

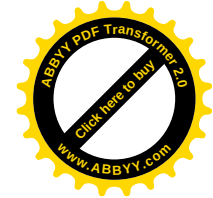
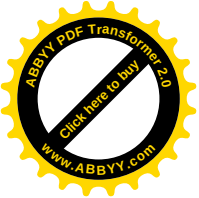
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD METALURGIA – ELECTROMECÁNICA
CARRERA DE METALURGIA

Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara

Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

Alisa Lamorú Urgelles

[Moa, 2012]



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
"DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD METALURGIA – ELECTROMECÁNICA
CARRERA DE METALURGIA

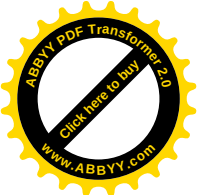
Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara

Trabajo de Diploma en Opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

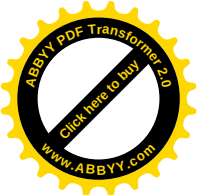
Autora: Alisa Lamorú Urgelles

**Tutores: Prof. Auxiliar Ing. Reynaldo Laborde Brown, Dr. C
Ing. Ángel Legrá Legrá
Prof. Asistente Ing. Roger Samuel Almenares Reyes, MSc.**

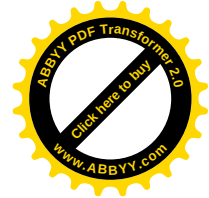
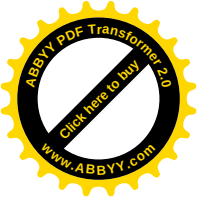
[Moa, 2012]



DEDICATORIA

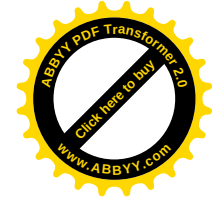
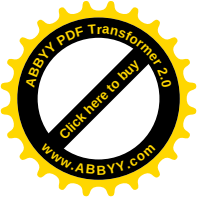


AGRADECIMIENTOS



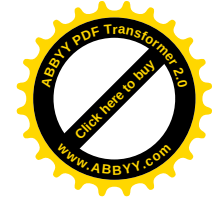
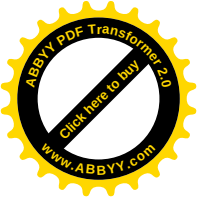
RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el rango de variación del índice de Bond a las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, a través de diferentes relaciones de serpentina – limonita. Se determinó el modelo cinético acumulativo para la simulación de la molienda a escala industrial que permita la posterior comprobación del índice de Bond a escala industrial. La fase experimental se realizó en la planta piloto del Centro de Investigación del Níquel la cual posee instalaciones para estos fines. Para la realización de los experimentos la muestra fue tomada directamente en las bandas transportadoras a la salida de los secaderos en la Planta de Preparación de Minerales. Como resultado fundamental se obtuvo que el consumo específico de energía en los molinos de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” debe fluctuar entre 3,4 y 24,4 kWh/t para composiciones extremas del material a moler y el modelo cinético acumulativo obtenido permite realizar la simulación del proceso de molienda a escala industrial bajo las condiciones actuales de operación.

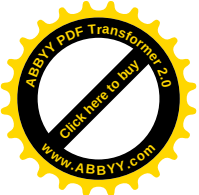


ABSTRACT

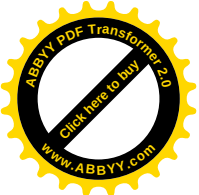
In the present work the rank of variation of the index of Bond to the ore of North and South of the Yagrumaje deposits of the Company "Commander Ernesto Che Guevara" determined; it stops through different relations from limonite – serpentine. The cumulative kinetic model for the simulation of the milling on industrial scale was determined that allows the later verification of the index of Bond on industrial scale. The experimental phase was made in the plant pilot of the Nickel Research Center which has facilities for these aims. For the accomplishment of the experiments the sample was taken directly in the transporting bands when coming out of the dryers in Plant of Minerals Preparation. As fundamental result obtained that the specific consumption of energy in the mills of the Company "Commander Ernesto Che Guevara" must fluctuate between 3,4 and 24,4 kWh/t for extreme compositions of the material to grind and the obtained cumulative kinetic model allows to make the simulation of the process of milling on industrial scale under the present conditions of operation.



ÍNDICE	PÁG.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Investigaciones realizadas sobre la molienda de los minerales lateríticos	6
1.2. Índice de Bond como herramienta para valorar la eficiencia energética de los procesos de molienda	10
1.3. Definición del índice de Bond	13
1.4. Ensayo estándar de Bond	15
1.5. Factores de corrección del índice de Bond	16
1.5.1. Corrección de unidades de masa	16
1.5.2. Corrección a molienda en vía seca	16
1.6. Ventajas del método de Bond	16
1.7. Desventajas del método de Bond	16
1.8. Caracterización del proceso de molienda de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara	17
1.8.1. Características técnicas de los molinos	18
1.8.2. Consumo específico de energía del proceso de molienda	18
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1. Metodología de la investigación	20
2.2. Toma de la muestra	21
2.3. Preparación de la muestra	22
2.4. Características químicas y granulométricas del material analizado	22
2.5. Métodos de homogenización y cuarteo para la preparación de la muestra	23
2.6. Análisis de tamices	24
2.6.1. Método de tamizado húmedo	25
2.7. Metodología para la determinación experimental del índice de Bond	26
2.7.1. Ajuste de la carga de bolas para la prueba de Bond	29
2.8. Metodología para la determinación del modelo cinético acumulativo	32
2.9. Equipos utilizados para el desarrollo de la investigación	33



2.9.1. Características técnicas de los equipos	34
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1. Índice de Bond a escala de laboratorio	37
3.1.1. Análisis de los resultados obtenidos en la determinación del índice de Bond	37
3.2. Resultados obtenidos durante la determinación de los parámetros del modelo cinético acumulativo para el material natural	45
CONCLUSIONES	49
RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51

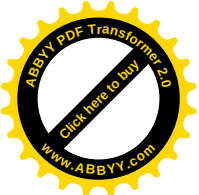


INTRODUCCIÓN

La energía es indispensable en la vida cotidiana y para el desarrollo socioeconómico de un país. Por esta razón, hoy resulta inevitable afrontar los grandes desafíos energéticos en las grandes empresas industriales, como fuente creciente de las importaciones, la presión ejercida sobre los recursos energéticos y el abastecimiento de energía a precios asequibles.

La sociedad a lo largo de la historia, ha creado su propia energía, gracias a todo tipo de avances científicos y tecnológicos. El último informe del Consejo Mundial de Energía (WEC), incluye que los combustibles fósiles carbón, petróleo y gas, contribuyen con un 63 % de la producción eléctrica (WEC de 1995). Estos tienen muchas ventajas; la principal su bajo costo y facilidad de transporte, pero también grandes desventajas, si se considera que son recursos naturales no renovables y a su vez constituyen fuentes de contaminación, con efectos ambientales severos. De aquí la importancia de disminuir los consumos energéticos y fomentar el uso racional de los mismos. La utilización de recursos naturales renovables y la adecuación de los procesos que consumen gran cantidad de energía a las condiciones de explotación para conseguir mejores indicadores de eficiencia por este concepto, constituyen vías para minimizarlo.

La Revolución Energética en Cuba impulsa también el uso de las fuentes renovables de energía. La generalización del modelo de generación distribuida abre paso a la paulatina penetración de las tecnologías energéticas renovables en nuestra matriz energética. Como expresara Raúl Castro Ruz en julio del 2008, nuestro país no está exento de recibir impactos negativos de la crisis energética internacional, por lo que resulta de vital importancia realizar una adecuada



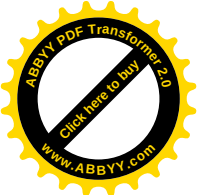
valoración de los reales impactos y las posibles alternativas de soluciones para atenuarla.

La molienda seca del mineral laterítico ha sido objeto de estudio con el fin de profundizar en los complejos fenómenos que tienen lugar durante el proceso industrial y sus altos consumos energéticos. La molienda del mineral es considerada un verdadero coloso energético, consume aproximadamente el 3 % de toda la energía que producen los países industrializados (Schonert ,1979), de ahí que en términos de costos, la etapa de molienda es la más significativa en el procesamiento de los minerales (Duarte et al, 1998).

En Cuba existen dos plantas procesadoras de las menas oxidadas de níquel y cobalto, ubicadas al nordeste de la zona oriental, una es la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", en Moa y la Empresa "Comandante René Ramos Latour", en Nicaro; ambas plantas incluyen la molienda como parte del proceso de preparación del mineral y en las mismas está establecido moler de forma conjunta las fracciones serpentiniticas y limoníticas a razón de 1:3, sin embargo, en la práctica se observa que es difícil mantener de forma estable esta relación (Llorente, 2003), esto está dado en parte, por la variabilidad de las características del mineral que se alimenta al proceso.

En ambas plantas se han realizado importantes trabajos dirigidos a investigar la influencia de la carga de bolas del molino sobre los indicadores energotecnológicos del proceso (Coello, 1993); las variables operacionales sobre la productividad (Aldana y Legrá, 1996) y el comportamiento del consumo específico de energía en la sección de molienda (Laborde, 2003; Laborde et al, 2005; entre otros). En todas estas investigaciones, sobre el mejoramiento de la eficiencia energética en el proceso de molienda de la laterita, han sido tratados con profundidad problemas particulares, utilizando diversos métodos, sin embargo, no se ha realizado para toda la gama de materiales que están en pronóstico de explotación.

En el caso particular del mineral laterítico de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur (ubicado al Este de la provincia de Holguín), estudios preliminares han puesto



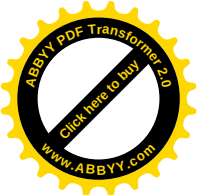
de manifiesto la alta complejidad de este tipo de mineral y la conveniencia de tratarlo como un mineral multicomponente, donde la variación de su composición sustancial está dada por la proporción en que se mezclen las componentes limoníticos y serpentiniticos, (Coello 1993 a, Coello 1993 b, Coello y Tijonov, 1996).

Como parte del programa de perfeccionamiento empresarial de las empresas niquelíferas cubanas procesadoras del mineral laterítico, surge la necesidad de elevar la eficiencia del proceso de molienda, para lo cual a su vez es imprescindible el conocimiento del consumo energético del proceso (para una unidad de molienda), en la actualidad se encuentra en el rango de 13,33 a 13,77 kwh/t.

Uno de los métodos que se utiliza para velar la eficiencia del proceso de molienda es llevar un control estadístico del consumo específico de energía, sin embargo este método no tiene en consideración un conjunto de factores que pueden influir sobre la variabilidad del consumo específico de energía, ni tiene en cuenta tampoco una referencia como es el índice de Bond que es un indicador con gran aceptación en la práctica mundial para los trabajos de racionalización del consumo de energía de los molinos de bolas.

A pesar de haberse realizado importantes intentos de caracterizar por vías alternativas el comportamiento energético ante la fragmentación de los diversos materiales, siempre se fija como referente comparativo en primera instancia el análisis de Bond (Austin et al 1973; Yap et al 1982; Austin et al 1983; Deister 1987; Levin 1989; Levin 1990; Coello 1993; Laplante et al 1993; Aksani; Sonmez B 2000; Moscher et al 2001), y la indudable eficacia práctica de su método permite presagiar que seguirá siendo así por mucho tiempo, por lo que nos encontramos ante la siguiente situación problemática.

Situación problemática: En la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se realizan grandes esfuerzos en el control del consumo de energía del proceso de molienda, sin embargo se desconoce el rango de variación del índice de Bond de las menas que se explotan actualmente, después de haberse introducido una



mallla clasificadora que reduce el tamaño máximo de las partículas en la alimentación de los molinos a 10 mm, lo cual constituye la necesidad de la presente investigación.

Problema de la investigación: Insuficiente conocimiento del rango de variación del índice de Bond de las menas lateríticas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Objeto de estudio: Proceso de molienda de las menas lateríticas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur.

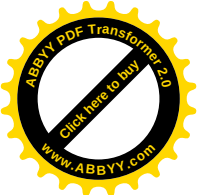
Campo de acción: Variabilidad del índice de Bond de las menas lateríticas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur.

Objetivo general: Determinar el rango de variación del índice de Bond para las menas lateríticas de nueva explotación en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, que permita una valoración del consumo energético en las condiciones actuales del proceso molienda.

Hipótesis: Mediante el ensayo de Bond de las menas lateríticas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur con diferentes relaciones serpentina – limonita es posible determinar el rango de variación de este indicador, lo cual permite predecir el consumo específico de energía para las condiciones actuales del proceso de molienda de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Objetivos específicos:

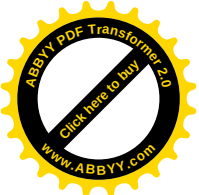
1. Determinar el índice de Bond de las menas lateríticas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur con diferentes relaciones de serpentina – limonita.



2. Determinar el modelo cinético acumulativo para la posterior simulación de la molienda a escala industrial que permita la comprobación del índice de Bond a esa escala.

Tareas

1. Sistematización del conocimiento sobre los aspectos teóricos de la molienda de mineral laterítico.
2. Determinación del índice Bond de las menas con un contenido altamente serpentínico y con un contenido altamente limonítico.
3. Determinación del índice de Bond para un material con una relación serpentina limonita alrededor de la media de la norma del proceso.
4. Determinación experimental del modelo cinético acumulativo para comprobar el índice de Bond en el proceso industrial.
5. Procesamiento y análisis de la información.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

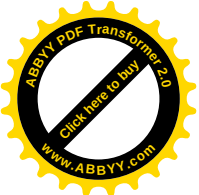
El objetivo del capítulo es exponer los principales trabajos que han tratado aspectos teóricos conceptuales relacionados con la molibilidad de las menas lateríticas que permiten aprovechar sus principales aportes y experiencias. Se señala el índice de Bond como herramienta para valorar la eficiencia energética de los procesos de molienda, así como los elementos básicos con tendencias actuales que resultan esenciales en el desarrollo del trabajo.

1.1. Investigaciones realizadas sobre la molienda de los minerales lateríticos

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, 1981). En el caso particular del proceso de molienda del mineral laterítico cubano, se han realizado importantes investigaciones en este sentido.

López et al. (1988), describen un método de laboratorio para el estudio 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 teoría de Bond, lo que permite obtener los parámetros energéticos del proceso, que posteriormente se utiliza en el dimensionado de los molinos industriales.

Muchos han sido, en sentido general, los trabajos realizados en busca de la mejora de la eficiencia energética de los circuitos de molienda (Alexandra y Fulvio, 1994). En el tema referido a la eficiencia energética de los molinos de bolas, Austin, Klimpel y Luckie (1984), en uno de sus libros han planteado hemos tratado a través de todo el libro de evitar el uso del término eficiencia de la molienda porque el grado de conversión de energía para la reducción del tamaño útil es un



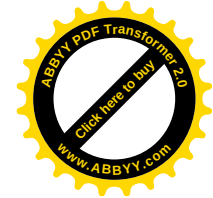
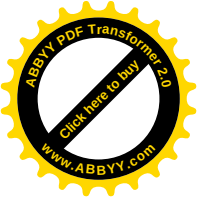
concepto débilmente definido. Añadimos que, la única eficiencia que es realmente de interés es el encuentro de las especificaciones del producto al costo mínimo.

Coello (1993), demuestra la necesidad de un profundo estudio, que encierre una multitud de fenómenos físicos y físicos químicos que tienen lugar durante la molienda de los minerales lateríticos por vía seca, entre los cuales se pueden citar la agregación y desintegración de conglomerados, la variación de la dureza del mineral en un amplio diapasón, así como su densidad. En la investigación se exponen los resultados de la influencia de la carga de bola y la composición granulométrica del producto inicial sobre los principales indicadores del proceso en cuestión. El autor señala que una de las vías para el perfeccionamiento de la molienda de los minerales lateríticos lo constituye la optimización de la carga de bolas en el intervalo 40-50 % mediante el aprovechamiento de las características particulares del mineral laterítico con el subsiguiente ahorro de energía.

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:

1. Humedad de mineral de alimentación.
2. Fineza del mineral de alimentación.
3. Grado de llenado del molino con la carga de bolas.
4. Insuficiente capacidad de los equipos que alimentan y extraen el material procesado y que suministran los insumos energéticos, electricidad fundamentalmente.
5. 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

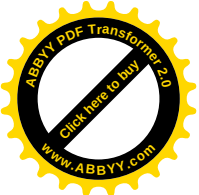


molino con clasificador perdió 25 % de su capacidad y sufrió un incremento del 50 % en el consumo de energía por toneladas al recibir el producto con un incremento de humedad de 0,8 a 4 %.

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 50,0 % 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.

Laborde et al. (2000), 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 et al. (2001), realizan 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 Tjonov, 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. El modelo propuesto puede ser empleado para determinar el consumo de energía en la molienda del mineral, pues el mineral laterítico está considerado como policomponente.



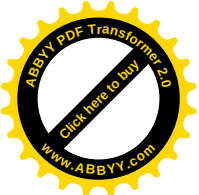
En otros trabajos se realizaron expresiones empíricas que relacionan la constante de la velocidad de la molienda con los diámetros de las bolas y se llegan a las conclusiones que las variaciones de la constante adimensional de la velocidad de molienda con el tamaño de alimentación fue aproximadamente análoga y fue independiente de los diámetros de las bolas y de los tipos de materiales. Se obtienen ecuaciones para determinar las relaciones óptimas entre el tamaño de alimentación y el diámetro de la bola y entre la constante máxima de la velocidad de molienda y el diámetro de la bola para los materiales utilizados (limestone, silica glass, gypsum) (Kotake et al., 2002).

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, et al., 2004).

Núñez y Pérez (2003), ejecutan 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.

Laborde (2004), efectúa una investigación en la unidad de molienda, específicamente en sus dos equipos principales: el molino de bolas y el ventilador de recirculación. Los resultados arrojaron 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.

Suárez et al. (2004), exponen los resultados obtenidos de un estudio realizado en la Planta de Preparación de Minerales (sección molienda) para determinar como



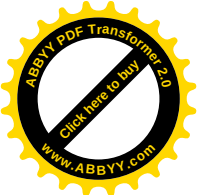
influyen el régimen dinámico y la operación del clasificador sobre los indicadores tecnológicos del proceso, en este trabajo no se aborda el efecto que tiene las diferentes clases en el proceso de molienda.

Heinnz (S.a), detalla la metodología de cálculo para determinar la carga de bolas al molino empleando ecuaciones logarítmicas, atendiendo al coeficiente de llenado del mismo y al diámetro medio del material de alimentación, se recogen de forma explícita las ecuaciones matemáticas empleadas para efectuar los cálculos. Aparece anexo a la metodología un ejemplo de cálculo realizado por el ingeniero Gaspar Saldivar Hernández para el molino de la planta piloto de Nicaro y un molino a escala de banco. Las expresiones matemáticas que aparecen recogidas en el documento pueden emplearse para realizar el cálculo de la carga de bolas a utilizar en los molinos.

De la bibliografía consultada se puede destacar que en su mayoría los trabajos realizados han estado dirigidos a determinar el consumo de energía en la molienda del mineral, la influencia del grado de llenado con bolas y la estrecha relación de esta última con la eficiencia energética del proceso, la humedad y la fineza del mineral de alimentación sobre la productividad de los molinos. Comúnmente, es el índice de Bond un indicador con gran aceptación en la práctica mundial para determinar el consumo de energía de los molinos de bolas. Por ello, el siguiente acápite está dedicado a exponer los trabajos que han empleado el índice de Bond para la valoración energética de los procesos de molienda.

1.2. Índice de Bond como herramienta para valorar la eficiencia energética de los procesos de molienda

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda (Morrell, 2004). Este índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del 20 del pasado siglo XX (Mosher y Tague, 2001). En diversos trabajos se dan indicaciones prácticas para facilitar la determinación del índice de Bond, con diferentes tipos de materiales, Deister (1987), Leving (1989), Lewis y Pearl



(1990), Aksani y Sonmez (2000), Aguado (2001), sin embargo no aparecen referencias sobre la determinación de este índice para un mineral de composición sustancial variable como es el caso de la laterita.

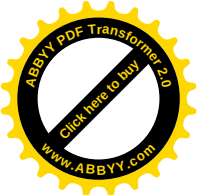
Reina (2004), efectúa el cálculo del índice de trabajo de Bond para los minerales lateríticos y se determina el valor real de consumo de energía para la molienda y la influencia que esta tiene sobre la variación del porcentaje de serpentina en la alimentación.

Núñez y Pérez (2003), hacen una caracterización granulométrica del mineral que entra al circuito de molienda, y tratan el ahorro de energía en el proceso de molienda y el aumento de la productividad del molino.

En la investigación titulada “Consumo específico de energía eléctrica en el proceso de molienda de la laterita” citado también por (Martínez, 2005), se realiza un análisis sobre los principales factores que determinan el consumo de energía eléctrica en el proceso de molienda de la laterita, en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, analiza la influencia del grado de llenado de bolas del molino, sobre la productividad y la estrecha relación de esta última con la eficiencia energética del proceso.

Lafargue (2005), hace un profundo estudio del consumo específico de energía para la laterita del proceso industrial mediante la prueba de Bond. Además determina el índice operacional real de la sección de molienda de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” el cual es comparado con el obtenido mediante la prueba de Bond, con el objetivo de valorar el comportamiento de la eficiencia energética y la productividad de los molinos industriales analiza la posibilidad de incrementar la productividad de los molinos así como una disminución de los costos de producción. A pesar del profundo análisis que se lleva a cabo en este trabajo sobre la productividad del proceso de molienda no se aborda el tema de la influencia que tiene el beneficio del mineral en la productividad del proceso de molienda.

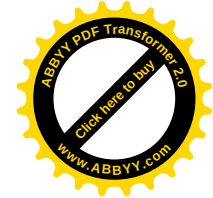
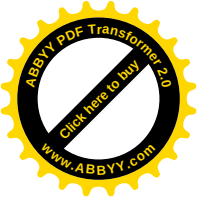
Ledesma (2008), realiza un estudio de la influencia del beneficio en el consumo específico de energía y la productividad del proceso de molienda industrial de la



Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” mediante el ensayo de Bond a nivel de laboratorio. En este se determina el consumo específico de energía y la productividad a escala de laboratorio para las clases (<200 mm, <10 mm y $<6,3$ mm) mediante el mencionado ensayo, lo cual arrojó como principales resultados que el incremento del tamaño de la fracción a moler, aumenta el valor del índice de Bond, lo que evidencia una variación en la molibilidad del mineral, motivado por cambios en la composición sustancial de este (relación Limonita – Serpentina). Con lo cual se demuestra la posibilidad de incrementar la productividad si se optimiza el Scalping a (<6 mm).

Legrá y López (2009), examinaron muestras compósitos para determinar el índice de trabajo del material (w_i), en kWh/t de mineral y resulta indicativo la molibilidad del mismo. Como carga circulante se adoptó un 250 % de la masa de alimentación, lo cual permite simular la operación de molienda en circuito cerrado. A partir de un catálogo de la Compañía Allis-Chalmers para determinar las dimensiones de los molinos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” y la potencia instalada en cada uno de estos, con el valor del índice de trabajo determinado para cada mineral (muestras). El trabajo sirve de base para determinar, a escala de laboratorio, la energía requerida para el desmenuzamiento del mineral laterítico que procesa actualmente la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Álvarez (2011), determinó la energía requerida para la molienda de 1 tonelada de mineral laterítico, la variación del consumo específico de energía y la productividad del proceso de molienda mediante el ensayo de Bond. Se determinó la influencia del contenido de finos en el mineral de alimentación sobre la productividad del molino de bolas. Se comparan los resultados obtenidos con los valores del proceso industrial con el objetivo de valorar la productividad de los molinos industriales, se analiza la posibilidad de incrementar la productividad de los molinos en la actualidad y además se determina el rango de variación del índice de Bond de las menas lateríticas de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.



Aldana et al. (2004), determinaron el índice de trabajo o de Bond para el mineral del yacimiento Yagrumaje Norte que será procesado en próximos periodos de explotación por la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Los resultados arrojaron valores del índice de bond para este mineral que se corresponden con el tipo de mineral de fácil molibilidad, se nota la poca dureza del mineral en la cinética de la molienda en cada ciclo con relación a la formación de nuevas clases finas con el tiempo, siendo el consumo proporcional a la formación de nuevas clases. El índice de Bond para las diferentes muestras se considera bajo, respecto al comportamiento del mineral tradicional que ha procesado la empresa y que no defiere geológicamente de la futura explotación, aunque es bueno señalar que los valores de este índice es inferior al índice operacional actual de los molinos y. al resultado de este mismo parámetro obtenido en otros ensayos de Bond con minerales de la misma empresa.

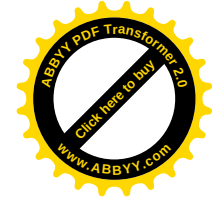
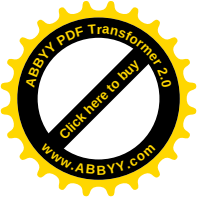
Como se considera en los trabajos señalados anteriormente, se han realizado grandes esfuerzos para establecer el control del consumo de energía del proceso de molienda de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, sin embargo, se desconoce el rango de variación del índice de Bond del mineral en las condiciones actuales, luego de haberse introducido un proceso de cribado giratorio que reduce el tamaño máximo de las partículas a 10 mm en la alimentación de los molinos.

Por lo tanto, los acápites que se presentan a continuación están dedicados a la definición y descripción de los aspectos conceptuales sobre el índice de Bond y el proceso de molienda de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los cuales sirven de punto de partida en la fundamentación de la metodología a emplear en la presente investigación.

1.3. Definición del índice de Bond

El índice de Bond se define a partir de la formulación de la tercera ley de la fragmentación (ecuación 1) propuesta por el propio Bond, la cual plantea:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (1)$$



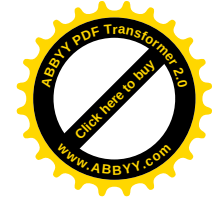
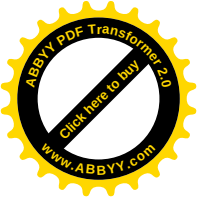
En la que W es el consumo energético específico, en kWh/t, d y D son los tamaños que dan un pasante del 80 % en producto y alimentación respectivamente, expresados en micras, y W_i es el índice de trabajo o índice de Bond en kWh/t.

De la fórmula se puede deducir una definición, de valor más teórico que práctico, del índice de Bond, que sería el consumo energético específico en kWh/t necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras, y según el propio Bond sería un parámetro de conminución que expresa la resistencia del material ante las operaciones de trituración y molienda.

Según Bond, si el material se comportase de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso muy poco habitual, por otra parte), el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las sucesivas etapas de conminución.

Pero la realidad es que los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura, pudiendo hablarse normalmente de un tamaño de grano natural, de forma que el comportamiento de ese material a tamaños de molienda superiores a dicho tamaño nos daría valores del índice de trabajo inferiores, que en el caso de realizar la molienda a un tamaño inferior a dicho tamaño de grano natural; esto se explica de una forma sencilla, ya que en el primer caso, los esfuerzos sobre las partículas generados por la acción de la molienda se dirigirán en principio preferentemente hacia las superficies intergranulares, que normalmente presentarán una resistencia inferior a la presentada por la red del grano monocristalino, y por tanto el consumo energético de la operación será menor.

No cabe duda que la eficacia de la operación estará influenciada enormemente por las características de la máquina, y es por ello que Bond definió con bastante precisión las condiciones en las que se debería realizar el ensayo. Por tanto, las determinaciones del índice de Bond mediante ensayos de laboratorio muestran el comportamiento del material en un rango estrecho de tamaños, y cualquier desviación puede acusar la influencia de esa heterogeneidad, lo que puede traducirse en variaciones que pueden ser importantes del índice de trabajo. Por



esto es muy recomendable que la determinación del índice de trabajo se realice lo más cerca posible del tamaño requerido en la molienda industrial (Aguado, 2005; Amarán et al., 2005; Laborde, 2005; Martínez, 2005).

1.4. Ensayo estándar de Bond

El índice de trabajo de un material, aplicable a la molienda fina en molinos de bolas, se determina en un molino de laboratorio de dimensiones estándar, de 12 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de longitud, que gira a 70 rpm, posee esquinas redondeadas y revestimiento liso, con una carga de bolas de acero determinada. El ensayo consiste en la realización de la molienda en un molino de bolas, simulando una operación en circuito cerrado con 250 % de carga circulante, y utilizando la malla de corte requerida, de acuerdo con el circuito industrial, de forma que los tamaños de cierre del circuito se encuentren siempre en el rango comprendido entre 28 y 325 mallas Tyler (entre 600 y 40 micras).

El índice de trabajo a partir de los ensayos se determina por la fórmula propuesta por el propio Bond (ecuación 2), válida para los molinos de dimensiones estándar, expuestos anteriormente.

$$Wi = \frac{44,5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (2)$$

Donde:

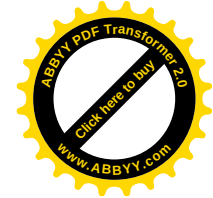
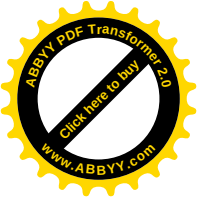
Wi es el índice de trabajo del material, kWh/ton corta.

P₁₀₀ es la abertura en micras de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito.

Gbp es el índice de molturabilidad del material en los molinos de bolas, en g/rev.

F₈₀ es el tamaño correspondiente al 80 % de pasante de la alimentación fresca, en micras,

P₈₀ es el tamaño correspondiente al 80 % de pasante del producto final, en micras.



1.5. Factores de corrección del índice de Bond

Como se puede apreciar en la fórmula anteriormente descrita, el índice de trabajo obtenido a partir de los ensayos, es válido para la molienda húmeda y expresado en toneladas cortas, debido a que nuestra investigación se necesita el índice de trabajo para la molienda por vía seca y en unidades volumétricas, se hace necesaria la corrección de este valor.

1.5.1. Corrección de unidades de masa

Dado que los valores obtenidos para la aplicación directa de la fórmula se obtienen en kWh/ton corta, para obtener el consumo energético específico referido a unidades métricas, es preciso multiplicar el valor $K_0=1,102$.

1.5.2. Corrección a molienda en vía seca

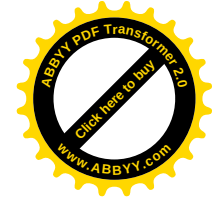
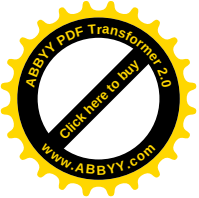
Propuesto por Bond originalmente, para el caso de la molienda en vía seca se aplica un coeficiente multiplicador $K_2= 1,3$.

1.6. Ventajas del método de Bond

- El método de Bond permite estimar el consumo medio de energía a escala industrial con un error promedio $\pm 20 \%$.
- Mide la resistencia del material ante operaciones de fragmentación.
- Es el procedimiento habitual para el dimensionado de trituradoras, molinos de barras y bolas, tanto a escala piloto como industrial.

1.7. Desventajas del método de Bond

Es objeto de rechazo entre diversos autores por la necesidad práctica de disponer de un molino de dimensiones estándar, el cual se encuentra en escasa disponibilidad en el mercado (elevando su precio y hace que no todos los laboratorios puedan permitirse el disponer del mismo).



1.8. Caracterización del proceso de molienda de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

La molienda de mineral es considerada como un proceso complejo donde se gasta 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 (Laborde et al., 2004).

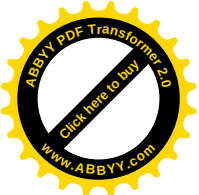
Por esto el esquema tecnológico de la fábrica de Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara cuenta con circuito de molienda que recibe el mineral procedente del proceso de secado a través de las correas transportadoras, las cuales son denominadas comúnmente “correas calientes”, el cual se descarga en 4 tolvas, una para cada molino mediante desviadores de mineral colocados sobre la correa y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Desde cada tolva el mineral llega a los molinos en forma dosificada de 120 t/h donde es sometido a un proceso de desmenuzamiento en molinos cilíndricos monocámaras de bolas (molienda seca) hasta valores de granulometría de: +0,149 mm (4 a 7,5) %, +0,074 mm (7 a 8) %, -0,074 mm (85 a 87) %, en un sistema a ciclo cerrado, barrido por aire provocado por un ventilador centrífugo, cuya función es crear una recirculación de aire dentro del molino para generar la descarga del mineral.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 t, con una distribución de bolas según su masa y dimensiones como se muestra a continuación.

Tabla 1. Distribución de la carga de bolas del molino industrial

Tamaño, mm	Masa, kg	%
100	5 500	10
70	5 500	10
60	8 000	15
40	13 500	25
32	21 500	40



El producto que el molino debe entregar tendrá una humedad de 4,5 a 5,5 % y el mineral molido es transportado hacia los silos de mineral del Taller de Hornos de Reducción mediante el empleo de bombas neumáticas colocadas en la descarga de las tolvas.

1.8.1. Características técnicas de los molinos

Los molinos de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” son de fabricación soviética, con código: 121-ML-201-204. Trans: 05001. Poseen las siguientes características técnicas:

Capacidad: 120 t/h

Diámetro: 3200 mm.

Largo: 5700 mm.

Motor del molino CC 3-15-49-10 T3.

Voltaje: 10 000 V.

Estator: 54 A.

Rotor: 115 A.

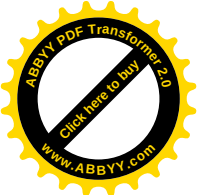
N=800 kW.

n=720 r/min.

Actualmente se conservan las características del proceso y del equipamiento de molienda a pesar de que se ha introducido el mencionado proceso de clasificación de tamaño en la etapa de secado de mineral, con el cual hay una disminución considerable del tamaño de partículas que se alimentan al proceso de molienda y esto permite sospechar que el consumo de energía para las condiciones actuales sea menor y que además existan mejoras en la eficiencia del proceso.

1.8.2. Consumo específico de energía del proceso de molienda

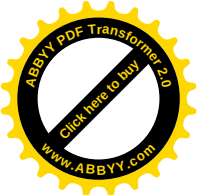
El consumo específico de energía está determinado por la energía consumida por hora para moler una tonelada de mineral y se expresa en kWh/t, puede ser



determinada para el molino en particular o para la unidad de molienda y se calcula en dependencia de los finos netos producidos o los finos totales. En el caso particular de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” el índice operacional de una unidad de molienda para las condiciones actuales de operación es de 13,77 kWh/t.

Conclusiones del Capítulo 1

- El índice de Bond, permite presagiar el comportamiento energético ante la fragmentación de los diversos materiales, y se considera uno de los métodos de más eficacia en práctica industrial.
- Las condiciones actuales del proceso de molienda en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” exige la determinación del rango de variación del índice de Bond del mineral que se procesa para determinar el consumo específico de energía del circuito de molienda.



CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” uno de los procesos de mayor consumo energético es el proceso de molienda del mineral. Con la introducción de mallas clasificadoras a la salida de los secaderos, el mineral que pasa hacia el área de molienda tiene un tamaño máximo de partícula inferior a los 10 mm, por lo que el mineral ha sufrido un cambio en sus características físico-mecánicas que deben facilitar su desmenuzamiento, con una consiguiente reducción del consumo específico de energía. En la actualidad se observa que la productividad media de los molinos de bolas oscila entre 80-85 t/h, cuando existe la expectativa de que pueden alcanzar valores cercanos a las 100 t/h con las nuevas características del mineral, lo que conllevaría a una reducción apreciable del consumo específico de energía y a la reducción de los costos de producción.

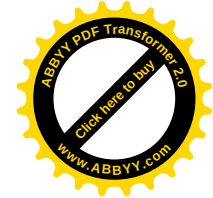
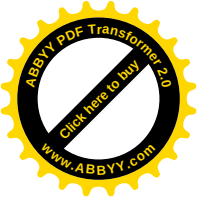
Uno de los métodos más empleados mundialmente para determinar de forma empírica el consumo específico de energía de los molinos de bolas, es el método de Bond y es precisamente el método que se emplea en este trabajo.

En este capítulo se hace referencia a los materiales y métodos utilizados en la realización del trabajo, se da comienzo a la técnica experimental llevada a cabo, luego se desarrolla la toma de muestras y su ulterior preparación para la realización de los distintos experimentos.

2.1. Metodología de la investigación

El presente acápite está encaminado a:

- Mostrar el diseño de la investigación.
- Exponer las técnicas y materiales utilizados en la investigación.



- Argumentar el procedimiento a seguir durante la investigación.

2.2. Toma de la muestra

Para la realización del trabajo se tomaron muestras de mineral de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur, los cuales se procesaban en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" en el momento de realización de los experimentos.

El material básico utilizado fue tomado directamente en las bandas transportadoras a la salida de los secaderos en la Planta de Preparación de Minerales. La muestra fue tomada garantizando dos criterios básicos para estos casos: primero, que la misma sea suficiente para la realización de los experimentos y segundo, que sea representativa tanto cuantitativamente como cualitativamente de todo el mineral que procesó la Empresa "Comandante Ernesto Ché Guevara" durante el periodo de toma de las muestras.

El material necesario para la realización de los experimentos fue tomado aleatoriamente durante un periodo de un mes, posteriormente fue homogenizado y caracterizado desde el punto de vista de su composición granulométrica.

La masa mínima de mineral a tomar para que la muestra sea representativa se determina por la ecuación (3) expresada en kg.

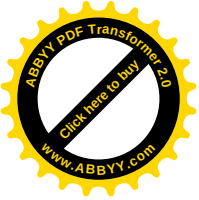
$$q = kd^a \quad (3)$$

Donde:

d: Diámetro máxima de partícula (mm).

k y a: Coeficientes empíricos (tabulados).

El material predominantemente serpentinitico se obtuvo mediante el tamizado del material natural con corte en el tamaño 4 mm. Prácticamente todo el material así obtenido es a simple vista de naturaleza rocosa (fragmentos de rocas serpentinitica). Como material con características predominantemente limoníticas



se tomó el pasante por el tamiz de 4 mm, donde la mayor parte del material es de composición terrosa (limonita), aunque también contiene partículas duras (pequeños fragmentos de roca limonítica) no distinguibles a simple vista.

2.3. Preparación de la muestra

Las muestras fueron preparadas con diferentes relaciones de serpentina y limonita para simular la variación de la composición sustancial del mineral. La homogeneidad y masa de estas para cada caso en particular se logró por cuarteos sucesivos, y la combinación de dos métodos clásicos en la preparación de muestras, el método del cono y el anillo, y el divisor tipo Rifles, luego se procedió a preparar las condiciones para las corridas experimentales que se explican a continuación:

- Se seleccionó el juego de tamices.
- Se seleccionaron las cargas de bolas del molino (para el ensayo de Bond).
- Se seleccionó la cantidad de material a emplear para cada experimento.

2.4. Características químicas y granulométricas del material analizado

El estadígrafo del contenido de los elementos químicos del mineral utilizado para la realización de los experimentos se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización química del mineral de descarga de los secaderos

Estadígrafo	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)
Promedio	1,14	0,090	36,69	7,65	11,23
Máximo	1,26	0,107	42,77	10,59	16,31
Mínimo	1,04	0,071	32,43	3,92	5,79
Desvest	0,08	0,011	2,74	2,16	3,16

El material es considerado con un tamaño máximo de partículas inferior a 10 mm, debido a que es clasificado en tromell ubicados en las descargas de los secaderos. Al reducirse el tamaño máximo en la alimentación a los molinos por

debajo de los 10 mm, se observa una mayor regularidad en la composición granulométrica del material, comparado con la situación existente antes de colocar los tromell.

2.5. Métodos de homogenización y cuarteo para la preparación de la muestra

Cono y anillo:

El método del cuarteo según **(Mitrofánov 1982)** consiste en mezclar el material para posteriormente apilarlo a la forma de un cono figura 1. Este se aplasta en forma de pastel figura 2 y se divide con una pala o espátula en forma de cruz (cuatro partes iguales) figura 3. Se retiran dos cuartos opuestos y las otras dos restantes partes figura 4 forman la nueva muestra, se vuelven a mezclar y el proceso se repite varias veces hasta obtener el tamaño apropiado de muestra



Figura 1. Cono



Figura 2. Anillo



Figura 3. División con cruceta



Figura 4. Dos partes iguales.

Una vez que se tiene la muestra preparada, se procede al pesaje de la misma para obtener el gramaje con el que se trabajará durante el proceso.

Cortador de Rifles:

Consiste en un recipiente en forma de V figura 5 que tiene en sus costados una serie de canales o chutes que descargan alternativamente en dos bandejas ubicadas en ambos lados del cortador, como se muestra en la figura 6. El material es vaciado en la parte superior y al pasar por el equipo se divide en dos fracciones de aproximadamente igual tamaño.



Figura 5. Cortador de Rifles.



Figura 6. Homogenización y cuarteo.

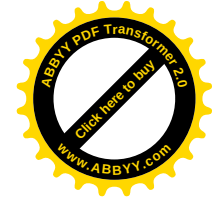
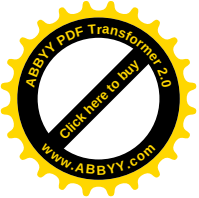
Ejemplos:

- 1). Se distribuye la muestra de 500 g (homogenizada) uniformemente a lo largo del cortador; de los dos recipientes que reciben la muestra se descarta uno de ellos.
- 2). El contenido del recipiente que no ha sido descartado, se vuelve a verter sobre el cortador y se repite el proceso hasta obtener la muestra de tamaño deseado.

2.6. Análisis de tamices

El análisis de tamices 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 masa de la muestra inicial. En este trabajo se utiliza la serie de Taylor, en el que el tamaño de la malla metálica anterior se diferencia del tamaño de la malla metálica posterior en $\sqrt{2}$ veces.

En la mayoría de los casos durante el cernido seco sobre todo en 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 acuoso (tamizado húmedo). Las muestras se tamizan por el método húmedo o seco en dependencia del grosor del material y a la exactitud necesaria de los resultados del análisis.

2.6.1. Método de tamizado húmedo

Este se realiza cuando la muestra contiene una cantidad considerable de material fino y material arcilloso, siendo necesaria una exactitud o precisión alta de los resultados del análisis granulométrico.

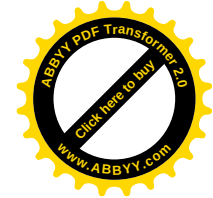
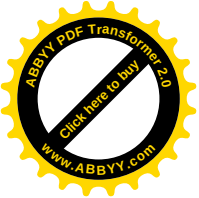
La muestra se deposita en un tamiz con orificios de pequeña dimensión, y las partículas más pequeñas (de lodo) se lavan con un chorro débil de agua. El lavado se realiza hasta que el agua se aclare, el resto de la muestra que queda se criba, se seca y se pesa, de modo que, por las diferencias entre las masas se determina la masa de lodo lavado.

Los resultados obtenidos son tabulados donde debe aparecer la clase de tamaño, la masa de material retenido en cada tamiz, el porciento en peso y la salida sumaria por más y la salida sumaria por menos

Para la realización de los ensayos se realizó la caracterización granulométrica de la muestra inicial para la determinación de las clases de tamaño desde ($<13,2$ mm hasta $<0,074$ mm), esto se logró tamizando parte del material homogenizado, mediante ensayo de tamices por vía seca para fracciones ($<13,2 +1$ mm) y vía húmeda para fracciones de ($+0,63$ mm $<0,074$ mm).

Se determinó la composición granulométrica inicial de cada muestra en particular (mineral natural, mineral serpentinito y mineral limonítico), utilizadas para realizar los ensayos de Bond; previa trituración y tamizado a ($<3,5$ mm). La masa mínima necesaria para realizar el análisis granulométrico se determinó mediante la ecuación 4.

$$Q_{mín} = 0,02 \cdot d^2 + 0,5 \cdot d \quad (4)$$



donde:

$Q_{\min}$ = Masa mínima de material a utilizar para realizar el análisis granulométrico, kg.

d= diámetro máximo de las partículas de mineral, mm.

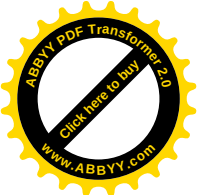
2.7. Metodología para la determinación experimental del índice de Bond

El método de Bond permite estimar el consumo real de energía a escala industrial con un error promedio ± 20 %. Es el procedimiento habitual para el dimensionado de trituradoras, molinos de barras y bolas, tanto a escala piloto como industrial.

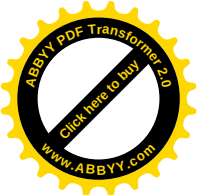
A continuación se ofrece una descripción de las operaciones a realizar en el desarrollo del ensayo de Bond para molinos de bolas y que fue utilizada en la determinación experimental del índice de Bond para los minerales lateríticos.

1. Preparación de la alimentación: Homogenización y cuarteo del mineral.
2. Determinación de la densidad aparente en la alimentación: Se determinó mediante la medición en un cilindro graduado (probeta), donde se prestó especial cuidado al máximo empaquetamiento posible del material en dicho cilindro, recurriéndose para esto al cribado del mismo por el tamiz de 3,5 mm.
3. Determinación del peso de 700 cm³ de alimentación mediante el valor de la densidad aparente, o directamente por pesada de dicho volumen: Este será el peso de alimentación en el primer ciclo, y en todo caso, el peso total al molino alimentado en cada ciclo.
4. Determinación del peso de producto ideal o peso ideal de finos, suponiendo una carga circulante de 250 %. Este valor será determinado por la expresión
- 5.

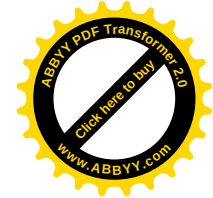
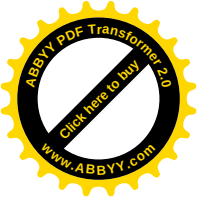
$$P_i = \frac{\text{peso 700}}{3,5} \quad (5)$$



5. Caracterización granulométrica de la alimentación, con especial cuidado en la obtención del valor característico a F_{80} , y el porcentaje de material en la alimentación inferior al tamaño de corte.
6. En el caso de que el análisis granulométrico realizado a la alimentación, se obtenga un porcentaje pasante por el tamiz de corte superior al 28 %, se realizará un ciclo vacío, se asignará cero al número de revoluciones y al número de granos netos por revolución en el primer periodo, se llevará a cabo el tamizado del total de la carga al tamiz de corte, separándose el cernido y completando el rechazo con alimentación fresca representativa hasta completar el peso inicial.
7. Introducción de la carga de alimentación en el molino, teniendo especial cuidado en el cierre del mismo. Es conveniente comprobar regularmente el estado de las juntas de cierre, para garantizar que no se produzcan acumulaciones de material no molido en los espacios que puedan quedar, o incluso pérdidas de material en el giro del molino.
8. Se hace girar el molino a un número arbitrario de revoluciones: (se recomienda 100 vueltas para materiales duros y 50 para materiales más blandos)
9. Se descarga el molino sobre una superficie tipo chapa perforada, para facilitar la separación de las bolas del material, se limpia el interior del molino y las bolas para recuperar en lo posible la totalidad de la masa introducida, posteriormente se cargan las bolas limpias.
10. Se tamiza cuidadosamente la descarga del molino, con el tamiz de corte seleccionado (0,074 mm), luego se procede a secar el rechazo en la estufa.
11. Se procede al pesado de rechazo tamizado, con precisión al menos de décimas de gramos.
12. Se determina el peso del cernido por diferencia entre el peso total del producto y el peso del rechazo.



13. Se determina la cantidad de material de tamaño menor que el tamiz de corte en la alimentación, según el análisis realizado en el paso 5, para conocer así el peso adicionado de finos en la carga de alimentación al actual período.
14. Se calcula el valor de los **gramos de finos netos producidos**, que corresponde al peso pasante producido (determinado en el paso 12), menos el peso de finos introducidos en la alimentación (determinado en el paso 13)
15. Se calcula el valor de los **gramos netos producidos por revolución (Gbp)**, dividiendo el número de gramos netos (obtenidos en el paso 14), entre el número de revoluciones del período.
16. Se añade una cantidad de muestra representativa de alimentación fresca al rechazo obtenido, para construir de nuevo el peso definido en el paso 3.
17. Se calcula la cantidad aproximada de **finos ya presentes** en la cantidad añadida en el paso 16, basándose en el análisis granulométrico del paso 5, este valor debe ser anotado para usarlo en el cálculo de los finos netos producidos en el siguiente período, como se describió en el paso 12.
18. Se calcula el peso que deberá ser molido en el próximo período para obtener la carga circulante deseada, se obtiene restando al peso ideal de finos, según el paso 4, la cantidad de finos presentes en la alimentación al molino.
19. Se determina el número de revoluciones correspondientes al siguiente período. El mismo se obtiene dividiendo la cantidad de material que debe ser molido (calculada en el paso 18), entre el número de gramos netos por revolución del período anterior (calculado en el paso 15).
20. Se añade nueva alimentación al rechazo del ensayo (como en el paso 16) y se repiten los pasos del 7 al 20. Deben realizarse, como mínimo, 5 períodos de molienda.
21. Según Bond es de esperar una convergencia del sistema donde el número de gramos netos por revolución frente al número de períodos muestre una tendencia creciente o decreciente, de forma, que en un determinado ciclo se produzca una inversión de tal tendencia, y pasados al menos los 5 ciclos,



puede darse por terminado el ensayo. En todo caso, este tipo de convergencia no es general, y de no presentarse tal inversión de tendencia, se debería continuar el ensayo hasta que no haya variación significativa en el número de gramos netos por revolución.

22. Promediando los valores de gramos netos por revolución obtenidos en los tres últimos períodos (si hubo la inversión tendencia comentada en el paso 21) se obtiene mediante el **índice de molturabilidad** en molinos de bolas, **Gbp**.
23. Mediante el análisis por tamizado, se determina la distribución granulométrica del pasante del tamiz de corte en el último ensayo realizado, con el fin de determinar el valor P_{80} .
24. Se calcula el índice de trabajo W_i en molinos de bolas, expresado en kWh/t, mediante la ecuación 6, propuesta por Bond.

$$W_i = \frac{44.5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{F_{80}} \right)} \quad (6)$$

donde:

P_{74} : tamaño de corte, μm

G_{bp} : índice de molturabilidad, g/rev.

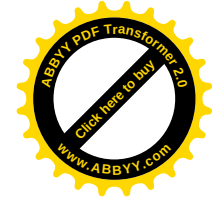
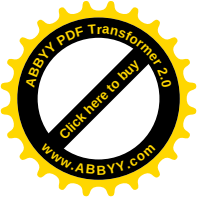
P_{80} : tamaño del 80 % de pasante en el producto, μm

F_{80} : tamaño del 80 % de pasante en la alimentación, μm

Para llevar el valor obtenido a toneladas métricas se introduce el factor $K_1 = 1,1$ y para considerar la molienda seca se introduce un factor $K_2 = 1,3$

2.7.1. Ajuste de la carga de bolas para la prueba de Bond

El índice de trabajo de un material, aplicable a la molienda fina de un molino de bolas, se determina en un molino de laboratorio de dimensiones estándar, 12 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de largo, el mismo gira a 70 rpm, posee



esquinas redondeadas y revestimiento liso, con una carga de bolas de acero determinada.

En su publicación más conocida (**Bond, 1961**), definió la carga de bolas mostrada en la tabla 3.

Tabla 3. Distribución recomendada por Bond inicialmente

Carga recomendada por Bond 1961				
Tamaño de bolas			Área	Peso
Pulgadas	cm	No. de bolas	(cm ²)	(g)
1,450	3,683	43	1832,4	8803
1,170	2,972	67	1858,9	7206
1,000	2,540	10	202,7	672
0,750	1,905	71	809,5	2011
0,610	1,549	94	708,9	1433
Total :		285	5412,4	20125

Según **BICO (1999)**, empresa fabricante del molino utilizado para la realización de los ensayos recogidos en el presente trabajo, mediante correspondencia particular Bond admitió la dificultad de especificar un número de bolas de cada peso para dar el área superficial y el peso total especificado, realizando una corrección que según la mencionada referencia debería ser como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Distribución recomendada por Bond finalmente

Carga recomendada por Bond 1961				
Tamaño de bolas			Área	Peso
Pulgadas	cm	No. de bolas	cm ²	g
1,500	3,810	25	1832,4	8803
1,250	3,175	39	1858,9	7206

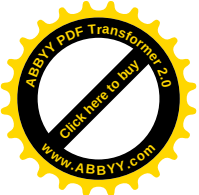
Carga recomendada por Bond 1961				
Tamaño de bolas			Área	Peso
Pulgadas	cm	No. de bolas	cm ²	g
1,000	2,540	60	202,7	672
0,875	2,223	68	809,5	2011
0,750	1,905	93	708,9	1433
Total :		285	5706,8	20592

En la tabla 5 el peso de las bolas se ha ajustado mejor. El valor calculado del área superficial ha disminuido en este caso, pero se debe decir que el valor real, de haberse podido medir, sería bastante superior al calculado, al presentar la mayoría de las bolas imperfecciones geométricas.

Tabla 5. Distribución de bolas medida laboratorio

Tamaño de bolas		Área	Peso
Pulgadas	cm	No. de bolas	g
1,500	3,810	24	5698,0
1,250	3,175	43	5104,6
1,000	2,540	50	4045,6
0,875	2,223	69	369,1
0,750	1,905	83	2645,4
Total		269	17862,7

Desde el punto de vista técnico, el índice de trabajo, constituye el método más fiable de caracterización de un mineral con vista al diseño de tipo cilíndrico en los que se va a procesar el material.



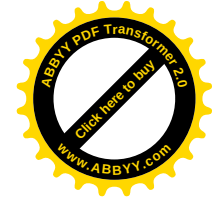
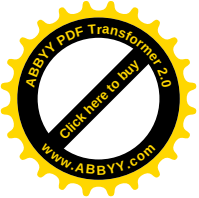
2.8. Metodología para la determinación del modelo cinético acumulativo

Para la realización de los ensayos relacionados con el modelo cinético acumulativo se siguió el siguiente orden:

1. Preparar el material natural de forma semejante a como fue preparado para obtener el índice de Bond (triturar por debajo de 3,5 mm hasta obtener unos 15 kg).
2. Homogenizar el material y obtener 3 muestras para caracterización.
3. Realizar análisis granulométricos completos a las 3 muestras seleccionadas.
4. Preparar 9 muestras de 955 g.
5. Moler una muestra durante 0,5 minutos.
6. Realizar un análisis granulométrico completo a la muestra molida.
7. Moler otra muestra durante 1 minuto.
8. Realizar un análisis completo a la muestra molida.
9. Moler una tercera muestra durante 1,5 minutos.
10. Realizar un análisis completo a la muestra molida.
11. Repetir 2 veces más los puntos del 5 al 10 y anotar cuidadosamente los resultados obtenidos en cada molienda acorde a los tiempos establecidos.

A partir de los resultados obtenidos de los análisis granulométricos de este material molido se aplicó la metodología para determinar los parámetros del modelo cinético acumulativo según se expone a continuación.

Los valores del parámetro cinético k , para cada tamaño, fueron determinados a partir de una regresión lineal de los valores del retenido del material en el tiempo, con un ajuste de la ecuación 7.



$$\ln W_{(x,t)} - \ln W_{(x,t_0)} = k t \quad (7)$$

Los valores de C y de n para cada tamaño se calculan a partir de los valores de k , estableciendo una regresión lineal, con un ajuste de la ecuación 8:

$$\ln k = \ln C + n \ln x \quad (8)$$

Y finalmente se obtiene el modelo representado por la ecuación 9.

$$W(x, t) = W(x, t_0) e^{-C x^n t} \quad (9)$$

donde,

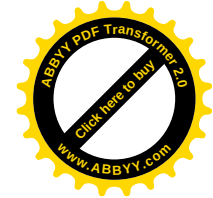
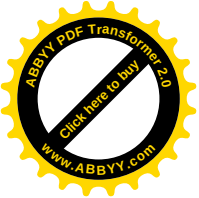
$W(x, t)$: masa de material en el tamaño x , retenida para un tiempo t de molienda

$W(x, t_0)$: masa de material en el tamaño x , antes de ser molida

C, n : constantes que dependen de las características del molino y del material

2.9. Equipos utilizados para el desarrollo de la investigación

- Series de tamices,
- Trituradora de mandíbula,
- Molino de Bond, accionado por un motor de inducción con regulación de velocidad mediante un variador de frecuencia,
- Estufa para el secado de las muestras,
- Balanza digital,
- Cronómetro digital,
- Probeta (plástica) graduada de 1000 mL.



2.9.1. Características técnicas de los equipos

La serie de tamices utilizados para el análisis granulométrico de la muestra inicial y para los ensayos de Bond son mostrados en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Juego de tamices que fue seleccionado para análisis granulométrico de la muestra inicial

No.	Tamaño (mm)	No.	Tamaño (mm)	No.	Tamaño (mm)
1	13,200	6	2,000	11	0,315
2	10,000	7	1,600	12	0,250
3	9,500	8	1,000	13	0,150
4	5,000	9	0,710	14	0,075
5	3,500	10	0,400	15	-0,075

Tabla 7. Juego de tamices que fue seleccionado para análisis granulométrico para los ensayos de Bond

No.	Tamaño (mm)	No.	Tamaño (mm)	No.	Tamaño (mm)
1	4,000	6	0,710	11	0,075
2	3,500	7	0,400	12	-0,075
3	2,000	8	0,315		
4	1,600	9	0,250		
5	1,000	10	0,150		

En las figuras 7, 8, 9 se muestran los equipos fundamentales utilizados para efectuar la preparación de las muestras y los experimentos planificados, así como sus especificaciones.



Figura 7. Trituradora de mandíbulas

Longitud de la quijada -----150 mm

Boca de alimentación

Ancho ----55 mm.

Largo -----75 mm.

Boca de descarga: 6.3 mm



Figura 8. Molino de Bond

Diámetro= 0,36 m

Largo= 0,36 m

Vr= 70 rev/min

Capacidad: 120 t/h

Carga de bolas: 54 t



Figura 9. Tamizadora

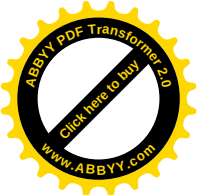
Modelo RX-29

Tipo Rotap

W.S Tyler Blvd

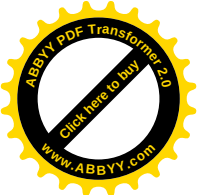
Mentor OH4460

Motor 560 kW



Conclusiones del Capítulo 2

- Se realizó el diseño de la investigación que garantiza adecuadamente el tratamiento del problema, además se describe como fueron tomadas y preparadas las muestras, aspecto considerado uno de los momentos más cuidadoso de la investigación.
- Se define el procesamiento del material de trabajo durante los experimentos, con la aplicación de técnicas y de métodos reconocidos internacionalmente, así como el empleo de equipos e instrumentos de medición en perfecto estado técnico que garantizan la calidad y la veracidad de los resultados.



CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos durante la investigación, y se tiene en cuenta el comportamiento de cada ciclo de molienda en ensayo, para la obtención del rango de variación del índice de Bond. Se establece un modelo predictivo del consumo de energía del proceso de molienda de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” para las condiciones actuales de procesamiento, determinado por la realización de pruebas cinéticas y el análisis de regresión correspondiente.

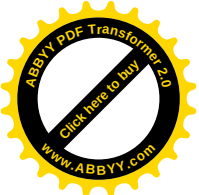
3.1. Índice de Bond a escala de laboratorio

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la determinación experimental del índice de Bond a las muestras tomadas del transportador de banda que va hacia los molinos. Como tamiz de corte se utilizó el 0,074 mm como se precisó en el capítulo anterior.

3.1.1. Análisis de los resultados obtenidos en la determinación del índice de Bond

En la tabla 8 se muestra el resultado de la caracterización granulométrica del material básico utilizado para los diferentes ensayos.

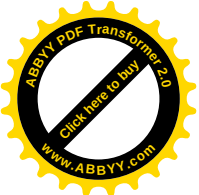
Como se aprecia, este material contiene aproximadamente un 29 % de fineza y un 17 % de componente serpentinitico apreciable a simple vista en el retenido entre 10 y 4 mm. Este comportamiento tiene su explicación por el hecho de que ha sido suprimido el material con partículas mayores de 10 mm, que antes de la colocación del tromell, llegaban a alcanzar tamaños superiores a los 40 mm, lo que elevaba la proporción serpentina-limonita por encima de lo normado en el flujo



tecnológico (25 % de la componente serpentínica y 75 % de la componente limonítica). La nueva composición se ajusta más a la norma del proceso.

Tabla 8. Caracterización granulométrica del material inicial utilizado para preparar las diferentes muestras empleadas en los ensayos de molienda

Tamiz, mm	Masa de muestras, g					Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3	4	5		
10,00	89,10	65,60	106,10	91,50	105,90	91,64	3,77
9,50	22,30	20,30	19,80	23,30	32,80	23,70	0,98
5,00	193,50	101,30	169,90	217,30	200,80	176,56	7,27
3,50	187,10	158,90	155,20	170,00	159,70	166,18	6,84
2,00	479,10	412,50	405,10	384,30	366,10	409,42	16,85
1,60	323,60	297,90	310,40	303,90	295,20	306,20	12,60
1,00	44,00	43,80	47,60	64,40	62,00	52,36	2,16
0,71	40,20	42,20	40,40	38,20	39,60	40,12	1,65
0,40	73,20	101,80	87,20	81,40	65,60	81,84	3,37
0,315	42,40	51,60	45,00	38,20	47,40	44,92	1,85
0,250	67,60	101,20	87,60	81,60	51,00	77,80	3,20
0,150	97,40	103,80	107,00	90,40	130,20	105,76	4,35
0,074	134,40	152,80	140,20	184,00	187,40	159,76	6,58
-0,074	638,80	791,60	712,70	647,50	674,20	692,96	28,53
	2432,70	2445,30	2434,2	2416,0	2417,9	2429,22	100

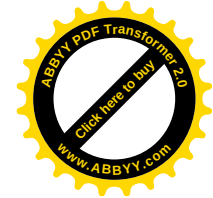
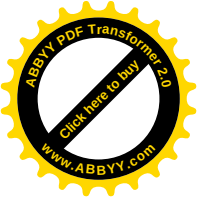


En la tabla 9 se muestran los resultados de la caracterización granulométrica del mineral natural preparado para la alimentación en los ensayos de Bond.

Tabla 9. Caracterización granulométrica del mineral natural utilizado para el ensayo de Bond

Tamiz, mm	Masa de muestra, g			Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	124,50	134,60	145,90	135,00	21,65
1,60	82,40	93,10	95,30	90,27	14,48
1,00	135,50	145,10	150,50	143,70	23,05
0,71	14,60	13,90	13,30	13,93	2,23
0,40	23,20	21,10	15,20	19,83	3,18
0,315	12,10	9,20	7,90	9,73	1,56
0,250	11,90	10,50	9,30	10,57	1,69
0,150	24,70	27,30	20,80	24,27	3,89
0,074	28,20	32,70	24,70	28,53	4,58
-0,074	135,60	150,10	157,40	147,70	23,69
	592,70	637,60	640,30	623,53	100

Puede apreciarse que el material así obtenido cumple con las exigencias de este tipo de ensayo al tener un 100 % pasante en el tamiz de 3,5 mm y menos del 28 % de la clase – 0,074 mm.



En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes ciclos de molienda, donde se utilizó un peso inicial de 954,90 g en la alimentación, equivalente a 700 cm³ de material en la probeta.

Tabla 10. Ciclos de molienda realizados para el material natural

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A moler, g		Finos producidos, g	Finos neto, g	
1	954,90	225,35	47,47	60	666,70	441,35	7,35
2	666,70	157,34	115,49	16	473,40	316,06	19,75
3	473,40	111,72	161,11	8	349,90	238,18	29,77
4	349,90	82,58	190,25	6	277,60	195,02	32,50
5	277,60	65,51	207,32	6	319,20	253,69	42,28
6	319,20	75,33	197,5	5	240,40	165,07	33,01

En la tabla 11 se muestra la caracterización granulométrica del material predominantemente serpentinitico utilizado para el ensayo de Bond y en la tabla 12 los resultados de los ciclos de molienda.

Tabla 11. Caracterización granulométrica del mineral predominantemente serpentinitico utilizado para el ensayo de Bond.

Tamiz, mm	Masa de muestra, g			Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0

Tamiz, mm	Masa de muestra, g			Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3		
2,00	221,30	209,50	220,80	217,20	32,20
1,60	89,60	85,50	93,50	89,53	13,27
1,00	99,50	97,40	95,70	97,53	14,46
0,71	43,10	45,50	44,20	44,27	6,56
0,57	24,50	27,30	25,00	25,60	3,79
0,40	20,90	19,30	19,00	19,73	2,93
0,315	17,90	17,70	17,60	17,73	2,63
0,250	12,70	15,10	12,60	13,47	2,00
0,150	25,10	23,80	23,40	24,10	3,57
0,074	25,90	26,40	29,30	27,20	4,03
-0,074	107,10	98,30	89,40	98,27	14,57
	687,60	665,80	670,5	674,63	100

Tabla 12. Ciclos en el ensayo de Bond para el material predominantemente serpentínico.

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A moler, g		Finos producidos, g	Finos neto, g	
1	1046,00	152,30	146,50	60	377,10	224,80	3,75
2	377,10	54,90	243,95	65	191,30	136,40	2,09

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A moler, g		Finos producidos, g	Finos neto, g	
3	191,30	27,85	271,00	130	245,10	217,30	1,67
4	245,10	35,69	263,20	158	450,50	414,81	2,62

En las tablas 13 y 14 se exponen los resultados de la caracterización granulométrica y de los ciclos de molienda del mineral con características predominantemente limoníticas, respectivamente.

Tabla 13. Caracterización granulométrica del mineral predominantemente limonítico utilizado para el ensayo de Bond

Tamiz, mm	Masa de muestra, g			Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	133,20	192,00	152,10	159,10	23,39
1,60	77,00	106,60	103,70	95,77	14,08
1,00	130,60	174,60	169,0	158,07	23,24
0,71	6,30	9,40	9,60	8,43	1,24
0,57	6,10	6,50	6,00	6,20	0,91
0,40	5,90	7,70	6,60	6,73	0,99
0,315	5,20	7,10	6,80	6,37	0,94

Tamiz, mm	Masa de muestra, g			Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3		
0,250	12,10	12,90	19,90	14,97	2,20
0,150	14,30	19,60	16,00	16,63	2,45
0,074	26,70	42,00	43,90	37,53	5,52
-0,074	139,00	185,40	186,90	170,43	25,06
	556,40	763,80	720,5	680,23	100

Tabla 14. Ciclos en el ensayo de Bond para el material predominantemente limonítico

No. Ciclo	Peso de la Carga Fresca	Pasante en 0,074 mm		No. de revoluciones	Pasante en 0,074 mm en el Producto		Gbp, g/rev
		Alimentado, g	A moler, g		Fino producidos, g	Fino neto, g	
1	925,80	232,00	32,50	50	679,30	447,30	8,95
2	679,30	170,20	94,30	10	516,50	346,30	34,63
3	516,50	129,43	135,06	3,9	389,70	260,27	66,74
4	389,70	97,66	166,84	2,5	335,60	237,94	95,18
5	335,60	84,10	180,40	2	334,90	250,80	125,40
6	334,90	83,92	180,60	1	270,50	186,58	186,58
7	270,50	67,79	196,71	1	236,20	168,41	168,40

En la tabla 15 se puede apreciar los resultados obtenidos en la determinación del índice de Bond para los tres tipos de materiales ensayados.

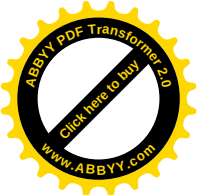


Tabla 15. Resultados de la determinación del índice de Bond para los tres tipos de materiales ensayados.

Material	F ₈₀ , μm	P ₈₀ , μm	G _{bp} , g/rev	w _i , kWh/t	W, kWh/t
Natural	2 320	1 595	36,00	4,00	5,40
Serpentinítico	2 614	528	2,14	18,10	24,40
Limonítico	3 514	2 000	177,50	2,50	3,40

Los resultados se corresponden con estudios realizados anteriormente (Laborde, 2005). El material natural ensayado corresponde a una mezcla cuya composición es cercana a 24 % de serpentina y 76 % de limonita, valor que puede considerarse como la composición del material que actualmente se está procesando a escala industrial para el cual corresponde un consumo específico de energía aproximadamente de 5,4 kWh/t.

En trabajos posteriores debe definirse la tendencia de variación de la composición del material que se mueve entre los extremos del material predominantemente serpentinitico y predominantemente limonítico, con respecto a la composición del material que aquí hemos llamado natural, de modo que pueda obtenerse un intervalo más pequeño y más preciso de variación del consumo específico de energía de los molinos.

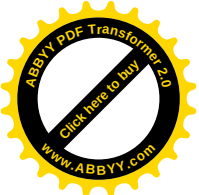
Debe significarse que para los casos extremos, es decir para el mineral predominantemente limonítico y serpentinitico, la industria no debe operar bajo estas condiciones en ninguna circunstancia, aunque el valor del índice de Bond obtenido para el mineral denominado natural en este trabajo (con relación limonita/serpentina similares al de la industria), permite afirmar que se puede lograr un ahorro significativo de energía durante el proceso de molienda, pues actualmente el consumo de una unidad de molienda de la Empresa Ernesto Che Guevara está en el rango de 13,33 a 13,77 kWh/t.

3.2. Resultados obtenidos durante la determinación de los parámetros del modelo cinético acumulativo para el material natural

En la tabla 16 se puede apreciar la composición granulométrica del material preparado para realizar los ensayos de molienda a partir de los cuales se determinan los parámetros del modelo cinético acumulativo.

Tabla 16. Caracterización granulométrica del mineral natural utilizado para el ensayo del modelo cinético acumulativo

Tamiz, mm	Masa de muestra, g			Promedio masa de muestra, g	Retenido, %
	1	2	3		
4,00	0	0	0	0	0
3,50	0	0	0	0	0
2,00	151,40	152,60	155,2	153,07	23,79
1,60	99,10	100,80	103,05	100,98	15,70
1,00	152,80	152,30	156,9	154,00	23,94
0,71	12,40	11,10	13,8	12,43	1,93
0,57	9,90	11,30	9,3	10,17	1,58
0,40	8,60	7,80	10,6	9,00	1,40
0,315	10,80	12,80	12,6	12,07	1,88
0,250	17,70	19,00	11,7	16,13	2,51
0,150	20,80	14,60	19,6	18,33	2,85
0,075	36,10	31,60	34,5	34,07	5,29
-0,075	127,20	115,60	126,65	123,15	19,14
	646,80	629,50	653,90	643,40	100



En la tabla 17 se exponen los resultados de los ciclos de molienda para los diferentes tiempos.

Tabla 17. Resultados de los ciclos de molienda para la determinación de los parámetros del modelo cinético.

Diámetro, μm	Tiempo, min			
	0	0,5	1	1,5
	Masa de muestra, g			
4000	0,00	0,00	0,00	0,00
3500	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	153,07	48,37	33,63	25,63
1600	100,98	23,80	15,47	11,95
1000	154,00	42,90	20,03	14,40
710	12,43	14,83	13,13	10,10
570	10,17	15,00	15,10	9,80
400	9,00	20,63	18,60	12,10
315	12,07	20,27	19,73	15,53
250	16,13	35,37	30,77	15,80
150	18,33	45,67	53,97	34,50
75	34,07	85,10	85,00	46,20
-75	123,15	603,07	649,57	758,98

A partir de los resultados anteriores se obtuvo para cada tamaño una regresión, como se observa en la figura 10, donde se ilustra el resultado obtenido para el tamaño correspondiente a 1000 μm .

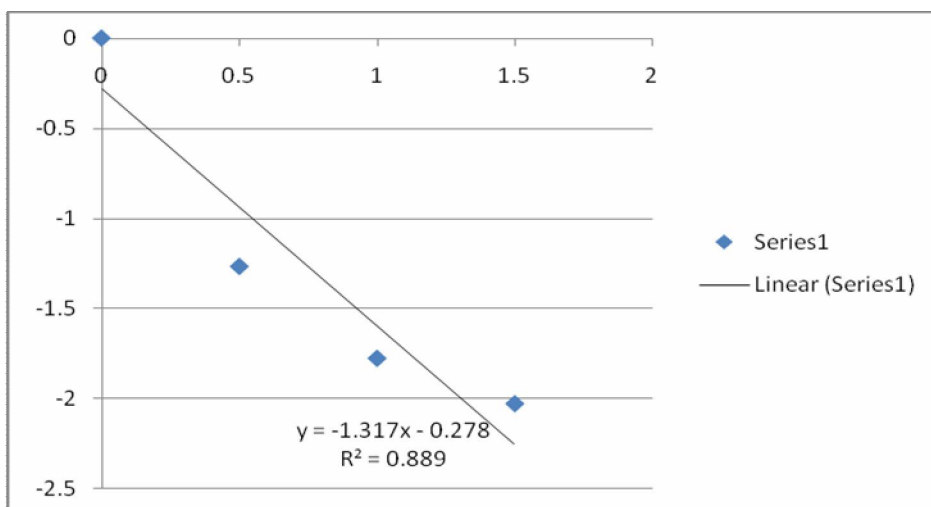


Figura 10. Ecuación de regresión para el tamaño correspondiente a las 1000 μm .

Los resultados que se muestran en el gráfico son semejantes a los obtenidos por Laborde (2005) para este tipo de material. Después de obtener mediante este procedimiento todos los valores de k (coeficiente de x , en la ecuación de regresión que aparece en el figura 10), correspondientes a cada tamaño, se obtuvo la regresión que se muestra en la figura 11, donde $n = 0,4496$ y $\ln C = 2,7906$

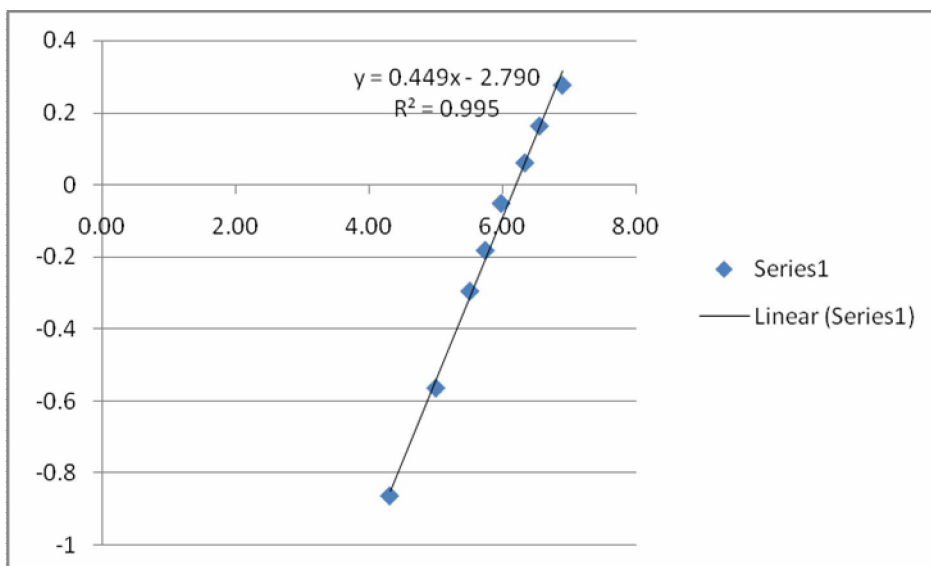
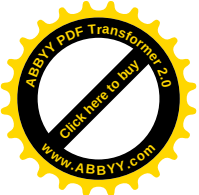


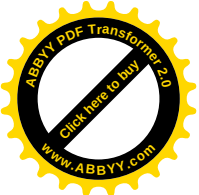
Figura 11. Ecuación de regresión para determinar finalmente los parámetros del modelo cinético acumulativo correspondiente al material natural.



De modo que el modelo cinético acumulativo para el material natural, queda expresado según la ecuación 10.

$$W(x, t) = W(x, t_0) e^{-163x^{0,449}t} \quad (10)$$

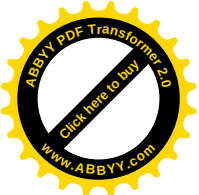
Con este modelo se puede realizar la simulación de la molienda del mineral a la escala industrial y realizar comprobaciones del índice de Bond.



CONCLUSIONES

Una vez analizados y discutidos los resultados se concluye que:

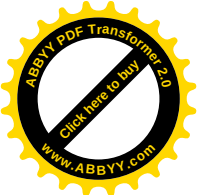
- El consumo específico de energía en los molinos de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, debe fluctuar entre 3,4 y 24,4 kWh/t para composiciones extremas del material a moler y debe presentar un valor aproximado de 5,4 kWh/t como valor promedio para el material que se procesa actualmente.
- El modelo cinético acumulativo obtenido permite realizar la simulación del proceso de molienda a escala industrial bajo las condiciones actuales de operación, los parámetros del modelo son: $n = 0,449$; $C = 16,3$.



RECOMENDACIONES

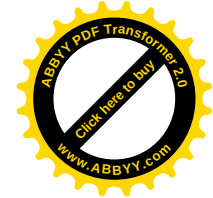
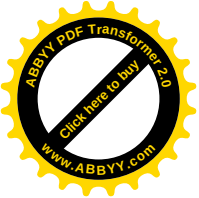
A partir de los resultados del índice de Bond y del modelo cinético acumulativo se recomienda:

- Validar el modelo cinético acumulativo a escala industrial que permita la comprobación del índice de Bond.

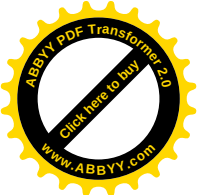


BIBLIOGRAFÍA

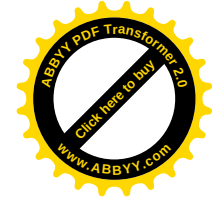
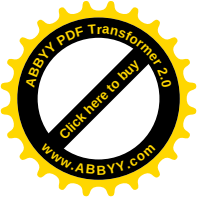
- AKSANI. B. y SONMEZ B. 2000: Simulation of Bond grindability test by using cumulative based kinetic model. Minerals Engineering,. Vol 13. No 6. pp 673-677.
- ALDANA et al. 2004: Determinación del índice de trabajo del mineral de futura explotación índice de Bond. Informe Técnico Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".
- ALDANA S. EUGENIO Y LEGRÁ L. ANGEL. 1996: Optimización de la productividad y la fineza de la molienda en la planta de preparación de minerales de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Centro de Investigación de la Laterita, Moa, Holguín.
- ÁLVAREZ R. Y. 2011: Determinación empírico-teórico de la energía requerida para el desmenuzamiento de las menas lateríticas en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Laborde. B, R, Legra Legra, Á, Rodríguez B G (tutores) Tesis de diploma. ISMM. 58 p.
- AUSTIN, L. G. 1973. "A comentary on Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. Powder Technology,. Vol 7, p 315-317
- AUSTIN. L. G. y BRAME, K. 1983: A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size mass balance simulation model. Powder Technology, 34 ; 261-274.
- BICO (Braun International Co.), Manual de operación del molino de bolas estándar de Bond, 1999.



- BOND F. C. 1952: "Third Theory of Comminution", Min. Eng. Trans. AIME, 193 484-494
- BOND, F. C. 1961: "Crushing and Grinding Calculations", Allis Chalmers Manufacturing Co., Milwaukee, Wisconsin.
- COELLO V. A et al 2006. Implementation of energy sustainability concepts during the comminution process of the Punta Gorda nickel ore plant (Cuba).
- COELLO V. A et al 2007: Grindability of lateritic nickel ores in Cuba Instituto Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa ISMM, Cuba.
- COELLO V. A y N. TIJONOV O. 2001: Molienda de minerales multicomponentes: modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía, en la Revista Minería- Geología V: XVII, No. 3 y 4. 49-53 pp.
- COELLO V. A. 1993 a. Consideraciones sobre la molienda seca de minerales lateríticos. Minería y Geología, XIII (2); 57-60.
- COELLO V. A. et al. 2006: Process models for simulation of Bond tests Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C) Vol. 115 No. 25.
- COELLO V. A. L. 1993: Mejoramiento de la tecnología de la molienda seca de la laterita. Tijonov (Tutor). Tesis de doctorado. Instituto de Minas de San Petersburgo, Rusia.
- DEISTER, R. J. 1987: How to determine the Bond work index using the lab ball mill gridability test. COMJ.
- LABORDE B, R et al, 2000: Productividad y eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico, en la Revista de Minería–Geología Vol.17 No 2. Coello.
- LABORDE B. R. 2004: Diagnóstico energético en el proceso de molienda de la laterita, en la revista minería - geología, ISSN 0258 5979, No. 3 y 4.



- LABORDE B. R., COELLO A.; RAMÍREZ S y ANGULO O. 2004: Diagnóstico energético del proceso de molienda de la laterita. Minería y Geología Vol XIX, No. 3 – 4.
- LAFARGUE B. U. 2005: Análisis del comportamiento del consumo específico de energía en el proceso de molienda de minerales lateríticos en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Laborde Brown R. (tutor). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 83 p.
- LAPLANTE, A.R.; PRASAD, U.; MCIVOR, R.E. y FINCH, J.A. 1993: "Error Analysis for Bond Work Index Determinations. Part 2: A Phenomenological Basis for the Analysis of Systematic Errors for the Rod Mill Test", Miner. Eng., 6 (5) 509-521.
- LEDESMA P. L. 2008: Influencia del beneficio en la productividad del proceso de molienda de la laterita en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Almenares Reyes, R S, Legra Legra, Á, Estenoz Mejías S (tutores). Trabajo de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 73 p.
- LEVIN, J. 1990: Observations on the Bond standard grindability test for the fine materials. Mineral and Metallurgical Processing, Vol 89, No 1, pp. 13-21.
- LEVIN, J. 1989: Observations on the Bond Standard Grindability Test, and a Proposal for a Standard Grindability Test for Fine Materials, J: S. Afr. Inst. Min. Metall, 89 (1) 13-2.
- LEWIS, K. A.; M. PEARL y P. TUCKER. 1990: Computer Simulation of the Bond grindability test. Minerals Engineering, Vol 3, No. 1, pp. 199-206.
- LLORENTE L. A. 2003. Proyección para el incremento de la productividad hasta 50 000 t de níquel más cobalto en la instalación de molienda de la empresa 'Cmdte Ernesto Che Guevara'. Alfredo Coello Velázquez (Tutor). Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico.



- LÓPEZ F et al, 1988: Determinación de los parámetros energéticos en un proceso de molienda de los minerales lateríticos, en la Revista de Metalurgia Vol. 24 No 4.
- MITROFÁNOV, S. I. 1982: Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú, Editorial Mir. 435 p.
- MOSHER, J. B. y TAGUE C. B. 2001: Conduct and precision of Bond grindability testing. Minerals Engineering. Vol 14, No. 10.
- NÚÑEZ G. Y. y PÉREZ G. S. 2003: Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda. Alfredo Coello Velázquez (Tutor). Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- REINA L. Y 2004: Determinación del índice de trabajo o de Bond para los minerales lateríticos. Beyris Mazar, P.E; Laborde Brown R. (tutores) Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 66 p.
- ROWLAND, C.A. 1998: "Using the Bond work index to measure operating comminution efficiency", Min. and Met. Proc., 15, 4, 32-36.
- SCHÖNERT, K. 1979: "Aspects of the physics of breakage relevant to Conminution", Proc. 4th Tewksbury Symp. Fracture, 17-18 Feb., University of Melbourne, Australia, 3:1-3:30.
- SUÁREZ G. B. y FUENTES .T. Y 2004: Influencia del régimen de operaciones en el proceso de molienda de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Laborde Brown; R (tutor) Trabajo de Diploma. ISMM. 90 p.
- YAP, R.F.; SEPÚLVEDA, J. L. y JAUREGUI, R.1982: Determination of the Bond Work Index using an ordinary batch ball mill, SME 1st Int. Fall Meeting, Symp. On Design and Installation of conminution circuits, Honolulu, Hawai. 4-9 de septiembre.