



**MINISTERIO DE EDUCACION
SUPERIOR**

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA “Dr. ANTONIO
NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD METALURGIA-
ELECTROMECAÁNICA**

**Consumo Energético de la molienda del mineral
laterítico con carbón bituminoso aditivo.**

Autora: Marianna Torres Guzmán.

Tutores: Dr. C Alfredo L Coello Velázquez.

Ing. Ángel Legrá Legrá

Moa, 2017



**MINISTERIO DE EDUCACION
SUPERIOR**

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALÚRGICO DE MOA “Dr. ANTONIO
NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD METALURGIA-
ELECTROMECAÁNICA**

**Consumo Energético de la molienda del mineral
laterítico con carbón bituminoso aditivo.**

Para Optar por el Título de: Ingeniera Metalúrgica

Autora: Marianna Torres Guzmán.

Firma_____

Tutores: Dr. C Alfredo L Coello Velázquez.

Firma _____

Ing. Ángel Legrá Legrá

Firma _____

Moa, 2017



Declaración de Autoría:

Yo: Marianna Torres Guzmán

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

Marianna Torres Guzmán _____ Dr. C Alfredo L Coello Velázquez _____

Pensamiento

“Tu meta más difícil, puede ser tu mayor triunfo”

Autor: Josh McDowell

Dedicatoria

Dedico mi trabajo de diploma que me acredita como una futura profesional en primer lugar:

A mi DIOS todopoderoso, que me guía en todas las decisiones de mi vida.

A mis padres y a mis dos hermanas, por su amor y apoyo incondicional.

A mi tutor Alfredo L Coello Velázquez por su dedicación y paciencia.

A mi familia que siempre han estado apoyándome.

A mis profesores, amigos (John, Yaine, Yennis, Jose Ángel) y compañeros de aula que me han brindado su mano amiga a lo largo de estos 5 años de la carrera.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente siempre estuvieron apoyándome a lo largo de mi carrera.

Agradecimientos

Primero a Dios, por darme las fuerzas y la capacidad para llegar a la meta final.

A mis padres por darme la vida y así formarme como un profesional.

A nuestra grandiosa revolución que nos da la posibilidad para la formación como futuros profesionales.

A mi tutor Alfredo L Coello Velázquez por convertirse en mi mentor, la persona que a lo largo de mi carrera me enseñó a dar pasos firmes y a formarme como una buena ingeniera.

A: Hugo José Angulo, Ángel Legrá, José Gutiérrez, quienes me brindaron ayuda incondicional para realizar este trabajo y quedara impregnado en mi la base de su experiencia.

A mis compañeros de aula y amistades por su colaboración a lo largo de la carrera.

A nuestro Comandante en jefe Fidel Castro y a esta revolución tan hermosa por darme la oportunidad para formarme con una educación gratuita.

Muchas gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo se determinó el efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el consumo energético de los molinos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Para ello se tomaron muestras de mineral, las cuales fueron extraídas de la Muestra Tecnológica (MT) con la participación de tres yacimientos: Camarioca Este (CE), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Sur (YS). Se realizaron pruebas con diferentes porcentos de carbón bituminoso con mineral laterítico que fueron sometidos al ensayo estándar de Bond para la determinación del consumo energético. La distribución granulométrica de la laterita utilizada en la investigación obedece a la ecuación Rosin-Ramler con un error de estimación de 3,05 % y una magnitud del coeficiente de determinación de 0,66. Mientras que en el caso del carbón bituminoso, la distribución de tamaño se ajusta al modelo de Gaudin-Schumann con un error de estimación de 0,47 %. La adición del carbón bituminoso en la molienda del mineral laterítico tiene un efecto significativo en el consumo energético del molino. El aumento del contenido de carbón en el mineral laterítico, aumenta el consumo energético en 3 kW-h/t como promedio. La sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el ensayo de 3,5- 4,5 % de la masa interior de mineral laterítico en el molino, no genera incremento alguno del consumo energético.

Palabras clave: Carbón bituminoso, petróleo aditivo, mineral laterítico.

ABSTRACT

In the present work the effect of the substitution of the petroleum additive by the bituminous coal in the energy consumption of the mills of the Company Ernesto Che Guevara was determined. For this purpose, mineral samples were taken, which were extracted from the Technological Sample (MT) with the participation of three deposits: Camarioca Este (CE), Yagrumaje Norte (YN) and Yagrumaje Sur (YS). Tests were carried out with different percentages of bituminous coal with laterite mineral that were submitted to the standard Bond test for the determination of energy consumption. The granulometric distribution of the laterite used in the investigation obeys the Rosin-Ramler equation with an error of estimation of 3,05 % and a magnitude of the determination coefficient of 0,66. While in the case of bituminous coal, the size distribution conforms to the Gaudin-Schumann model with an estimation error of 0,47 %. The addition of bituminous coal in the grinding of the laterite mineral has a significant effect on the energy consumption of the mill. The increase in carbon content in the lateritic ore increases energy consumption by 3 kW-h / t on average. The substitution of the bituminous coal additive oil in the test of 3,5-4,5 % of the internal mass of lateritic ore in the mill does not generate any increase in energy consumption.

Key words: Bituminous coal, petroleum additive, lateritic mineral.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Aspectos generales sobre la molienda de minerales.....	4
1.2 Fundamentos teóricos de la molienda de minerales.....	6
1.3 Molienda de mezclas minerales.....	8
1.4 Antecedentes de la presente investigación.....	10
1.5 Generalidades sobre el carbón bituminoso y sus propiedades.....	12
1.6 Uso y aplicaciones del carbón bituminoso.....	13
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	15
2.1 Materiales y equipos utilizados en el trabajo.....	15
2.1.1 Materiales	15
2.1.2 Mineral Laterítico	16
2.1.3 Carbón bituminoso.....	17
2.1.4 Petróleo tecnológico	17
2.2 Métodos, procedimientos y técnicas	18
2.2.1 Procedimiento para la conformación y preparación del mineral laterítico utilizado.....	18
2.2.2 Procedimiento para la preparación del carbón bituminoso utilizado.....	19
2.2.3 Procedimiento estándar para la determinación del índice de Bond.....	19
2.3 Procedimientos para la toma y preparación de la muestra	23
2.4 Procedimiento para la determinación de la composición granulométrica de los materiales.....	25
2.5 Procedimiento para el tamizado por vía húmeda.....	26
2.6 Equipos utilizados para el desarrollo de la investigación	27

2.7 Características técnicas de los equipos	27
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1. Resultados de los análisis granulométricos	30
3.2 Resultados de la determinación del Índice de Bond.	33
3.3 Influencia del contenido de carbón bituminoso sobre el Índice de Bond de la molienda de las lateritas.	37
3.4 Consideraciones ambientales del estudio	38
CONCLUSIONES.....	40
BIBLIOGRAFÍA	41
RECOMENDACIONES	44
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La crisis económica mundial ha incitado a generar ideas que permitan introducir nuevas prácticas industriales con el fin de adecuar los recursos de las empresas en un mundo moderno considerablemente dinámico y competitivo, en función de reducir los costos.

La industria metalúrgica requiere de tecnologías y materias primas que generan altos desembolsos y producciones de alto valor agregado a bajo costo. El empleo de combustibles más baratos ha sido una de las principales estrategias para responder a la problemática (Pérez, 2012).

Los yacimientos lateríticos constituyen la materia prima para la obtención de Níquel más Cobalto. En Cuba se concentran reservas importantes, que ubica al país en el 4to lugar a nivel mundial de exportación de estos metales (Coello, 2009). Las producciones mundiales obligan a incrementar el control del proceso metalúrgico para poder competir en el mercado internacional con productos de alta calidad.

El carbón se muestra como una alternativa interesante a evaluar en la tecnología carbonato amoniacal, particularmente, el empleo del carbón bituminoso en la industria de níquel como agente reductor pasa por la evaluación de su molienda en bolas como una variante tecnológica en su preparación (Namindo, 2015).

El proceso de molienda de minerales es una de las operaciones que genera mayores costos desde el punto de vista energético (Coello, 1999). El petróleo aditivo genera un grupo de efectos negativos en la molienda seca del mineral laterítico (Coello, 2009) muy particularmente en la productividad del molino (Coello, 2009; Llorente, 2003) y en el régimen aerodinámico a costa de las incrustaciones de las tuberías, estas reducen su diámetro con su constante incremento de la variación de la velocidad (Coello, 2009; Llorente, 2003). Es por esta razón que resulta importante determinar efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el consumo energético de los molinos, lo cual puede ser una alternativa que conlleve a una futura solución en el proceso CARON.

Situación problémica:

Necesidad de determinar el efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el consumo energético de los molinos.

Problema:

Desconocimiento del efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el comportamiento energético en la molienda del mineral laterítico.

Objeto de estudio:

Proceso de molienda de las lateritas con carbón aditivo.

Objetivo general:

Determinar el efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el consumo energético de la molienda del mineral laterítico que se alimenta en la planta Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos:

- ❖ Caracterizar granulométricamente el carbón bituminoso y el mineral laterítico.
- ❖ Determinar el efecto de la adición a diferentes niveles de carbón bituminoso en el consumo energético de la molienda de las lateritas

Hipótesis:

La evaluación del efecto de la adición del carbón bituminoso sobre el consumo energético de la molienda de las lateritas, permitirá establecer el efecto de la sustitución del petróleo en la energía consumida en los molinos.

Metodología de la investigación:

Para la fundamentación de la investigación fue utilizado el método teórico, particularmente el método histórico- lógico.

En el análisis de los resultados fueron empleados el análisis y la síntesis, la inducción y deducción. En el desarrollo experimental fueron empleados los procedimientos propios de la disciplina.

Obtenida la información bibliográfica, se caracteriza y se somete a un proceso de molienda individual el carbón bituminoso y el mineral laterítico con el uso de un

molino de bola a escala de banco. La evaluación energética del efecto de la sustitución se realizó empleando el procedimiento estándar de Bond.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos del trabajo. Con especial énfasis se tratan los fundamentos teóricos de la molienda de minerales y las particularidades de la molienda en bolas. También se presentan un análisis de los trabajos precedentes y un resumen de las generalidades sobre el carbón bituminoso y el mineral laterítico de los yacimientos de Camarioca Este (CE), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Sur (YS).

1.1 Aspectos generales sobre la molienda de minerales.

La molienda, como operación unitaria, ocupa un lugar importante en un grupo numeroso de industrias tales como, el procesamiento de minerales, la industria del cemento, la cerámica y en la industria química y farmacéutica (Fuerstenau et al., 2011).

La molienda es la última operación de preparación mecánica, es una operación unitaria que reduce el tamaño de las partículas de una muestra sólida hasta la granulometría final deseada. Este proceso ocurre cuando la energía de fragmentación supera la energía de cohesión interna de las partículas. Esta se puede llevar a cabo por vía seca o húmeda (Wills y Napier-Munm, 2006).

Sin ignorar que es una operación de alto consumo de energía (Laborde et al., 2000), la molienda es ampliamente utilizada en la minería, la metalurgia, el procesamiento de minerales, la industria del cemento y la construcción y la industria química entre otros.

Los objetivos básicos de la molienda de minerales están relacionados con la liberación del componente útil del estéril y el aumento de la superficie de contacto (Coello, 1999).

La molienda se lleva a cabo en equipos especiales denominados molinos. Su rendimiento depende del material a procesar, del grosor del producto molido y el grado de molibilidad del mineral, de la construcción del molino, de sus dimensiones, de la forma del revestimiento, como también de las condiciones de explotación del molino, los molinos pueden trabajar en ciclo cerrado o abierto (Andreev et al., 1980)

En la molienda de minerales, el tambor del molino, se llena aproximadamente hasta la mitad del volumen interior con los elementos moledores (Andreev et al., 1980). Durante la rotación del tambor, los elementos moledores, gracias a la fricción, se elevan hasta la altura que corresponde al equilibrio dinámico y caen en forma de parábola, o se deslizan hacia abajo en forma de capas. La magnitud del elevamiento que sufren los medios de molienda depende de la velocidad de rotación del molino y del tipo de revestimiento del molino.

A velocidades relativamente bajas o con revestimientos lisos, los medios de molienda tienden a rodar hacia el pie del molino y la conminución que ocurre es principalmente abrasiva. La caída en cascada produce una molienda más fina, con gran producción de polvo y aumento del desgaste del revestimiento. A velocidades mayores los cuerpos de molienda son proyectados sobre la carga para describir una serie de parábolas antes de aterrizar en el “pie” de la carga (Andreev et al., 1980)

La caída en catarata produce disminución por impacto y un producto más grueso con menos desgaste del revestimiento. Los molinos se caracterizan por las dimensiones del diámetro interior y el largo del tambor. La carga de bolas, es uno de los factores que influyen de forma considerable en el proceso de molienda ya que define el área superficial de los medios moledores. El trabajo efectivo del molino de bolas requiere que la carga de bolas contenga bastante cantidad no sólo de las bolas grandes para triturar pedazos grandes del material, sino también de las bolas de tamaño medio y pequeñas para el rompimiento de granos pequeños (Wills y Finch, 2016).

1.2 Fundamentos teóricos de la molienda de minerales

Por más de un siglo los fenómenos de reducción de tamaño se han abordado a través de la energía consumida por los equipos de trituración y molienda (Coello y Tikjonov, 2001). La práctica mundial ha demostrado que en las plantas de beneficio más de 50-70 % del consumo de energía corresponde a los procesos de preparación mecánica de minerales (Andreev, et al., 1980).

Austin (1964) establece que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera el 3 % de toda la energía consumida por el molino; por su parte, Beke (1964) determina que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no sobrepasa 0,6 %.

Las primeras investigaciones referidas a esta temática (Rittinger, 1867; Kick, 1883), estuvieron dirigidas a una mejor comprensión de los fenómenos que tienen lugar en la molienda; estos investigadores defendieron la posición de explicar la molienda de minerales desde la relación energía-reducción de tamaño.

Bond (1952), concluyó que el trabajo necesario para romper un cubo de lado d es proporcional al volumen d^3 de dicho cubo; pero al formarse la primera grieta, la energía fluye a las nuevas superficies resultantes, que serán proporcionales a d^2 . Juzgando la teoría de Rittinger, plantea la incorrecta comprensión del término de energía útil expuesta por los investigadores que le precedieron. Rittinger considera que toda la energía consumida en la molienda se aprovecha en la formación de las nuevas superficies (Coello y Tikjonov, 2001).

Bond (1960) expone los tres principios básicos de su teoría. El modelo de Bond es el siguiente:

$$W = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \quad (1)$$

Donde:

W: consumo energético específico, en kWh/t;

d_{80} y D_{80} : tamaños que dan un pasante del 80 % en producto y alimentación respectivamente, expresado en micras.

Wi: 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 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 (1952), si el material se comportara de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso que es muy habitual) el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las etapas sucesivas de conminución.

Pero la realidad es que los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura, se puede hablar normalmente de un grano natural, de forma que el comportamiento de ese material en molienda superiores nos daría valores del índice de trabajo inferiores, que en el caso de realizar la molienda inferior 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 dirigirá 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.

La eficacia de la operación estará influenciada enormemente por las características de la máquina. 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 laboratorios, 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, es por esto que es recomendable que la

determinación del índice de trabajo se realice lo más cerca posible del tamaño requerido de molienda industrial.

El índice de Bond proporciona una primera estimación del consumo real de energía necesaria para triturar o moler material en un determinado equipo a escala industrial (error promedio $\pm 20\%$). Sin embargo, debido a su simplicidad, este procedimiento se utiliza con asiduidad para el dimensionado de trituradoras, molinos de barras y bolas, tanto a escala piloto como industrial.

Más abajo se brindan las principales definiciones del índice de trabajo o de Bond:

1. Es el consumo energético específico (kWh/t) necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras.
2. El índice de Bond (o índice de trabajo), mide la resistencia del material ante operaciones de fragmentación. Sería constante para un material homogéneo en composición y estructura; en general variará con el tamaño.
3. Índice de trabajo operacional: resultado del cociente entre el consumo medido en planta para una cantidad dada. Sería el valor idóneo para el diseño del circuito, pero sólo es conocido a posteriori. Puede considerarse medida de eficacia de operación la comparación entre el índice de trabajo obtenido en el laboratorio y el calculado en la planta.

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

1.3 Molienda de mezclas minerales

El primer informe conocido sobre el estudio de mezclas binarias de minerales de diferente dureza es el antes mencionado de Holmes y Paching (1957). Estudiando la molienda seca de cuarzo y caliza, llegaron a la conclusión que las distribuciones granulométricas de los productos de la molienda de las mezclas son prácticamente

iguales a los productos molidos obtenidos en la molienda por separado de los minerales.

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

Tanaka (1966) estableció que las curvas de superficie específica de los productos molidos de las mezclas de cuarzo y dolomita se ubican centralmente entre las curvas de la superficie específica de estos minerales molidos por separado. El científico indio Kapur, a partir de molienda de cuarzo y caliza, llegó a la conclusión de que el módulo de distribución se mantiene constante con independencia del modo de molienda y que la energía consumida en la molienda en bola, se distribuye proporcional al contenido de los constituyentes en las mezclas (Bilenko, 1984).

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

Para los minerales lateríticos cubanos, Coello-Velázquez et al., (2008) establece que las funciones de selección y de distribución de fractura de las mezclas minerales se ubican centralmente entre las funciones de selección y de distribución de fractura de los minerales molidos por separado. En este mismo trabajo, el autor determina la influencia del contenido de los minerales constituyentes de la mezclas en el consumo

energético del molino. Así llega a la conclusión de que en la medida que aumenta el contenido del mineral constituyente más duro, mayor es la magnitud del índice Bond.

1.4 Antecedentes de la presente investigación

En el estudio de molienda algunos investigadores se han dirigido a profundizar los fenómenos físicos y químicos en los minerales laterítico, entre los que se puede mencionar a Coello y Falcón, (1991) que estudian la molienda por la vía seca y ofrecen resultados sobre la agregación y desintegración de conglomerados, además de 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 factor determinante en los consumos energéticos en la molienda de mineral laterítico es la carga de bola, seguido del régimen aerodinámico y el ángulo de inclinación de las puertas del separador de aire, demostrado por Coello (1993b), a escala de laboratorio, semi-industrial e industrial, por tanto 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, Coello (1993a).

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 Tijonov, que derivan en uno nuevo para la valoración de la energía en la molienda de minerales multicomponentes. El modelo propuesto no sólo permite la determinación del consumo de energía de cada componente de la mezcla mineral en su molienda conjunta, sino también los flujos energéticos de cada clase de tamaño de cada componente de la mezcla. 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.

Laborde et al. (2004), realizan 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.

Núñez y Pérez (2003), realizan un estudio obteniendo un modelo matricial que caracteriza el comportamiento de la molibilidad del material, basándose en la cinética de molienda en los minerales lateríticos, para la fragmentación.

Coello et al. (2008) demuestra la influencia de las mezclas lateríticas de limonitas y serpentinitas de la velocidad de la molienda de cada uno estas fracciones molidas por separado y en su conjunto, confirma las afirmaciones de Coello (1993) sobre la conservación de la regularidades individuales de las fracciones constituyentes de la mena laterítica en la molienda de sus mezclas utilizando con indicadores de la molienda las funciones de distribución de la fragmentación y de selección.

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

En el trabajo de Liubert (2016), apoyándose en las funciones de fragmentación y de selección, realiza una evaluación de la molibilidad de las mezclas de carbón bituminoso y el mineral laterítico. A juzgar por los resultados, la molibilidad de las mezclas se ve notablemente afectada por el contenido de carbón bituminoso en ellas. El incremento del contenido de carbón bituminoso en la mezcla trae consigo una disminución notable de la velocidad de molienda.

Considerando que la molienda de minerales como proceso unitario es totalmente energético (Coello y Tijonov, 2004) es de suma importancia, la evaluación de la energía consumida en la fragmentación del mineral laterítico en presencia de carbón bituminoso.

1.5 Generalidades sobre el carbón bituminoso y sus propiedades.

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

Existen diversos tipos de carbón, la clasificación general y básica es por rango o categoría, el carbón bituminoso es uno de ellos. Los principales yacimientos

explotados comercialmente del carbón bituminoso se encuentran en Estados Unidos, China y Rusia. En Cuba no existen yacimientos de este tipo de combustible, sin embargo es utilizado en el país el carbón bituminoso aunque no con fines energéticos.

La fórmula empírica del carbón bituminoso es $C_{137} H_{97} O_9 NS$ (Brian H, 2008). El carbón bituminoso es un carbón relativamente duro que contiene betún, de mejor calidad que el lignito pero peor que la antracita por el porcentaje de carbono que contiene. Suele ser de color negro, a veces marrón oscuro, presentando a menudo unas bandas bien definidas de material brillante y mate.

1.6 Uso y aplicaciones del carbón bituminoso.

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

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

Las vetas de carbón bituminoso se identifican estratigráficamente por la distintiva secuencia de bandas brillantes y oscuras. Es una roca sedimentaria orgánica formada por la compresión diagenética y sub-metamórfica de material turboso, de forma que sus componentes principales son macéral es: vitrinita, exinita, entre otros.

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

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

En todo trabajo investigativo es de gran importancia seleccionar correctamente los materiales y métodos, para garantizar su desarrollo de manera eficaz y a la vez asegurar la realidad de los resultados, en cuanto a los análisis granulométricos, la toma y preparación de las muestras, la determinación de la cinética de la molienda de la mezcla de mineral laterítico con carbón bituminoso, la determinación de los parámetros de las funciones de fragmentación, así como el tratamiento de los resultados.

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.

Los objetivos del presente capítulo son:

- Exponer los procedimientos, las técnicas y los materiales y equipos empleados en el desarrollo del presente trabajo.
- Argumentar la selección de los métodos, procedimientos y técnicas empleados en el trabajo.

2.1 Materiales y equipos utilizados en el trabajo.

2.1.1 Materiales

En el desarrollo del trabajo se emplean tres materiales: el mineral laterítico provenientes de los yacimientos Camarioca Este (CE), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Sur (YS), carbón bituminoso y el petróleo aditivo. Más abajo se describen cada uno de ellos.

2.1.2 Mineral Laterítico

El mineral laterítico utilizado para la realización de los ensayos para la determinación del Índice de Bond fue extraído de la Muestra Tecnológica (MT) conformada para la realización de la corrida de Planta Piloto (etapa 05) del Proyecto 600185: “Evaluación integral del mineral a alimentar en la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) en el 2016. En ella participaron tres yacimientos: Camarioca Este (CE), Yagrumaje Norte (YN) y Yagrumaje Sur (YS).

En la tabla 1 se muestra el porcentaje de participación de los yacimientos que participaron en la conformación de la muestra tecnológica, definido según la zona elegida para la minería hasta el 2020; así como su composición en los dos tipos fundamentales de menas.

Tabla 1. Participación de Yacimientos en la muestra tecnológica

Yacimientos	Composición de las Menas (%)		Participación de los Yacimientos (%)
	LB	SB	
CE	29,64	8,22	47,54
YN	16,78	7,99	36,72
YS	28,26	9,11	15,74
Total	74,68	25,32	100,00

LB: Limonita de balance SB: Serpentina de balance

De acuerdo con la tabla 1, la relación de LB/SB de la mezcla de los tres minerales es de 2,95, valor que se encuentra cercano al rango de diseño de la ECG, que es de una relación de LB/SB: 3/1.

En la tabla 2 se presenta el promedio de la composición química de los elementos.

Tabla 2. Composición química de los elementos y compuestos de interés presentes en el mineral laterítico.

Elementos	Ni	Co	Fe	MgO	SiO ₂
Contenido, %	1,17	0,10	42,45	2,47	7,88

Como es característico de los minerales lateríticos, el hierro, es el elemento de mayor contenido, seguido por la sílice. Estos yacimientos son ricos en cobalto y el contenido de níquel puede considerarse como medio.

2.1.3 Carbón bituminoso

El carbón bituminoso utilizado para realizar la determinación del Índice de Bond fue obtenido en la Unidad de Proyectos de Nicaro perteneciente al Centro de Investigaciones del níquel. La misma corresponde a las muestras que fueron utilizadas en las pruebas de banco para el Proyecto Ferroníquel. En la tabla 3 se presentan los resultados promedios de análisis químico y valor calórico, reportados por los laboratorios de la ECG y de AXINOC de las Tunas.

Tabla 3. Resultados de análisis químico y valor calórico promedio del carbón bituminoso.

Contenido de los elementos, %		Valor Calórico, kcal/kg
Carbón	Azufre	
73,40	0,70	7497,53

2.1.4 Petróleo tecnológico

El petróleo tecnológico que se empleó para realizar los experimentos de Índice de Bond presenta características similares, al empleado en los secaderos y hornos de reducción de la ECG, el mismo se obtiene de la tubería retorno de la bomba de suministro combustible a los quemadores del horno de reducción de la planta piloto de Moa, perteneciente al Centro de investigaciones. En el anexo 3, Tabla 38, se

muestra el reporte con las características físicas y químicas fundamentales del combustible (emitido por Economía Energética de la ECG).

2.2 Métodos, procedimientos y técnicas

Los principales métodos utilizados guardan relación con la homogeneización del mineral laterítico y la conformación de las mezclas, la preparación del carbón bituminoso y los métodos empíricos propios de la disciplina que incluye los métodos de muestro y preparación de muestras, la determinación de la distribución granulométricas de los materiales y productos y finalmente, la determinación del índice de Bond.

2.2.1 Procedimiento para la conformación y preparación del mineral laterítico utilizado.

Una vez preparada y ajustada la muestra tecnológica, se conformó una pila de aproximadamente 22 m de largo por 3,5 de alto, para la que se inició el proceso de pre-homogenización, el cual se efectuó empleando el método de formación de pilas cónicas sucesivas con la utilización de un cargador frontal marca VOLVO modelo L-120. El proceso de pre-homogenización se realizó en cinco pasos, aprovechándose en cada uno, el proceso de segregación que experimenta los tamaños mayores de partículas, con el objetivo de separar las rocas mayores de 150 mm. En la tabla 4 se presenta el efecto de homogenización para cada uno de los elementos de interés al concluir los cinco pasos de homogenización.

Tabla 4. Efecto homogenización para cada uno de los elementos de interés.

Elementos	Ni	Co	Fe	MgO	SiO₂
Efecto de homogenización (%)	92,98	93,07	95,38	89,43	91,46

Una vez concluido el proceso de homogenización, se tomaron con un cargador frontal muestras puntuales totalmente aleatorizadas de la pila de mineral pre-homogenizado, conformándose una muestra compósito de 25 a 30 toneladas aproximadamente. La muestra compósito se alimentó a la sección de Preparación de

Mineral de la Planta Piloto del CEDINIQ, donde se trituraron las fracciones mayores de 50 mm presentes en el mismo. Luego la muestra de mineral con tamaño de partícula menor a 50 mm fue expuesta a un proceso de cribado, en el que se separaron las fracciones mayores de 10 mm, porque son las fracciones de tamaños rechazadas en el proceso de Preparación del Mineral de la ECG.

El mineral laterítico con un tamaño de partícula inferior a 10 mm fue tamizado utilizando un tamiz de corte de 3,15 mm, donde las fracciones mayores de este tamaño se trituraron, con el objetivo de cumplir con las especificaciones que exige la determinación del Índice de Bond (todo el material debe presentar una granulometría menor de 3,15 mm).

Finalmente la muestra de mineral laterítico con una granulometría inferior a los 3,15 mm fue homogenizada y cuarteada utilizando los métodos tradicionales de cono y anillo y divisor tipo Rifles.

2.2.2 Procedimiento para la preparación del carbón bituminoso utilizado.

Igual que el caso del mineral laterítico, la muestra de carbón bituminoso fue tamizada utilizando un tamiz de corte de 3,15 mm, triturándose todo el material que queda por encima del tamiz antes mencionado. Una vez que el carbón alcanzó las condiciones de tamaño para la realización de los experimentos de Índice de Bond, fue homogenizado y cuarteado de manera similar como se procedió con el mineral laterítico.

2.2.3 Procedimiento estándar para la determinación del índice de Bond.

El método de Bond permite estimar el consumo real de energía a escala industrial con un error promedio $\pm 20\%$. 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 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.
3. Determinación del peso de producto ideal o peso ideal de finos, suponiendo una carga circulante de 250 %. Este valor será determinado por la expresión 2.

$$P_i = \frac{\text{peso}700}{3,5} \quad (2)$$

4. Caracterización granulométrica de la alimentación, con especial cuidado en la obtención del valor característico a F₈₀, y el porcentaje de material en la alimentación inferior al tamaño de corte.
5. 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.
6. 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.
7. Se hace girar el molino a un número arbitrario de revoluciones: (se recomienda 100 vueltas para materiales duros y 50 para materiales más blandos)

8. 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.
9. 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.
10. Se procede al pesado de rechazo tamizado, con precisión al menos de décimas de gramos.
11. Se determina el peso del cernido por diferencia entre el peso total del producto y el peso del rechazo.
12. 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.
13. 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)
14. 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.
15. Se añade una cantidad de muestra representativa de alimentación fresca al rechazo obtenido, para construir de nuevo el peso definido en el paso 3.
16. 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.

17. 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.
18. 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).
19. 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.
20. 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.
21. 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 molidurabilidad** en molinos de bolas, **Gbp**.
22. 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} .
23. Se calcula el índice de trabajo W_i en molinos de bolas, expresado en kWh/t, mediante la ecuación 3, propuesta por Bond.

$$W_i = \frac{44.5}{P_{74}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{F_{80}} \right)} \quad (3)$$

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

2.3 Procedimientos para la toma y preparación de la muestra

Aprovechándose el marco de la realización de una prueba a escala piloto, se tomó el mineral laterítico en flujo dinámico en la descarga de la banda transportadora que suministra el mineral a la tolva de alimentación del secador piloto. Para la toma de las muestras se empleó una cajuela, dispositivo diseñado para estas operaciones.

La muestra fue tomada garantizando dos criterios básicos para estos casos:

- 1) que la misma sea suficiente para la realización de los experimentos.
- 2) que sea representativa tanto cuantitativamente como cualitativamente de todo el mineral.

Cada muestra de carbón bituminoso y de mineral laterítico fue preparada, homogenizada por los métodos clásicos en la preparación de muestras: el método del cono y el anillo, y el divisor tipo Johns o cuarteador de rifle.

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 conformado.



Figura 2. Conformación del anillo.



Figura 3. División con cruceta



Figura 4. Operación de cuarteo.

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.

Este equipo 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. 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 Johnson



Figura 6. Operación de cuarteo.

Ejemplos:

- 1). Se distribuye la muestra de 7,5 kg (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.

2.4 Procedimiento para la determinación de la composición granulométrica de los materiales.

La distribución granulométrica se realizó con ayuda del análisis de tamices. Este análisis 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 (Wills y Napier-Munn, 2006). En ausencia de tamiz de esta serie se tomó un diámetro de tamiz cercano a este valor.

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.

2.5 Procedimiento para el tamizado por vía húmeda.

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.

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

dónde:

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

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

2.6 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.

2.7 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 5 y 6.

Tabla 5. Juego de tamices que fue seleccionado para análisis granulométrico de la muestra inicial.

No.	Tamaño, Mm	No.	Tamaño, mm
1	3,15	6	0,50
2	2,38	7	0,40
3	1,6	8	0,25
4	1,000	9	0,150
5	0,71	10	-0,150

Tabla 6. 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 7-9 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: determinada experimentalmente

Carga de bolas: 22 kg



Figura 9. Tamizadora

Tamizadora

Modelo RX-29

Tipo Rotap

W.S Tyler Blvd

Mentor OH4460

Motor 5,60 kW

CONCLUSIONES PARCIALES

El diseño de la investigación garantiza adecuadamente el tratamiento del problema, describe detalladamente la conformación de las mezclas lateríticas, así como la toma y preparadas las muestras y su caracterización granulométrica, aspectos considerados uno de los momentos más cuidadoso de la investigación. Se define el procesamiento de los datos y materiales de trabajo obtenidos durante los experimentos, con la aplicación de procedimientos y técnicas 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 III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo analizan y discuten los principales resultados obtenidos durante la investigación. Se presenta una caracterización granulométrica de los materiales empleados en el trabajo. Se exponen los resultados del índice de Bond y la influencia en la molturabilidad y el propio índice de trabajo.

3.1. Resultados de los análisis granulométricos

Los resultados promedios de la distribución de tamaño del mineral laterítico se muestran en la tabla 7 y la figura 10.

Tabla 7. Distribución granulométrica de la muestra para el ensayo estándar de Bond.

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño inferior, (mm)	Peso, (g)	Retenido, (%)	Pasante Acumulativo, (%)
3,15/2,38	2,380	6,0	2,73	100,00
2,38/1,6	1,600	16,90	7,68	97,27
1,6/1	1,000	29,00	13,18	89,59
1/0,71	0,710	22,07	10,03	76,41
0,71/0,5	0,500	17,47	7,94	66,38
0,5/0,25	0,250	33,40	15,18	58,45
0,25/0,125	0,125	24,17	10,98	43,27
0,125/0,075	0,075	71,03	32,28	32,28
0,075/0	0,000	0,00	0,00	0,00
Total		220,03	100,00	

A juzgar por la distribución de tamaño mostrada en la figura 10, la curva granulométrica de las lateritas estudiadas sigue las mismas regularidades que las estudiadas por Coello (1993), Coello et al. (2008, 2009). En esta muestra prevalece la presencia de granos gruesos. El contenido de la fracción mayor de 0,125 mm es de aproximadamente 57 %.

La distribución granulométrica de las lateritas investigadas obedece a la ecuación Rosin-Ramler con un error de estimación de 3,05 % y la magnitud del coeficiente de determinación de 0,66. Wills y Finch (2016) y Alvarez et al. (20016) dejan claro que la composición granulométrica de la mayoría de las menas y rocas, puede ser descrita

con ayuda del modelo Rosin-Ramler. El modelo R-R para las lateritas aparece más abajo.

$$R = 1 - \exp\left(-\frac{d_i}{0,01}\right)^{0,2185} \quad (5)$$

La muestra inicial compuesta por la mezcla de los yacimientos Camarioca Este y Yagrumaje Norte y Sur, el tamaño máximo no supera los 3,15 como establece el procedimiento estándar de Bond (fig. 10).

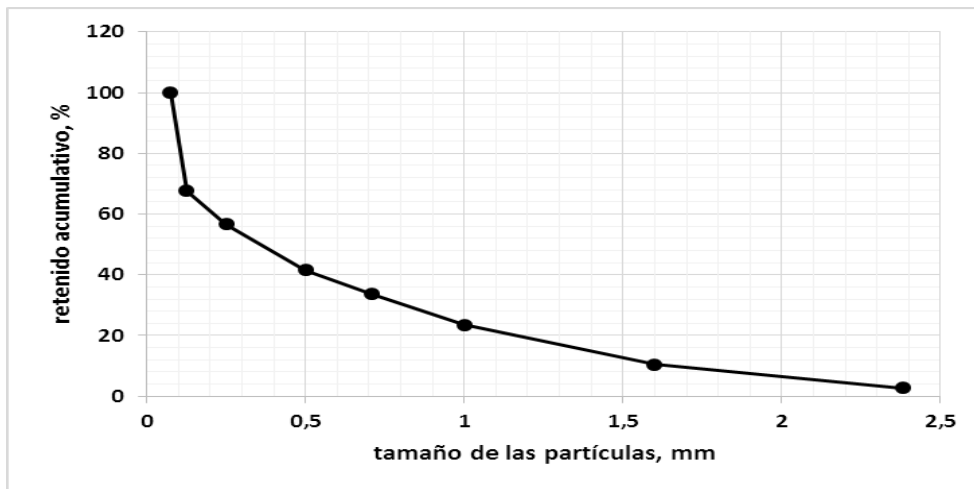


Fig. 10. Distribución de tamaño de la muestra de mineral laterítico.

Los valores de la distribución granulométrica de las muestras de carbón bituminoso aparecen en la tabla 8 y la figura 11. A juzgar por los resultados, la distribución de tamaños en la muestra es uniforme, esto significa que existe un equilibrio en el contenido de las fracciones gruesas y finas. El tamaño máximo responde a los requisitos del procedimiento estándar de Bond (menor de 3,15 mm).

La composición granulométrica del carbón bituminoso puede expresar con ayuda de la ecuación Gaudin-Schumann con un error de estimación de 0,47 y el coeficiente de determinación con un valor de 0.98. De acuerdo a los cálculos no es posible representar esta distribución de tamaño con la ecuación Rosin-Ramler. Wills y Finch (2017) asegura que la primera describe la distribución granulométrica de los

carbones con un alto coeficiente de determinación. El modelo ajustado de Schumman para el carbón bituminoso aparece más abajo.

$$W = \left(\frac{d_i}{3150} \right)^{0,6019}$$

(6)

Tabla 8 Análisis granulométrico del carbón bituminoso.

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	Peso promedio, (g)	Acumulativo, (%)	
			Retenido,	Cernido,
3,15/2,38	2,380	37,20	14,66	100,00
2,38/1,6	1,600	60,03	23,66	85,34
1,6/1	1,000	46,20	18,21	61,68
1/0,71	0,710	24,73	9,75	43,48
0,71/0,5	0,500	18,90	7,45	33,73
0,5/0,25	0,250	23,33	9,19	26,28
0,25/0,125	0,125	14,60	5,75	17,09
0,125/0,075	0,075	6,00	2,36	11,34
0,075/0	0,000	22,77	8,97	8,97
Total		253,77	100,0	0

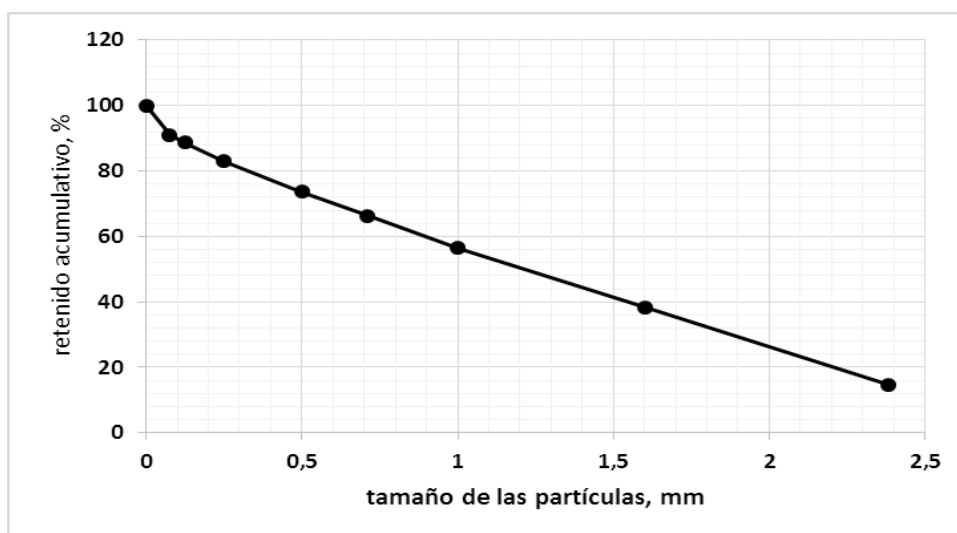


Fig. 11. Distribución granulométrica de las muestras de carbón bituminoso.

3.2 Resultados de la determinación del Índice de Bond.

En las tablas 9 y 10 se muestran los resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para el mineral laterítico. Los resultados del Gbp demuestran que su valor se invierte a partir del ensayo 3, a quién corresponde una molibilidad de 13,47 gramos de finos/revoluciones del tambor.

Tabla 9. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para el mineral laterítico

Nº de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	871,70	0	220,50	50	479,50	479,50	9,59
2	479,50	0	220,50	23	275,10	288,60	12,55
3	288,60	0	220,50	18	246,75	236,75	13,47
4	246,75	0	220,50	16	180,25	180,25	11,00
5	180,25	0	220,50	20			

Comparando con los resultados de la molibilidad del carbón bituminoso (tabla 10), la producción de finos en los ciclos de la determinación del índice de Bond del mineral laterítico es incomparablemente superior al primero. Esto habla de una menor molibilidad del carbón y confirma los resultados de Betancourt L (2016) y Namindo (2015). El punto de inflexión corresponde a los 0,87 g/rev.

Los resultados de la determinación del índice de Bond para la muestras de laterita incrementado el contenido de carbón bituminoso aparece en las tablas 11-15. Para la mayoría de los estos ensayos, el punto de inflexión se alcanza en el segundo ciclo.

Tabla 10. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para el carbón bituminoso.

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp, (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	603,95	54,23	118,32	100	91,15	36,92	0,37
2	91,15	8,19	164,37	457	305,85	297,66	0,66
3	305,85	27,47	145,09	221	192,25	164,78	0,75
4	192,25	17,26	155,29	208	179,55	162,29	0,79
5	179,55	16,12	156,43	201	189,15	173,03	0,87
6	189,15	16,99	155,57	180	158,50	141,51	0,79
7	158,50	14,23	158,32				

Tabla 11. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la mezcla de mineral laterítico con carbón bituminoso a 3,5 %

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	827,97	0,00	236,56	50	416,17	416,17	8,32
2	416,17	0,00	236,56	28	278,93	278,93	9,82
3	278,93	0,00	236,56	24	233,67	233,67	9,69
4	233,67	0,00	236,56	24	277,03	277,03	11,34
5	277,03	0,00	236,56	21			

Los resultados muestran que con la sola adición de 3,5 % de carbón bituminoso, la molturabilidad de las lateritas disminuye sustancialmente, el punto de inflexión disminuye en 3,65 g/rev. El sucesivo incremento del contenido de carbón bituminoso hace disminuir en 0,385 g/rev como promedio. La molturabilidad del mineral laterítico disminuye al incrementar el contenido de carbón de 3.5-5,5 % hasta 8,72 g/rev.

Estos elementos hacen pensar que la molienda conjunta del mineral laterítico con el carbón bituminoso hace reducir la formación de la clase nuevamente formada y por tanto reduce la velocidad de su formación. Los resultados de la molturabilidad de la

molienda de las lateritas con adición de carbón bituminoso y con petróleo aditivo (4,2 %) se mantienen aproximadamente en el mismo rango. En este sentido queda demostrado que el petróleo aditivo influye negativamente en la formación de las clases finas. Estos elementos confirman los resultados de Coello et al. (2009).

En cuanto al efecto del carbón, los resultados de la molturabilidad ponen de manifiesto su efecto negativo en la molienda de las lateritas.

Tabla 12. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la mezcla de mineral laterítico con carbón bituminoso a 4,0 %.

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	819,93	0,00	234,27	50	414,27	414,27	8,29
2	414,27	0,00	234,27	28	276,97	276,97	9,79
3	276,97	0,00	234,27	24	229,20	229,20	9,58
4	229,20	0,00	234,27	24	261,60	261,60	10,70
5	261,60	0,00	234,27	22			

Tabla 13. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la mezcla de mineral laterítico con carbón bituminoso a 4,5 %

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	812,20	0,00	232,06	50	417,53	417,53	8,35
2	417,53	0,00	232,06	28	270,23	270,23	9,72
3	270,23	0,00	232,06	24	226,57	226,57	9,49
4	226,57	0,00	232,06	24	255,03	255,03	10,43
5	255,03	0,00	232,06	22			

Tabla 14. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la mezcla de mineral laterítico con carbón bituminoso a 5,0 %

N° de ciclos	Peso de carga fresca , (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm,		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos, (g)	
1	802,17	0,00	229,19	50	384,20	384,20	7,68
2	384,20	0,00	229,19	30	237,07	237,07	7,95
3	237,07	0,00	229,19	29	245,73	245,73	8,52
4	245,73	0,00	229,19	27	203,57	203,57	7,58
5	203,57	0,00	229,19	30			

Tabla 15. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la mezcla de mineral laterítico con carbón bituminoso a 5,5 %

N° de ciclos	Peso de carga fresca, (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm, en el producto.		Gbp (g/rpm)
		Alimentación, (g)	A moler, (g)		Finos producidos, (g)	Finos Netos, (g)	
1	789,90	0,00	225,69	50	374,73	374,73	7,49
2	374,73	0,00	225,69	30	228,30	228,30	7,58
3	228,30	0,00	225,69	30	259,73	259,73	8,72
4	259,73	0,00	225,69	26	214,17	214,17	8,28
5	214,17	0,00	225,69	27			

Tabla 16. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la mezcla de mineral laterítico con petróleo.

N° de ciclos	Peso de carga fresca, (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp, (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	858,50	0,00	245,29	50	354,07	354,07	7,08
2	354,07	0,00	245,29	35	277,27	277,27	8,01
3	277,27	0,00	245,29	31	255,03	255,03	8,33
4	255,03	0,00	245,29	30	258,53	258,53	8,76
5	258,53	0,00	245,29	28	201,70	201,70	7,20
6	201,70	0,00	245,29	34			

3.3 Influencia del contenido de carbón bituminoso sobre el Índice de Bond de la molienda de las lateritas.

En la figura 12 se muestra la influencia del consumo de carbón. La figura muestra una tendencia a la disminución de la molturabilidad en la medida que aumenta el contenido de carbón.

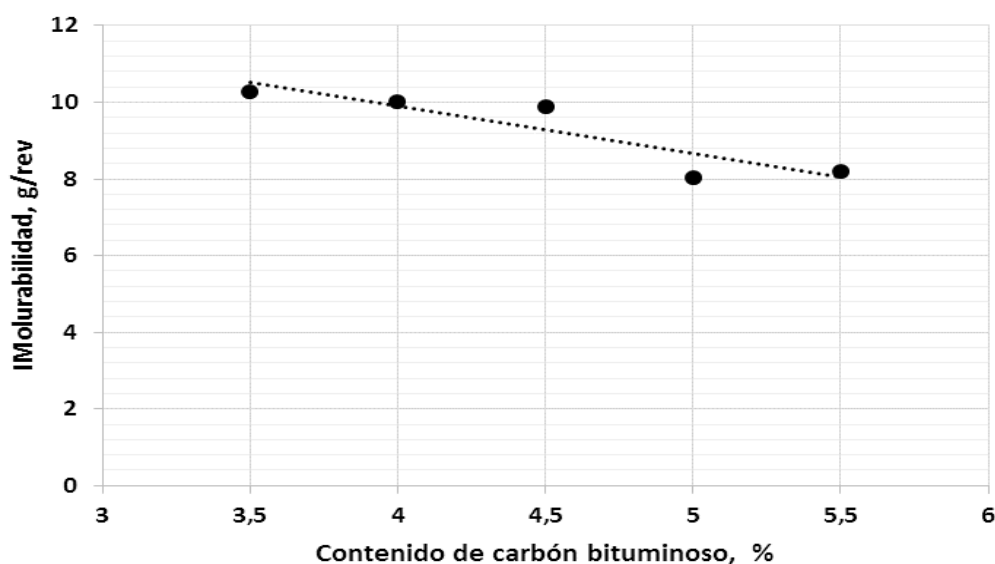


Fig. 12. Influencia del contenido de carbón bituminoso en la molturabilidad.

Su valor práctico se relaciona con la necesidad del control riguroso de este parámetro debido a las consecuencias negativas que genera su adición en la molienda del mineral laterítico. De acuerdo con Legra (2017), los mejores resultados obtenidos en las pruebas de reducción giran alrededor de la cantidad estequiométrica de carbón (4,5 %).

La influencia del contenido del carbón bituminoso en el consumo energético de la molienda de las lateritas aparece en la figura 13.

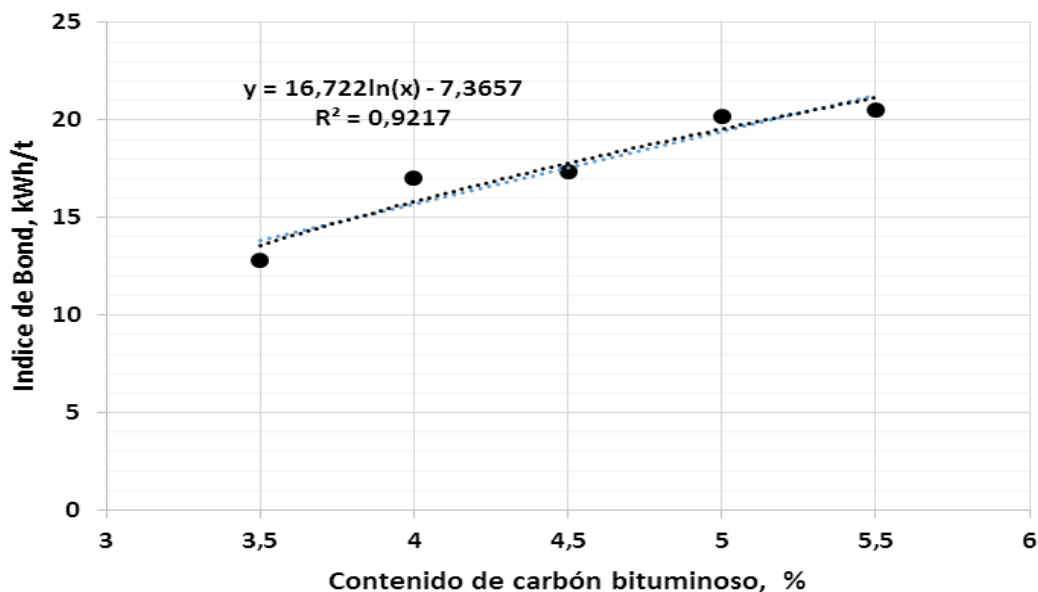


Fig. 13. Influencia del contenido de carbón bituminoso en el índice de Bond.

A juzgar por la figura 13, el consumo energético de la molienda de las lateritas se incrementa con el aumento del contenido de carbón bituminoso. Esta regularidad coincide plenamente con los resultados aportados por Coello et al. (2008).

El consumo energético al mezclar el petróleo tecnológico y el mineral laterítico, en la proporción utilizada por la ECG, resultó un valor de 17,00 kW-h/t como promedio. La adición del carbón bituminoso en el rango de 3,5 hasta 4,5 % no significó incremento alguno del consumo energético con respecto a la molienda actual de lateritas. En el desarrollo de los experimentos no observó fenómeno alguno relacionado con la aglomeración de partículas o de su adhesión a las paredes y elementos molidores, elementos que sí están presentes en la molienda con petróleo aditivo (Llorente, 2003).

3.4 Consideraciones ambientales del estudio

Al producirse la combustión incompleta del carbón bituminoso durante el proceso de reducción del mineral laterítico, el efecto ambiental sería similar al del petróleo

aditivo, pues en ambos caso se producen los gases reductores (H_2 , CO , SO_2) que reaccionan con los elementos (Ni , Co , Fe), los que inicialmente se encuentran en forma de óxido y durante este proceso pasan a estado metálico.

Para el caso del azufre, el carbón bituminoso contiene cinco veces menos azufre que el petróleo tecnológico utilizado en el proceso de reducción, por lo que la emanación del SO_2 por este concepto sería cuantitativamente inferior al del petróleo.

Se debe destacar que el empleo del carbón bituminoso como reductor implica la conformación de grandes depósitos de almacenamiento-homogenización (pilas piramidales de carbón bituminoso) que provocan el desprendimiento en cantidad indeterminada de finos de carbón, que deben contaminar la atmósfera circundante de la localidad.

CONCLUSIONES

1. La distribución granulométrica de la laterita utilizada en la investigación obedece a la ecuación Rosin-Ramler con un error de estimación de 3,05 % y una magnitud del coeficiente de determinación de 0,66. Mientras que en el caso del carbón bituminoso, la distribución de tamaño se ajusta al modelo de Gaudin-Schumann con un error de estimación de 0,47 %.
2. El índice de Bond de la molienda de la laterita se ve afectado por la adición del carbón bituminoso en los niveles de 3,5 a 5,5 %, el índice de trabajo varía desde 12,1 kWh/t hasta 17,33 kWh/t. El consumo energético del molino aumenta con el incremento del contenido de carbón en la molienda del mineral laterítico.
3. La adición del carbón bituminoso en la molienda de las lateritas en los niveles de 3,5 a 4,5 % no genera incremento alguno del consumo energético con respecto al consumo actual del molino con petróleo aditivo. El ulterior incremento del contenido de carbón bituminoso por encima del 4,5 %, genera un incremento del consumo energético de aproximadamente 3 kW-h/t como promedio.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDREIVE, S.; PEROV, V.; ZVERIEVICH, V. (1980). *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*, Moscú: Editorial Mir.
- ARIZTIMUÑO, A.; GONZALEZ, R. y RISUEÑO, V. (2010). *El carbón como materia prima*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial.
- BEKE, B. (1964): *Principles of comminution*, Maclaren.
- BETANCOURT, L. (2016). *Molibilidad de la molienda del carbón bituminoso, el mineral laterítico y las de sus mezclas lateríticas*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM.
- BILENKO, L. F., *Zakonomiernosti izmilcheniia v barabannij melnts*. Nedra. Moskva.1984.
- BOND F.C. 1952, *The third theory of comminution trans. SME/AIME*, 193, 484-494.
- BRIAN, B. MARTY, W. (2008). *Coal characteristics*. Indiana Center for Coal Technology & Research.
- COELLO-VELÁZQUEZ A. L. AND FALCÓN J. (1991), *Considerations of the dry grinding of laterite ore*. Technical paper to poster XVII International Mineral Processing Congress. Dresden. GDR, sept. 23-28.
- Coello A. (1993), *Sovershenstvovanie technologii izmilchenii lateritobij pud na zabode "Punta Gorda"*. Diss. Uch. step. Kand. Doct. Tejn. Nauk. IMS. Saint Petersburg.
- COELLO-VELÁZQUEZ A. L. (1993a), *"Consideraciones sobre la molienda seca de minerales lateríticos"*, Minería y Geología XIII (2), pp. 37-42.
- COELLO-VELÁZQUEZ A. L. (1993b), *Sovershenstvovanie technologii izmilchenii lateritobij pud na zabode "Punta Gorda"*. Diss. Uch. step. Kand. Doct. Tejn. Nauk. IMS. Saint Petersburg.
- COELLO, A. (1999): *Curso de preparación mecánica de menas y minerales*.
- COELLO-VELÁZQUEZ, A. y TIJONOV, N. (2001). *Modelo integro – diferencial para la valoración de la energía en la molienda de minerales multicomponentes*. Minería y Geología, Vol. II (4): 14-20.

- COELLO-VELÁZQUEZ A. L. Y TIJONOV O. H. (1996), *“Regularidad en la molienda de los minerales lateríticos”*. Minería y Geología XIII (3),: 57-60.
- COELLO-VELÁZQUEZ A. L. (2001), *“Molienda de minerales multicomponentes: Modelo integro-diferencial para la valoración de la energía”*, Minería y Geología XVII (3-4), pp. 49-53.
- COELLO-VELÁZQUEZ A, L., MENENDEZ-AGUADO, J.M., LABORDE-BROWN R. (2008), *Grindability of lateritic nickel ore in Cuba*, Powder Technology 182, 113-115.
- COELLO (2009). *Aportes al conocimiento de la molienda seca de las menas lateríticas*.
- FUERSTENAU, D.W. y SULLIVAN, D.A. (1962). *Comminution of mitures in ball mills*. P.152-157.
- HOLMES T.A. AND PATCHING S. (1957), *Preliminary investigation of the differential grinding of quartz-limestone mixture*. Trans. Inst. Chem.
- KICK, F. (1883). *Contribution to the Knowledge of Brittle Materials*. Dinglers J.
- LABORDE R., COELLO-VELÁZQUEZ A., MARRERO S., ANGULO O. (2000) *“Productividad y eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico*. Rev. Minería y Geología, Vol. XVI (2).
- LABORDE B. R. (2004): *Diagnóstico energético en el proceso de molienda de la laterita*, Rev. Minería y Geología, ISSN 0258 5979, No. 3 y 4.
- LEGRA, A. (2016). Proyecto 600185: Evaluación integral del mineral a alimentar en la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara (ECG). CEIDINIQ.
- LLORENTE, L., *“Proyección para el incremento de la productividad hasta 50 mil t de níquel + cobalto en la instalación de molienda de la fábrica “Ernesto Che Guevara”*. Tesis a la opción del título de Master en Beneficio de Minerales. Moa ISMM. 2003.
- MAYANS, T. (2012). *Determinación de las pérdidas de la planta de preparación de carbón antracita de Cayo Guam*. Trabajo de Diploma. Moa : ISMM.

- NAMINDO, M. (2015). *Cinética de la molienda del carbón bituminoso*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM.
- NÚÑEZ, G.; PÉREZ, G.S. (2003). *Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda*. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM.
- RITTINGER, R. P. (1867). *Von. Textbook of Mineral Dressing*. Berlín: Ernest and Korn.
- .TANAKA T. (1966), *Selektivnii pazmol dvujcomponentnij smecei, sostvnie chasti kototij obladaut pazlichnoi pazmolaemosti*. V kn. Trudi Ebropieskogo Soveshania po izmilchenia. Stroizdat. M.
- WILLS, A. y FINCH, J.A. (2016). *An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Wills' Mineral Processing Technology. ISBN: 978-0-08-097053-0.
- WILLS, A. & NAPIER-MUNN, T. (2006). *An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Mineral Processing Technology. ISBN: 0750644508.

RECOMENDACIONES

Realizar pruebas a escala piloto que permitan confirmar los resultados obtenidos en los experimentos a escala de banco.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis granulométricos de los materiales.

Tabla 1. Análisis granulométrico del mineral laterítico in situ.

Mallas micras	Masa retenida (g)	Retenido %	Análisis químico por fracciones; %						
			Ni	Co	Fe	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
75000	5967,40	13,11	1,06	0,013	9,79	23,68	32,39	10,57	0,09
50000	380,00	0,83	1,34	0,027	10,56	27,58	40,29	1,06	0,35
25000	1407,50	3,09	1,25	0,040	25,42	16,11	23,21	6,16	0,87
16500	1216,00	2,67	1,12	0,055	27,29	12,43	20,84	8,26	1,03
12500	892,90	1,96	1,20	0,062	30,43	10,81	16,55	7,49	1,17
6300	3591,80	7,89	1,16	0,072	36,28	7,04	12,79	8,55	1,38
3150	4330,30	9,51	1,04	0,072	38,97	5,08	9,62	9,02	1,49
2250	2254,10	4,95	1,00	0,068	39,13	4,08	7,89	9,19	1,41
1000	7194,30	15,81	1,06	0,078	39,67	3,49	7,73	9,81	1,57
710	179,46	0,39	0,90	0,080	39,93	3,58	7,12	12,38	2,22
500	451,37	0,99	0,92	0,093	39,06	4,11	7,75	11,83	2,30
315	532,95	1,17	0,97	0,122	38,48	4,38	8,87	11,87	2,21
250	255,60	0,56	1,03	0,151	37,78	4,24	5,53	11,57	2,14
150	1555,33	3,42	1,11	0,199	37,63	4,79	10,19	11,37	2,06
125	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75	706,97	1,55	1,25	0,195	38,83	1,13	10,84	10,32	2,34
45	59,82	0,13	1,26	0,155	40,08	3,78	9,43	9,39	2,63
-45	14542,10	31,95	1,25	0,078	44,33	2,41	7,12	8,33	1,74
	45517,90	100,00							

Tabla 2. Análisis granulométrico del carbón bituminoso in situ.

Tamiz	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
					Retenido	Cernido
50/25	338,8	330,3	336,8	335,3	14,91	100,00
25/12,5	225,9	218,9	226,1	223,6	9,94	85,09
12,5/9	564,7	571,2	569,9	568,6	25,28	75,15
9/6,3	451,8	452,3	453,7	452,6	20,13	49,86
6,3/3,15	220,1	215,5	216,3	217,3	9,66	29,74
3,15/2,38	67,1	69,5	67,7	68,1	3,03	20,07
2,38/1,6	67,8	70,9	71,1	69,9	3,11	17,05
1,6/1	135,9	130,3	131,0	132,4	5,89	13,94
1/0,71	45,2	48,6	47,7	47,2	2,10	8,05
0,71/0,5	23,0	29,1	25,4	25,8	1,15	5,95
0,5/0,25	22,6	21,5	20,5	21,5	0,96	4,80
0,25/0,125	45,6	40,2	42,8	42,9	1,91	3,85
0,125/0,075	22,6	22,1	21,9	22,2	0,99	1,94
0,075/0	18,1	23,5	20,5	20,7	0,92	0,95
0	0,6	0,9	0,7	0,7	0,0	0,03
Masa Total	2249,8	2244,8	2252,1	2248,9	100,0	0,00

Tabla 3. Análisis granulométrico del mineral laterítico para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
					Retenido (%)	Cernido (%)
3,15/2,38	3,15	6,1	5,6	6,00	2,73	100,00
2,38/1,6	2,380	13,4	19,6	16,90	7,68	97,27
1,6/1	1,600	24,4	32,6	29,00	13,18	89,59
1/0,71	1,000	21,8	21,9	22,07	10,03	76,41
0,71/0,5	0,710	17,1	18,3	17,47	7,94	66,38
0,5/0,25	0,500	33,6	33,7	33,40	15,18	58,45
0,25/0,125	0,250	21,4	24,6	24,17	10,98	43,27
0,125/0,075	0,125	70,4	69,5	71,03	32,28	32,28
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		208,2	225,8	220,03	100,00	

Tabla 4. Análisis granulométrico del mineral laterítico para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
					Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	9,7	8,800	9,3	1,06	100,00
2,38/1,6	2,380	22,8	24,600	23,70	2,72	98,94
1,6/1	1,600	34,3	30,100	32,20	3,69	96,22
1/0,71	1,000	28,6	29,000	28,80	3,30	92,53
0,71/0,5	0,710	43,3	47,700	45,50	5,22	89,22
0,5/0,25	0,500	132,9	144,300	138,60	15,90	84,00
0,25/0,125	0,250	220,8	210,300	215,55	24,73	68,10
0,125/0,075	0,125	205,3	190,400	197,85	22,70	43,38
0,075/0	0,075	172,8	187,700	180,25	20,68	20,68
Masa Total		870,500	872,900	871,70	100,00	0,00

Tabla 5. Análisis granulométrico del carbón bituminoso para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
					Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	38,60	38,10	37,200	14,66	100,00
2,38/1,6	2,380	56,80	65,00	60,033	23,66	85,34
1,6/1	1,600	46,10	47,80	46,200	18,21	61,68
1/0,71	1,000	24,60	24,70	24,733	9,75	43,48
0,71/0,5	0,710	18,10	18,00	18,900	7,45	33,73
0,5/0,25	0,500	23,10	22,90	23,333	9,19	26,28
0,25/0,125	0,250	14,40	14,30	14,600	5,75	17,09
0,125/0,075	0,125	5,50	5,70	6,000	2,36	11,34
0,075/0	0,075	22,80	21,40	22,767	8,97	8,97
Masa Total		250,00	257,90	253,767	100,0	0,00

Tabla 6. Análisis granulométrico del carbón bituminoso para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
					Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	0,1	0,5	0,3	0,05	100,00
2,38/1,6	2,380	0,6	0,8	0,7	0,12	99,96
1,6/1	1,600	0,7	1,1	0,9	0,15	99,84
1/0,71	1,000	0,5	1,4	1,0	0,16	99,69
0,71/0,5	0,710	4,0	4,0	4,0	0,66	99,54
0,5/0,25	0,500	72,0	75,3	73,7	12,20	98,87
0,25/0,125	0,250	192,6	193,1	192,9	31,93	86,68
0,125/0,075	0,125	184,6	159,6	172,1	28,50	54,74
0,075/0	0,075	149,8	167,2	158,5	26,25	26,25
Masa Total		604,85	603,0	603,9	100,00	0,00

Tabla 7. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 3,5 % de carbón bituminoso para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	9,3	9,8	9,700	9,60	4,55	100,00
2,38/1,6	2,380	17,6	17,6	16,800	17,33	8,21	95,45
1,6/1	1,600	22,2	22,3	23,500	22,67	10,74	87,24
1/0,71	1,000	14,4	18,5	14,100	15,67	7,42	76,50
0,71/0,5	0,710	15,5	13,3	15,900	14,90	7,06	69,08
0,5/0,25	0,500	20,2	30,5	24,300	25,00	11,84	62,02
0,25/0,125	0,250	15,9	26,8	18,700	20,47	9,70	50,18
0,125/0,075	0,125	91,3	76,9	88,200	85,47	40,49	40,49
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		206,4	215,7	211,2	211,10	100,00	

Tabla 8. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 3,5 % de carbón bituminoso para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	10,400	10,300	9,200	9,967	1,20	100,00
2,38/1,6	2,380	20,700	21,600	19,900	20,733	2,50	98,80
1,6/1	1,600	33,900	37,600	43,500	38,333	4,63	96,29
1/0,71	1,000	22,100	27,700	23,300	24,367	2,94	91,66
0,71/0,5	0,710	41,600	43,100	46,800	43,833	5,30	88,72
0,5/0,25	0,500	100,900	124,800	103,400	109,700	13,24	83,42
0,25/0,125	0,250	176,300	163,100	161,300	166,900	20,16	70,18
0,125/0,075	0,125	147,700	137,900	125,700	137,100	16,55	50,02
0,075/0	0,075	276,300	267,100	287,700	277,033	33,47	33,47
Masa Total		829,900	833,200	820,800	827,967	100,00	0,00

Tabla 9. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 4,0 % de carbón bituminoso para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	6,5	6,7	5,700	6,30	3,04	100,00
2,38/1,6	2,380	12,3	12,0	12,600	12,30	5,94	96,96
1,6/1	1,600	18,9	17,5	17,600	18,00	8,69	91,02
1/0,71	1,000	13,0	12,1	10,700	11,93	5,76	82,34
0,71/0,5	0,710	11,3	11,9	12,200	11,80	5,69	76,58
0,5/0,25	0,500	27,6	26,9	28,200	27,57	13,30	70,88
0,25/0,125	0,250	30,7	30,3	31,000	30,67	14,80	57,58
0,125/0,075	0,125	86,8	87,7	91,400	88,63	42,78	42,78
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		207,1	205,1	209,4	207,20	100,00	

Tabla 10. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 4,0 % de carbón bituminoso para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	9,3	8,8	7,7	8,6	1,05	100,00
2,38/1,6	2,380	19,6	21,3	25,1	22,0	2,68	98,95
1,6/1	1,600	29,1	29,1	35,1	31,1	3,79	96,27
1/0,71	1,000	31,6	29,4	23,3	28,1	3,43	92,47
0,71/0,5	0,710	39,7	42,9	36,9	39,8	4,86	89,05
0,5/0,25	0,500	126,1	115,0	119,1	120,1	14,64	84,19
0,25/0,125	0,250	177,8	158,9	159,8	165,5	20,18	69,55
0,125/0,075	0,125	134,9	146,8	147,7	143,1	17,46	49,36
0,075/0	0,075	254,1	269,7	261,0	261,6	31,91	31,91
Masa Total		822,200	821,900	815,700	819,9	100,00	0,00

Tabla 11. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 4,5 % de carbón bituminoso para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	8,0	5,5	5,90	6,47	3,07	100,00
2,38/1,6	2,380	16,5	16,2	17,70	16,80	7,98	96,93
1,6/1	1,600	25,9	24,2	23,20	24,43	11,60	88,95
1/0,71	1,000	19,3	15,8	14,30	16,47	7,82	77,35
0,71/0,5	0,710	17,4	11,5	14,10	14,33	6,80	69,54
0,5/0,25	0,500	31,4	20,5	23,20	25,03	11,88	62,73
0,25/0,125	0,250	20,6	13,5	18,10	17,40	8,26	50,85
0,125/0,075	0,125	71,6	96,7	100,80	89,70	42,59	42,59
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		210,7	203,9	217,3	210,63	100,00	

Tabla 12. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 4,5 % de carbón bituminoso para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	10,80	15,70	11,30	12,600	1,55	100,00
2,38/1,6	2,380	27,70	19,10	29,50	25,433	3,13	98,45
1,6/1	1,600	43,50	46,50	43,10	44,367	5,47	95,31
1/0,71	1,000	35,30	39,70	33,30	36,100	4,45	89,85
0,71/0,5	0,710	49,60	42,10	47,70	46,467	5,72	85,40
0,5/0,25	0,500	142,00	134,00	130,10	135,367	16,68	79,67
0,25/0,125	0,250	149,60	141,40	149,60	146,867	18,10	62,99
0,125/0,075	0,125	114,10	105,70	108,10	109,300	13,47	44,90
0,075/0	0,075	244,00	263,10	258,00	255,033	31,43	31,43
Masa Total		816,60	807,30	810,70	811,533	100,00	0,00

Tabla 13. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 5,0 % de carbón bituminoso para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	7,0	6,7	8,500	7,40	3,52	100,00
2,38/1,6	2,380	15,5	13,4	12,300	13,73	6,53	96,48
1,6/1	1,600	23,5	20,9	18,200	20,87	9,93	89,95
1/0,71	1,000	19,3	15,1	12,400	15,60	7,42	80,02
0,71/0,5	0,710	14,6	12,3	11,400	12,77	6,07	72,60
0,5/0,25	0,500	32,5	32,1	27,400	30,67	14,59	66,53
0,25/0,125	0,250	34,2	31,2	28,800	31,40	14,94	51,94
0,125/0,075	0,125	72,3	75,5	85,600	77,80	37,01	37,01
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		218,9	207,2	204,6	210,23	100,00	

Tabla 14. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 5,0 % de carbón bituminoso para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	13,800	10,500	13,900	12,733	1,61	100,00
2,38/1,6	2,380	30,600	29,400	25,700	28,567	3,62	98,39
1,6/1	1,600	34,400	32,300	35,500	34,067	4,31	94,77
1/0,71	1,000	21,300	25,700	30,900	25,967	3,29	90,46
0,71/0,5	0,710	41,300	44,500	43,900	43,233	5,47	87,17
0,5/0,25	0,500	153,900	150,200	148,600	150,900	19,11	81,70
0,25/0,125	0,250	149,000	144,400	145,300	146,233	18,51	62,59
0,125/0,075	0,125	129,100	132,900	140,100	134,033	16,97	44,08
0,075/0	0,075	211,900	220,000	210,600	214,167	27,11	27,11
Masa Total		785,300	789,900	794,500	789,900	100,00	0,00

Tabla 15. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 5,5 % de carbón bituminoso para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	7,3	6,8	8,000	7,37	3,62	100,00
2,38/1,6	2,380	12,9	13,5	14,200	13,53	6,65	96,38
1,6/1	1,600	20,8	20,0	19,900	20,23	9,94	89,73
1/0,71	1,000	11,5	11,8	13,000	12,10	5,95	79,78
0,71/0,5	0,710	15,6	13,0	13,000	13,87	6,82	73,84
0,5/0,25	0,500	25,3	24,4	26,000	25,23	12,40	67,02
0,25/0,125	0,250	32,1	31,4	25,700	29,73	14,61	54,62
0,125/0,075	0,125	75,1	83,5	85,600	81,40	40,01	40,01
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		200,6	204,4	205,4	203,47	100,00	

Tabla 16. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 5,5 % de carbón bituminoso para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	9,400	8,500	11,200	9,700	1,21	100,00
2,38/1,6	2,380	30,300	23,300	21,900	25,167	3,14	98,79
1,6/1	1,600	33,900	32,300	36,300	34,167	4,26	95,65
1/0,71	1,000	27,700	28,100	25,500	27,100	3,38	91,39
0,71/0,5	0,710	54,600	40,600	39,700	44,967	5,61	88,01
0,5/0,25	0,500	130,100	135,400	128,200	131,233	16,36	82,41
0,25/0,125	0,250	166,300	186,100	199,200	183,867	22,92	66,05
0,125/0,075	0,125	137,600	151,700	137,900	142,400	17,75	43,13
0,075/0	0,075	210,600	200,900	199,200	203,567	25,38	25,38
Masa Total		800,500	806,900	799,100	802,167	100,00	0,00

Tabla 17. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 4,2 % de petróleo para determinar el F_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, (%)	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	4,0	4,7	4,9	4,53	2,07	100,00
2,38/1,6	2,380	13,6	18,3	12,5	14,80	6,77	97,93
1,6/1	1,600	28,7	37,4	33,1	33,07	15,13	91,15
1/0,71	1,000	25,8	28,5	27,3	27,20	12,45	76,02
0,71/0,5	0,710	27,2	28,2	29,8	28,40	13,00	63,57
0,5/0,25	0,500	53,8	47,4	50,5	50,57	23,14	50,57
0,25/0,125	0,250	40,6	35,5	39,6	38,57	17,65	27,43
0,125/0,075	0,125	21,3	21,9	20,9	21,37	9,78	9,78
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00
Masa Total		215,0	221,9	218,6	218,50	100,00	

Tabla 18. Análisis granulométrico de la mezcla de mineral laterítico con 4,2 % de petróleo para determinar el P_{80} .

Clase de tamaño, (mm)	Tamaño Inferior (mm)	M1	M2	M3	Peso promedio (g)	Acumulativo, %	
						Retenido	Cernido
3,15/2,38	3,15	6,4	5,9	6,6	6,3	0,7	100,00
2,38/1,6	2,380	24,2	28,3	30,5	27,7	3,2	99,27
1,6/1	1,600	35,0	30,3	37,2	34,2	4,0	96,04
1/0,71	1,000	28,3	20,9	20,8	23,3	2,7	92,06
0,71/0,5	0,710	48,2	56,1	50,9	51,7	6,0	89,35
0,5/0,25	0,500	162,3	155,5	165,0	160,9	18,7	83,32
0,25/0,125	0,250	218,8	200,0	210,1	209,6	24,4	64,57
0,125/0,075	0,125	124,5	163,1	141,5	143,0	16,7	40,15
0,075/0	0,075	209,5	199,9	195,7	201,7	23,5	23,50
Masa Total		857,2	860,0	858,3	858,5	100,0	0,00

Anexo 2: Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond.

Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para las mezclas de mineral laterítico con 3,5 % de carbón bituminoso.

Tabla 19. Experimento N° 1

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	829,90	0,00	237,11	50	407,10	407,10	8,142
2	407,10	0,00	237,11	29	275,60	275,60	9,464
3	275,60	0,00	237,11	25	236,90	236,90	9,455
4	236,90	0,00	237,11	25	276,30	276,30	11,017
5	276,30	0,00	237,11	22			

Tabla 20. Experimento N° 2

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	833,20	0,00	238,06	50	425,80	425,80	8,516
2	425,80	0,00	238,06	28	292,30	292,30	10,456
3	292,30	0,00	238,06	23	234,00	234,00	10,278
4	234,00	0,00	238,06	23	267,10	267,10	11,532
5	267,10	0,00	238,06	21			

Tabla 21. Experimento N° 3

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	820,80	0,00	234,51	50	415,60	415,60	8,312
2	415,60	0,00	234,51	28	268,90	268,90	9,530
3	268,90	0,00	234,51	25	230,10	230,10	9,351
4	230,10	0,00	234,51	25	287,70	287,70	11,472
5	287,70	0,00	234,51	20			

Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para las mezclas de mineral laterítico con 4,0 % de carbón bituminoso.

Tabla 22. Experimento N° 1

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	822,20	0,00	234,91	50	416,60	416,60	8,332
2	416,60	0,00	234,91	28	275,30	275,30	9,764
3	275,30	0,00	234,91	24	229,50	229,50	9,539
4	229,50	0,00	234,91	25	254,10	254,10	10,318
5	254,10	0,00	234,91	23			

Tabla 23. Experimento N° 2

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	821,90	0,00	234,83	50	419,90	419,90	8,398
2	419,90	0,00	234,83	28	270,50	270,50	9,673
3	270,50	0,00	234,83	24	232,80	232,80	9,590
4	232,80	0,00	234,83	24	269,70	269,70	11,014
5	269,70	0,00	234,83	21			

Tabla 24. Experimento N° 3

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	815,70	0,00	233,06	50	406,30	406,30	8,126
2	406,30	0,00	233,06	29	285,10	285,10	9,940
3	285,10	0,00	233,06	23	225,30	225,30	9,609
4	225,30	0,00	233,06	24	261,00	261,00	10,762
5	261,00	0,00	233,06	22			

Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para las mezclas de mineral laterítico con 4,5 % de carbón bituminoso.

Tabla 25. Experimento N° 1

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	818,60	0,00	233,89	50	411,80	411,80	8,236
2	411,80	0,00	233,89	28	280,10	280,10	9,863
3	280,10	0,00	233,89	24	231,20	231,20	9,750
4	231,20	0,00	233,89	24	244,00	244,00	10,172
5	244,00	0,00	233,89	23			

Tabla 26. Experimento N° 2

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	807,30	0,00	230,66	50	419,50	419,50	8,3900
2	419,50	0,00	230,66	27	259,30	259,30	9,4319
3	259,30	0,00	230,66	24	222,90	222,90	9,1147
4	222,90	0,00	230,66	25	263,10	263,10	10,3967
5	263,10	0,00	230,66	22			

Tabla 27 Experimento N° 3

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	810,70	0,00	231,63	50	421,30	421,30	8,4260
2	421,30	0,00	231,63	27	271,30	271,30	9,8691
3	271,30	0,00	231,63	23	225,60	225,60	9,6123
4	225,60	0,00	231,63	24	258,00	258,00	10,7067
5	258,00	0,00	231,63	22			

Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para las mezclas de mineral laterítico con 5,0 % de carbón bituminoso.

Tabla 28. Experimento N° 1

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	800,50	0,00	228,71	50	384,20	384,20	7,6840
2	384,20	0,00	228,71	30	241,70	241,70	8,1203
3	241,70	0,00	228,71	28	260,80	260,80	9,2594
4	260,80	0,00	228,71	25	210,60	210,60	8,5261
5	210,60	0,00	228,71	27			

Tabla 29. Experimento N° 2

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	806,90	0,00	230,54	50	372,60	372,60	7,4520
2	372,60	0,00	230,54	31	239,00	239,00	7,7254
3	239,00	0,00	230,54	30	241,30	241,30	8,0858
4	241,30	0,00	230,54	29	200,90	200,90	7,0462
5	200,90	0,00	230,54	33			

Tabla 30. Experimento N° 3

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	799,10	0,00	228,31	50	395,80	395,80	7,9160
2	395,80	0,00	228,31	29	230,50	230,50	7,9918
3	230,50	0,00	228,31	29	235,10	235,10	8,2293
4	235,10	0,00	228,31	28	199,20	199,20	7,1799
5	199,20	0,00	228,31	32			

Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para las mezclas de mineral laterítico con 5,5 % de carbón bituminoso.

Tabla 31. Experimento N° 1

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	785,30	0,00	224,37	50	378,50	378,50	7,57
2	378,50	0,00	224,37	30	217,70	217,70	7,35
3	217,70	0,00	224,37	31	255,10	255,10	8,35
4	255,10	0,00	224,37	27	211,90	211,90	7,88
5	211,90	0,00	224,37	28			

Tabla 32. Experimento N° 2

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	789,90	0,00	225,69	50	370,10	370,10	7,4020
2	370,10	0,00	225,69	30	229,20	229,20	7,5173
3	229,20	0,00	225,69	30	263,30	263,30	8,7701
4	263,30	0,00	225,69	26	220,00	220,00	8,5492
5	220,00	0,00	225,69	26			

Tabla 33. Experimento N° 3

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	794,50	0,00	227,00	50	375,60	375,60	7,5120
2	375,60	0,00	227,00	30	238,00	238,00	7,8760
3	238,00	0,00	227,00	29	260,80	260,80	9,0487
4	260,80	0,00	227,00	25	210,60	210,60	8,3950
5	210,60	0,00	227,00	27			

Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para las mezclas de mineral laterítico con 4,2 % de petróleo.

Tabla 34. Experimento N° 1

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	857,20	0,00	244,9	50	342,50	342,50	6,85
2	342,50	0,00	244,9	36	268,80	268,80	7,52
3	268,80	0,00	244,9	33	254,20	254,20	7,80
4	254,20	0,00	244,9	31	268,10	268,10	8,54
5	268,10	0,00	244,9	29	209,50	209,50	7,31
6	209,50	0,00	244,9	34			

Tabla 35. Experimento N° 2

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	860,00	0,00	245,7	50	356,70	356,70	7,13
2	356,70	0,00	245,7	34	284,10	284,10	8,25
3	284,10	0,00	245,7	30	249,50	249,50	8,38
4	249,50	0,00	245,7	29	260,80	260,80	8,89
5	260,80	0,00	245,7	28	199,90	199,90	7,23
6	199,90	0,00	245,7				

Tabla 36. Experimento N°3

N° de ciclos	Peso de carga fresca (g)	Pasante a la malla, 0,074 mm		rpm	Pasante a la malla 0,074 mm		Gbp (g/rpm)
		Alimentación (g)	A moler (g)		Finos producidos (g)	Finos Netos (g)	
1	858,30	0,00	245,2	50	363,00	363,00	7,26
2	363,00	0,00	245,2	34	278,90	278,90	8,26
3	278,90	0,00	245,2	30	261,40	261,40	8,80
4	261,40	0,00	245,2	28	246,70	246,70	8,85
5	210,60	0,00	227,00	27			

Anexo 3: Resultados generales.

Tabla 37. Resultados de cada experimento para determinar el Índice de Bond.

Material	Gbp, g/rev	F ₈₀ , μm	P ₈₀ μm	P ₂₀₀ μm	Wi kWh/t
Mineral laterítico	12,34	1163,3	436,9	75	11,34
Carbón bituminoso	0,76	2203,91	223,87	75	45,59
3,5 % de carbón	10,2841	1195,35	434,33	75	12,81
4,0 % de carbón	10,0236	882,38	428,43	75	17,00
4,5 % de carbón	9,8796	1136,86	511,83	75	17,33
5,0 % de carbón	8,0182	999,13	463,33	75	20,21
5,5 % de carbón	8,1932	1013,05	477,83	75	20,52
4,2 % de petróleo	8,10	1157,86	455,63	75	17,00

Tabla 38. Características del petróleo tecnológico utilizado.

Índices	Unidad	Método Analítico	Certificación Laboratorio Químico
Visc. a 50 °C	CSTOK	D-445	696,80
Visc. a 80 °C	CSTOK		158,08
Densidad API		D-1298	14,80
Pto. Inflamación	°C	D-93	122,50
Carbón Conradson	%	D-189	8,60
Cenizas	%	D-382	0,06
Agua	%	D-95	2,00
Azufre	%	D-197	3,09
T de fluidez crítico	°C	D-97	-
Impurezas Mecánicas	%	D-473	0,01
Asfaltenos	%	D-1548	5,89
Valor Calórico	Kcal/Kg	D-4698	9938,74
Sodio	ppm	D-1218	-
Vanadio	ppm	D-1548	-