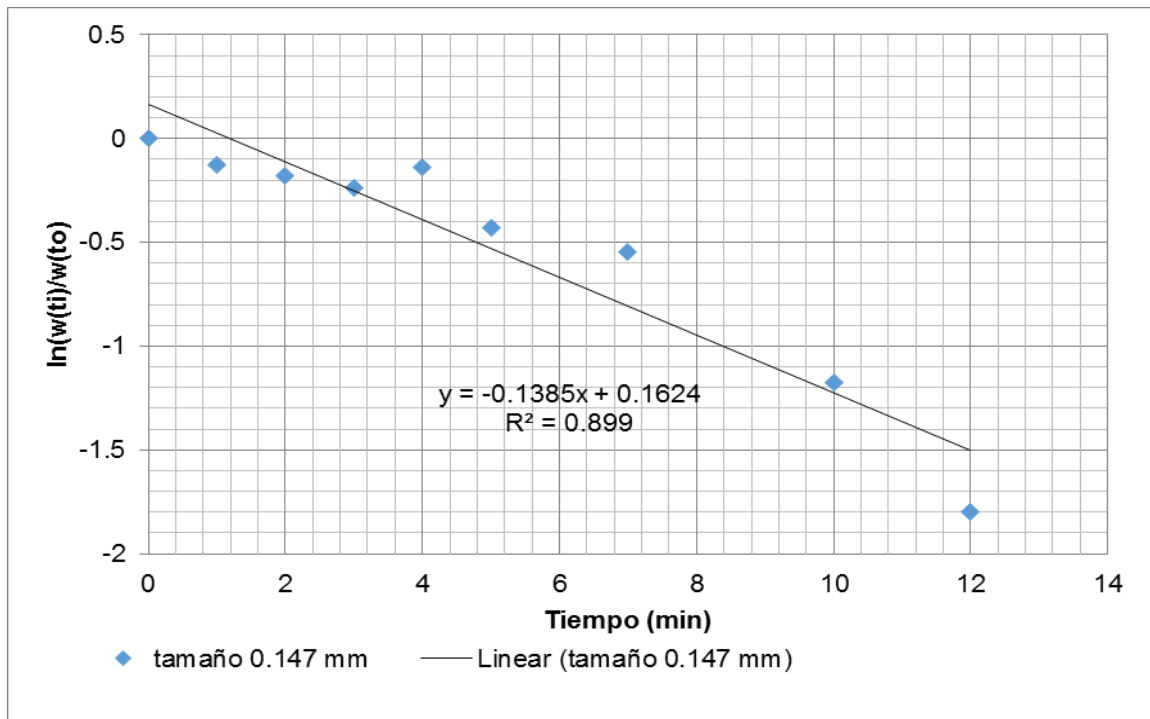
Anexo 12. Resultados obtenidos del parámetro cinético k a partir de la regresión lineal para cada clase de tamaño

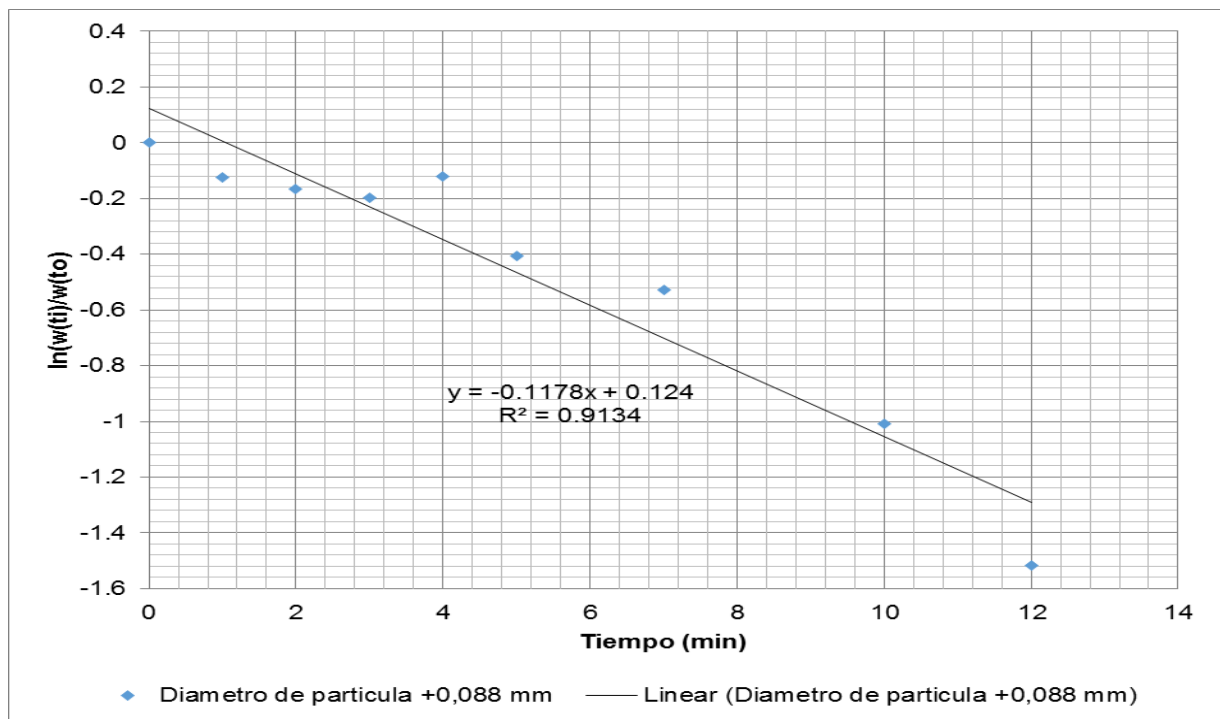














Anexo 13. Resultados para validación del modelo cinético-acumulativo

		d, mm		Experimento	Estimado	Experimento	Estimado	Experimento	Estimado
c	n		0	1		2		3	
0.03078	0.3003	1980	0.1005	0.0798	0.074393978	0.053433	0.055069293	0.038233	0.04064
0.03078	0.3003	1400	0.2645	0.2236	0.201702334	0.170233	0.153814107	0.1274	0.117296
0.03078	0.3003	1000	0.3537	0.3032	0.276842868	0.261367	0.216686383	0.2271	0.169602
0.03078	0.3003	808	0.4836	0.432666667	0.384311283	0.364067	0.305407697	0.305233	0.242704
0.03078	0.3003	590	0.5105	0.489433333	0.414176414	0.4341	0.336027623	0.374367	0.272624
0.03078	0.3003	400	0.6816	0.6301	0.565878119	0.528033	0.469803471	0.419733	0.39004
0.03078	0.3003	250	0.7272	0.6561	0.61870568	0.575167	0.526398128	0.481767	0.447862
0.03078	0.3003	200	0.7435	0.6724	0.63923302	0.605267	0.549588236	0.560867	0.472515
0.03078	0.3003	147	0.7732	0.680066667	0.67369804	0.644967	0.587000839	0.6114	0.511461
0.03078	0.3003	125	0.7991	0.708166667	0.700837642	0.673333	0.614658242	0.650433	0.539076
0.03078	0.3003	88	0.8358	0.737533333	0.742709482	0.7075	0.659987287	0.686967	0.586479
0.03078	0.3003	74	0.8554	0.754233333	0.764691154	0.7312	0.683601311	0.715233	0.61111
0.03078	0.3003	0	1	1		1		1	
		d, mm		Experimento	Estimado	Experimento	Estimado	Experimento	Estimado
c	n		0	4		5		7	
0.03078	0.3003	1980	0.1005	0.0071	0.030175394	0.006367	0.022336991	0.0024	0.01224
0.03078	0.3003	1400	0.2645	0.097033333	0.089447182	0.048033	0.068210606	0.039233	0.039666
0.03078	0.3003	1000	0.3537	0.208333333	0.132748059	0.124733	0.10390261	0.0779	0.063654
0.03078	0.3003	808	0.4836	0.2725	0.192873989	0.221567	0.153274711	0.146433	0.096798
0.03078	0.3003	590	0.5105	0.349833333	0.221184258	0.308433	0.179450152	0.229967	0.11812
0.03078	0.3003	400	0.6816	0.409666667	0.323819398	0.386667	0.26884142	0.2923	0.185303
0.03078	0.3003	250	0.7272	0.468466667	0.381043715	0.4255	0.324194047	0.317667	0.234674
0.03078	0.3003	200	0.7435	0.512766667	0.406250476	0.4756	0.349278707	0.362833	0.258184
0.03078	0.3003	147	0.7732	0.593866667	0.44564147	0.501967	0.388292531	0.393067	0.294785
0.03078	0.3003	125	0.7991	0.632566667	0.472787829	0.531833	0.414650867	0.412133	0.318945
0.03078	0.3003	88	0.8358	0.653633333	0.521157238	0.557267	0.463111297	0.434633	0.365695
0.03078	0.3003	74	0.8554	0.684433333	0.546306701	0.5942	0.488374914	0.458633	0.39029
0.03078	0.3003	0	1	1		1		1	
		d, mm		Experimento	Estimado	Experimento	Estimado		
c	n		0	10		12			
0.03078	0.3003	1980	0.1005	0	0.004964589	0	2.34439E-07		
0.03078	0.3003	1400	0.2645	0.0142	0.017590498	0	2.23629E-14		
0.03078	0.3003	1000	0.3537	0.0531	0.030522342	0.001111	6.54459E-17		
0.03078	0.3003	808	0.4836	0.105233333	0.048579688	0.006667	4.69235E-21		
0.03078	0.3003	590	0.5105	0.126433333	0.063080033	0.012222	2.59728E-20		
0.03078	0.3003	400	0.6816	0.151433333	0.106038306	0.017778	1.03565E-23		
0.03078	0.3003	250	0.7272	0.168966667	0.1445294	0.034444	3.92938E-22		
0.03078	0.3003	200	0.7435	0.195366667	0.164082872	0.06	2.92899E-21		
0.03078	0.3003	147	0.7732	0.238166667	0.194996236	0.071111	2.84327E-20		
0.03078	0.3003	125	0.7991	0.265566667	0.215161233	0.157778	5.43734E-20		
0.03078	0.3003	88	0.8358	0.304866667	0.256606932	0.218889	5.99114E-19		
0.03078	0.3003	74	0.8554	0.354366667	0.278828	0.263333	1.78972E-18		
0.03078	0.3003	0	1	1		1	0		



Anexo 14. Resultados de estimación del valores del modelo cinético-acumulativo

Experimentos								
	1		2		3		4	
d, (mm)	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp
1980	0.005406	0.000366	-0.00163596	5.01E-05	0.002531083	0.000168	-0.02308	0.074996309
1400	0.021898	0.002144	0.016419226	0.001584	0.010104483	0.000801	0.007586	0.000593092
1000	0.026357	0.002291	0.044680284	0.007638	0.057498418	0.014558	0.075585	0.027423042
808	0.048355	0.005404	0.05865897	0.009451	0.062529397	0.01281	0.079626	0.023267162
590	0.075257	0.011572	0.098072377	0.022157	0.101742346	0.027651	0.128649	0.047309913
400	0.064222	0.006546	0.058229862	0.006421	0.02969298	0.002101	0.085847	0.017989634
250	0.037394	0.002131	0.048768538	0.004135	0.033904301	0.002386	0.087423	0.016314442
200	0.033167	0.001636	0.055678431	0.005122	0.088351606	0.013918	0.106516	0.022126436
147	0.006369	5.96E-05	0.057965828	0.00521	0.099939428	0.016336	0.148225	0.03699603
125	0.007329	7.59E-05	0.058675092	0.005113	0.111357331	0.019065	0.159779	0.040358239
88	-0.00518	3.63E-05	0.047512713	0.003191	0.100488064	0.014699	0.132476	0.026849787
74	-0.01046	0.000145	0.047598689	0.003099	0.104122887	0.015158	0.138127	0.027875566
kappa cal	0.31012	0.032408	0.59062405	0.07317	0.797200159	0.13965	1.126764	0.362099653
Experimentos								
	5		7		10		12	
d, (mm)	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp	(est-teor) ²	(est-teor) ² /exp
1980	-0.01597	0.04006	0.009839625	0.004334	0.004964589		-2.3E-07	
1400	-0.02018	0.008476	0.000433031	2.75E-06	0.003390498	0.00081	-2.2E-14	
1000	0.020831	0.003479	0.014246393	0.001953	0.022577658	0.0096	0.001111	0.001111111
808	0.068292	0.021049	0.049635822	0.016074	0.056653646	0.0305	0.006667	0.006666667
590	0.128983	0.053939	0.111846768	0.069711	0.0633533	0.031745	0.012222	0.012222222
400	0.117825	0.035904	0.106996842	0.042584	0.045395028	0.013608	0.017778	0.017777778
250	0.101306	0.02412	0.082992382	0.021246	0.024437266	0.003534	0.034444	0.034444444
200	0.126321	0.033551	0.104649785	0.031355	0.031283795	0.005009	0.06	0.06
147	0.113674	0.025742	0.098281306	0.024876	0.043170431	0.007825	0.071111	0.071111111
125	0.117182	0.02582	0.093188805	0.020943	0.050405434	0.009567	0.157778	0.157777778
88	0.094155	0.015908	0.068938707	0.010262	0.048259735	0.007639	0.218889	0.218888889
74	0.105825	0.018847	0.068343724	0.009564	0.075537982	0.016102	0.263333	0.263333333
kappa cal	0.958248	0.306896	0.788847878	0.252906	0.452719187	0.13594	0.843333	0.843333333



Anexo 14. Vistas de fotos de otros equipos e instrumentos utilizados



a). Pesa



b). Pie de ley



c). Cronómetro



d). Balanza técnica



e). Estufa utilizada para secar el material a 120 grado celcius.



f). La muestra seca.