



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA – QUÍMICA

Influencia del contenido de serpentina en la cinética de la molienda de las mezclas lateríticas

Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

YURIXANDER GARRIDO ARIAS

Moa, 2018

“Año 60 de la Revolución”



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA – QUÍMICA

Influencia del contenido de serpentina en la cinética de la molienda de las mezclas lateríticas

Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Autor: Yurixander Garrido Arias

Firma _____

Tutores:

Prof. Tit, Alfredo L. Coello Velázquez, Dr. C.

Firma _____

Ms.C Rogelio Lázaro Ramentol Cruz

Firma _____

Moa, 2018

“Año 60 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo: Yurixander Garrido Arias

Autor de este trabajo, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Yurixander Garrido Arias

Autor

Dr. C Alfredo Lázaro Coello Velázquez

Tutor

Mc. S Rogelio Lázaro Ramentol Cruz

Tutor

A mis padres

A mi hermano

A mis abuelos

Agradecimientos:

A mi madre y mi padre Idermis y Norge por la orientación y apoyo que me brindaron.

A mi hermano Yandi por siempre alentarme a seguir adelante.

A mis tutores Dr. C Alfredo L Coello Velázquez, Msc. S Rogelio Lázaro Ramentol Cruz, por haber sido la fuente donde surgió este trabajo y por la confianza depositada en mí para la realización del mismo.

Al profesor Dr. C Roger Almenares por su invaluable apoyo.

A todo el colectivo de profesores del Departamento de Metalurgia-Química que de una u otra manera contribuyeron a mi formación como futuro profesional.

A mis amigos Felipe, Julio, Manuel, Adrian, Víctor, Rosibet, Roibert, compañeros de cuarto y de aula que realmente me brindaron su apoyo incondicional en todos estos años.

A todos ellos: Muchas gracias

Pensamiento

“Lo que puedes hacer, o has soñado que podrías hacer, debes comenzar. La osadía lleva en sí, genio, poder y magia.

GOETHE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	4
1.1 Antecedentes de la investigación	4
1.2 Características del mineral laterítico	10
1.3 Aspectos fundamentales sobre la reducción de tamaño	11
1.3.1 El proceso de desmenuzamiento	11
1.3.2 Molienda de minerales.....	12
1.3.3 Molienda de mezclas de minerales	13
1.3.4 Molinos de bolas.....	14
1.4 Distribución de tamaño de partículas.	16
1.4.1 Función de Rosin – Rammler	18
1.5 Aspectos generales sobre la cinética de molienda	19
1.6 Función de fractura	19
Conclusiones parciales	21
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1 Diseño de la investigación.....	22
2.2 Materiales utilizados y sus características (Laborde, 2005).	23
2.3 Estimación del modelo de Rosin – Rammler.....	24
2.4 Obtención del Modelo cinético	25
2.5 Determinación de la función selección (S_{ij}).....	28
Conclusiones parciales	29
CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	30
3.1 Resultados de la función de Rosin – Rammler	30
3.2 Resultados obtenidos de la cinética acumulativa	32
3.3 Resultados obtenidos de la función selección (S_{ij}).....	39
Conclusiones parciales	41
CONCLUSIONES GENERALES.....	42
RECOMENDACIONES	43

BIBLIOGRAFÍA	44
--------------------	----

ANEXOS	
--------	--

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es determinar la influencia del contenido de la serpentina en la cinética de la molienda de las mezclas lateríticas. Con este fin se realizó una estimación de los datos experimentales de Laborde (2005) para las clases de tamaño de partículas, las cuales fueron calculadas por el modelo de Rosin - Rammler y así determinar la cinética acumulativa para diferentes porcentos de contenido de serpentina y diferentes tiempos, además, se calculó la velocidad específica de la fractura del material investigado para obtener el comportamiento según sus contenidos en las mezclas. Los resultados muestran un aumento del retenido acumulativo y una disminución de la velocidad específica de fractura al incrementar el contenido de serpentina en las mezclas minerales, lo que indica que es inversamente proporcional al contenido de serpentina, que por sus características físico-mecánicas y químicas presenta una baja molibilidad.

Palabras claves

Función selección, mezclas lateríticas, modelo cinético acumulativo.

ABSTRACT

The objective of this work is to determine the influence of serpentine content on the kinetics of the grinding of lateritic mixtures. To this end, an estimate of the experimental data from Laborde (2005) was made for the particle size classes, which were calculated by the Rosin-Rammler model and thus determine the cumulative kinetics for different serpentine content percents and different times, in addition, the specific speed of the fracture of the investigated material was calculated to obtain the behavior according to their contents in the mixtures. The results show an increase of the cumulative retention and a decrease of the specific fracture speed when increasing the serpentine content in the mineral mixtures, which indicates that it is inversely proportional to the content of serpentine, which due to its physical-mechanical and chemical characteristics presents a low mobility.

Keywords

Cumulative kinetic model, lateritic mixtures, selection function.

INTRODUCCIÓN

Los países menos desarrollados hoy día se le exige un incremento de la eficiencia económica para elevar su nivel competitivo en el mercado mundial. En Cuba la industria metalúrgica del níquel desempeña un papel medular en este ámbito, es por ello que todo cuanto se haga para elevar la productividad y la eficiencia de esta industria repercutirá de manera directa en las posibilidades de adquisición de la economía cubana. La industria cubana del níquel cuenta con más 60 años de experiencia utilizando la tecnología Carbonato Amoniacal para la obtención de níquel a partir de los minerales lateríticos.

En la tecnología carbonato amoniacal, la molienda de minerales lateríticos garantiza la superficie específica requerida del mineral para reducir el níquel y cobalto distribuidos en la red cristalina de los principales portadores. Esto último constituye un elemento imprescindible para conseguir los índices de extractable planificados en el proceso de lixiviación y la producción final. En este sentido, la mena debe ser reducida dimensionalmente hasta un tamaño de 80-85 % de la clase menor a 0,074 mm, (COELLO A. L., 2015).

La composición de la laterita varía significativamente en función de su ubicación, el clima y la profundidad. Los minerales principales que albergan níquel y cobalto pueden ser óxidos de hierro, minerales de la arcilla u óxidos de manganeso. Los óxidos de hierro derivan de rocas ígneas máficas y otras rocas ricas en hierro.

Las lateritas de níquel se producen en zonas de la tierra donde rocas ultramáficas (que contienen minerales ferromagnéticos como olivino, piroxeno y anfíbol) han experimentado meteorización bajo clima tropical por tiempos prolongados. (DALVI, BACON, & OSBORNE, 2004).

De ahí que el estudio del desarrollo del proceso en el tiempo (cinética del proceso) y los mecanismos de fragmentación y selección representan unos de los principales parámetros a investigar en la evaluación de la molibilidad de las mezclas lateríticas. Para dirigir el proceso de molienda en el molino de bolas y para escoger condiciones de su trabajo más útil es necesario conocer cómo se efectúa el proceso en el tiempo, es decir, conocer su cinética. La cinética es la disminución de la clase gruesa de tamaño en el proceso de molienda.

La molienda de mineral es considerada como un proceso altamente complejo donde se gasta una alta cantidad de energía, fundamentalmente en el movimiento de las bolas en el molino, para obtener un producto con la fineza adecuada que permita la máxima extracción de Ni + Co en los procesos posteriores (en el caso del mineral laterítico). De ahí surge la necesidad de combinar lo más eficientemente posible el uso racional de la energía, la productividad y la calidad del producto. (LABORDE, COELLO, & MENDOZA, 2000).

Debido a lo planteado anteriormente es necesario el estudio de la cinética como elemento primordial del proceso, y determinar las funciones de fragmentación y de selección experimentalmente que brinda una información importante para el futuro diseño de una instalación de molienda para su tratamiento. Este estudio tendrá como objetivo obtener una mejor eficiencia del proceso y a su vez disminuir el consumo energético.

Problema de investigación: Insuficiente conocimiento de las regularidades del comportamiento de la molienda en molinos de bolas en mezclas de mineral laterítico para obtener un producto con las características granulométricas adecuadas que mejoren la eficiencia del proceso.

Objeto de estudio: Contenido de serpentina en la cinética de la molienda de las mezclas lateríticas.

Campo de acción: Parámetros de molibilidad del proceso de molienda para mezclas lateríticas y los procedimientos de su determinación.

Objetivo general: Evaluar la influencia del contenido de serpentina en la cinética de la molienda de las mezclas lateríticas.

Objetivos específicos:

- Evaluar la cinética acumulativa en el proceso de molienda de las mezclas lateríticas.
- Determinar la función selección de la molienda de las mezclas lateríticas.

Hipótesis:

La determinación de la cinética acumulativa del proceso de molienda de las mezclas lateríticas, permitirá establecer el comportamiento de las clases granulométricas en el tiempo.



Tareas de investigación:

- Sistematización de los conocimientos relacionados con el tema y elaboración del estado del arte.
- Determinación de la cinética acumulativa de molienda y la función selección (S_i)
- Redacción de la tesis.

Métodos de investigación: Con la finalidad de darle solución al problema planteado en la investigación se utilizaron métodos teóricos y empíricos. Mediante el empleo de los métodos histórico – lógico, así como los procedimientos de análisis y síntesis, se realiza el estudio del estado del arte en el empleo de los métodos empíricos, y particularmente los procedimientos de la cinética acumulativa de la molienda y para la determinación de la función selección.

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos que resultan medulares 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 de la laterita, de la preparación mecánica, del proceso de molienda y la función selección.

1.1 Antecedentes de la investigación

Durante el proceso de molienda de cualquier mineral, el material grueso con una amplia gama de tamaños de las partículas, es alimentado al molino y aparece como producto en la zona de molienda, un material más fino cubriendo nuevamente una amplia gama de tamaños de las partículas. (AUSTIN & LUCKIE, 1972). Por ello, durante el estudio del proceso, donde la alimentación se transforma en producto, no sólo es necesario conocer la razón a la cual las partículas se fragmentan, sino también describir sus tamaños generales.

Se reconoce que hasta un 99 % de la energía consumida en la molienda de un mineral se gasta en el movimiento del molino, en ruido y en calor; sólo el 1 % queda para la reducción del material (ROWLAND, 1988). En el caso particular del proceso de molienda del mineral laterítico cubano, se han realizado importantes investigaciones en este sentido.

López y Ortiz (1988), realizan una investigación de los parámetros característicos del proceso de molienda. El estudio se realiza a partir de experimentos en un molino estándar y la aplicación de la tercera "ley" de Bond, lo que permite obtener los parámetros energéticos del proceso que, posteriormente se utiliza en el dimensionado de los molinos industriales, a pesar del profundo estudio que se realiza en el mismo no se tiene en cuenta la influencia que tienen las diferentes clases de tamaño del mineral en la productividad de la molienda.

Coello (1993), demuestra a escala de laboratorio, semi-industrial e industrial que el factor determinante en los consumos energéticos en la molienda de mineral laterítico es la carga de bola, seguido del régimen aerodinámico y el ángulo de inclinación de las paletas del separador de aire. Este trabajo propone una tecnología de operación

que permite optimizar estos últimos parámetros. En este mismo trabajo se demuestra la influencia de la relación serpentina/limonita en los indicadores de la molienda del mineral laterítico.

Otros de los aportes de Coello (1993) está relacionado con el consumo energético de cada componente en la mezcla mineral laterítico. Se demuestra que cada componente en la mezcla de las fracciones limoníticas y serpentiniticas se muele de acuerdo a sus propias regularidades y que los consumos energéticos de cada mineral asumen los valores extremos. El consumo energético de las mezclas ocupa un lugar intermedio entre los consumos energéticos de los constituyentes. Estudia también la cinética de las fracciones limoníticas y serpentiniticas en conjunto y por separado, establece que la regularidad de la cinética de la molienda de los constituyentes y sus mezclas son similares tanto cualitativamente como cuantitativamente.

Falcón y Coello (1997), muestran los resultados obtenidos empleando diferentes procesos de separación de las fases minerales presentes en las menas lateríticas. Las investigaciones se llevaron a cabo a escala de laboratorio y de banco. Se estudiaron esquemas combinados de preparación mecánica y beneficio de minerales utilizando las operaciones de trituración, molienda, clasificación hidráulica, lavado, cribado, separación magnética y gravitacional.

Más tarde Laborde y Coello (2001) analizan la influencia del grado de llenado con bolas del molino sobre la productividad y la estrecha relación de esta última con la eficiencia energética del proceso. Se demuestra la existencia de reservas energéticas en el proceso. Se detectan las principales causas del fenómeno que son: irregularidad de alimentación al molino creando ausencias ocasionales dentro del sistema o baja productividad, pero a pesar de la profundidad con que son tratados los temas de dicha obra tampoco se tiene en cuenta la influencia del beneficio de la mena.

Coello y Tijonov (2001), realiza un análisis crítico-valorativo sobre los modelos más convencionales que describen la relación matemática entre la energía consumida en la molienda y la reducción dimensional, sus principales limitaciones para la evaluación de la energía en la molienda de poliminerale. A partir de esto se proponen importantes adecuaciones al modelo de Tijonov, que derivan en uno nuevo para la valoración de la energía en la molienda de minerales multicomponentes. El modelo propuesto no sólo permite la determinación del consumo de energía de cada

componente de la mezcla mineral en su molienda conjunta, sino también los flujos energéticos de cada clase de tamaño de cada componente de la mezcla.

Garcés y Rondón (2002), determinaron por vía experimental los parámetros de las funciones de la razón de la fragmentación y de distribución de la fragmentación de la molienda dosificada de la laterita en un molino de bolas a escala de laboratorio, pero a pesar de la profundidad con que son tratados los temas de dicha obra no se realiza un análisis de la influencia que tiene el beneficio del material en la productividad del molino.

En Cuba existen una planta procesadora de las menas oxidadas de níquel y cobalto, ubicada al nordeste de la zona oriental (Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", la planta incluye la molienda como parte del proceso de preparación de minerales y en la misma está establecido moler de forma conjunta las fracciones serpentinitica y limonítica a razón de 1:3, sin embargo, en la práctica se observa que es difícil mantener de forma estable esta relación, por lo que la molienda del mineral laterítico se presenta como la molienda de un mineral, (RODRIGUEZ, 2011).

Núñez y Pérez (2003), realizaron una extensa investigación en la cinética de molienda en los minerales lateríticos, para la fragmentación, obteniéndose con estos un modelo matricial que caracteriza el comportamiento de la molibilidad del material analizado, a pesar de la profunda investigación realizada, no se aborda el tema del beneficio de la mena que se alimenta.

Fuentes y Suárez (2004), hicieron un estudio en la planta de Preparación de Minerales (sección molienda) para determinar cómo influyen el régimen dinámico y la operación del clasificador sobre los indicadores tecnológicos del proceso, en este trabajo no se aborda el efecto que tiene las diferentes clases en el proceso de molienda.

Reina (2004), realizó el cálculo del índice de trabajo de Bond para los minerales lateríticos y se determina el valor real de consumo de energía para la molienda y la influencia que esta tiene sobre la variación del porcentaje de serpentina en la alimentación.

Laborde (2004), realizó una investigación en la unidad de molienda, específicamente en sus dos equipos principales el molino de bolas y el ventilador de recirculación. Los resultados muestran que la variabilidad observada en el consumo energético se debe,

fundamentalmente, a la ausencia de estabilidad en el flujo de alimentación de los molinos. Se obtiene un modelo estadístico que permite predecir el comportamiento del consumo específico de energía en función de la productividad diaria de la sección de molienda.

Brown et al (2004), en su investigación demuestran que la función razón específica de la fragmentación (S), para el mineral laterítico a medida que aumenta el contenido de serpentina en la mezcla, los valores de (S_j) son menores, alcanzando los valores máximos para el caso en que el mineral es prácticamente limonítico (parte terrosa del mineral) y los valores mínimos para el caso serpentinitico (parte rocosa del mineral). Esto demuestra que con el aumento del contenido de serpentina en el mineral el proceso transcurre más lento, por lo que disminuye la productividad del molino y aumenta el consumo específico de energía, (RODRIGUEZ, 2011).

Para el mineral laterítico a medida que aumenta el contenido de serpentina en la mezcla, los valores de la función razón específica de la fragmentación (S), son menores, y se alcanzan los valores máximos para el caso en que el mineral es prácticamente limonítico (parte terrosa del mineral) y los valores mínimos para el caso serpentinitico (parte rocosa del mineral). Esto demuestra que con el aumento del contenido de serpentina en el mineral el proceso transcurre más lento, por lo que disminuye la productividad del molino y aumenta el consumo específico de energía (LABORDE, 2005).

Gilart y Rodríguez (2006), realizó un estudio de la cinética de la molienda, así como la función de selección y de rompimiento para el vidrio volcánico de "El Picao", obteniendo como resultados para el caso de la función selección, que su comportamiento es, que a medida que aumenta el tamaño de la partícula se incrementa la velocidad del mineral, por consiguiente, se aumenta la probabilidad de fractura de las partículas minerales. Para el caso de la función de rompimiento se puede afirmar que son insensibles a las condiciones de la molienda.

Coello y Menéndez (2008), demuestran la influencia de las mezclas lateríticas de limonitas y serpentinitas de la velocidad de la molienda de cada uno de estas fracciones molidas por separado y en su conjunto, confirma las afirmaciones de Coello en (1993) sobre la conservación de las regularidades individuales de las fracciones constituyentes de la mena laterítica en la molienda de sus mezclas utilizando con

indicadores de la molienda las funciones de distribución de la fragmentación y de selección.

Pérez (2011) realizó un estudio en Sagua de Tánamo caracterizando la cinética de molienda para el yacimiento de las Tobas Vítreas, llegando a la conclusión de que al molerse este mineral por cinco minutos o más se obtiene un producto que se puede utilizar como aditivo puzolánico al cemento con las condiciones óptimas para este fin, (MEDINA, 2017).

El aprovechamiento de las reservas minerales del municipio de Moa es limitado a menas cuya composición industrial varía en un rango muy estrecho. La serpentina dura y descompuesta (menas fuera de balance) tiene un apreciable contenido de níquel y otros metales que por falta de tecnología no se pueden recuperar económicamente, por esta razón se acumulan o se desechan (RAMENTOL, 2012).

Aldana y Legrá (1996), analizaron que la productividad de los molinos se mide por el número de toneladas de mineral inicial desmenuzado, por la cantidad de toneladas formadas nuevamente y por la cantidad de toneladas de la clase calculada por unidad de tiempo y depende de una serie de factores, entre los más significativos se encuentran:

- Humedad de mineral de alimentación.
- Fineza del mineral de alimentación.
- Grado de llenado del molino con la carga de bolas.
- Insuficiente capacidad de los equipos que alimentan y extraen el material procesado y que suministran los insumos energéticos, electricidad fundamentalmente.
- Limitación de la carga (amperaje) de los equipos básicos, en este caso el molino.

El control de la humedad en la alimentación y en el circuito es de vital importancia en la molienda por vía seca, particularmente en circuitos con cribado. Algunos tipos de molinos toleran mayor contenido de humedad que otros, esta afecta la capacidad y el consumo de potencia, se demostró experimentalmente que un molino con clasificador perdió 25 % de su capacidad y sufrió un incremento del 50 % en el consumo de energía por toneladas al recibir el producto con un incremento de humedad de 0,8 a 4 %.

El consumo de energía está ligado al grado de llenado del molino con los elementos triturantes. Al incrementarse este, se incrementa también el consumo de energía al máximo cuando el molino está lleno hasta el 50 % de su volumen. Estas conclusiones se confirman con datos experimentales; de igual manera, la influencia del grosor, forma, densidad y resistencia de las bolas. El trabajo puede ser utilizado como referencia para determinar el consumo de energía requerida para el desmenuzamiento del mineral laterítico, (URGELLES, 2012).

Namindo (2015) determina las regularidades del proceso de molienda del carbón bituminoso, con el objetivo de utilizarlo como alternativa energética en el proyecto de Ferroníquel S.A. En su trabajo se establece el modelo cinético acumulativo para la molienda del carbón bituminoso. En este trabajo no se determina la molienda del carbón para las monoclasas, ni para las mezclas con mineral laterítico, sino para el carbón bituminoso en su totalidad.

Viada (2015), ejecuta una extensa investigación en la cinética de molienda en los minerales lateríticos, para la fragmentación, obteniéndose con estos un modelo matricial que caracteriza el comportamiento de la molibilidad del material analizado, a pesar de la profunda investigación realizada, no se aborda el tema del beneficio de la mena que se alimenta.

En el trabajo de Liubert (2015), apoyándose en las funciones de fragmentación y de selección, realiza una evaluación de la molibilidad de las mezclas de carbón bituminoso y el mineral laterítico. A juzgar por los resultados, la molibilidad de las mezclas se ve notablemente afectada por el contenido de carbón bituminoso en ellas. El incremento del contenido de carbón bituminoso en la mezcla trae consigo una disminución notable de la velocidad de molienda.

Romero (2004) obtiene un modelo matemático que describe las características granulométricas de suspensiones lateríticas y Cieno Carbonatado y se definen los efectos de las características granulométricas y coloides químicos sobre la reología de dichas suspensiones. Citado de (RICARDO, 2016).

El tema sobre la interacción de las dos componentes mineralógicas durante la molienda, ha sido polémico. Falcón (1987) citado de (RAMENTOL, 2016), sostuvo la hipótesis sobre la existencia de una interacción positiva entre las fracciones

limoníticas y serpentínicas, sobre la base del comportamiento de los índices del mineral molido al compensar con mineral la disminución de la carga de bolas.

1.2 Características del mineral laterítico

La laterita es el suelo propio de las regiones cálidas, caracterizado por el bajo contenido de sílice y su elevado contenido en hierro, alúmina y/u otros minerales. Las costras lateríticas se deben a la meteorización de la capa superficial del suelo, es decir, a la acción in situ de los agentes meteorológicos (lluvia, insolación, viento, acción de los seres vivos, etc.).

Las lateritas se forman a partir de la lixiviación de rocas madres que pueden ser sedimentarias, metamórficas; ígneas o proto-menas. Dicha lixiviación va dejando en el residuo los iones más insolubles que son predominantemente el hierro y aluminio. El mecanismo de lixiviación tiene una secuencia de pasos muy importantes. Primeramente ácidos disuelven la estructura cristalina de un mineral determinado del material padre, esto es seguido por la hidrólisis y precipitación de óxidos insolubles y sulfatos de hierro, aluminio y sílice, (V.L.SMIRNOV, 1982).

Todo esto bajo altas temperaturas en un clima monzónico subtropical húmedo. Una característica esencial para la formación de laterita es la repetición de las estaciones húmedas y secas. Las rocas son lixiviadas por el agua de lluvia que se filtra durante la temporada de lluvias, la solución resultante que contiene los iones lixiviados es llevada a la superficie por la acción capilar durante la estación seca, (V.L.SMIRNOV, 1982).

Estos iones forman sales que se secan en la superficie. Dichas sales son lavadas durante la próxima temporada de lluvias. La formación de laterita se ve favorecida en zonas de relieve atenuado como suaves crestas y mesetas que evitan la erosión de material superficial. Durante la formación de lateritas existe una zona de reacción donde las rocas están en contacto con agua que abarca el nivel más bajo al más alto en el que fluctúa el nivel freático. Esta zona de reacción se agota progresivamente de los iones fácilmente lixiviados de sodio, potasio, calcio y magnesio. Una solución con estos iones puede tener el pH adecuado para disolver preferentemente óxido de silicio en lugar de los óxidos de aluminio y óxidos de hierro.

La constitución del mineral laterítico se compone de una mezcla de limonita (de carácter terroso) y de serpentinas parcialmente descompuestas y duras.

Limonita: se define como $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ para referirse a los óxidos de hierro, naturalmente hidratados de identidad incierta.

Serpentina: se define como un mineral con una fórmula química definida $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ formador de rocas en dos variedades fundamentales Antigorita y Crisotilo.

Ambos minerales tanto la limonita como la serpentina son considerados minerales secundarios puesto que se formaron de minerales previamente existentes, mediante procesos en los que participa la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera.

1.3 Aspectos fundamentales sobre la reducción de tamaño

La molienda es la última etapa de las operaciones de reducción de tamaño y se puede llevar a cabo por vía seca y húmeda. La cual ayuda a que los agentes químicos extractivos puedan realizar la extracción con mayor riqueza y facilidad, en donde se tendría una menor pérdida del producto.

1.3.1 El proceso de desmenuzamiento

Para dirigir el proceso de desmenuzamiento en el molino de bolas y para escoger condiciones de su trabajo más útil es necesario conocer como se efectúa el proceso en el tiempo, es decir conocer su cinética.

El grosor del material molido se controla con ayuda de un tamiz de control que tiene orificios de dimensiones correspondientes al grosor máximo de desmenuzamiento. Los granos pasados por los orificios del tamiz forman el producto acabado. El resto en el tamiz de control representa en si la clase gruesa no desmenuzada hasta el final.

El material inicial destinado para el desmenuzamiento puede consistir bien exclusivamente en granos de la clase gruesa, bien de la mezcla de la clase gruesa y el producto acabado.

Si durante el trabajo del molino de bolas de acción periódica dentro de los lapsos determinados de tiempo se van a tomar muestras del material desmenuzado, determinar en ellas las masas de la clase gruesa y representar los resultados en forma de un gráfico, entonces se obtienen líneas curvas que indican la dependencia de la masa, de restos de la clase gruesa del tamiz de control de la duración del desmenuzamiento. Estos gráficos muestran la disminución normal de la cantidad de la

clase gruesa del material, desmenuzado y tiene una forma de curva hiperbólica común para todos los minerales, lo que indican la existencia de la relación estable entre la cantidad de material no desmenuzado hasta el final y el tiempo de desmenuzamiento.

La forma de las curvas depende de las cualidades del material que se desmenuce, y las condiciones del desmenuzamiento. Por eso la investigación de las curvas es una base del estudio de la cinética del proceso del desmenuzamiento en los molinos de bolas.

1.3.2 Molienda de minerales

La molienda es la última etapa de las operaciones de reducción de tamaño y se puede llevar a cabo por vía seca y húmeda (ANDREIEV, 1980). La molienda se realiza en los molinos, los cuales son tambores en cuyo interior se disponen los medios moledores, que se mueven libremente en el interior del mismo. Los medios moledores pueden ser barras, bolas, guijarros, rocas duras e incluso algunos casos, los pedazos gruesos del propio mineral. De acuerdo a la práctica industrial, la granulometría del producto alimentado varía de 250 mm hasta 5 mm, con excepción de los molinos de automolienda; aunque es recomendable alimentar el material con un tamaño menor a 15 mm.

La molienda depende de un gran número de factores incluyendo el grado de diseminación del componente útil en la ganga; le corresponde el mayor peso en la liberación de los componentes útiles de las menas, por esta razón la calidad del producto final, la eficiencia de la separación y la obtención de altos índices cualitativo - cuantitativos del beneficio dependen de la molienda; la eficiencia de la molienda es precisamente la clave del éxito de la separación de los minerales, una molienda que no garantice el grado de liberación necesario, trae consigo bajas recuperaciones en el beneficio, bajos contenidos del componente útil en el concentrado y cuantiosas pérdidas del componente valioso en las colas.

La remolienda del mineral implica además del consumo innecesario de energía, la reducción del componente útil por debajo del tamaño necesario, provocando pérdidas de este componente; por otra parte, cuando este último sucede con la ganga, se producen las lamas secundarias, las cuales tienen un efecto muy negativo en los índices de la separación (COELLO A. , 1999:).

Cualquier consumo energético que produzca una reducción de tamaño debe estar relacionado necesariamente con las condiciones iniciales y finales de tamaño de partícula.

En el caso de rotura de partículas individuales, dichas condiciones de tamaño pueden ser, en el caso de partículas esféricas, el diámetro; y en el caso de partículas irregulares, un tamaño entre dos diámetros de malla de tamices suficientemente cercanos. En el caso de roturas de colectivos de partículas (rotura de lechos de partículas), será preciso conocer en general la distribución de tamaños antes y después de la rotura, (ANDREIEV, 1980).

Si la distribución granulométrica no varía mucho en la alimentación y el producto, (como es el caso de los molinos de bolas, en los que se puede suponer un desplazamiento casi paralelo), suele usarse un parámetro característico, como el d_{80} , lo cual en todo caso queda abierto a objeciones ya que es necesaria mucha más energía para la rotura de las partículas finas que las gruesas, y el cambio en los rasgos de tamaños finos no puede ser descrito bien sólo por dicho parámetro (ANDREIEV, 1980).

Para intentar superar las objeciones comentadas anteriormente, se utiliza asiduamente como medida de la reducción de tamaño el cambio en la superficie específica entre alimentación y producto. Eso tampoco está exento de objeciones, ya que el valor de este parámetro depende grandemente del método utilizado siendo estrictamente solo posibles las comparaciones cuando los valores se hayan obtenido mediante el mismo método empleado. En todo caso, está claro que un mismo valor de la superficie específica puede ser obtenido a partir de diferentes distribuciones de tamaños (ANDREIEV, 1980).

Puede por tanto concluirse que la única medida aceptable de la reducción de tamaño consiste en la comparación de las distribuciones granulométricas de alimentación y producto, que por otro lado no presenta ningún problema a la hora de su tratamiento numérico (ANDREIEV, 1980).

1.3.3 Molienda de mezclas de minerales

El primer informe conocido sobre el estudio de mezclas binarias de minerales de diferente dureza es el antes mencionado de Holmes y Paching, (1957). Estudiando la

molienda seca de cuarzo y caliza, llegaron a la conclusión que las distribuciones granulométricas de los productos de la molienda de las mezclas son prácticamente iguales a los productos molidos obtenidos en la molienda por separado de los minerales.

Posteriormente, Fuersternau y Sullivan, (1962) para la molienda en barras y en bolas de mezclas de cuarzo y caliza establecieron que la clase de tamaño dada se forma con velocidad constante, y es característico para cada material y modo de molienda (por separado o en su conjunto). Quizás por ser un trabajo más acabado, estas tesis son conocidas como las hipótesis de Fuersternau-Sullivan, (GUZMÁN, 2017).

El científico indio Kapur, a partir de molienda de cuarzo y caliza, llegó a la conclusión de que el módulo de distribución se mantiene constante con independencia del modo de molienda y que la energía consumida en la molienda en bola, se distribuye proporcional a la proporción másica de los constituyentes en las mezclas, (GUZMÁN, 2017).

Coello en (1993b), confirma tales afirmaciones. En este sentido, para el caso de las lateritas niquelíferas demuestra que las curvas granulométricas de las mezclas de serpentinita y limonita se ubican en una posición intermedia entre las curvas granulométricas de dichas fracciones mineralógica, pero molidas por separado. Más tarde, revela las mismas regularidades a mezclas de magnetita y cuarzo (COELLO-VELÁZQUEZ & TIJONOV, 1996). En ambos trabajos, Coello incorpora en el estudio de la cinética de la molienda de las mezclas, confirmando que los minerales constituyentes se muelen de acuerdo sus propias regularidades, sin que el modo de molienda influya en los resultados del rompimiento.

1.3.4 Molinos de bolas

Los molinos de bola, figura 1.1, se fabrican tanto con descarga central del material desmenuzado como también con descarga a través del enrejado. Estos molinos son ampliamente usados en la industria del cemento, clinker, yeso y en industria metalúrgica, entre otras (COELLO A. , 1999:)

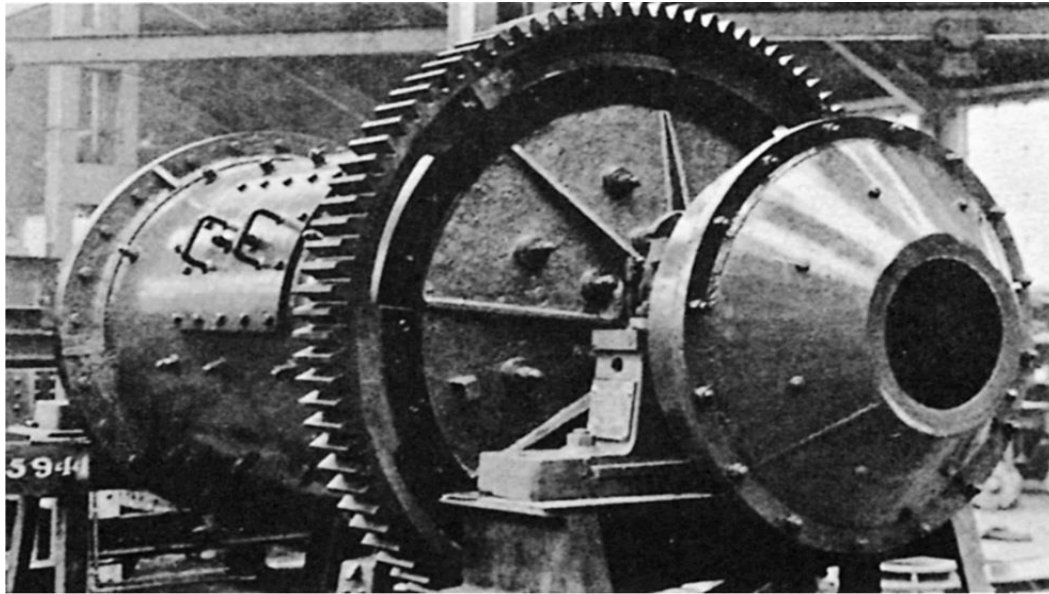


Figura 1.1 Molino de bolas (WILLS, 2015).

El tambor se fabrica de láminas gruesas de acero fundido, soldado o remachado. En ambos extremos del tambor, están remachadas o soldadas bridas de acero tallado, para sujetar las tapas laterales (ANDREIEV, 1980).

En su interior del tambor se cargan las bolas. Estas pueden ser fabricadas de acero forjado, fundido hierro colado y sus dimensiones pueden variar de 25 hasta 150 mm. Las fabricadas con acero forjado son sometidas a un tratamiento térmico con el que alcanzan características óptimas al desgaste. La dureza de las bolas varía considerablemente: las más suaves tienen una dureza Brinell de 350-450 y las dureza de hasta 700, (COELLO A. , 1999:).

El tambor del molino contiene numerosas bolas que lo llenan aproximadamente hasta la mitad. Esto se expresa en función del porcentaje del volumen del molino ocupado por las bolas; por ejemplo un volumen masivo de bolas que ocupan la mitad del molino es aproximadamente una carga de 50 %, (RICARDO, 2016) .

La eficiencia de la molienda y su consumo de energía depende del número de revoluciones del molino (velocidad de rotación del tambor), del peso, tamaño de las bolas y volumen que ocupan la carga de bolas dentro del mismo. A partir de esta concepción se puede decir que la fuerza principal de molino se trasmite a los cuerpos molidores a través de revestimiento.

Cuando se opera con una velocidad relativamente pequeña, o un revestimiento liso, hace que la carga de bolas se deslice lentamente a una baja altura, para luego resbalar en descendencia sobre las paredes del tambor, al mismo tiempo, las capas de bolas resbalan unas sobre otras, favoreciendo que prevalezca el mecanismo de abrasión o fricción, este régimen de trabajo se le conoce como régimen de cascada, que produce un material más fino, y en consecuencia, aparece una mayor cantidad de lamas en el producto molido y un mayor desgaste en el revestimiento del molino (WILLS, 2015)

Pourghahramani,(2012) expresa que en los molinos donde prevalece el mecanismo de impacto en la fragmentación, se ocasiona una fractura masiva en las partículas, que conllevan a la aparición de partículas irregulares y alargadas que luego son redondeadas por el mecanismo de fricción, (RICARDO, 2016). Plantea Austin (1994.), que para este tipo de molinos, el rendimiento está severamente influenciado por la condiciones de operación (revestimiento del molino, la rejilla) y las características propias del mineral. Los cambios en la composición mineralogía y en las propiedades físicas de la alimentación pueden influir en la variación de las condiciones óptimas de operación, como también en los cambios de los productos que recirculan al molino.

Las velocidades reales de rotación del molino varían entre el 60 y 70 % de la velocidad de su valor crítico. Para la molienda en seco y suspensiones de baja viscosidad se emplean de un 70 a 75 %. Las velocidades en los molinos que no cuentan con desviadores internos, pueden incrementarse en un 5%, para compensar fallas, (RICARDO, 2016).

1.4 Distribución de tamaño de partículas.

El análisis de la distribución de tamaño se utiliza sobre todo para obtener datos cuantitativos sobre la distribución dimensional individual de partículas en los flujos de un circuito de molienda . Esto es importante para conocer en todo momento la calidad de la molienda, tamaño óptimo de la alimentación en procesos de máxima eficacia.

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 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. La característica 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 tamiz dada, 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 A. , 1993).

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.

1.4.1 Función de Rosin – Rammler

La función de Rosin – Rammler es la distribución más utilizada en Europa para representar el porcentaje del pasante acumulado en función del tamaño de partícula, y se representa mediante:

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^n} \quad (1)$$

donde

$R(x)$: retenido acumulado para un tamaño x , unidades.

x : tamaño de la partícula, unidades.

a : módulo de tamaño de Rosin–Rammler para el cual $R(x)$ es igual al 63,2 %.

n : módulo de distribución de Rosin–Rammler.

Despejando convenientemente y tomando dos veces logaritmo natural en ambos miembros de la ecuación (1) se obtiene:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{R(x)}\right)\right) = n \ln x - n \ln a \quad (2)$$

Los parámetros n y a se obtienen de la pendiente de la línea recta y de la intersección de esta con el eje horizontal correspondiente a $R(x) = 63,2 \%$, respectivamente, al representar el $\ln\left(\ln\left(1/(R(x))\right)\right)$ en función del $\ln x$. Ambas constantes completan la descripción de la distribución de tamaños de la muestra

La representación gráfica de la función de Rosin – Rammler se expande en las regiones por debajo del 25 % y por encima del 75 %, y se contrae en la región comprendida entre el 30 y el 60 % del pasante acumulado. Sin embargo, se ha demostrado que esta contracción es insuficiente para causar efectos adversos en la representación de la distribución de tamaño ((NAPIER-MUNNN & KOJOVIC, 2005; ÁLVARES, 2010; WILL & FINCH, 2016).

1.5 Aspectos generales sobre la 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 A. , 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 desarrolla el proceso dado en el tiempo. En la cinética del proceso de molienda se propone 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, considerando el molino como un reactor de mezcla perfecta (COELLO & MENÉNDEZ, 2008).

Para los intervalos determinados de tiempo, se muelen la misma cantidad de material en el molino de bolas y luego el material molido es sometido a la determinación de 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 muele y de las condiciones del desmenuzamiento. Andreiev, (1980) recomienda 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 la clase gruesa y las características granulométricas.

1.6 Función de fractura

En el proceso de molienda de los minerales, el material grueso con una amplia distribución de tamaños de las partículas, es alimentado al molino y aparece como

producto en la zona de molienda, un material más fino cubriendo nuevamente una amplia gama de tamaños de las partículas.

Por ello, durante el estudio del proceso, donde la alimentación se transforma en producto, no sólo es necesario conocer la razón a la cual las partículas se fragmentan, sino también describir el aporte que ofrece cada clase después de ser fracturada a su inmediata inferior. (RAMENTOL, 2016).

La razón específica de la fragmentación S_j , figura 1.2, es definida como la fracción de partículas de tamaño j , fragmentadas en la unidad de tiempo. Esta función es utilizada de la forma siguiente: si S_j es la función razón específica de la fragmentación de un material de tamaño j y $M_j(t)$ es la fracción de masa para el tiempo t en el tamaño j de la masa total de partículas W , en una prueba batch, entonces la razón de fragmentación del material de tamaño j es $S_j M_j(t) W$. (PRASHER, 1987).

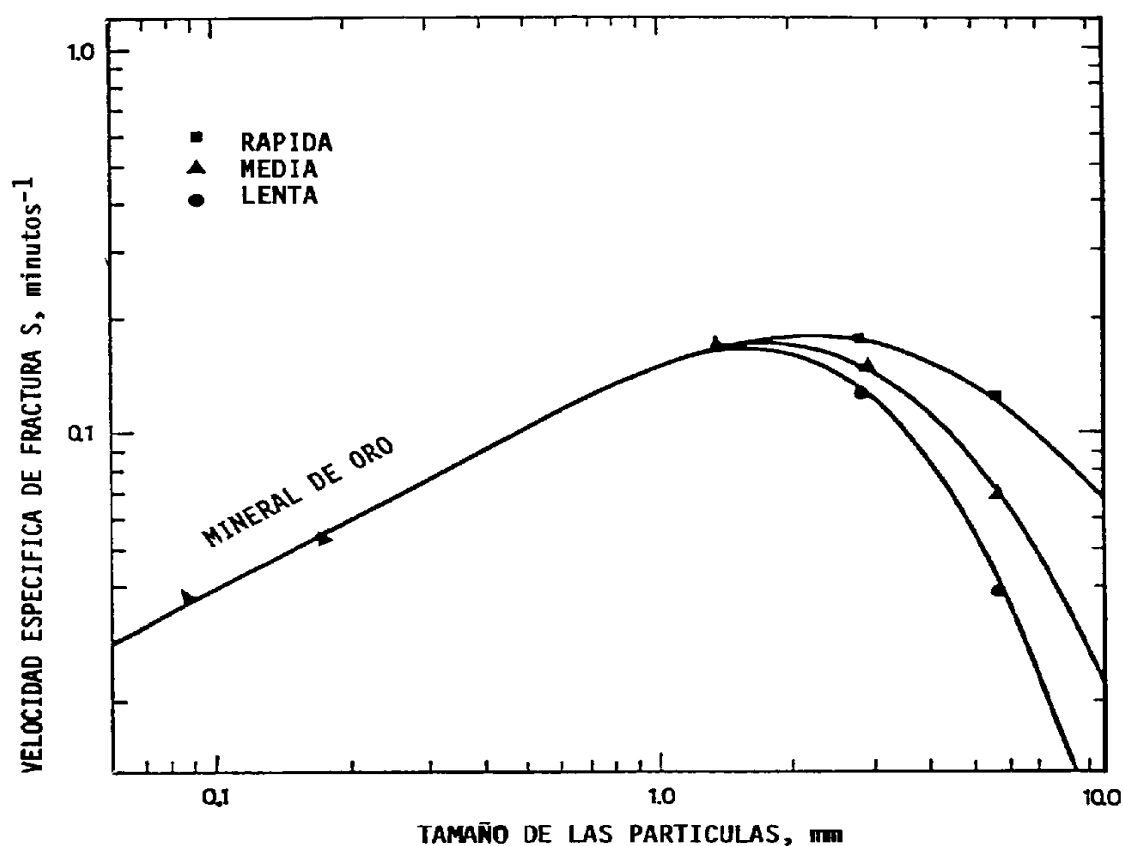


Figura 1.2 Representación gráfica del método de selección (S_{ij}) (AUSTIN Y. C., 1994.).

Conclusiones parciales

- Existe una vasta experiencia en la molienda de las menas lateríticas y el estudio de las funciones de distribución de la fragmentación y las funciones selección, pero no se ha mostrado el estudio de la cinética de las clases granulométricas, que permita evaluar su comportamiento.
- El estudio de la cinética de la molienda de las mezclas lateríticas, plantea que la molienda de este material sigue las mismas regularidades que la mayoría de los minerales, con el incremento del tiempo, disminuye la masa de la clase gruesa; y en cuanto, al contenido de serpentina, se evidencia que un incremento de este produce un aumento del tamaño de la clase gruesa.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

Para materializar los trabajos investigativos es de vital importancia la apropiada selección de los materiales y los métodos, para garantizar su desarrollo de manera eficaz y a la vez la veracidad de los resultados, los análisis granulométricos, la determinación de la cinética de la molienda, la determinación de la función de selección, así como el tratamiento de los resultados. Los objetivos específicos de este capítulo son:

- Exponer la metodología de la investigación.
- Exponer las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental.

2.1 Diseño de la investigación.

Para el desarrollo de la investigación fue necesario estimar la composición granulométrica del producto alimentado a la planta de molienda de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara con ayuda del modelo Rosin – Rammmler. Este modelo fue determinado para los datos experimentales de laboratorio de Laborde (2005), tabla 2.1 y 2.2. Los cuales fueron empleados para determinar la función de selección por método I de la metodología de Austin y Concha (1994.). Los datos para realizar los cálculos de la cinética de molienda donde se representará el tamaño de partícula, salida de las clases, tabla 2.1, y las variaciones de tiempo, para los parámetros de C y n, tabla 2.2, que dependen de las condiciones del proceso de molienda y de las características del material respectivamente.

Tabla 2.1 Datos experimentales del tamaño de partícula y salida de las clases del material serpentino.

Tamaño (x)	Salida de las clases, u
2	0,225
1	0,111
0,85	0,045
0,6	0,073
0,4	0,106
0,3	0,023
0,2	0,055
0,16	0,05
0,074	0,103
0,044	0,029

Tabla 2.2 Contenido de serpentina en el mineral, Cs, %.

Contenido de serpentina en el mineral, Cs, %							
Parámetro	0	10	25	35	50	75	85
C _m	0,1704	0,0938	0,0344	0,0327	0,0204	0,0052	0,007
N	0,2639	0,2461	0,3154	0,2542	0,3429	0,5022	0,4253

2.2 Materiales utilizados y sus características (Laborde, 2005).

El material utilizado durante esta investigación es la laterita del yacimiento de Punta Gorda, este yacimiento es un típico depósito residual de níquel, cobalto y hierro asociado a una corteza de meteorización desarrollada en forma de un potente manto, esencialmente laterítico, sobre un macizo de rocas ultrabásicas serpentinizadas. Se distingue por el fino espesor de la capa de serpentina alterada que se interpone entre la capa limonítica y el lecho de roca (RAMENTOL, 2016).

Sobre la base del comportamiento de los parámetros geomorfológicos, geológicos y geoquímicos, dicho yacimiento ha sido dividido en siete dominios geológicos (LEÓN, 2001). La laterita se define como "Suelo rojo residual" que se desarrolla en regiones húmedas tropicales y subtropicales con buen drenaje. La sílice y el magnesio son lixiviados y contienen concentraciones, particularmente, de hidróxidos de hierro y aluminio, (VERA, 1979).

Puede representar una mena de hierro, aluminio, manganeso o níquel (ROJAS, 1995). Uno de los componentes principales de este material es la limonita, definida para referirse a los óxidos de hierro, naturalmente hidratados de identidad incierta. Otro de los componentes principales de la laterita es la serpentina, formado de rocas en dos variedades fundamentales Antigorita y Crisotilo.

La constitución del mineral laterítico se compone de una mezcla de limonita (de carácter terroso) y de serpentinas parcialmente descompuestas y duras. La limonita aparece como tierra suelta o en terrones de color amarillo; por su parte el material serpentínico presenta toda la gama desde mineral terroso hasta fracciones de rocas duras de diversos tamaños.

Este mineral está acompañado de una humedad promedio de 38 %, variando desde un 30 a un 40 %. El peso volumétrico del mineral seco "in situ" es de 1,20 t/m³ y el del mineral húmedo "in situ" es de 1,78 t/m³.

Las características químicas de los horizontes de la corteza de intemperismo del yacimiento Moa muestran un cuadro geoquímico en correspondencia con la génesis de estos depósitos exógenos, evidenciando una tonalidad química vertical muy bien definida, Rojas (1995).

2.3 Estimación del modelo de Rosin – Rammler.

La función de Rosin – Rammler es la distribución más utilizada en Europa para representar el porcentaje del retenido acumulado en función del tamaño de partícula (ÁLVARES, 2010) y se representa mediante:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^n} \quad (3)$$

R , retenido acumulado para un tamaño x , %.

x : tamaño de la partícula, unidades.

a : módulo de tamaño de Rosin–Rammler

n : módulo de distribución de Rosin–Rammler.

Despejando convenientemente y tomando dos veces logaritmo natural en ambos miembros de la ecuación (3) se obtiene:

$$\ln \left[\ln \frac{1}{R} \right] = n \cdot \ln x - n \cdot \ln a \quad (4)$$

La línea recta obtenida, en la figura 2.1, tiene la forma $y = qx + r$, donde q es la pendiente de la recta y r el intercepto. Al comparar la ecuación de la recta con la ecuación (4), se concluye:

$$N = q \text{ (pendiente de la recta)} \quad (5)$$

$$r = -n \ln(a) \quad (6)$$

de donde:

$$a = e^{-\frac{r}{n}} \quad (7)$$

Una vez identificados los parámetros de dicha función, se determina el retenido acumulativo mediante la ecuación (3).

La estimación de los parámetros "n" y "a" de la función de Rosin–Rammler se realiza a partir de la representación gráfica de la ecuación (4)

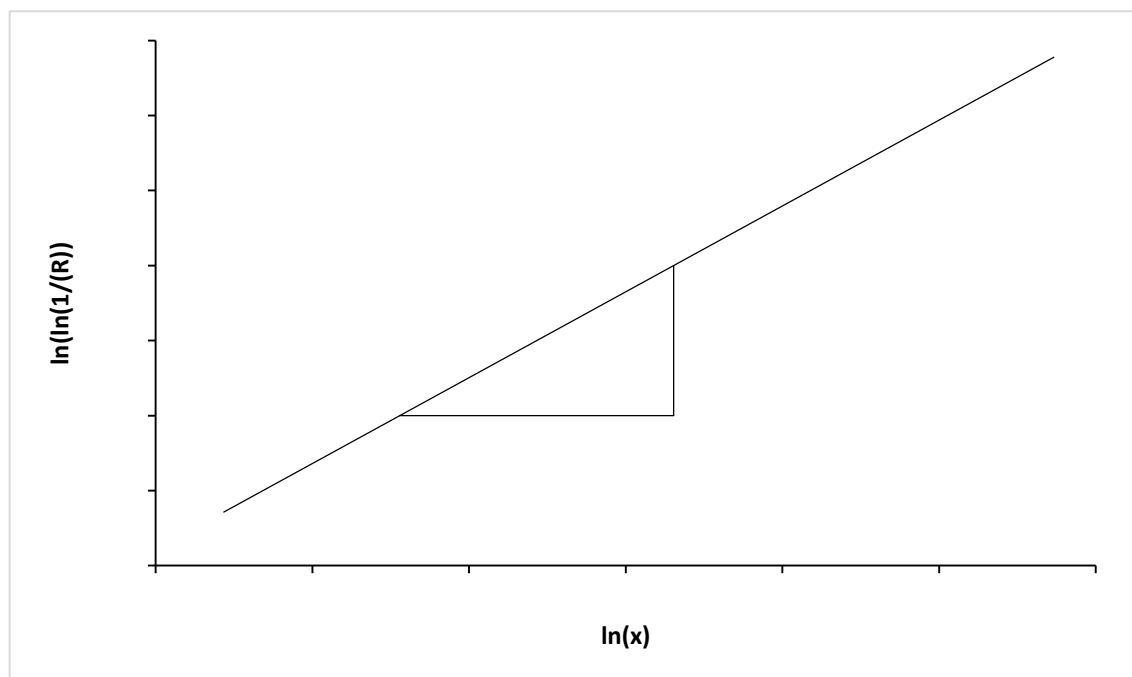


Figura 2.1 Representación gráfica de la función de Rosin – Rammler.

2.4 Obtención del Modelo cinético

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.

E. Davis (1939) propuso que la velocidad de variación de la clase gruesa es proporcional (directamente) a la cantidad de esta clase en el momento t en el interior del molino. Mittag y Zagustin, Tobarov y Tamer lo expresaron de la siguiente forma:

$$\frac{dR}{dT} = -K \quad (8)$$

Donde:

R - contenido de la clase gruesa en el producto de molienda.

T - tiempo de molienda.

k- coeficiente que depende de las condiciones de molienda y las propiedades del material.

Esta proporcionalidad se debe en parte a que según va disminuyendo el contenido de

la clase gruesa en el interior del molino, se va haciendo más difícil el contacto o la probabilidad de choques de los elementos moledores con el material, trayendo como consecuencia que el proceso se haga más lento y viceversa. Las características del material es otro factor que va a influir en la velocidad de la molienda.

Integrando la ecuación (8) se obtiene la siguiente expresión:

$$R = R_0 e^{-KT} \quad (9)$$

R_0 - contenido inicial de la clase gruesa, %, unidades.

Tamer dedujo la ecuación (9) y la denominó ecuación de la reacción de molienda, análogo a la ecuación de la reacción química y lo generalizó hasta una ecuación de mayor grado.

Zagustin en 1935 propuso la siguiente ecuación:

$$R(x, T) = R_0(x) e^{-axt} \quad (10)$$

Donde:

$R(x_1)$ y $R_0(x)$ - característica granulométrica del producto molido a un tiempo t e inicial respectivamente,

x - tamaño del grano,

a - constante de Rittinger.

Lo interesante en la ecuación de cinética de Zagustin radica en que para $W = \text{const}$, la ecuación describe la característica granulométrica del producto y para la x constante describe la cinética del proceso.

Sin embargo, su principal insuficiencia está relacionada con la gran dispersión de los datos estimados por el modelo y los datos experimentales en la molienda por vía húmeda, Zagustin desarrolló la ecuación sobre la base de la molienda seca del cuarzo, obteniendo una buena correspondencia entre los datos empíricos y teóricos, modelados por su ecuación. Por lo visto, en la molienda de un material isomorfo como el cuarzo, la molibilidad se mantiene constante en el tiempo; la desviación de los resultados experimentales y los teóricos aumentan con el aumento del tiempo de molienda.

La constante α se puede calcular logaritmirizando la ecuación (10)

$$a = \ln \left(\frac{R_0 C_x}{R(x,t)} \right) / x \quad (11)$$

Si dentro de lapsos determinados de tiempo durante el trabajo del molino de bolas se toman muestras del material desmenuzado 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 la curva depende de las propiedades del material que se desmenuza y de las condiciones del desmenuzamiento. Es por eso que Andreiev (1980), recomienda la investigación de las curvas como parte del estudio la cinética de la molienda.

Loveday planteo en 1965 el modelo cinético acumulativo representado por la ecuación de primer orden:

$$\frac{dW_d}{dt} = K_D W_D \quad (12)$$

donde:

W_D : es la masa del material, g;

k_D : la constante cinética.

Laplante (1987) planteó la definición matemática del modelo cinético acumulativo que se representa a continuación:

$$W(x, t) = W(x, 0) \cdot e^{-KT} \quad (13)$$

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} .

A partir de la regresión lineal de la ecuación (13) donde se obtiene.

$$\ln W_{(x,t)} - \ln W_{(x,0)} = KT \quad (14)$$

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

$$K = C \cdot x^n \quad (15)$$

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:

$$\ln K = \ln C + n \cdot \ln \quad (16)$$

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 14 y 16 se obtiene:

$$W_{(x,t)} = W_{(x,0)} \cdot e^{-C \cdot x^n \cdot t} \quad (17)$$

2.5 Determinación de la función selección (S_{ij}).

Considere un molino discontinuo de laboratorio como si fuese un reactor bien mezclado que contiene una masa W de material en polvo, la que recibe una variedad de acciones de fractura cuando el molino está en operación. Es conveniente representar la distribución granulométrica del polvo en el molino donde los intervalos de tamaño corresponden a una serie geométrica de tamices con $\sqrt[4]{2}$ ó $\sqrt{2}$. (AUSTIN Y. C., 1994.)

Si la alimentación inicial del molino está limitada a partículas dentro del intervalo de tamaño mayor, numerado como intervalo 1, entonces la condición inicial es $w_1(0) = 1$. Esta alimentación se muele por un intervalo de tiempo t_1 , se muestrea el producto para determinar por tamizaje la fracción en peso que permanece en el intervalo de tamaño original y, retornando la muestra al molino, se continúa su operación por un intervalo de tiempo adicional t_2 , repitiendo todo el procedimiento. Parecería razonable que la velocidad de desaparición de la masa de la fracción de tamaño 1 concuerde con una ley de primer orden, esto es:

$$\frac{d[W_1(t) \cdot w]}{dt} \propto -W_1(t) \cdot w \quad (18)$$

$\propto$ -masa de partículas de tamaño 1 presente en el molino en el tiempo t.

Como la masa retenida en el molino W es constante, resulta:

$$\frac{dW_1(t)}{dt} = S_1 W_1(t) \quad (19)$$

Donde - S_1 es una constante de proporcionalidad que recibe el nombre de velocidad específica de fractura y tiene unidades de t^{-1} . Entonces, si S_1 no varía con el tiempo, integrando la ecuación (19) sujeta a la condición inicial $W_1(0)$ da:

$$W_1(t) = W_1(0) \cdot \exp(1 - S_1 t) \quad (20)$$

o también:

$$\log[W_1(t)] = \log[W_1(0)] - S_1 t/2,3 \quad (21)$$

Se debe reconocer que no hay una razón fundamental de por qué la hipótesis de primer orden debiera ser aplicable en cualquiera de las situaciones de molienda, y más tarde serán discutidos varios casos de desviación de esta norma. Sin embargo, muy frecuentemente la hipótesis de primer orden es una excelente aproximación a la verdad. Una verificación experimental de la hipótesis, prueba que la acumulación de finos no afecta la velocidad de fractura específica del material de mayor tamaño. Sin embargo, esto no prueba que el material más fino también se fracture con una cinética de primer orden, en presencia de cantidades variables de material más grueso. Este chequeo básico fue ejecutado por Gardner y Austin usando una técnica de trazadores radioactivos. Si algún tamaño es marcado con un trazador, entonces el desaparecimiento de esa fracción de tamaño con el tiempo puede ser distinguido de la aparición, en ese mismo tamaño, de productos de fractura de tamaños mayores, ya que éstos no estarían marcados. Entonces:

$$\frac{W_j(t)}{W_j(0)} = \exp(-S_j t) \quad (22)$$

Conclusiones parciales

- Mediante la metodología descrita es posible el estudio de la cinética de la molienda del mineral laterítico, y sus mezclas, para la determinación de la función selección.
- 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.

CAPÍTULO III ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos mediante la caracterización granulométrica del mineral laterítico, tanto durante su etapa preparatoria como para el material producto del proceso de molienda en un tiempo variable. Se determinan las funciones de fractura y selección. Se realiza un análisis del comportamiento de la función de Rosin – Rammler con variaciones de tiempos con un determinado por ciento de materia prima de serpentina.

3.1 Resultados de la función de Rosin – Rammler

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del cálculo del retenido acumulativo realizado a partir de los datos experimentales (tabla 2.1).

Tabla 3.1 Resultados calculados para el retenido acumulativo.

Tamaño de partícula (x), mm	Salida de las clases, u	Retenido acumulativo (R), u
2	0,225	0,225
1	0,111	0,336
0,85	0,045	0,381
0,6	0,073	0,454
0,4	0,106	0,56
0,3	0,023	0,583
0,2	0,055	0,638
0,16	0,05	0,688
0,074	0,103	0,791
0,044	0,029	0,82

Se modelaron los valores de retenido acumulado por la función de Rosin – Rammler, ecuación (3), para obtener los valores modelados del retenido acumulativo para cada una de las clases de tamaño de partículas de la molienda de las mezclas del mineral laterítico, en la tabla 3.3 se muestran dichos resultados.

Por la ecuación (4) se calcula la función lineal para determinar los valores de n y a respectivamente, la función lineal se grafica para obtener la pendiente y el intercepto.

Tabla 3.2 Linealización de la función de Rosin – Rammler.

$\ln(\ln(1/R))$	$\ln(x)$
0,3999	0,6931
0,0868	0,0000
-0,0357	-0,1625
-0,2362	-0,5108
-0,5450	-0,9163
-0,6170	-1,2040
-0,7998	-1,6094
-0,9836	-1,8326
-1,4505	-2,6037
-1,6172	-3,1236

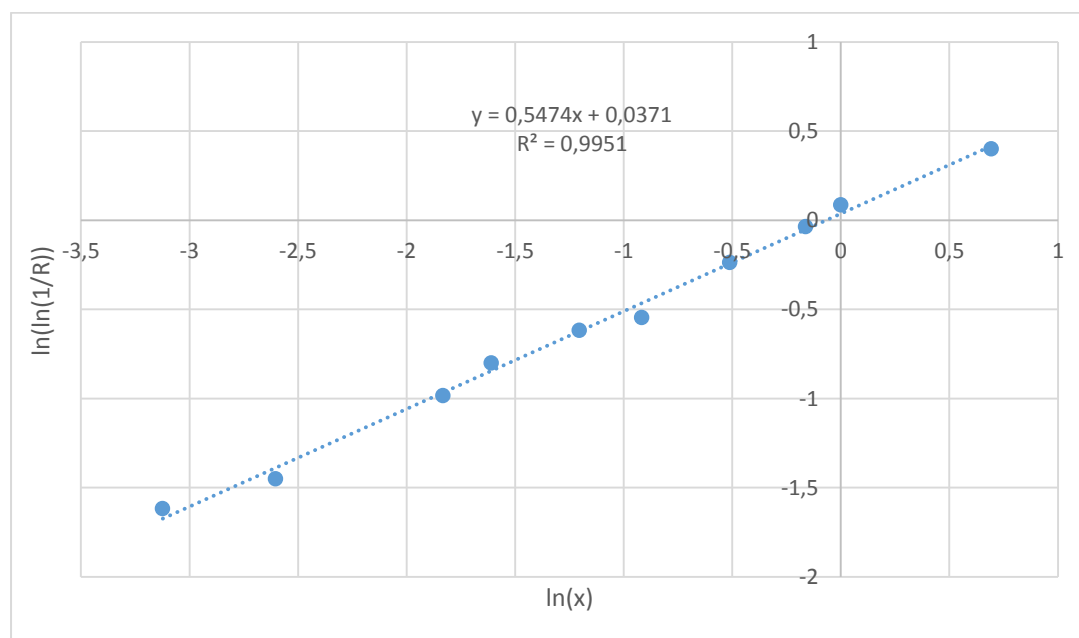


Figura 3.1 Representación gráfica de la función lineal de Rosin - Rammler.

En la figura 3.1 se muestra que el error no sobrepasa el 5 % para las clases de tamaño. Esto, unido a los resultados que se muestran en la tabla 3.1 que demuestra que los valores experimentales y estimados son menores que sus respectivos valores críticos. 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.

Los valores de n y de a son 0,547 y 0,935 respectivamente y la ecuación que

caracteriza la función de Rosin – Rammler es:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{0,935}\right)^{0,547}} \quad (23)$$

En la tabla 3.3 se muestra los resultados del retenido acumulativo modelado a partir de la ecuación 23.

Tabla 3.3 Cálculo del retenido acumulativo antes de moler rectificado por Rosin – Rammler.

Tamaño de partícula, mm	Retenido acumulativo, u
10	0,0257
9,5	0,0285
7,07	0,0484
5	0,0817
3,5	0,1274
2	0,2194
1,6	0,2612
1	0,3542
0,71	0,4230
0,4	0,5334
0,315	0,5761
0,25	0,6151
0,15	0,6926
0,074	0,7792

3.2 Resultados obtenidos de la cinética acumulativa

En la tabla 3.4 se muestran los resultados del cálculo de la cinética acumulativa, mediante la ecuación 17, para la molienda del mineral laterítico (0 % de serpentina y 100 % de limonita) para tiempos de molienda desde 0,5 hasta 30 minutos.

Se observa que para un tiempo de 0,5 minutos la cantidad de material de la clase 10 mm fracturada es mínima, pero para un tiempo de 30 minutos, la cantidad de material

retenida de la misma clase, prácticamente es nula. Lo anteriormente expuesto, se puede visualizar en la figura 3.2.

Tabla 3.4 Cinética acumulativa de la molienda de las mezclas lateríticas (0 % de serpentina, $C=0,1704$ y $n=0,2639$).

Tamaño de partícula	Tiempo, minutos									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0220	0,0188	0,0138	0,0101	0,0074	0,0054	0,0011	4E-05	2E-06
9,5	0,0285	0,0244	0,0209	0,0154	0,0113	0,0083	0,0061	0,0013	0,0001	2E-06
7,07	0,0484	0,0420	0,0364	0,0274	0,0206	0,0155	0,0116	0,0028	0,0002	9E-06
5	0,0817	0,0717	0,0630	0,0485	0,0374	0,0288	0,0222	0,0060	0,0004	3E-05
3,5	0,1274	0,1132	0,1005	0,0793	0,0625	0,0493	0,0389	0,0119	0,0011	0,0001
2	0,2194	0,1981	0,1788	0,1457	0,1188	0,0968	0,0789	0,0284	0,0037	0,0005
1,6	0,2612	0,2372	0,2154	0,1776	0,1465	0,1208	0,0996	0,0380	0,0055	0,0008
1	0,3542	0,3253	0,2987	0,2519	0,2125	0,1792	0,1511	0,0645	0,0117	0,0021
0,7	0,4230	0,3913	0,3620	0,3098	0,2652	0,2269	0,1942	0,0892	0,0188	0,0040
0,4	0,5334	0,4989	0,4666	0,4082	0,3571	0,3123	0,2732	0,1400	0,0367	0,0096
0,3	0,5761	0,5411	0,5081	0,4481	0,3952	0,3486	0,3074	0,1640	0,0467	0,0133
0,3	0,6151	0,5798	0,5466	0,4856	0,4315	0,3834	0,3407	0,1887	0,0579	0,0177
0,2	0,6926	0,6577	0,6246	0,5633	0,5080	0,4582	0,4132	0,2465	0,0878	0,0312
0,1	0,7792	0,7465	0,7152	0,6564	0,6025	0,5530	0,5076	0,3307	0,1403	0,0595

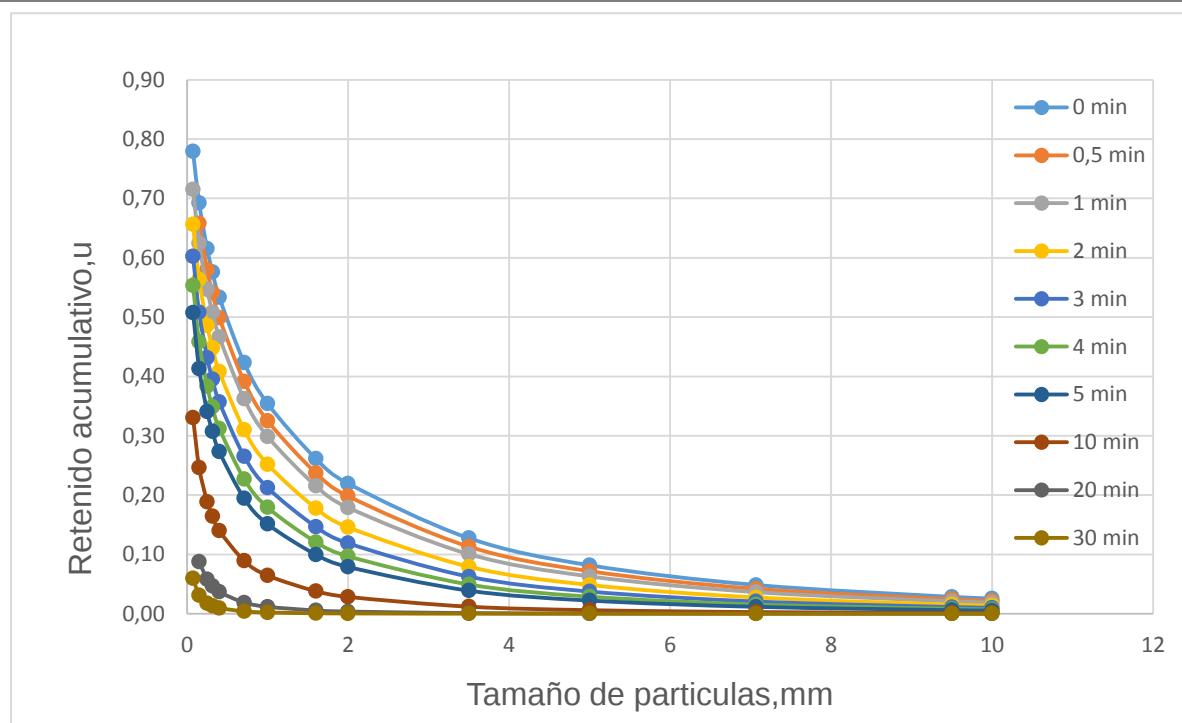


Figura 3.2 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 0 % de serpentina y 100 % de limonita.

El comportamiento del retenido acumulativo es variable a medida que se aumenta el tiempo, esto a su vez es para un contenido de 100 % de limonita que por sus características de fácil molienda proporciona un menor retenido acumulativo. La desaparición de las clases gruesas comienza desde los primeros 30 segundos de molienda. En este intervalo tan pequeño de tiempo, el contenido de la clase 0,074 mm disminuye.

En las figuras 3.2 y 3.3 se muestran la variación de la cinética acumulativa de molienda del mineral laterítico para un 10 % y 25 % de serpentina (90 % y 75 % de limonita) para tiempos de molienda desde 0,5 hasta 30 minutos.

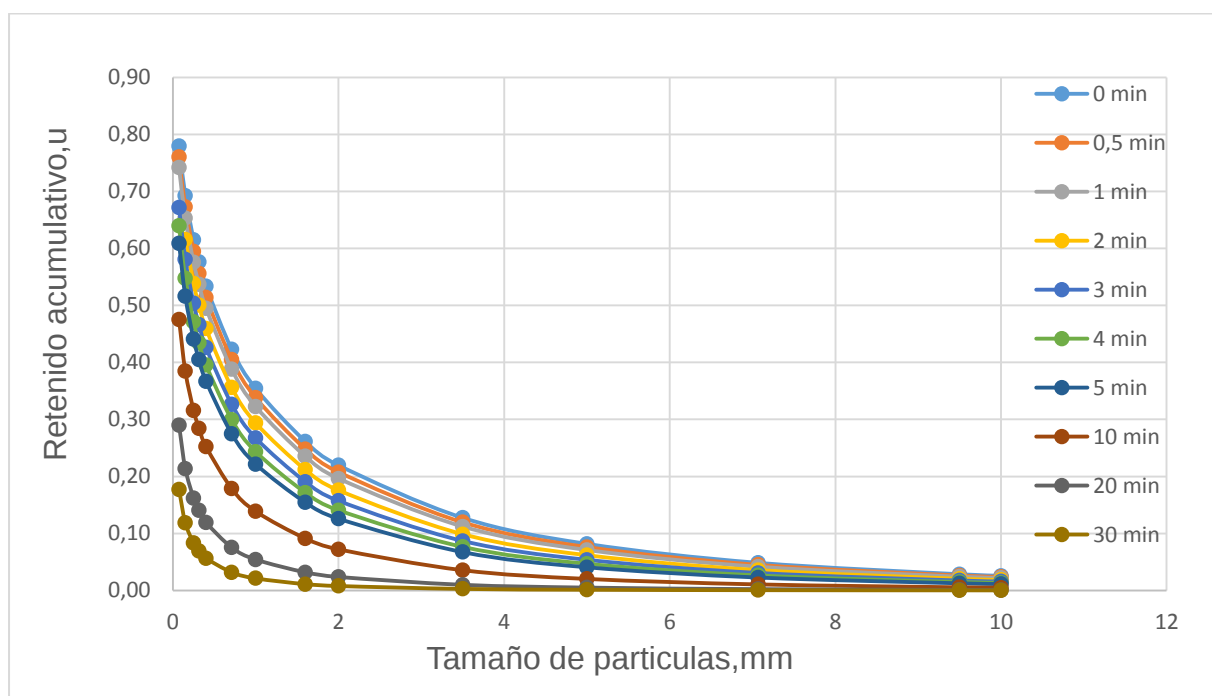


Figura 3.3 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 10 % de serpentina y un 90 % de limonita.

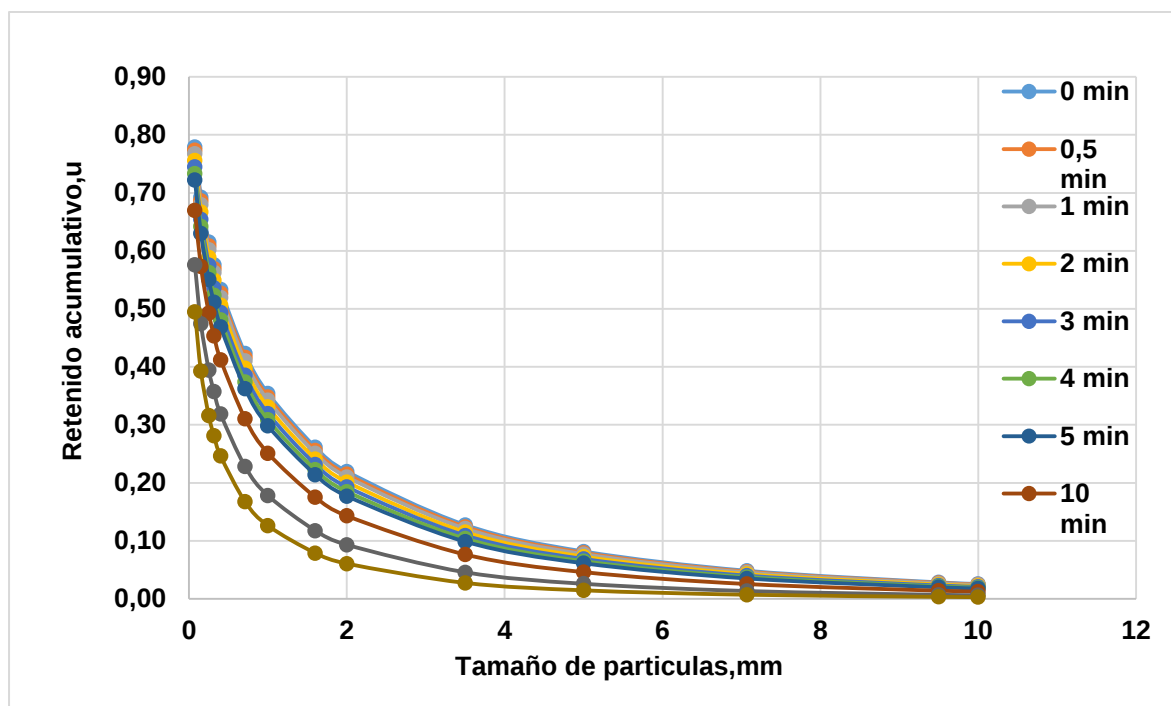


Figura 3.4 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 25 % de serpentina y un 75 % de limonita.

El comportamiento del retenido acumulativo para el 10 % y 25 % de serpentina varían con respecto a la figura 3.5, este aumento del contenido serpentina es el factor que diversifica el retenido acumulativo, donde se necesitaría más tiempo de molienda para alcanzar un menor o igual retenido. A medida que se incrementa la fracción serpentinitica en la mezcla mineral, la cantidad de material que se fragmenta disminuye.

En la tabla 3.5 se muestran los resultados del cálculo de la cinética acumulativa, mediante la ecuación 10, para la molienda del mineral laterítico (cinética acumulativa de la molienda de las mezclas lateríticas (35 % de serpentina, $C=0,0327$ y $n=0,2542$), para tiempos de molienda desde 0,5 hasta 30 minutos.

Se observa que para un tiempo de 0,5 minutos la cantidad de material de la clase 10 mm fracturada es mínima, pero para un tiempo de 30 minutos, la cantidad de material retenida de la misma clase, disminuye considerablemente. Lo anteriormente expuesto, se puede visualizar en la figura 3.5.

El comportamiento del retenido acumulativo donde el mismo se ve variable a medida que se aumenta el tiempo. La desaparición de las clases gruesas comienza desde los

primeros 30 segundos de molienda. En este intervalo tan pequeño de tiempo, el contenido de la clase 0,074 mm disminuye en menor medida.

Tabla 3.5 Cinética acumulativa de la molienda de las mezclas lateríticas (35 % de serpentina, $C=0,0327$ y $n=0,2542$).

Tamaño de partícula	Tiempo, minutos									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0250	0,0243	0,0229	0,0216	0,0203	0,0192	0,0143	0,0080	0,0044
9,5	0,0285	0,0277	0,0269	0,0254	0,0239	0,0226	0,0213	0,0159	0,0089	0,0050
7,07	0,0484	0,0472	0,0459	0,0435	0,0412	0,0391	0,0370	0,0283	0,0165	0,0097
5	0,0817	0,0797	0,0778	0,0741	0,0705	0,0671	0,0639	0,0499	0,0305	0,0187
3,5	0,1274	0,1246	0,1218	0,1165	0,1113	0,1064	0,1018	0,0813	0,0518	0,0331
2	0,2194	0,2152	0,2110	0,2030	0,1952	0,1877	0,1806	0,1486	0,1006	0,0681
1,6	0,2612	0,2565	0,2518	0,2427	0,2339	0,2254	0,2173	0,1807	0,1250	0,0865
1	0,3542	0,3485	0,3428	0,3318	0,3211	0,3108	0,3008	0,2554	0,1842	0,1328
0,7	0,4230	0,4167	0,4105	0,3984	0,3866	0,3752	0,3641	0,3134	0,2323	0,1721
0,4	0,5334	0,5265	0,5198	0,5065	0,4935	0,4809	0,4686	0,4117	0,3177	0,2452
0,3	0,5761	0,5691	0,5623	0,5487	0,5355	0,5226	0,5100	0,4515	0,3538	0,2773
0,3	0,6151	0,6081	0,6012	0,5875	0,5742	0,5611	0,5484	0,4888	0,3884	0,3087
0,2	0,6926	0,6856	0,6787	0,6651	0,6519	0,6388	0,6261	0,5659	0,4625	0,3779
0,1	0,7792	0,7726	0,7661	0,7533	0,7407	0,7283	0,7161	0,6582	0,5560	0,4697

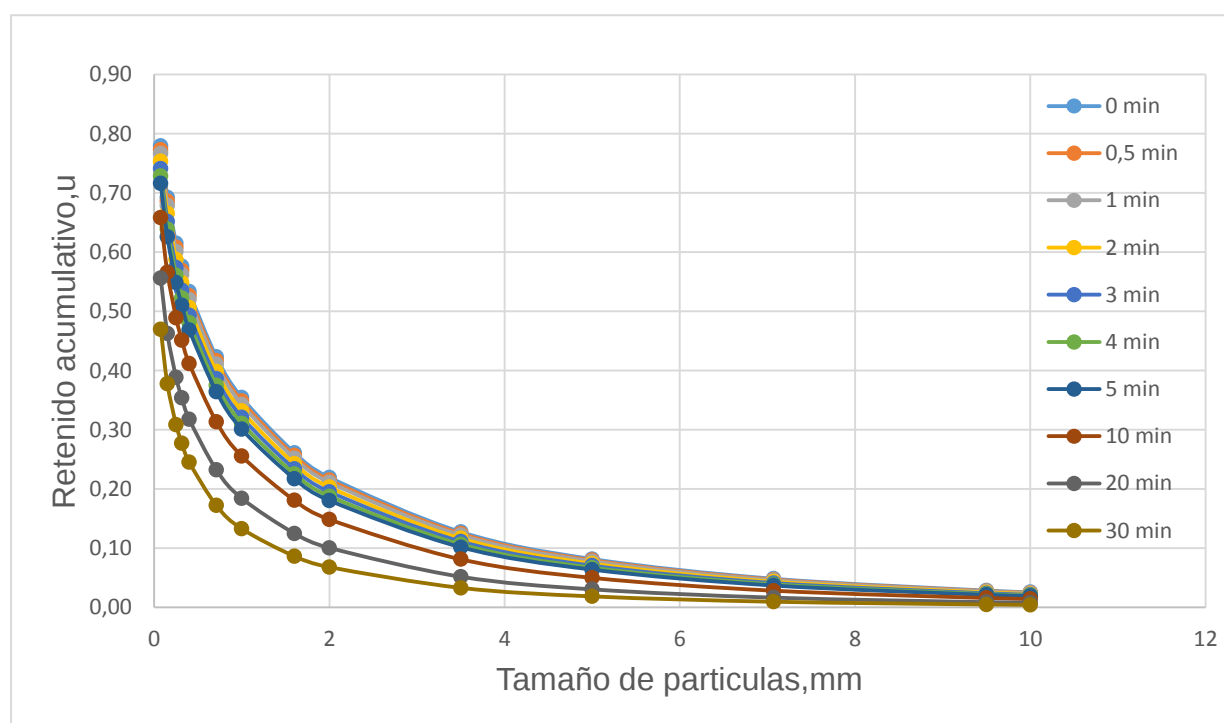


Figura 3.5 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 35 % de serpentina y un 65 % de limonita.

En la figura 3.6 el comportamiento del retenido acumulativo es alto por el contenido de 50 % de serpentina, esto crea la necesidad de un aumento del tiempo de molienda, donde se muele igual cantidad de serpentina y de limonita los cuales tienen características diferentes de molienda.

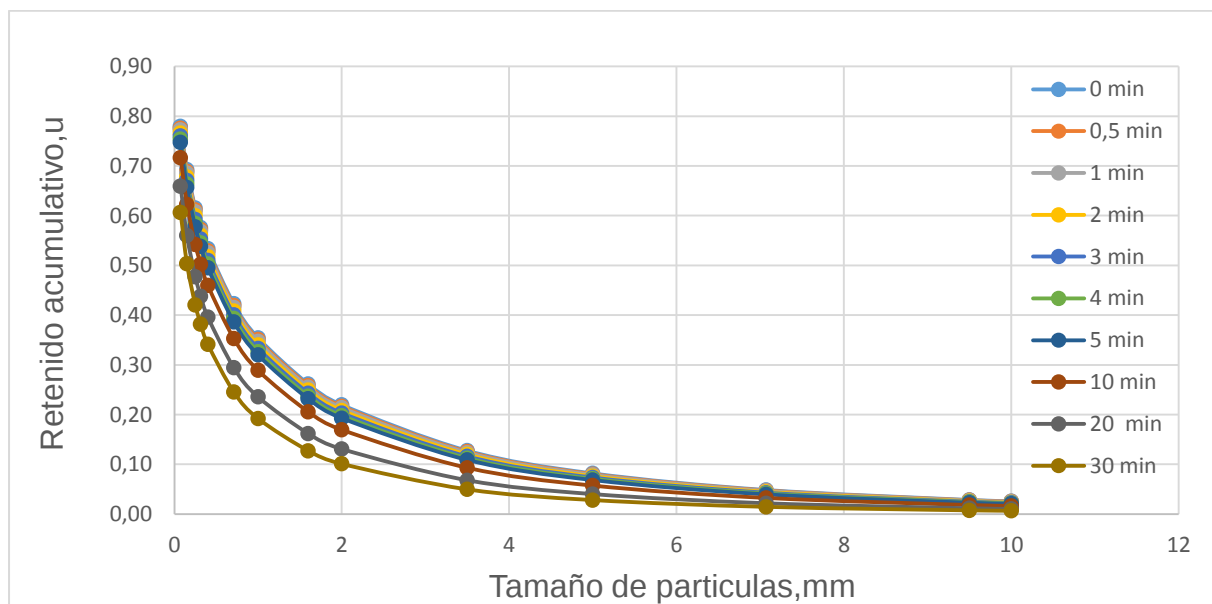


Figura 3.6 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 50 % de serpentina y un 50 % de limonita.

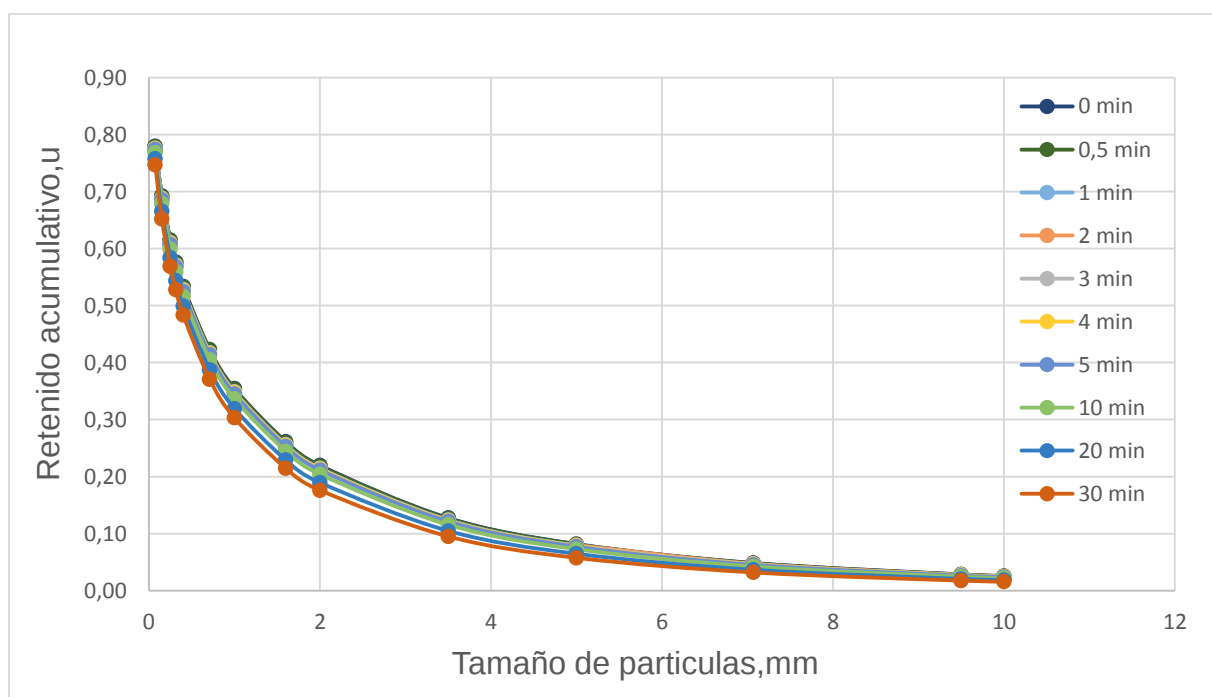


Figura 3.7 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 75 % de serpentina y un 25 % de limonita.

En la figura 3.7 se representa el comportamiento del retenido acumulativo donde el mismo es variable a medida que se aumenta el tiempo. La desaparición de las clases gruesas comienza desde los primeros 30 segundos de molienda disminuye en menor medida lo mismo ocurre para los diferentes intervalos por el alto contenido de serpentina.

El comportamiento del retenido acumulativo para el 75 % de serpentina no varían considerablemente en mayor medida con respecto a la figura 3.8, este aumento del contenido serpentina es el factor que diversa el retenido acumulativo, donde se necesitaría más tiempo de molienda para alcanzar un menor o igual retenido. A medida que se incrementa la fracción serpentinitica en la mezcla mineral, la cantidad de material que se fragmenta disminuye.

En la tabla 3.8 Los resultados obtenidos se muestran en los cálculos de la cinética acumulativa, mediante la ecuación 10, para la molienda del mineral laterítico (cinética acumulativa de la molienda de las mezclas lateríticas (85 % de serpentina, $C=0,007$ y $n=0,4553$) para tiempos de molienda desde 0,5 hasta 30 minutos.

Tabla 3.8 Cinética acumulativa de la molienda de las mezclas lateríticas (85 % de serpentina, $C=0,007$ y $n=0,4553$).

Tamaño de partícula	Tiempo, minutos									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0255	0,0253	0,0248	0,0243	0,0239	0,0234	0,0214	0,0177	0,0147
9,5	0,0285	0,0282	0,0280	0,0274	0,0270	0,0265	0,0260	0,0237	0,0198	0,0165
7,07	0,0484	0,0480	0,0477	0,0469	0,0462	0,0454	0,0447	0,0412	0,0351	0,0299
5	0,0817	0,0811	0,0806	0,0795	0,0784	0,0773	0,0762	0,0711	0,0619	0,0539
3,5	0,1274	0,1267	0,1259	0,1244	0,1229	0,1215	0,1200	0,1131	0,1004	0,0891
2	0,2194	0,2184	0,2174	0,2154	0,2133	0,2113	0,2094	0,1998	0,1818	0,1655
1,6	0,2612	0,2601	0,2590	0,2568	0,2546	0,2525	0,2503	0,2398	0,2202	0,2021
1	0,3542	0,3530	0,3518	0,3493	0,3469	0,3445	0,3421	0,3303	0,3080	0,2871
0,7	0,4230	0,4217	0,4204	0,4179	0,4154	0,4129	0,4104	0,3982	0,3748	0,3528
0,4	0,5334	0,5321	0,5309	0,5284	0,5259	0,5234	0,5209	0,5087	0,4852	0,4627
0,3	0,5761	0,5749	0,5737	0,5712	0,5688	0,5663	0,5639	0,5520	0,5288	0,5067
0,25	0,6151	0,6140	0,6128	0,6104	0,6080	0,6057	0,6033	0,5917	0,5692	0,5475
0,15	0,6926	0,6915	0,6904	0,6882	0,6861	0,6840	0,6818	0,6713	0,6506	0,6306
0,074	0,7792	0,7783	0,7774	0,7756	0,7738	0,7720	0,7702	0,7613	0,7439	0,7269

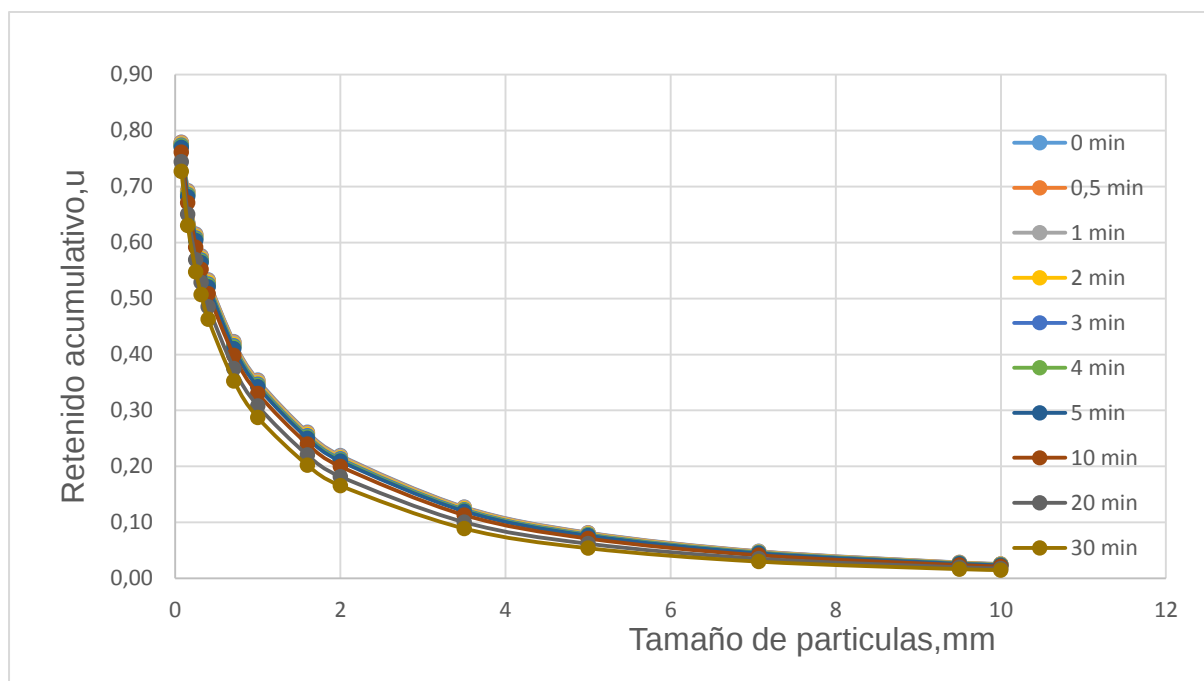


Figura 3.8 Representación gráfica del retenido acumulativo en función del tamaño de partículas para un 85 % de serpentina y un 15 % de limonita.

Considerando lo anterior, se afirman los resultados de Coello, (1993) que está relacionado con la cinética de la molienda de cada componente de la mezcla lateríticas. Se demuestra que cada componente en la mezcla de las fracciones limoníticas y serpentiniticas se muele de acuerdo a sus propias regularidades y que cada mineral asume los valores extremos. La cinetica de la molienda de las mezclas ocupa un lugar intermedio entre los constituyentes, donde se estudia también la cinética de las fracciones limoníticas y serpentiniticas en conjunto y por separado, establece que la regularidad de la cinética de la molienda de los constituyentes y sus mezclas son similares tanto cualitativamente como cuantitativamente.

3.3 Resultados obtenidos de la función selección (S_{ij}).

En la tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos de la función selección (S_{ij}), en dependencia del contenido de serpentina y el tamaño de partícula para un tiempo de 0 minutos. Se observa que, a medida que se incrementa el contenido de serpentina, la velocidad específica de fractura disminuye para una misma clase de tamaño, se obtiene un comportamiento similar al comparar la velocidad de fractura para diferentes clases de tamaño, es decir, a medida que se disminuye el tamaño de partícula, disminuye la función selección y viceversa.

Tabla 3.9 Resultados obtenidos de la función selección para 0 minutos.

Tamaño de partícula	Contenido de serpentina, %						
	0	10	25	35	50	75	85
10	0,3125	0,1651	0,0710	0,0586	0,0449	0,0165	0,0186
9,5	0,3083	0,1631	0,0699	0,0579	0,0441	0,0161	0,0182
7,07	0,2852	0,1516	0,0637	0,0537	0,0398	0,0139	0,0161
5	0,2603	0,1392	0,0571	0,0492	0,0354	0,0117	0,0139
3,5	0,2369	0,1275	0,0510	0,0449	0,0313	0,0097	0,0119
2	0,2044	0,1111	0,0428	0,0390	0,0258	0,0074	0,0094
1,6	0,1927	0,1052	0,0399	0,0368	0,0239	0,0066	0,0085
1	0,1702	0,0937	0,0344	0,0327	0,0204	0,0052	0,0070
0,71	0,1555	0,0861	0,0308	0,0299	0,0181	0,0044	0,0060
0,4	0,1336	0,0748	0,0257	0,0259	0,0149	0,0033	0,0047
0,315	0,1255	0,0705	0,0239	0,0244	0,0137	0,0029	0,0043
0,25	0,1181	0,0666	0,0222	0,0230	0,0127	0,0026	0,0039
0,15	0,1032	0,0587	0,0189	0,0202	0,0106	0,0020	0,0031
0,074	0,0856	0,0494	0,0151	0,0169	0,0083	0,0014	0,0023

En la figura 3.9 representa el comportamiento de la función selección, la cual varía con el aumento de los porcentos de contenido de serpentina.

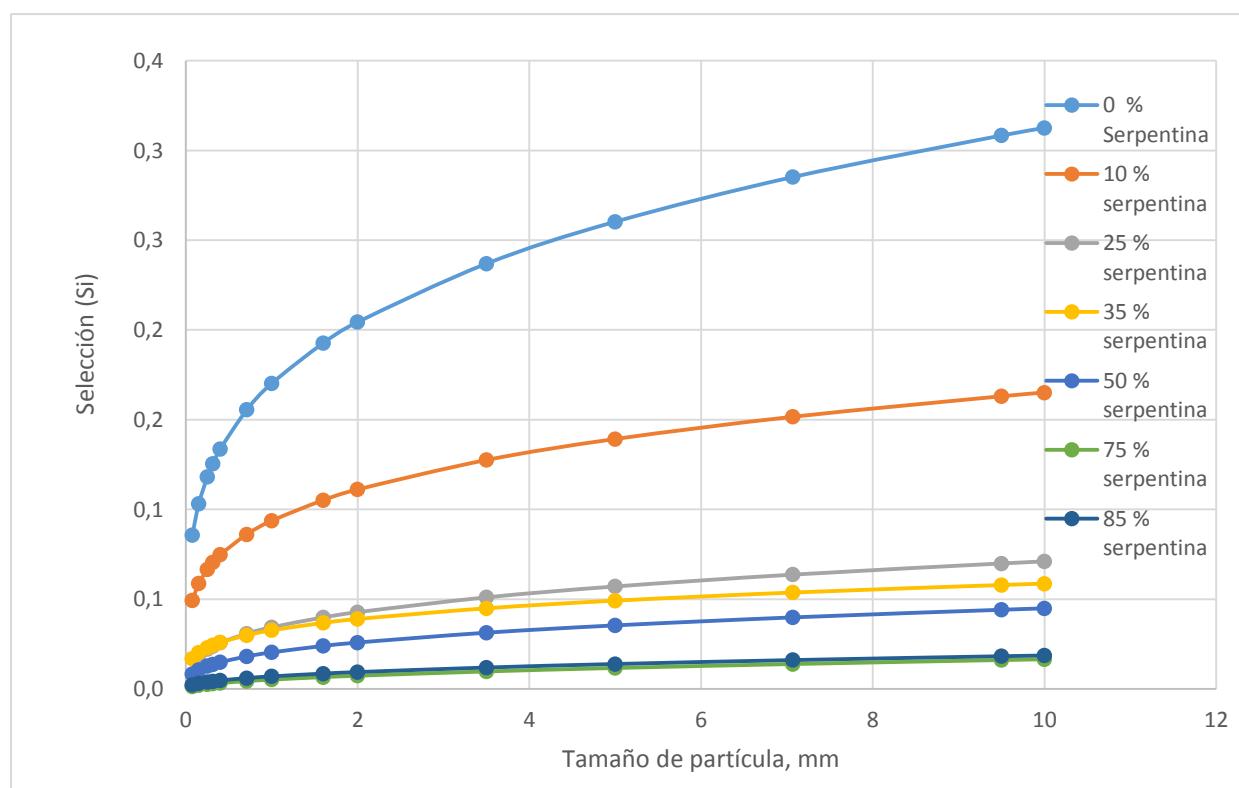


Figura 3.9 Representación gráfica del comportamiento de la velocidad específica de fractura (S_{ij}) en función del tamaño de partícula.

La velocidad específica de fractura es alta para un 0 % de serpentina, es decir, donde existe un 100 % de limonita, que por sus características físico-mecánicas y químicas presenta una molibilidad superior a la de serpentina. Es decir, al incrementar el contenido de serpentina en la mezcla mineral, se incrementa las fracciones duras, disminuyendo así la velocidad de fragmentación de las partículas minerales.

Como se puede apreciar, existe una disminución de los valores de la función selección S_j con el aumento del contenido de serpentina en el mineral y viceversa, por lo que mientras menor sea este contenido en el mineral el proceso de desmenuzamiento transcurre a una menor velocidad. La probabilidad de fragmentación se incrementa a medida que aumenta el diámetro de las partículas.

Conclusiones parciales

- A partir de los resultados experimentales de la caracterización granulométrica, se determinó el modelo cinético acumulativo para diferentes porcentos de contenido de serpentina, el cual demostró que a medida que se incrementa el contenido serpentino en la mezcla aumenta el retenido acumulativo.
- A partir de los resultados experimentales del modelo cinético acumulativo se determinó la función selección de la molienda mezclas lateríticas, donde demostró que el aumento de los porcentos de contenido de serpentina disminuye la velocidad específica de fractura.

CONCLUSIONES GENERALES

- La cinética acumulativa de la molienda de las mezclas lateríticas muestra que la desaparición de las clases gruesas comienza desde los primeros 30 segundos, permitiendo la estimación de las clases granulométricas en el proceso de molienda del material investigado en función del tiempo, donde influye el incremento del contenido de serpentina, el cual aumenta el retenido acumulativo.
- La determinación de la función selección de la molienda de las mezclas lateríticas a partir de los resultados modelados a través de la cinética acumulativa demostró que la velocidad específica de fractura es inversamente proporcional al porcentaje de contenido de serpentina.



RECOMENDACIONES

- Continuar el análisis de las datas experimentales para determinar la influencia del contenido de serpentina en la molienda de mezclas lateríticas.
- Realizar estudios de la influencia del contenido de serpentina en la función de distribución de fractura con el objetivo de obtener un comportamiento específico de la molienda de las mezclas lateríticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVARES, R. B. (2010). *Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaño de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método de Bond*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
2. ANDREIEV, S. P. (1980). *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*. En S. P. ANDREIVE. Moscú: Editorial Mir, Moscú.
3. AUSTIN, & LUCKIE. (1972). *Methods for Determination of Breakage Distribution Parameters*. Department of material sciences. Pennsylvania State University.
4. AUSTIN, Y. C. (1994.). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. F. A. CYTED. Chile.
5. COELLO, A. (1993). *Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos*. Minería y Geología, Vol. 1 No1.
6. COELLO, A. (1993). *Mejoramiento de la tecnología de la molienda seca de*. Rusia: Instituto de Minas de San Petersburgo,.
7. COELLO, A. (1999:). *Curso de preparación mecánica de menas y minerales*. Minería y Geología , XII (12), 26-32.
8. COELLO, A. L. (2015). *Procedimiento para la determinación*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
9. COELLO, A. V. (2008). *Grindability of Laterite nickel ores in Cuba*. Powder technology. Elsevier. Vol. 182, issue 1.
10. COELLO, A., & MENÉNDEZ, J. (2008). *Grindability of laterite nickel ores in Cuba*. Powder technology , Vol 182. issue 1.
11. COELLO-VELÁZQUEZ, A. &. (2001). *Modelo integral - diferencial para la valoración de la energía en la molienda de minerales*. Minería y Geología. Vol. II (4), p. 14-20.
12. COELLO-VELÁZQUEZ, A. (1993b). *Sovershenstvovanie tehnologii izmilchenii*. Saint Petersburg: Diss. Uch. step. Kand. Doct. Tejn. Nauk.
13. COELLO-VELÁZQUEZ, A., & TIJONOV, O. (1996). *Regularidad en la molienda de los minerales lateríticos*. Minería y Geología XIII, 57-60.
14. DALVI, A. D., BACON, W. G., & OSBORNE, R. C. (2004). *«The Past and the Future of Nickel Laterites*.

15. FALCÓN, & COELLO, H. Y. (1997). preparación mecánica de los minerales lateríticos. tecnológica vol .1 no 1.
16. FUENTES.T, S. B. (2004). Influencia del regimen de operaciones en el proceso de molienda del empresa Comandante Che Guevara. moa: instituto Superior imero - Metalúrgico .
17. GARCÉS.R, & RONDÓN.S. (2002). Estudio experimental de las funciones de fragmentación de la razón de fragmentación y distribución de la fragmentación de la laterita en un molino de bolas a escala de laboratorio. Moa: Istituto superior minero - metalúrgico.
18. GILART, R., & RODRÍGUEZ, T. (2006). Determinación de los parámetros básicos. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico .
19. GUZMÁN, M. T. (2017). Consumo Energético de la molienda del mineral. Moa: Instituto Superior Minero Metalurgico.
20. LABORDE BROWN, R. (2004). Diagnóstico energético en el proceso de molienda de la laterita. Minería -Geología, ISSN02585979, No 3 y 4.
21. LABORDE, R. (2005). Modelación y Simulación del proceso de molienda. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
22. LABORDE, R., & COELLO, A. (2001). Productivity and energetic efficiency in the milling process of the Lateritic mineral. Revista Minería y Geología. XVII (2).
23. LABORDE, R., COELLO, A., & MENDOZA, J. (2000). Particularidades del consumo de energia en el proceso de molienda seca del mineral laterítico. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
24. LEÓN, V. S. (2001). Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa. Moa: Instituto Superior Minero-metalúrgico.
25. LIUBERT. (2015). Evaluación de la molibilidad de las mezclas de carbón bituminoso y el mineral laterítico. Moa: ISMM.
26. LÓPEZ.F, & ORTIZ, N. (1988). determinación de los parametros energéticos en un proceso de molienda de los minerales lateríticos. reviste de metalurgia Vol.24 no 4.
27. MEDINA, Y. G. (2017). Determinación del índice de Bond en la molienda para las mezclas de carbon antracita y mineral laterítico. Moa: ISMM.

28. NAMINDO, M. N. (2015). Cinética de la molienda del carbón bituminoso. Moa: ISMM.
29. NAPIER-MUNNN, T. J., & KOJOVIC, T. (2005). Circuitos de Trituración de Mineral Su Operación y Optimización. Queensland, Australia: JKMRC.
30. NÚÑEZ, & PÉREZ, G. (2003). modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda. Moa: instituto superior minero -metalúrgico.
31. PRASHER, C. L. (1987). Crushing and Grinding Process Handbook. Londres.
32. RAMENTOL, R. (2012). Factores que influyen en la productividad del proceso de molienda de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa: ISMM.
33. RAMENTOL, R. (2016). Identificación de los parámetros de fractura de los modelos de fragmentación para la molienda de mineral laterítico. Moa: ISMM.
34. REINA, L. (2004). Determinación del índice de trabajo o de Bond para los minerales lateríticos. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
35. RICARDO, L. J. (2016). Determinación de las funciones de fragmentación y selección para el mineral coralino. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
36. RODRIGUEZ, Y. A. (2011). Determinación empírica - teórica de la energía requerida para la desmenuamiento de las menas lateríticas en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa: ISMM.
37. ROJAS, A. (1995). Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento de Moa. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
38. ROWLAND, C. (1988). Using the Bond work index to measure operating comminution efficiency. LMin and Met , 15.4.32-36.
39. URGELLES, A. L. (2012). Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur de la Empresa Ernesto Che Guevara. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
40. V.L. SMIRNOV. (1982). Geología de yacimientos de minerales. Moscú: Mir Moscú.



41. VERA, Y. A. (1979). Introducción a los yacimientos de níquel cubanos. La Habana: Ministerio de Minería y Geología.
42. VIADA, A. (2015). Determinación de la cinética de la molienda y las funciones de fragmentación y selección del rechazo del carbonato de calcio. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
43. WILL, B. A., & FINCH, J. A. (2016). Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Elsevier.
44. WILLS, B. A. (2015). Mineral Processing Technology. Montreal, Canada.

ANEXOS

Anexos 1 Cálculos del retenido acumulativo para el 10 % de serpentina.

Tamaño de partículas	Tiempo, minutos (para Cm=0,0938 ; N=0,2461) 10 % de serpentina									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0237	0,0218	0,0185	0,0157	0,0133	0,0113	0,0049	0,0009	0,0002
9,5	0,0285	0,0262	0,0242	0,0205	0,0174	0,0148	0,0126	0,0056	0,0011	0,0002
7,07	0,0484	0,0449	0,0416	0,0358	0,0307	0,0264	0,0227	0,0106	0,0023	0,0005
5	0,0817	0,0762	0,0711	0,0618	0,0538	0,0468	0,0407	0,0203	0,0050	0,0012
3,5	0,1274	0,1195	0,1121	0,0987	0,0869	0,0765	0,0673	0,0355	0,0099	0,0028
2	0,2194	0,2076	0,1963	0,1757	0,1572	0,1406	0,1258	0,0721	0,0237	0,0078
1,6	0,2612	0,2478	0,2351	0,2116	0,1905	0,1714	0,1543	0,0911	0,0318	0,0111
1	0,3542	0,3380	0,3225	0,2936	0,2673	0,2434	0,2216	0,1387	0,0543	0,0212
0,71	0,4230	0,4052	0,3881	0,3560	0,3266	0,2996	0,2749	0,1786	0,0754	0,0318
0,4	0,5334	0,5138	0,4949	0,4592	0,4261	0,3954	0,3669	0,2523	0,1193	0,0565
0,315	0,5761	0,5561	0,5369	0,5003	0,4662	0,4344	0,4048	0,2844	0,1404	0,0693
0,25	0,6151	0,5950	0,5755	0,5383	0,5036	0,4711	0,4407	0,3158	0,1621	0,0832
0,15	0,6926	0,6725	0,6530	0,6157	0,5805	0,5474	0,5161	0,3846	0,2136	0,1186
0,074	0,7792	0,7601	0,7416	0,7058	0,6718	0,6394	0,6086	0,4753	0,2900	0,1769

Anexos 2 Cálculos del retenido acumulativo para el 25 % de serpentina.

Tamaño de partícula	Tiempo, minutos (para Cm=0,0344 ; N=0,3154) 25 % serpentina									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0248	0,0240	0,0223	0,0208	0,0194	0,0180	0,0126	0,0062	0,0030
9,5	0,0285	0,0275	0,0265	0,0248	0,0231	0,0215	0,0201	0,0141	0,0070	0,0035
7,07	0,0484	0,0469	0,0454	0,0426	0,0400	0,0375	0,0352	0,0256	0,0135	0,0072
5	0,0817	0,0794	0,0772	0,0729	0,0688	0,0650	0,0614	0,0461	0,0261	0,0147
3,5	0,1274	0,1242	0,1211	0,1150	0,1093	0,1039	0,0987	0,0765	0,0459	0,0275
2	0,2194	0,2148	0,2102	0,2014	0,1930	0,1849	0,1772	0,1430	0,0932	0,0608
1,6	0,2612	0,2561	0,2510	0,2412	0,2318	0,2227	0,2140	0,1753	0,1176	0,0789
1	0,3542	0,3482	0,3423	0,3307	0,3195	0,3087	0,2983	0,2511	0,1780	0,1262
0,71	0,4230	0,4165	0,4101	0,3977	0,3856	0,3739	0,3625	0,3106	0,2281	0,1675
0,4	0,5334	0,5266	0,5198	0,5066	0,4937	0,4812	0,4689	0,4123	0,3186	0,2462
0,315	0,5761	0,5693	0,5625	0,5492	0,5363	0,5236	0,5112	0,4537	0,3572	0,2813
0,25	0,6151	0,6083	0,6016	0,5884	0,5755	0,5628	0,5505	0,4926	0,3945	0,3159
0,15	0,6926	0,6860	0,6796	0,6668	0,6544	0,6421	0,6301	0,5732	0,4745	0,3927
0,074	0,7792	0,7733	0,7675	0,7559	0,7446	0,7334	0,7224	0,6697	0,5757	0,4948

Anexos 3 Cálculos del retenido acumulativo para el 50 % de serpentina.

Tamaño de partícula	Tiempo, minutos (para Cm=0,0204 ; N=0,3429) 50 % serpentina									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0252	0,0246	0,0235	0,0225	0,0215	0,0205	0,0164	0,0105	0,0067
9,5	0,0285	0,0278	0,0272	0,0261	0,0249	0,0239	0,0228	0,0183	0,0118	0,0076
7,07	0,0484	0,0475	0,0465	0,0447	0,0430	0,0413	0,0397	0,0325	0,0218	0,0146
5	0,0817	0,0803	0,0789	0,0761	0,0735	0,0709	0,0684	0,0573	0,0402	0,0282
3,5	0,1274	0,1254	0,1235	0,1197	0,1160	0,1124	0,1089	0,0931	0,0681	0,0498
2	0,2194	0,2166	0,2138	0,2084	0,2030	0,1979	0,1928	0,1694	0,1308	0,1010
1,6	0,2612	0,2581	0,2551	0,2490	0,2431	0,2374	0,2317	0,2056	0,1618	0,1273
1	0,3542	0,3506	0,3471	0,3401	0,3332	0,3265	0,3199	0,2889	0,2356	0,1921
0,71	0,4230	0,4192	0,4154	0,4079	0,4006	0,3934	0,3863	0,3528	0,2943	0,2455
0,4	0,5334	0,5295	0,5255	0,5178	0,5101	0,5025	0,4951	0,4596	0,3960	0,3411
0,315	0,5761	0,5722	0,5683	0,5605	0,5529	0,5453	0,5379	0,5022	0,4378	0,3816
0,25	0,6151	0,6113	0,6074	0,5997	0,5922	0,5847	0,5773	0,5419	0,4773	0,4205
0,15	0,6926	0,6889	0,6852	0,6780	0,6708	0,6637	0,6567	0,6226	0,5598	0,5032
0,074	0,7792	0,7759	0,7727	0,7663	0,7599	0,7536	0,7473	0,7167	0,6593	0,6064

Anexos 4 Cálculos del retenido acumulativo para el 85 % de serpentina.

Tamaño de partícula	Tiempo, minutos (para $C_m=0,007$; $N=0,4253$) 85 % serpentina									
	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
10	0,0257	0,0255	0,0253	0,0248	0,0243	0,0239	0,0234	0,0214	0,0177	0,0147
9,5	0,0285	0,0282	0,0280	0,0274	0,0270	0,0265	0,0260	0,0237	0,0198	0,0165
7,07	0,0484	0,0480	0,0477	0,0469	0,0462	0,0454	0,0447	0,0412	0,0351	0,0299
5	0,0817	0,0811	0,0806	0,0795	0,0784	0,0773	0,0762	0,0711	0,0619	0,0539
3,5	0,1274	0,1267	0,1259	0,1244	0,1229	0,1215	0,1200	0,1131	0,1004	0,0891
2	0,2194	0,2184	0,2174	0,2154	0,2133	0,2113	0,2094	0,1998	0,1818	0,1655
1,6	0,2612	0,2601	0,2590	0,2568	0,2546	0,2525	0,2503	0,2398	0,2202	0,2021
1	0,3542	0,3530	0,3518	0,3493	0,3469	0,3445	0,3421	0,3303	0,3080	0,2871
0,71	0,4230	0,4217	0,4204	0,4179	0,4154	0,4129	0,4104	0,3982	0,3748	0,3528
0,4	0,5334	0,5321	0,5309	0,5284	0,5259	0,5234	0,5209	0,5087	0,4852	0,4627
0,315	0,5761	0,5749	0,5737	0,5712	0,5688	0,5663	0,5639	0,5520	0,5288	0,5067
0,25	0,6151	0,6140	0,6128	0,6104	0,6080	0,6057	0,6033	0,5917	0,5692	0,5475
0,1500	0,6926	0,6915	0,6904	0,6882	0,6861	0,6840	0,6818	0,6713	0,6506	0,6306
0,0740	0,7792	0,7783	0,7774	0,7756	0,7738	0,7720	0,7702	0,7613	0,7439	0,7269

Anexos 5 Cálculos de la velocidad específica de fractura para 0 % serpentina.

[illegible]

Anexos 6 Cálculos de la velocidad específica de fractura para 10 % serpentina.

[illegible]

Anexos 7 Cálculos de la velocidad específica de fractura para 25 % serpentina.

[illegible]

Anexos 8 Cálculos de la velocidad específica de fractura para 35 % serpentina.

[illegible]

Anexos 9 Cálculos de la velocidad específica de fractura para 50 % serpentina.

[illegible]

Anexos 11 Cálculos de la velocidad específica de fractura para 85 % serpentina.

[illegible]

