Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. “Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia - Química

Determinación de los consumos energéticos de la molienda del carbón antracita, el mineral laterítico y de sus mezclas

Trabajo de Diploma Para Optar por el Título de Ingeniera Metalúrgica

Yumaiby Galindo Medina

MOA, 2017

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

Dr. “Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Departamento de Metalurgia - Química

Determinación de los consumos energéticos de la molienda del carbón antracita, el mineral laterítico y de sus mezclas

Trabajo de Diploma Para Optar por el Título de Ingeniera Metalúrgica

Autor: Yumaiby Galindo Medina **Firma: _____**

Tutor: Dr. C. Alfredo Lázaro Coello Velázquez **Firma: _____**

Ing. Hugo Angulo Palma **Firma: _____**

MOA, 2017

Declaración de autoridad:

Yo: Ing. Yumaiby Galindo Medina:

Autora del presente trabajo de diploma el cual lleva por título Determinación del índice de Bond en la molienda para las mezclas de carbón antracita y mineral laterítico, con los tutores Dr. C Alfredo L Coello Velázquez y el Ing. Hugo Angulo Palma certificamos que su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Firma:…… Fecha:……..

Autor: Yumaiby Galindo Medina

Firma:…… Fecha:…….

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

Agradecimiento

A mis padres Jorge Galindo Carrera y Admaris Medina López como recompensa por su esfuerzo, dedicación y confianza cuando la meta parecía imposible. Con todo amor y cariño aquí está la culminación de cinco años de sacrificios, alegrías y tristezas. A mi hermana Yunaimy Galindo Medina y familia en general por haberme alentado en mi formación como profesional y muy importante, todos los que de una forma u otra han aportado un granito de arena a lo largo del camino. En la recta final a Gutiérrez, Hugo Legrá y en especial mi profesor Coello. Eternamente le agradezco a mis amistades que han sido lo más sincero que he podido cultivar todo este tiempo y a mi esposo Víctor Daniel Laurel Castillo por ser mi inspiración y el toque de aliento que necesitaba. A todos gracias.

Dedicatoria

Desde lo más profundo de mi corazón solo le dedico la realización de este trabajo de diploma a Dios quien supo poner en mi camino personas capaces y responsables, que me dio un corazón perseverante y paciente a pesar de todas las circunstancias y contratiempos.

Pensamiento

"Como mismo la naturaleza les reveló su secreto a los hombres del pasado; así mismo lo hará con los hombres del presente. Solamente tienen que hacerse las preguntas correctas"…

Albert Einstein.

Resumen

En el presente trabajo se determinó el rango de variación del índice de Bond durante el proceso de molienda para las mezclas de carbón antracita y laterita. Se halló el consumo de energía para el carbón antracita y la mezcla de carbón con mineral laterítico. La fase experimental se realizó en la planta piloto del Centro de Investigación del Níquel la cual posee instalaciones para estos fines. Como resultado fundamental se obtuvo que el consumo específico de energía para el carbón natural fue de 76,8549 kWh/t y para las mezclas entre (62,3618 y 39,4687) kWh/t. Resulta significativo que en la medida que se incrementa el porciento del carbón en la mezcla va aumentando considerablemente el consumo energético.

Palabras claves: carbón antracita, molienda, mineral laterítico.

Summary

In the present work, the range of variation of the Bond index during the grinding process for anthracite and laterite coal mixtures was determined. Energy consumption was found for anthracite coal and the coal mixture with lateritic ore. The experimental phase was carried out at the pilot plant of the Nickel Research Center which has facilities for these purposes. As a fundamental result, the specific energy consumption for natural coal was 76,8549 kWh / t and for mixtures between (62,3618 and 39,4687) kWh / t. It is significant that as the percentage of coal in the mixture increases, the energy consumption increases considerably.

Key word: Anthracite coal, milling, lateritic mineral.

INDICE

Introducción 1
1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL 5
1.1 Carbón mineral.....5
1.1.1 Origen y Formación de los carbones 5
1.1.2 Clasificación de los carbones.....6
1.2 Aspectos generales sobre el carbón antracita.....7
1.2.1 Usos del carbón antracita 8
1.3 Minerales lateríticos. Aspectos generales 8
1.4 Aspectos generales de la molienda de minerales 10
1.5 Descripción del Proceso de Molienda del carbón.....12
1.6 Relaciones energía tamaño.....14
1.7 Eficiencia energética de los procesos de molienda.....16
1.7.1 Ensayo estándar de Bond.....19
1.8 Trabajos precedentes sobre la investigación 20
1.8.1Trabajos realizados sobre el carbón antracita.....20
Conclusiones del Capítulo 24
2. MATERIALES Y METODOS 25
2.1. Preparación de las muestras.....26
2.2 Procedimiento para la determinación de la composición granulométrica.....29
2.2.1 Análisis de tamiz 29
2.2.2 Procedimiento del análisis de tamiz por vía húmeda 30
2.3 Procedimiento para la determinación del Índice de Trabajo o de Bond.....30
2.4 Principales materiales y equipos utilizados en la investigación.....34
Conclusiones parciales 36

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 37
3.1 Resultados del análisis granulométrico realizado.....37
3.2 Resultados obtenidos para determinar el índice de Bond 42
3.3 Consideraciones ambientales del estudio 46
CONCLUSIONES FINALES.....47
RECOMENDACIONES.....48
BIBLIOGRAFIA 49

INTRODUCCIÓN

La industria metalúrgica constituye una de las principales fuentes de ingreso de la economía de las naciones. En Cuba, especial importancia lo tiene la industria extractiva del níquel y cobalto a partir de los yacimientos lateríticos del nordeste oriental.

El alti-bajo de los precios del petróleo y creciente aumento de los costos de los principales insumos de la industria del níquel, particularmente los costos energéticos, se hace evidentemente necesario buscar alternativas para disminuir estos costos, sobre todo en el área de molienda que históricamente constituye una de las operaciones desde el punto de vista energético, más costosas (Coello, 1999). Una vía factible puede ser sin duda alguna la utilización del carbón como agente reductor en los hornos de reducción.

En épocas reciente el desarrollo de sistemas de combustión, basados en combustibles líquidos y gaseosos, llevó a una diversificación de las fuentes de energía, con la consiguiente reducción en la utilización del carbón como energía primaria.

La crisis del petróleo de los años 70 motivó entre otros hechos, un importante aumento de precios de los combustibles y potenció en los últimos años la utilización del carbón, destacándose principalmente su aplicación en la generación de energía eléctrica.

Prácticamente todo el carbón se utiliza en procesos de combustión y coquizado. Así, tomando como base los datos de consumo de energía primaria en España de 1998 puede observarse que, aproximadamente, un 80 % del carbón se quema para generar electricidad o vapor para usos industriales y domésticos, mientras que, aunque en cantidades mucho menores, es así mismo significativo su empleo en los sectores siderúrgicos, cementero y de fabricación de coque. El resto se utiliza en otras actividades de menor importancia relativa, como pueden ser la fabricación de

pigmentos y materiales de relleno y la filtración de agua.

La molienda de mineral ocupa un lugar importante en la tecnología carbonato-amoniacal (Coello, 1993). Los problemas económicos de la época del período especial, obligó a los ingenieros cubanos a la introducción del petróleo como elemento reductor del níquel y cobalto. Esta introducción pasó necesariamente por su adición en la alimentación de los molinos. Llorente (2003) y Coello et al. (2009) evaluando la influencia del petróleo aditivo en la molienda de las lateritas llegaron a la conclusión sobre su efecto negativo en la productividad del molino.

Por años, la sustitución del petróleo aditivo en los molinos ha estado en el pensamiento de los investigadores del ramo sin que necesariamente se haya llegado a un consenso. No cabe duda que el tan necesario incremento de la productividad de los molinos pasa por la sustitución del petróleo o el cambio del lugar de su adición. La alternativa de sustituir el petróleo aditivo por el carbón antracita requiere de la necesidad de evaluar las afectaciones que pueda ocasionar de realizarse su preparación de manera conjunta con la laterita.

Considerando que el alto costo de la energía para los molinos, resulta de extrema importancia la evaluación energética de la molienda del carbón antracita y sus mezclas con las lateritas.

Objeto de estudio: Molienda de las mezclas de carbón antracita y laterita.

Campo de acción: Consiste en el consumo específico de energía del proceso de molienda de las mezclas de carbón antracita y laterita.

Problema de investigación:

La evaluación de la molienda de las antracitas residuales de Nicaro ha requerido del desarrollo de varios trabajos de investigación que involucran los estudios cinéticos y de molibilidad de sus mezclas con el mineral laterítico. No menos importancia tiene la evaluación energética de su molienda y la de sus mezclas, la cual no ha sido reputada por trabajo alguno.

Objetivo General: Determinar el consumo específico de energía en el proceso de molienda del carbón antracita, el mineral laterítico y sus mezclas para la valoración energética dada las condiciones reales de molienda.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar granulométricamente el carbón antracita, el mineral laterítico y sus mezclas.
2. Determinar el índice de Bond para el carbón antracita, el mineral laterítico y sus mezclas.
3. Establecer la influencia de la composición de las mezclas de antracita/laterita en el consumo energético del molino.

Hipótesis:

La determinación del índice de Bond de las antracitas, del mineral laterítico y de sus mezclas permitirá establecer:

- ✓ El consumo energético de su molienda.
- ✓ La influencia de la composición de las mezclas en el consumo de energía de la molienda del mineral laterítico.

Tareas de investigación:

1. Fundamentos teóricos de la molienda de las mezclas de carbón antracita y laterita.
2. Caracterización granulométrica de los materiales estudiados.
3. Determinación del índice Bond de las antracitas, el mineral laterítico, y sus mezclas.
4. Valoración de los resultados obtenidos de los ensayos técnicos.
5. Elaboración del informe final de la tesis.
6. Presentación de la tesis.

Métodos de investigación:

Para lograr determinar el problema de esta investigación y el diagnóstico del objeto se utilizaron una serie de métodos teóricos y empíricos que se muestran a continuación:

- histórico-lógico
- hipotético-deductivo
- inducción y deducción
- análisis y síntesis

Además de estos métodos se utilizaron técnicas estadísticas y procedimientos propios del área de investigación en el análisis de los resultados y el tratamiento de los datos.

1 MARCO TEORICO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se realiza el análisis de los diferentes temas relacionados en el desarrollo de esta investigación, con el objetivo de disponer de los elementos esenciales y de las tendencias actuales que resultan imprescindibles para el desarrollo del trabajo. Se realizará un breve análisis sobre investigaciones precedentes que han tratado sobre el tema en cuestión con el fin de aprovechar sus experiencias y aportes. Incluye elementos relacionados con las particularidades de la molienda del carbón antracita, mineral laterítico y las mezclas de diferentes porcientos de ambas, así como la caracterización general delos materiales a utilizar.

1.1 Carbón mineral

El carbón mineral es el combustible fósil más abundante en el mundo, se encuentra presente en todos los continentes. La diversidad y la abundancia de las reservas a nivel mundial pueden afrontar el desafío estratégico de contar con un suministro seguro de energía. Es un material comparativamente estable y no presenta los problemas de fugas y derrames asociados a otros combustibles fósiles tales como el gas o el petróleo. Su mayor desventaja es el grado de contaminación del ambiente producto de las emanaciones del proceso de combustión. Por tanto se debe tener presente el aspecto ecológico, y las normas medioambientales.

1.1.1 Origen y Formación de los carbones

En eras geológicas remotas, y sobre todo en el período carbonífero, que comenzó aproximadamente hace 362,5 millones de años, 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. Debido a la acción de las bacterias anaeróbicas, la materia orgánica fue ganando carbono y perdiendo oxígeno e hidrógeno, y se formaron las turberas, constituyendo estas la primera etapa del proceso por el que la vegetación se transforma en carbón; este proceso, unido a los incrementos de

presión por las capas superiores, así como los movimientos de la corteza terrestre y, en ocasiones, el calor volcánico, comprimieron y endurecieron los depósitos con el paso del tiempo, y provocaron cambios físicos y químicos en los restos orgánicos y los transformaron en lo que hoy conocemos como carbón. Inicialmente la turba, precursora del carbón, fue convertida en lignito o carbón pardo, que son tipos de carbón con "madurez" orgánica baja. Luego de muchos millones de años, la continuidad de los efectos de la temperatura y presión produjo cambios adicionales en el lignito, incrementando progresivamente su madurez y transformándolo al rango conocido como carbones sub bituminosos.

A medida que este proceso fue ocurriendo, una serie de cambios químicos y físicos provocaron que el carbón se volviera más duro y maduro, punto en el cual se le clasifica como bituminoso o carbón duro. Bajo las condiciones adecuadas, el incremento progresivo en la madurez orgánica continua, para finalmente formar la antracita.

1.1.2 Clasificación de los carbones

Las variaciones en la edad y en la historia geológica del carbón ocasionan variaciones en el rango. La clasificación general y básica del carbón es por categoría, desde turba y lignitos en el extremo inferior de la escala, pasando por los carbones bituminosos hasta llegar a la antracita en el extremo superior. A continuación se muestra una figura donde se puede apreciar claramente el carbón mineral.

Fig.1. Imagen del carbón antracita

1.2 Aspectos generales sobre el carbón antracita

Es el mejor de los carbones, muy poco contaminante y de alto poder calórico, 34 MJ/kg. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina. Contiene de 75 a 95 % de carbono. Sobre esta última sustancia se halla el grafito, que es casi carbono puro y que es incombustible. A continuación se presentan algunas características de acuerdo a la clasificación del carbón mineral.

Los componentes principales del carbón son: vitreno, clareno, dureno y fuseno.

Vitreno: Es la parte negra, brillante y quebradiza del carbón.

Clareno: Es negro y brillante, pero en menor cantidad que el vitreno.

Dureno: Es el componente mate, gris oscuro, duro y resistente.

Fuseno: Es la parte negra, blanda y polvorosa que tiende a romperse. No es coquizable, por lo cual perjudica el poder aglomerante del carbón.

En la tabla .1 se muestran una serie de características referidas al carbón.

Tabla .1 Características generales del carbón.

Tamaño, mm	Humedad %	Ceniza %	Masa volátil %	Azufre %	Valor Calórico kcal/kg	% fino, %	Dureza
15-35	3,37	4,68	6,87	0,50	8090	8,45	3

Comparado con otros carbones es poco contaminante. Cabe destacar que no difiere mucho en cuanto a calorías con la mayoría de los carbones bituminosos (hullas). Comparado con estos últimos la antracita no mancha al ser manipulada y cuenta

con un bajo contenido de humedad. Es un material que quema emitiendo una flama azul (Ariztimuño, 2010).

1.2.1 Usos del carbón antracita

Los usos del carbón antracita son muy variados, a continuación se muestran algunas aplicaciones a nivel mundial:

- para quemar en las centrales térmicas.

- en calefacciones.

- en la producción de gas para alumbrado.

- en la industria siderúrgica.

- fabricación de gomas sintéticas y colorantes.

- generación de vapor en saunas, piscinas y baños turcos.

- fundiciones ferrosas y no ferrosas.

- lechos filtrantes.

- fundición de los metales en la industria metalúrgica.

1.3 Minerales lateríticos. Aspectos generales

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

Las lateritas se forman a partir de la lixiviación de rocas madres que pueden ser sedimentarias, metamórficas; ígneas o proto-menas. Dicha lixiviación va dejando en el residuo los iones más insolubles que son predominantemente el hierro y aluminio.

El mecanismo de lixiviación tiene una secuencia de pasos muy importantes. Primeramente ácidos disuelven la estructura cristalina de un mineral determinado del material padre, esto es seguido por la hidrólisis y precipitación de óxidos insolubles y sulfatos de hierro, aluminio y sílice. Todo esto bajo altas temperaturas en un clima monzónico subtropical húmedo. Una característica esencial para la formación de laterita es la repetición de las estaciones húmedas y secas. Las rocas son lixiviadas por el agua de lluvia que se filtra durante la temporada de lluvias, la solución resultante que contiene los iones lixiviados es llevada a la superficie por la acción capilar durante la estación seca. Estos iones forman sales que se secan en la superficie. Dichas sales son lavadas durante la próxima temporada de lluvias. La formación de laterita se ve favorecida en zonas de relieve atenuado como suaves crestas y mesetas que evitan la erosión de material superficial. Durante la formación de lateritas existe una zona de reacción donde las rocas están en contacto con agua que abarca el nivel más bajo al más alto en el que fluctúa el nivel freático. Esta zona de reacción se agota progresivamente de los iones fácilmente lixiviados de sodio, potasio, calcio y magnesio. Una solución con estos iones puede tener el pH adecuado para disolver preferentemente óxido de silicio en lugar de los óxidos de aluminio y óxidos de hierro.

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

Limonita: se define como $FeO(OH)*nH_2O$ para referirse a los óxidos de hierro, naturalmente hidratados de identidad incierta.

Serpentina: se define como un mineral con una fórmula química definida $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ formador de rocas en dos variedades fundamentales Antigorita y Crisotilo.

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

1.4 Aspectos generales de la molienda de minerales

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

La trituración y molienda son procesos de disminución de las dimensiones de los granos de los minerales mediante la destrucción de los mismos por la acción de las fuerzas exteriores que superan las fuerzas interiores de cohesión las que unen entre si las partículas del cuerpo sólido. Durante la trituración y la molienda tienen lugar un gran número de mecanismos, que no son más que los tipos de fuerzas rompedoras que actúan sobre el mineral. Se conocen cinco métodos de trituración: compresión, corte, flexión, impacto y desgaste o (fricción). Los esfuerzos necesarios para el rompimiento de los materiales se desarrollan en los equipos de trituración y molienda.

El proceso de trituración va acompañado de la compresión del material contra superficies rígidas, o por impactos contra superficies también rígidas: a la molienda

por su parte, en contraste con la trituración, le es característico la abrasión y el impacto o golpe del mineral por elementos libres como las bolas. La diferencia entre trituradoras y molinos radica en que en las primeras no existe punto de contacto entre los elementos trituradores, entre estos se tiene una holgura, la cual es ocupada por el material durante el proceso de rompimiento, a esta holgura se le conoce como cámara o zona de trituración. La trituración (molienda) de los minerales ocurre por las zonas de defectos (poros, micro poros, fisuras y micro fisuras) y por las zonas más débiles de los cristales, cuando la energía imprimida por los órganos de trituración supera los límites de dureza del mineral, (Coello, 1999)

Las finalidades de reducir el tamaño de las partículas sólidas pueden ser, liberar las especies minerales valiosas de los estériles antes de su concentración, tal y como ocurre en el tratamiento de los minerales metalíferos por flotación, además para incrementar el área de superficie disponible para la reacción química, tal y como ocurre en la reacción de la caliza con la sílice y otros minerales en un horno rotatorio o producir partículas de mineral o roca dimensionada de tamaño y forma requerida. En el caso de la reducción de tamaño antes de la concentración la extensión o cantidad a la que debe llegarla trituración depende de la finura intermolecular o del tamaño natural del grano de las partículas aprovechables.

El tamaño natural del grano puede variar ampliamente para un mismo mineral en diferentes partidas. Los procesos de reducción de tamaño generalmente conllevan varias etapas en serie. Es común incluir máquinas de concentración dentro de los circuitos de conminución, bien para evitar la sobremolienda de las partículas o para eliminar partículas estériles de los circuitos tan pronto se producen en forma liberada, (Linch1980).

En el proceso de molienda se emplean cerca de la mitad de la energía gastada por la fábrica de enriquecimiento (Wills, 2006). Por esta razón se debe tratar, en la medida de lo posible, de reducir el volumen de material sometido a estas operaciones (Lynch, 1977). El proceso de molienda se lleva a cabo en lo que se

llama los molinos dando volteretas. Los diferentes tipos de molinos son de que da volteretas o rotativo lo cual incluye de la vara, de bolas, del guijarro, el autógeno, y del tubo.

El talón de Aquiles de las máquinas de trituración y molienda es su alto consumo de energía. El equipamiento disponible para la trituración y molienda de minerales, carece de un principio organizador que le permita aprovechar al máximo la energía suministrada para el rompimiento de las partículas minerales. En la molienda, por ejemplo, la energía de rompimiento se imprime al material en forma desmedida, el grado de liberación necesario se alcanza a costa de una alta remolienda de uno o varios de los minerales participantes, de ahí su baja eficiencia. Austin (1964) establece que la energía útil en el rompimiento del mineral no supera 3 % de toda la energía consumida por el molino; por su parte, Beke (1964) determina que el consumo de energía en el rompimiento del mineral no sobrepasa 0,6 %. Con independencia de la diferencia en los resultados de ambos, debemos estar de acuerdo con que la energía que se consume en el rompimiento la partícula mineral es sumamente pequeña. Las principales pérdidas de energía están dadas, en forma de calor y ruido, en las transmisiones del accionamiento del molino. Las restantes tienen lugar durante la fricción entre partículas sin su consecuente rompimiento, en el choque metal-metal en el interior del molino y en la evaporación de la humedad contenida en la mena.

1.5 Descripción del Proceso de Molienda del carbón

El carbón mineral es usado en procesos en los que se requiere una gran demanda de energía, por lo que su principal consumo se da en: la generación eléctrica, la industria del cemento y la industria metalúrgica, debido a su bajo costo y a la cantidad de energía que se le puede extraer. Pero la combustión de este en su forma natural, es decir, las condiciones en las que es extraído es bastante ineficiente (alrededor del 5% de eficiencia), debido a dos factores importantes: La humedad presente y el tamaño de mineral.

La pulverizaron del carbón, permite una combustión más eficiente, ya que dentro del proceso se consiguen dos efectos importantes sobre el carbón: La deshidratación puesto que la reducción en el contenido de humedad tiene un efecto positivo en la tasa de transferencia de calor; y el aumento de la superficie específica, es decir, la superficie del carbón expuesta a la combustión por unidad de volumen. El tamaño máximo de carbón suministrado a los pulverizadores suele ser entre 19 y 75 mm. Hasta un tamaño máximo de unos 75 mm, no se afecta la capacidad de algunos tipos de pulverizador mientras que otros sí muestran su sensitividad en todo momento. Los finos, carbón de un tamaño de 3,35 mm o menos, cuando están mojados, son la causa principal de obstrucciones, en particular cuando su contenido excede de 25% a 30% por masa del total de carbón. La distribución del tamaño de partículas o granulometría varía mucho según el tipo de carbón, método de extracción, limpieza del carbón, equipo para trituración y el grado de manejo y manipulación.

En el proceso de molienda del carbón mineral, el material es pulverizado hasta que una cantidad mayor o igual al 80% del material alimentado al molino tenga un tamaño menor a 75 μm, es decir, que el 80 % de este, pase por una malla número 200, según la norma D-408 ASTM; luego este polvo es llevado fuera del molino a través de un sistema de transporte neumático, en una mezcla aire-polvo de carbón; durante el proceso de molienda y transporte, el carbón es deshidratado, para optimizar sus propiedades combustibles. El sistema de transporte, conduce la mezcla hasta un sistema de colección de polvo, que se encarga de separar el material particulado del aire, este último es conducido hacia una chimenea para su liberación a la atmósfera; y el polvo colectado es transportado hacia la tolva de alimentación para su posterior uso en los quemadores.

La finalidad del proceso de molienda es pulverizar el carbón mineral aumentando su eficiencia energética debido al incremento de área por unidad de volumen y a la deshidratación lograda durante el proceso.

Para el proceso de molienda de carbón mineral, para su posterior uso como combustible industrial, se debe considerar los siguientes factores relevantes:

- Calidad del carbón.
- Fuentes de aire caliente para la deshidratación del carbón.
- Número de puntos de consumo de combustible.
- Tipo de horno y espacio disponible, especialmente cuando se instala una planta nueva para un horno existente.
- Sistemas de seguridad industrial.

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

1.6 Relaciones energía tamaño

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

En los últimos 50 años muchas han sido las publicaciones referidas al tema de la relación energía–reducción de tamaño: Charles (1957), Schuhman (1960),Austin y Klimpel (1964), Harris (1966), Kapur y Fuesternau (1988), Tijonov (1984) y Coello (1993), entre otros.

La mayoría de ellas se apoya en las denominadas leyes de trituración y molienda. Esto denota que la descripción matemática de la dependencia entre energía consumida en la molienda y reducción de tamaño de los trozos minerales, está en la preferencia de los científicos e investigadores del tema. 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. En este sentido, la reducción del tamaño se estudió como función del área de la superficie de la partícula nuevamente formada, el volumen del material molido y el diámetro. Los experimentos han demostrado que en el proceso de reducción de tamaño, la energía consumida por unidad de masa es proporcional a las pequeñas variaciones del tamaño de las partículas, y que la energía requerida para lograr dichas variaciones es inversamente proporcional a una función dada del tamaño inicial del mineral (Lynch, 1977). El profesor Hukki (1975) sugiere que la relación energía consumida-tamaño de la partícula es una combinación de las tres leyes: Precisamente, las diferentes interpretaciones deRittinger, Kick y Bond a esta correlación, dieron lugar a la propuesta de las leyes de trituración.

Rittinger (1867) en su modelo propone que el área de la superficie nuevamente formada es proporcional a la energía consumida en la molienda. Más tarde, Kick (1883) expone también su teoría.

La diferencia en los resultados estimados por estos modelos, provocó una larga discusión, que se agudizó a inicios de la década del 50, cuando Fred Bond publicó las conclusiones de sus investigaciones. Bond (1950), juzgando la teoría de

Rittenger, 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; hoy se conoce que sólo una pequeña parte de esta energía es disipada en el rompimiento de los trozos minerales.

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

A pesar de haberse realizado importantes intentos de caracterizar por vías alternativas el comportamiento energético ante la fragmentación de los diversos materiales, siempre se fija como referente comparativo en primera instancia el análisis de Bond dada la necesidad de evaluar los índices energéticos en los diferentes molinos. (Austin et al 1973; Yap et al 1982; Austin et al 1983; Deister1987; Levin 1989; Levin 1990; Coello 1993.

1.7 Eficiencia energética de los procesos de molienda

La eficiencia respecto a la energía de una operación de molienda se define como la energía que se consume en comparación con la energía ideal requerida. La eficiencia energética teórica de operaciones de molienda está entre el 0.06 al 1 por 100, basándose en valores de la energía superficial del cuarzo. La incertidumbre en estos resultados se debe a la incertidumbre misma de la energía superficial teórica.

La eficiencia energética práctica se define como la eficiencia de la molienda técnica en comparación con los experimentos de trituración en el laboratorio. Se han obtenido eficiencias prácticas del 25 al 60 por 100.

El coeficiente de energía se basa algunas veces en la ley de Rittinger, es decir, nueva superficie producida por unidad de energía introducida. Por lo común, el tiempo de molienda es la variable experimental. El coeficiente de energía se expresa también en toneladas/hp-h que atraviesan un tamaño de malla específico.

El índice de Bond ha sido definido como el parámetro de la reducción de tamaño o dimensional, que expresa la resistencia del material a la trituración y a la molienda (Morrell, 2004). Este índice se ha empleado en la industria desde finales de la década del 20 del pasado siglo XX (Mosher y Tague, 2001). En diversos trabajos se dan indicaciones prácticas para facilitar la determinación del índice de Bond, con diferentes tipos de materiales. El índice de Bond se define a partir de la formulación de la tercera ley de la fragmentación, la cual plantea:

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

En la que W es el consumo energético específico, en kWh/t, d y D son los tamaños que dan un pasante del 80 % en producto y alimentación respectivamente, expresados en micras, y Wi es el índice de trabajo o índice de Bond en kWh/t. De la fórmula se puede deducir una definición, de valor más teórico que práctico, del índice de Bond, que sería el consumo energético específico en kWh/t necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras, y según el propio Bond sería un parámetro de conminución que expresa la resistencia del material ante las operaciones de trituración y molienda.

Según Bond, si el material se comportase de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso muy poco habitual, por otra parte), el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las sucesivas etapas de conminución. Pero la realidad es que los materiales frecuentemente son heterogéneos en su estructura, pudiendo hablarse normalmente de un tamaño de grano natural, de

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

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

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.

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 ±20 %. Es el procedimiento habitual para el dimensionado de trituradoras, molinos de barras y bolas, tanto a escala piloto como industrial.

1.7.1 Ensayo estándar de Bond

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

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

Desde el punto de vista técnico, el índice de trabajo, constituye el método más fiable de caracterización de un mineral con vista al diseño de tipo cilíndrico en los que se va a procesar. Desde el punto de vista teórico, es sin duda una investigación a la práctica, ya que los clásicos ensayos de caracterización de los materiales se relevan insuficientes a la hora de predecir el comportamiento de un material antes de la trituración. En todo caso existen estudios en los que se ve la dificultad de tal pretensión (Bearman et al., 1997).

No cabe duda que la lógica podría intentar buscar alguna relación entre parámetros tales como la dureza o la resistencia a la tracción, con el comportamiento que un determinado material tiene ante la trituración, por ejemplo. Podría incluso suponerse que cuanto más duro y/o resistente a la tracción fuese un material, más difícil sería su trituración, o incluso extender tal suposición a la implicación en sentido contrario, convirtiendo tal condición en necesaria y suficiente. Pero la práctica nos da

contraejemplos para cada una de las implicaciones. Tal es el caso del diamante o algunos tipos de vidrios, materiales duros pero frágiles que llevarían a valores bajos del índice de trabajo, o en los casos de micra o grafito, materiales blandos o plásticos, pero que debido a sus peculiaridades geométricas nos ofrecen valores de índice de Bond altos.

1.8 Trabajos precedentes sobre la investigación

A partir de 1980, se empezaron las investigaciones para desarrollar gasolina a partir de carbón. El alto coste en la producción de gasolina de este modo, hace que no sea competitivo con el método "tradicional", aunque el hecho de que las reservas petrolíferas esté disminuyendo y que los pozos son cada vez más pequeños e inaccesibles hace que vuelva a estar en auge esta posibilidad (Ariztimuño, 2010). Los procesos de preparación mecánica en especial la molienda, son operaciones de mucho consumo de energía (Laborde et al. 2000).

1.8.1Trabajos realizados sobre el carbón antracita

Con el objetivo de procesar el carbón antracita para su utilización en la producción se han realizado muchos trabajos investigativos entre ellos se encuentran:

Coello (1999), abordando el tema de la cinética de molienda, dejó claramente plasmado su definición. Pérez (2011) realizó un estudio en Sagua de Tánamo caracterizando la cinética de molienda para el yacimiento de las Tobas Vítreas, llegando a la conclusión de que al molerse este mineral por cinco minutos o más se obtiene un producto que se puede utilizar como aditivo puzolánico al cemento con las condiciones óptimas para este fin.

Coello (1993), demuestra un vasto conocimiento referido al proceso de molienda por vía seca de los minerales lateríticos. Dejando claro una serie de fenómenos y transformaciones físicas y físicas- químicos, entre los cuales se pueden citar la agregación y desintegración de conglomerados, la variación de la dureza del mineral en un amplio diapasón, así como su densidad. La optimización de la

carga de bolas en el rango de 40-50% con el debido ahorro de energía pasa a ser una de las formas más viables para lograr la molienda de estos minerales lateríticos. Quedando claro en este trabajo que la composición granulométrica del producto tanto como la carga de bolas tienen una gran influencia sobre los principales indicadores del proceso de molienda.

Núñez y Pérez (2003), obtuvieron en su trabajo un modelo matricial, caracterizando así la molibilidad y características del mineral estudiado. Esto representó un avance también en la cinética de molienda de los minerales lateríticos en particular para la fragmentación.

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 poliminerales. 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 (2004), efectúa una investigación en el molino de bolas y el ventilador de recirculación, unos de los equipos principales en el área de molienda. 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.

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.

Lamorú (2012) Determinó el rango de variación del índice de Bond a las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, a través de diferentes relaciones de serpentina – limonita. Determinó el modelo cinético acumulativo para la simulación de la molienda a escala industrial. Como resultado fundamental de la investigación se obtuvo que el consumo específico de energía en los molinos de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” debe fluctuar entre 3,4 y 24,4 kWh/t para composiciones extremas del material a moler y el modelo cinético acumulativo obtenido permite realizar la simulación del proceso de molienda a escala industrial bajo las condiciones actuales de operación.

Peña (2015) estableció el modelo cinético acumulativo para la molienda del carbón antracita y planteó la posibilidad de utilizar el carbón como material alternativo en la generación de energía en la industria extractiva del níquel. En este trabajo arribó a la conclusión de que la muestra de carbón antracita tomada del depósito de la “Empresa Ernesto Che Guevara”, desde el punto de vista granulométrico, es poco homogénea y con tendencia a la prevalencia de granos gruesos. La cinética de la molienda del material utilizado muestra que la desaparición de las clases gruesas comienza desde el primer minuto, mostrando una reducción significativa de las dos primeras clases en este tiempo. La velocidad de desaparición de las clases (k) depende del tamaño de partículas minerales. El comportamiento del carbón antracita para la función selección es que: a medida que aumenta el tamaño de la partícula se incrementa de forma irregular la velocidad de molienda del material, por lo que se

produce un aumento de la probabilidad de fractura de las partículas. Para los valores obtenidos de la función de rompimiento, se puede afirmar que son similares a los reportados en los trabajos de Lynch (1977), King (2001) y Martins (2005).

Grettel (2016) Demuestra que las curvas cinéticas de las mezclas ocupan un lugar intermedio entre las curvas cinéticas de los minerales constituyentes de las mezclas molidos por separado. La molibilidad de las mezclas de carbón antracita y las laterítas dependen inobjetablemente de las proporciones en la mezcla del primero y por ende la adición de la antracita a la alimentación del molino ira a la disminución de su molibilidad.

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Los conocimientos existentes sobre las mezclas de carbón antracita y mineral laterítico son insuficientes.
- El índice de Bond, permite estimar el comportamiento energético ante la fragmentación de los diversos materiales, y se considera uno de los métodos de más eficacia en la práctica industrial.
- El conocimiento desarrollado sobre la molienda de las mezclas de antracita y mineral laterítico cubre los elementos relacionados con los estudios cinéticos y la molibilidad expresado en términos de las fracciones de fractura y selección.
- El índice de Bond es una herramienta de considerable utilidad para evaluar el consumo energético de la molienda de minerales.

2. MATERIALES Y METODOS

Es de gran importancia en todo trabajo investigativo hacer una correcta selección de los materiales y los métodos a utilizar. Con el desarrollo de este capítulo se proyecta:

1. Exponer los procedimientos, las técnicas, los equipos y materiales empleadas en la investigación.

2. Argumentar los procedimientos, técnicas y métodos empleados en la solución del problema planteado.

Para el desarrollo de esta investigación, el carbón antracita fue tomado del puerto existente en la zona de Rolo Monte Rey del municipio de Moa. El carbón procede del yacimiento que se encuentra en Vietnam perteneciente a la corporación COALIMEX. Este producto se transporta vía marítima hacia el puerto de Moa para su posterior procesamiento.Los requisitos de calidad del carbón antracita se exponen en la tabla .2 y en la tabla .3 la composición granulométrica del carbón in situ.

Tabla .2 Requisitos a la composición química del carbón antracita.

N	Azufre, %	Hierro, %	Humedad, %	Ceniza, %	Masa de los volátiles, %
1	≤ 0,5	≤ 0,5	Max 8	≤ 7	≤ 7

Tabla .3 Composición granulométrica del carbón antracita in situ.

N	**Fracción de tamaño, mm**	**Retenido, %**	**Retenido acumulativo, %**
1	>6,0	0,00	0,00
2	6,0-4,76	5,00	5,00
3	4,76-2,5	68,00	73,00
4	2,5-1,19	16,00	89,00
5	1,19-0	11,00	100,00
6	**Total**	100,00	

Las muestras del mineral laterítico fueron tomadas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur, Camarioca Este y Punta Gorda los cuales se procesarán en la Empresa ‘’Comandante Ernesto Che Guevara en el 2018. La composición granulométrica y química de las lateritas aparecen en la tabla 4.

La muestras fueron seleccionadas garantizando dos criterios básicos para estos casos: primero, que la misma sea suficiente para la realización de los experimentos y segundo,

que sea representativa tanto cuantitativamente como cualitativamente Posteriormente fueron preparadas y homogenizadas por un método clásico: el método del cono y el anillo.

Tabla .4 Composición química y granulométrica de las lateritas empleadas en el trabajo.

Masa inicial (g)	Mallas mm	Mallas micras	Masa retenida (g)	Retenido %	Análisis quimico por fracciones; %						
					Ni	Co	Fe	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3
45517,90	75	75000	5967,40	13,11	1,06	0,013	9,79	23,68	32,39	10,57	0,09
	50	50000	380,00	0,83	1,34	0,027	10,56	27,58	40,29	1,06	0,35
	25	25000	1407,50	3,09	1,25	0,040	25,42	16,11	23,21	6,16	0,87
	16,5	16500	1216,00	2,67	1,12	0,055	27,29	12,43	20,84	8,26	1,03
	12,5	12500	892,90	1,96	1,20	0,062	30,43	10,81	16,55	7,49	1,17
	6.3	6300	3591,80	7,89	1,16	0,072	36,28	7,04	12,79	8,55	1,38
	3,15	3150	4330,30	9,51	1,04	0,072	38,97	5,08	9,62	9,02	1,49
	2,25	2250	2254,10	4,95	1,00	0,068	39,13	4,08	7,89	9,19	1,41
	1	1000	7194,30	15,81	1,06	0,078	39,67	3,49	7,73	9,81	1,57
	0,71	710	179,46	0,39	0,90	0,080	39,93	3,58	7,12	12,38	2,22
	0,5	500	451,37	0,99	0,92	0,093	39,06	4,11	7,75	11,83	2,30
	0,315	315	532,95	1,17	0,97	0,122	38,48	4,38	8,87	11,87	2,21
	0,25	250	255,60	0,56	1,03	0,151	37,78	4,24	5,53	11,57	2,14
	0,15	150	1555,33	3,42	1,11	0,199	37,63	4,79	10,19	11,37	2,06
	0,125	125	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,075	75	706,97	1,55	1,25	0,195	38,83	1,13	10,84	10,32	2,34
	0,045	45	59,82	0,13	1,26	0,155	40,08	3,78	9,43	9,39	2,63
	-0,045	-45	14542,10	31,95	1,25	0,078	44,33	2,41	7,12	8,33	1,74
			45517,90	**100,00**							

2.1. Preparación de las muestras

Unos de los métodos empleados en la preparación de las muestras son el anillo y el cono. Esta técnica es ampliamente utilizada en la homogeneización de los materiales granulados.

El método del anillo y cono según Mitrofanov (1982), comienza con el vertido cuidadoso del material en forma de cono (ver figuras .2, .3 y .4) y con una pala, se echa en el vértice de un montón que adquiere forma de cono, y se distribuye uniformemente por todos sus lados. El menudo restante se recoge minuciosamente y también se arroja en el vértice del cono. Después de esto se coloca una tabla de madera delgada y se introduce a presión en el material aproximadamente a una profundidad equivalente a la anchura de la tabla. Luego, conservando la posición de la tabla paralela a la posición inicial, y por tanto, a la base, dicha tabla se desplaza a un lado.

Con esto el material arrastrado por la tabla se distribuirá por la superficie lateral de la mitad del cono. Después la tabla en la misma posición, se mueve en dirección contraria

y se desplaza la segunda mitad del material desde el vértice del cono hacia la superficie lateral de la otra mitad del cono truncado.

Más tarde esta posición de la tabla se cambia en 90º. La operación de nivelación se repite hasta que se obtenga una capa de material cómoda para el cuarteo, la cual debe ser no mayor de 100 a 150 mm y tener un diámetro no menor que las mayores partículas del material. Se puede nivelar el cono con una pala, desplazando gradualmente el material desde el eje del mismo, por los radios a la periferia.

El cuarteo se realiza después de nivelar el montón: con la arista de esa misma tabla en la capa del material se hacen dos surcos mutuamente perpendiculares, los cuales se cruzan en proyección del vértice, así el montón se divide en cuatro partes. Posteriormente dos cuartos opuestos se unen siendo estos la mitad de la muestra. Una mitad de ésta se desecha, y con la otra, se repite las operaciones de lanzamiento en el cono y cuarteo, la operación se realiza hasta que se obtenga la muestra con la masa correspondiente al diámetro de las partículas más gruesas del material.

Fig. 2. Formación del cono

Fig. 3. Formación del anillo

Fig. 4. División con cruceta

Divisor de Johnson.

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

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.

Fig. 5. Divisor Johnson

2.2 Procedimiento para la determinación de la composición granulométrica

2.2.1 Análisis de tamiz

El análisis de tamices consiste en cernir la muestra a través de un juego estándar de tamices, y en determinar el porcentaje de residuos en cada uno de estos, con respecto a la masa de la muestra inicial. En este trabajo se utiliza la serie de Taylor, en el que el tamaño de la malla metálica anterior se diferencia del tamaño de la malla metálica posterior en $\sqrt{2}$ veces. La masa mínima se determina por la siguiente fórmula:

$$Q_{min} = 0{,}04 * D_{max} + 0{,}5 D_{max} \quad (2)$$

Donde:

Qmin: es la masa de muestra mínima necesaria para realizar el análisis granulométrico (kg).

D: es el diámetro máximo de la muestra d_{95}(mm).

Los ensayos para determinar la composición granulométrica se realizaron en el Centro de Investigaciones del Níquel “Capitán Alberto Fernández Montes de Oca“

La serie de tamices utilizada para el índice de Bond fue: (3,15; 2,38; 1,6; 1,0; 0,71; 0,5; 0,4; 0,25; y 0,15). Y la serie de tamices utilizada para la caracterización de la muestra in situ fue: (50; 25; 12,5; 9; 6,3; 3,15; 2,38; 1,6; 1,0; 0,71; 0,5; 0,4; 0,25; y 0,15).

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

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.

2.3 Procedimiento para la determinación del Índice de Trabajo o de Bond

El método estándar de Bond detallado se caracteriza por ser más exacto que el método estándar de Bond para molinos de bolas. Los pasos están especificados de una forma más minuciosa, y se tiene en cuenta la presencia de finos en la alimentación.

1. Preparación de la alimentación. La carga debe estar seca y triturada a un tamaño inferior a 3,36 mm.

2. Determinación de la densidad aparente de la alimentación.

3. Cálculo del peso de 700 cm^3de alimentación mediante el valor de la densidad aparente, y ese será el peso de alimentación.

4. Cálculo del peso de producto ideal, suponiendo una carga circulante de 250 %. Este valor será:

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

Donde:

Pi: es peso ideal (%)

700: es el peso de alimentación, (cm^3)

3,5: es la carga circulante

5. Caracterización granulométrica de la alimentación.

6. En el caso de que en el análisis granulométrico realizado a la alimentación, resulte un porcentaje superior al 28 %, de tamaños inferiores a la malla de corte del ensayo, se asignará cero al número de revoluciones y al número de gramos neto por revolución en el primer periodo. En ese caso, debe separase el cernido de la carga de alimentación correspondiente al tamiz de corte, y completar con una porción representativa de la alimentación fresca.

7. Introducción de la carga de alimentación en el molino.

8. Se hace girar el molino un número arbitrario de revoluciones, que suele ser 50 para tamaños gruesos y 100 para tamaños finos (incluso más de 100 si el material es de dureza media).

9. Se descarga el molino sobre una superficie dura, separando las bolas del material; se limpia el interior del molino y las bolas para recuperar la totalidad de la alimentación introducida, y se cargan de nuevo las bolas limpias.

10. Se tamiza la descarga del molino con el tamiz de corte seleccionado, evitando sobrecargar el tamiz; se puede agilizar esta operación disponiendo una serie de tamices sobre el tamaño de corte.

11. Se pesa el total de rechazo tamizado.

12. Se calcula el peso del pasante por diferencia entre el peso total de producto y el peso de rechazo, aunque si es posible, se recomienda realizar la pesada directa como comprobación.

13. Se calcula la cantidad de material de tamaño menor que el del tamiz de corte que estaba presente en la alimentación, según el análisis realizado en el paso 5, y

en la cantidad adicionada de alimentación fresca en la carga de alimentación al primer período.

14. Se calculan los gramos netos de producto, que corresponde al peso de producto introducido (calculado en el paso 12), menos el peso de material inferior al tamaño de corte introducido con la alimentación (calculado en el paso 13).

15. Se calcula los gramos netos producidos por revolución, dividiendo el número de gramos netos (obtenidos en el paso 14), entre el número de revoluciones del periodo.

16. Se añade nueva alimentación de muestra representativa al rechazo obtenido, para constituir de nuevo el peso definido en el paso 3.

17. Se calcula la cantidad aproximada de producto con tamaño menor que el del tamiz de corte presente en la cantidad añadida en el paso 16, basándose en el análisis granulométrico del paso 5. Este valor puede ser anotado para usarlo en el cálculo de la carga de entrada para el siguiente período, como se describió el paso 12.

18. Se calcula el peso que deberá ser molido en el próximo período para obtener la carga circulante deseada; se obtiene restando al peso de producto ideal, según el paso 4, la cantidad de producto pasante presente en la alimentación al molino.

19. Se calcula el número de revoluciones correspondientes al siguiente período. Se obtiene dividiendo la cantidad de material que debe ser molido (calculada en el paso 18), entre el número de gramos netos por revolución del período anterior (calculado en el paso 15).

20. Se añade nueva alimentación al rechazo del ensayo (como en el paso 16) y se repiten los pasos del 7 al 20. Deben realizarse, como mínimo, 5 periodos de molienda.

21. Es de esperar que el gramaje neto por revolución frente al número de periodos, muestre una tendencia hacia arriba o hacia abajo, de forma que en el quinto periodo o posterior, se produzca una inversión de tal tendencia. De no presentarse esta inversión, se deberá continuar el ensayo hasta que no se produzca variación significativa en el número de gramos netos por revolución.

22. Promediando los valores obtenidos en los dos últimos períodos, se calcula el porcentaje de carga y el número de gramos netos por revolución. Este promedio es el índice de molturabilidad en molinos de bolas, *Gbp*.

23. Se determina la distribución granulométrica del pasante del tamiz de corte en el último ensayo realizado.

24. Se representan las distribuciones granulométricas obtenidas en los pasos 5 y 23, y se determina el tamaño correspondiente al 80 % de pasante.

25. Se calcula el índice de trabajo *Wi*, en molino de bolas, expresado en kWh/t_{corta} mediante la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{44.5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{F_{80}} \right)} \qquad (4)$$

Donde:

P_{75}: tamaño de corte, µm

P_{74}: tamaño de corte, µm

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

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

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

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

El Índice de Trabajo del carbón antracita fue determinado en el molino de Bond perteneciente al Laboratorio Tecnológico del Centro de Investigaciones del Níquel(CEDINIQ), para ello se utilizó la carga de bola recomendada por Bond (Giralt et al, 2006), las cuales se muestran en las tablas .5 y .6.

Tabla .5 Distribución de bolas recomendadas por Bond.

Tamaño de bola (cm)	**No. De bola**	**Peso (kg)**	**Salida parcial**
3,81	18	8.803	43,7
3.175	29	7.206	35,8
2,54	44	0.672	3.3
2.223	69	2.011	10,0
1,905	93	1,433	7,1
Total:	**285**	**20,125**	**100,0**

Tabla .6 Masa de las bolas a partir de las empleadas por Bond.

M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
6,5	5,3	0,5	1,5	1,1

2.4 Principales materiales y equipos utilizados en la investigación

En las figuras .6, .7, .8 y .9 se muestran los equipos fundamentales utilizados para efectuar la preparación de las muestras y los experimentos planificados.

Fig. 6. Trituradora de mandíbulas

Fig. 7. Molino de Bond

Fig. 8. Tamizadora

Fig. 9. Estufa

Además de los mostrados anteriormente se hizo uso de algunos otros no menos importantes como son:

- Accesorios de muestreo (pala y bandejas para muestreo)

- Juego de tamices seleccionados según la serie de Tyler

- Balanza digital

- Cronómetro digital

- Probeta (plástica) graduada a 1000 mL

CONCLUSIONES PARCIALES

El diseño de la investigación garantiza adecuadamente el tratamiento del problema, se incorporan los elementos relacionados con la toma y preparación de las muestras, aspectos considerados uno de los momentos más importantes en la investigación. También se define el procesamiento de los datos y los materiales aportados por los experimentos mediante 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.

3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Introducción

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos durante la investigación, la caracterización granulométrica del carbón antracita y las mezclas con el mineral laterítico, tanto durante su etapa preparatoria como para el material producto y se tiene en cuenta el comportamiento de cada ciclo de molienda en ensayo para la obtención del rango de variación del índice de Bond.

3.1 Resultados del análisis granulométrico realizado

Los resultados obtenidos en el análisis granulométrico realizado para las muestras de carbón antracita y mineral laterítico, aparecen en las tablas .7 y .8.

Tabla .7 Composición granulométrica del carbón antracita.

Clases de tamaño, mm	**Tamaño de partícula, mm**	**Retenido parcial, %**	**Acumulativo, %**	
			Retenido	**Cernido**
3,15/2,38	2,380	15,08	15,08	100,00
2,38/1,6	**1,600**	**36,59**	**51,67**	**84,92**
1,6/1	**1,000**	**28,08**	**79,75**	**48,34**
1/0,71	0,710	9,64	89,39	20,25
0,71/0,5	0,500	5,08	94,47	10,62
0,5/0,25	0,250	1,23	95,70	5,54
0,25/0,125	0,125	2,67	98,37	4,30
0,125/0,075	0,075	0,92	99,29	1,63
0,075/0	0,000	0,72	100,00	0,72
Total		100,00		

A juzgar por los resultados de la citada tabla, el tamaño máximo de la muestra es cercano 3,15 mm, la distribución de los granos minerales en la muestra obedece a la forma de una “S”, siendo el tamaño medio aproximadamente igual 1 mm. En la fig. 10 se muestra la distribución de tamaño del carbón antracita para la cual el modelo de representación de la distribución de tamaño mejor ajustado es el modelo de Gauss-Gaudin-Schumann como se muestra en la ecuación 5.

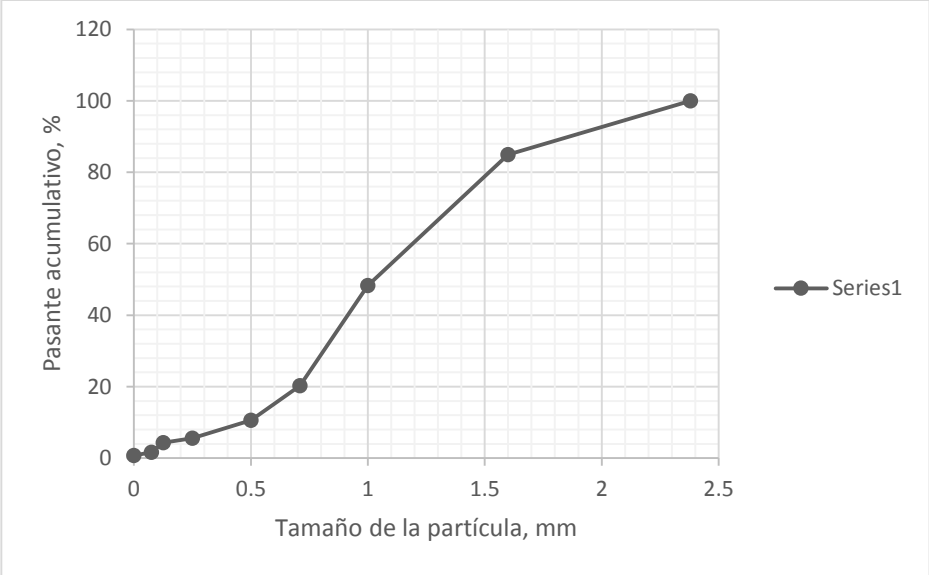

Fig. 10. Distribución de tamaño del carbón antracita.

El modelo G-G-S para la antracita, aparece más abajo.

$$W = \left(\frac{d_i}{3150}\right)^{0,9731} \quad (5)$$

Tabla .8 Composición granulométrica del mineral laterítico.

Clases de tamaño, mm	**Tamaño de partícula, mm**	**Retenido parcial, %**	**Acumulativo, %**	
			Retenido	**Cernido**
3,15/2,38	2,380	2,73	2,73	100,00
2,38/1,6	**1,600**	**7,68**	**10,41**	**97,27**
1,6/1	**1,000**	**13,18**	**23,59**	**89,59**
1/0,71	0,710	10,03	33,62	76,41
0,71/0,5	0,500	7,94	41,56	66,38
0,5/0,25	0,250	15,18	56,74	58,45
0,25/0,125	0,125	10,98	67,72	43,27
0,125/0,075	0,075	32,28	100,00	32,28
0,075/0	0,000	0,00	100,00	0,00
Total		100,00		

El mineral laterítico (tabla .8, fig. 11) sigue una tendencia un tanto diferente; en la muestra de este mineral prevalecen los granos gruesos. El tamaño máximo es de 3,15 mm.

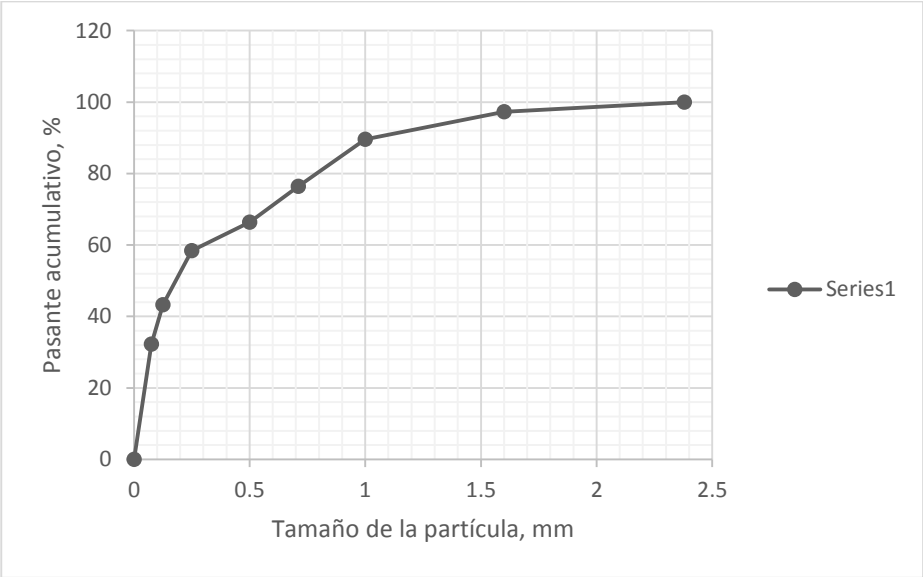

Fig. 11. Distribución granulométrica del mineral laterítico.

En las tablas .9, .10 y .11 se muestra la distribución de tamaño de las partículas de las mezclas preparadas de carbón antracita y mineral laterítico en las proporciones 3:1; 1:1 y 1:3.

Tabla .9 Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 1:3

Clases de tamaño, mm	**Tamaño de partícula, mm**	**Retenido parcial, %**	**Acumulativo, %**	
			Retenido	**Cernido**
3,15/2,38	2,380	14,30	14,30	100,00
2,38/1,6	**1,600**	**32,77**	**47,07**	**85,70**
1,6/1	**1,000**	**24,76**	**71,83**	**52,93**
1/0,71	0,710	8,70	80,53	28,17
0,71/0,5	0,500	4,18	84,71	19,48
0,5/0,25	0,250	1,72	86,43	15,30
0,25/0,125	0,125	3,16	89,59	13,58
0,125/0,075	0,075	3,66	93,25	10,42
0,075/0	0,000	6,76	100,00	6,76
Total		100,00		

La adición del carbón antracita hace variar la composición granulométrica de las muestras. Dado su mayor grosor, la tendencia de la distribución granulométrica se ve afectada por el incremento de contenido de las clases gruesas; a medida que aumenta la presencia del carbón en la mezcla, se incrementa el contenido de los granos gruesos

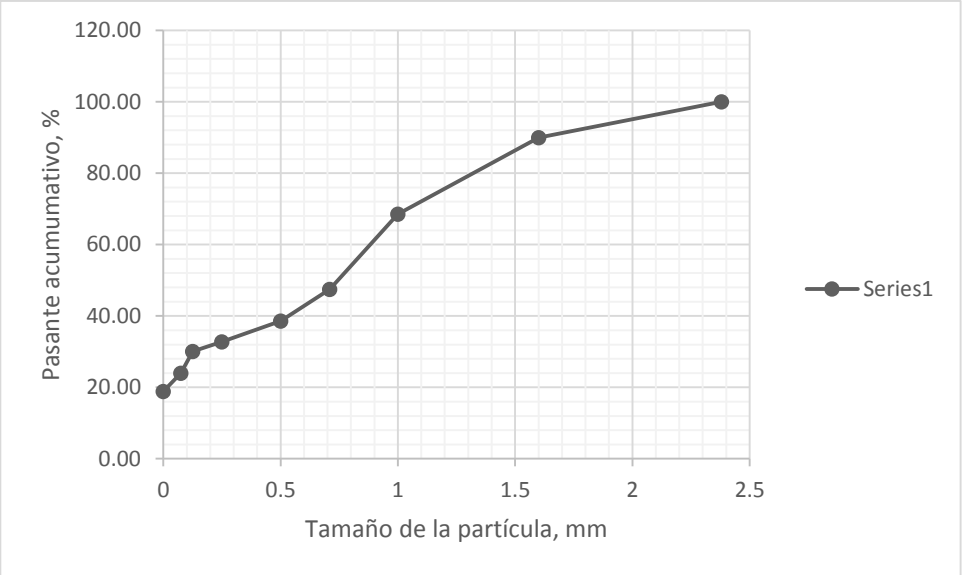

Fig. 12. Distribución granulométrica de la mezcla antracita/laterita

Tabla .10 Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 1:1.

Clases de tamaño, mm	**Tamaño de partícula, mm**	**Retenido parcial, %**	**Acumulativo, %**	
			Retenido	**Cernido**
3,15/2,38	2,380	10,03	10,04	100,00
2,38/1,6	**1,600**	**21,42**	**31,46**	89,96
1,6/1	**1,000**	**21,08**	**52,54**	68,54
1/0,71	0,710	8,85	**61,39**	47,46
0,71/0,5	0,500	5,87	**67,26**	38,61
0,5/0,25	0,250	2,68	**69,94**	32,74
0,25/0,125	0,125	6,11	**76,05**	30,06
0,125/0,075	0,075	5,07	**81,12**	23,95
0,075/0	0,000	18,88	**100,00**	18,88
Total		100,00		0

La mezcla que contiene mayor cantidad de finos, es la muestra con un 25 % de carbón, aunque en ella la tendencia de prevalencia de granos gruesos se mantiene.

Tabla 11. Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 3:1.

Clases de tamaño, mm	Tamaño de partícula, mm	Retenido parcial, %	Acumulativo, %	
			Retenido	Cernido
3,15/2,38	2,380	9,82	9,81	100,00
2,38/1,6	**1,600**	**19,30**	29,11	90,19
1,6/1	**1,000**	**16,13**	45,24	70,89
1/0,71	0,710	9,33	54,57	54,76
0,71/0,5	0,500	6,44	61,01	45,43
0,5/0,25	0,250	3,96	64,97	38,99
0,25/0,125	0,125	8,51	73,48	35,03
0,125/0,075	0,075	7,42	80,90	26,52
0,075/0	0,000	19,10	100,00	19,10
Total		100,00		

En la figura 13 se presentan las curvas granulométricas del mineral laterítico, el carbón antracita y sus mezclas. A juzgar por dicha figura, las curvas de la distribución granulométrica de las mezclas ocupan un lugar intermedio entre ambos materiales.

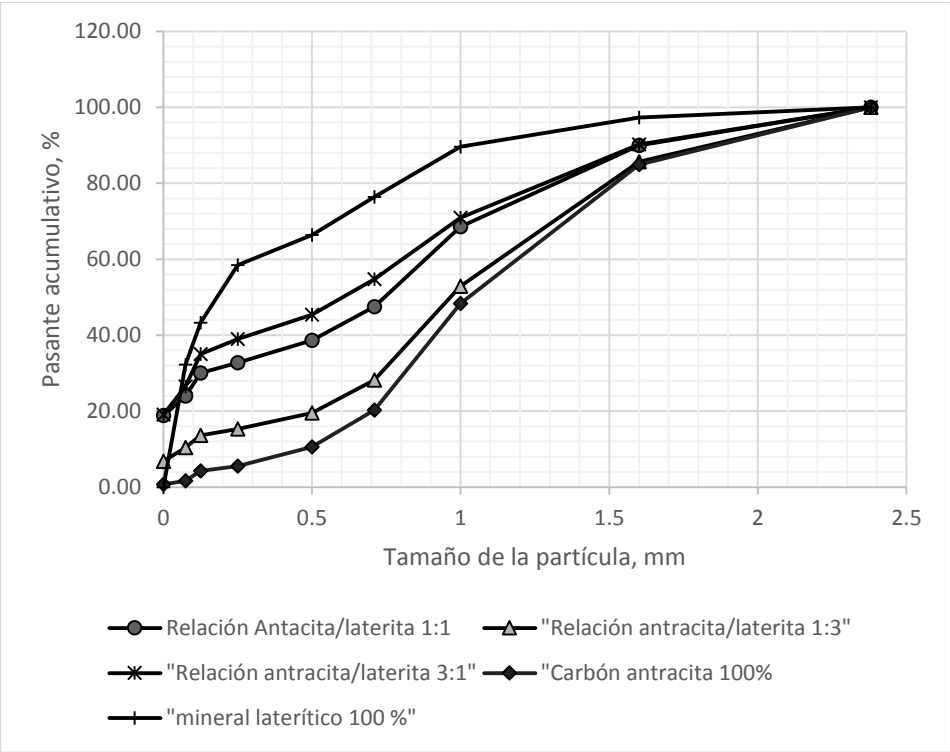

Fig. 13. Curvas granulométricas de la laterita, la antracita y sus mezclas.

Estos resultados son coincidentes con Coello et al. (2008), quienes estudiando la molibilidad de las mezclas de serpentinita y limonita demostraron que las mezclas ocupan un lugar intermedio entre las fracciones “puras” de ambos materiales.

3.2 Resultados obtenidos para determinar el índice de Bond

En las tablas 12 y 13 se muestran los resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para el carbón antracita y el mineral laterítico. Los resultados del Gbp en la tabla 12 demuestran que su valor se invierte en el ensayo 5, a quién corresponde una molturabilidad de 0,7264 g/rev.

Tabla 12. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para el carbón antracita.

# de ciclos	Peso de carga fresca g	Pasante a la malla, 0,15 mm		rpm	Pasante a la malla 0,15 mm		Gbp g/rpm
		Alimentación	A moler		Finos producidos g	Finos Netos g	
1	600,50	4,50	167,07	100	32,10	27,60	0,27
2	32,10	0,24	171,33	621	298,30	298,06	0,48
3	298,30	2,24	169,33	353	171,40	169,16	0,47
4	171,40	1,29	170,29	355	254,10	252,81	0,71
5	254,10	1,91	169,67	238	175,00	173,09	0,72
6	175,00	1,31	170,26	234	166,00	164,69	0,70

Comparando con los resultados de la molturabilidad del mineral laterítico (tabla 13), la producción de finos en los ciclos de la determinación del índice de Bond del carbón antracita es incomparablemente inferior que el primero. Esto habla de una menor molibilidad del carbón y confirma los resultados de Román (2016) y Peña (2015). Estos autores arriban a la conclusión que de acuerdo a los valores de la función selección, el carbón antracita posee una molibilidad menor que el mineral laterítico.

Tabla 13. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para el mineral laterítico

# de ciclos	Peso de carga fresca g	Pasante a la malla, 0,15 mm		rpm	Pasante a la malla 0,15 mm		Gbp g/rpm
		Alimentación	A moler		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

Los resultados de la determinación del índice de Bond para mezclas estudiadas se muestran en las tablas .14, .15 y .16.

Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 3:1.

Tabla 14. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la muestra con una relación antracita/laterita 3:1

# de ciclos	Peso de carga fresca g	Pasante a la malla, 0,15 mm		rpm	Pasante a la malla 0,15 mm		Gbp g/rpm
		Alimentación	A moler		Finos producidos g	Finos Netos g	
1	634,00	43,11	138,03	100	149,50	106,39	1,0639
2	149,50	10,17	170,98	161	131,20	121,03	0,7531
3	131,20	8,92	172,22	229	172,50	163,58	0,7153
4	172,50	11,73	169,41	237	209,80	198,07	0,8363
5	209,80	14,27	166,88	200	188,10	173,83	0,8712
6	188,10	12,79	168,35	193	184,5	171,71	0,8886
7	184,50	12,55	168,60	190	174,5	161,95	0,8536

Los resultados muestran que con la sola adición de 25 % de la antracita, la molturabilidad de las lateritas disminuye sustancialmente, el punto de inflexión disminuye desde 13,47 g/rev hasta 5,0475 g/rev. El sucesivo incremento del contenido de antracita en las muestras hace disminuir en 5,044 g/rev como promedio.

Tabla 15. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la muestra con una relación antracita/laterita 1:1

# de ciclos	Peso de carga fresca g	Pasante a la malla, 0,15 mm		rpm	Pasante a la malla 0,15 mm, en el producto.		Gbp g/rpm
		Alimentación g	A moler g		Finos producidos g	Finos Netos g	
1	712,30	135,34	68,18	100	270,40	135,06	1,3506
2	270,40	51,38	152,14	113	212,20	160,82	1,4277
3	212,20	40,32	163,20	114	281,80	241,48	2,1126
4	281,80	53,54	149,97	71	167,80	114,26	1,6095

Tabla 16. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la muestra con una relación antracita/laterita 1:3

# de ciclos	Peso de carga fresca g	Pasante a la malla, 0,15 mm		rpm	Pasante a la malla 0,15 mm		Gbp g/rpm
		Alimentación g	A moler		Finos producidos g	Finos Netos g	
1	816,30	155,10	78,13	100	525,60	370,50	3,7050
2	525,60	99,86	133,36	36	307,90	208,04	5,7795
3	307,90	58,50	174,73	30	211,10	152,60	5,0475
4	211,10	40,11	193,12	38	171,50	131,39	**3,4342**
5	171,50	32,59	200,64	58	182,90	150,32	**2,5727**
6	816,30	155,10	78,13	100	525,60	370,50	3,7050

En la figura .14, se muestra la influencia del contenido de carbón en la molturabilidad de las mezclas, siguiendo una distribución similar a la Weibull.

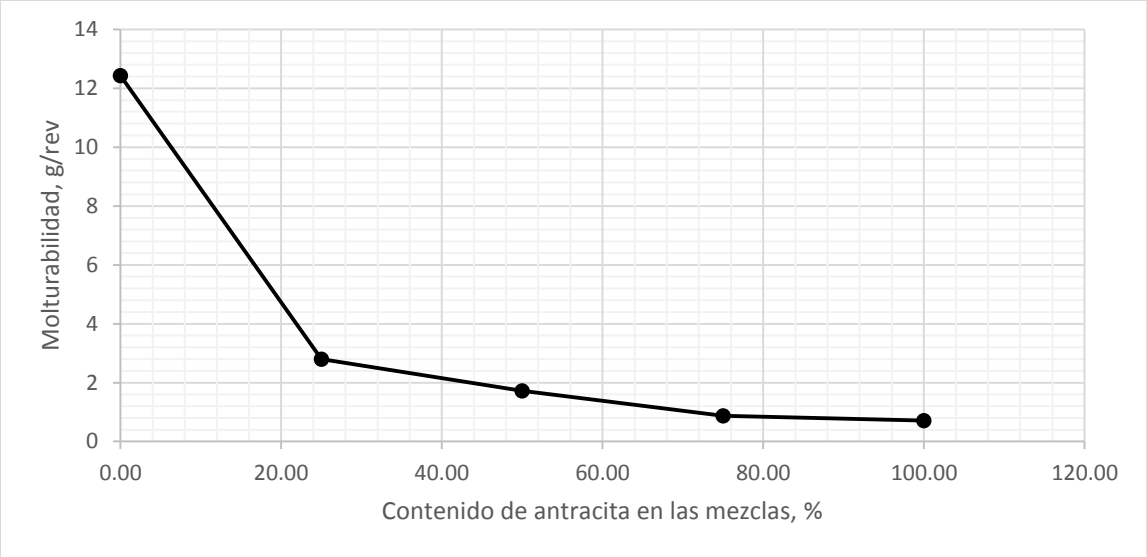

Fig. 14. Influencia del contenido de antracita en la molturabilidad de las mezclas.

En la figura .15, aparece la dependencia del índice de Bond de la composición de la mezcla de antracita y mineral laterítico. De acuerdo con los resultados mostrados, el índice de Bond aumenta con el incremento del mineral constituyente más duro (antracita). Similares resultados son reportados por Coello el al. (2008) y Coello (1993, 2009) estudiando las molibilidad de las mezclas de serpentinita y limonita.

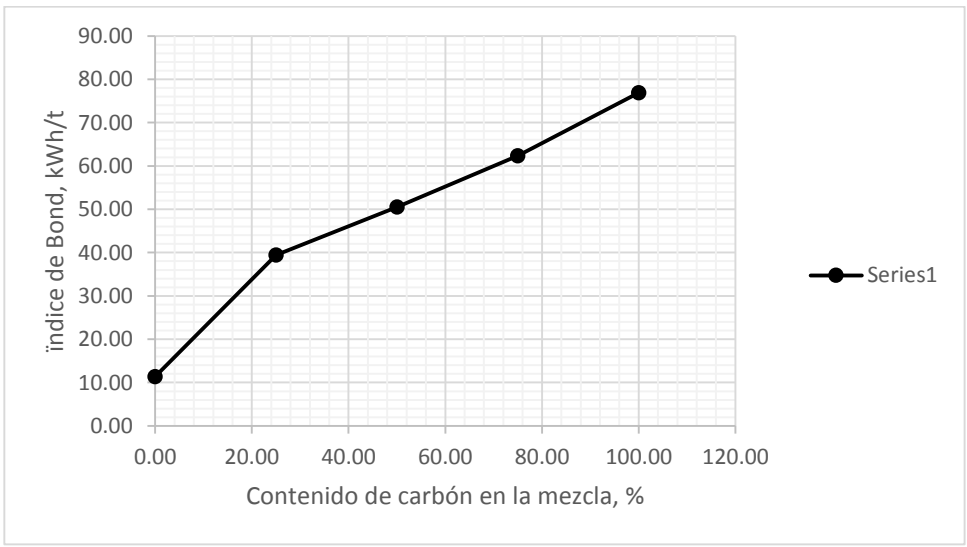

Fig. 15. Dependencia del índice de Bond de la composición de la mezcla.

3.3 Consideraciones ambientales del estudio

Durante el proceso de reducción del mineral laterítico y la combustión incompleta del carbón antracita el efecto ambiental sería similar al del petróleo aditivo. Para ambos casos la producción de gases reductores pasa a estado metálico. Para el caso del azufre, el carbón antracita contiene menos porción que el petróleo tecnológico utilizado en el proceso de reducción, por lo que la emanación del SO_2 será inferior al del petróleo. Dado el gran desprendimiento de finos de carbón de los almacenamientos se hace evidente la contaminación de la localidad para lo que se deben tomar medidas.

CONCLUSIONES FINALES

Los resultados del trabajo permitieron arribar a las siguientes conclusiones:

La distribución granulométrica de las muestras del mineral laterítico y el carbón antracita difieren sustancialmente. En el material laterítico prevalece la presencia de granos gruesos, mientras que para la antracita, la distribución de los granos se mantiene uniforme en el espectro de tamaño seleccionado. La distribución granulométrica de las mezclas se ubica centralmente entre las curvas granulométricas del mineral laterítico y la antracita.

La adición de carbón antracita en la molienda de las lateritas afecta la molturabilidad. El aumento del contenido de antracita en la mezcla, disminuye la molturabilidad. Como promedio esta magnitud disminuye en 5,0475 g/rev.

El índice de Bond aumenta con el aumento de la concentración de antracita en las mezclas. El consumo energético del molino disminuye en 18 kWh/t por cada 25 % de antracita en la mezcla.

RECOMENDACIONES

Evaluar a una escala de banco los resultados obtenidos en el trabajo.

Realizar pruebas semi-industriales para precisar el comportamiento energético de molienda de la laterita con contenido estequiométrico de antracita.

BIBLIOGRAFIA

1. ANDREEV, E.; PEROV, V. & ZVERIEVICH, V. 1980: *Trituración, desmenuzamiento y cribado de los minerales*. Editorial Mir, Moscú, 547p.
2. ARIZTIMUÑO. 2010: *Diseño de un sistema para el proceso de molienda de carbón mineral para ser usado como combustible industrial.* Tesis de grado.
3. AUSTIN, L. G. AND KLIMPEL, R. R. 1964: The theory of grinding operations. Ind. Eng. Chem., 56, 18 – 29.
4. AUSTIN. L. G. y BRAME, K. 1983: A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size mass balance simulation model. Powder Technology, 34; 261-274.
5. BEARMAN, R.A., BRIGGS, C.A., Kojovic, T. (1997), "The Application of Rock Mechanics Parameters to the Prediction of Comminution Behaviour", Miner. Eng.,10 3 255-264
6. BOND F.C., A new theory of comminution. AIME. Mining Eng. Vol. 187. No 8.1950.
7. Coello et al, 2008 grindability of cuban laterite ore-authors copy pdf.
8. Coello et al, 2009 Aportes al conocimiento de la molienda del mineral laterítico.
9. COELLO, A. 1999: Curso de preparación mecánica de menas y minerales.
10. Coello-Velázquez A. L., "Molienda de minerales multicomponentes: Modelo integro-diferencial para valoración de la energía", Minería y Geología XVII (3-4), pp. 49-53, 2001.
11. COELLO-VELÁZQUEZ, A. 1993: Consideraciones sobre la molienda de los minerales lateríticos. Minería y Geología. Vol. I (1): p. 53-56.
12. COELLO-VELÁZQUEZ, A. 2009: Aportes al conocimiento de la molienda de las menas lateríticas, Minería y Geología.
13. DEISTER, R.J., (1987), "How to Determine the Bond Work Index Using Lab Ball Mill Grind ability Test". Eng. And Min, Jour., February 1987, 42-45.
14. Eng. Min. J., Vol. 176, pp. 106.
15. GIRALT, R.; & RODRÍGUEZ, T. 2006: Determinación de los parámetros básicos de la molienda del vidrio volcánico de la zona de El Picao. Trabajo de diploma. ISMM Moa.
16. HARRIS, C.: "On the role of the energy in comminution: a review of physical and mathematical principles", Trans. Inst. Min. Metall, 75:C37-C56, 1966.

17. HOJAS. J. A. 2006: Diseño de un sistema para molienda del carbón mineral para ser usado como combustible industrial, Trabajo de diploma, Escuela superior politécnica del Litoral, Guayaquil – Ecuador. 269 p.
18. Hukki, R.T., 1975, “The principles of comminution; an analytical summary,”
19. Kapur O. C., Fuesternau D. W. Energy split in multicomponent grinding. Inst. Journal of mineral processing. Elsevier. Vol 24.1/2. Sept 1988.
20. KICK F. Contribution to the knowledge of brittle materials. Dinglers J. 1883.
21. LABORDE B, R et al, 2000: Productividad y eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico, en la Revista de Minería–Geología Vol.17 No 2. Coello.
22. LABORDE B. R. 2004: Diagnóstico energético en el proceso de molienda de la laterita, en la revista minería - geología, ISSN 0258 5979, No. 3 y 4.
23. Lamorú Urgelles, A. 2012: Determinación del índice de Bond de las menas de los yacimientos Yagrumaje Norte y Sur en la Empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma. ISMM. Moa.
24. LEVIN, J. 1989: Observations on the Bond Standard Grindability Test, and a Proposal for a Standard Grindability Test for Fine Materials, J: S. Afr. Inst. Min. Metall, 89 (1) 13-2
25. LEVIN, J. 1990: Observations on the Bond standard grindability test for the fine materials. Mineral and Metallurgical Processing, Vol 89, No 1, pp. 13-21.
26. LLORENTE, L. 2003: Proyección para el incremento de la productividad hasta 50 000 t de Níquel más Cobalto en la instalación de molienda de la Empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de Maestría. Departamento de Metalurgia. ISMM Moa.
27. LYNCH, A. 1977: Mineral processing and grinding circuits: their simulation, optimization. Design and control. Elseiver. Amsdertam, Oxf. NY.
28. LYNCH, J. 1980: Circuitos de trituración y molienda de minerales. Editorial Rocas y Minerales, Madrid, 192p.
29. MITROFÁNOV, S. I. 1982: Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú, Editorial Mir. 435 p.
30. Morrell, S., 2004. Analternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimization of grinding circuits. Int. J. Miner. Process. 74, 133–141.
31. Mosher, J.B., C. B. Tague. Conduct and precision of Bond grindability testing.

Minerals Engineering, Vol 14, No. 10, 2001.

32. NÚÑEZ G. Y. y PÉREZ G. S. 2003: Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda. Alfredo Coello Velázquez (Tutor).Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
33. P. King, Modeling and simulation of mineral processing systems,Butterworth Heinemann, Boston, 2001.
34. Peña, Y. 2015: Determinación de parámetros de molibilidad del carbón antracita del depósito de la Empresa Ernesto Che Guevara, trabajo de diploma. ISMM Moa.
35. R. J. Charles: AIME Trans, 1957, vol. 208, pp. 88, MINING ENGINEERING, January, 1957.
36. R. Shuhmann, Jr: AIME Trans, 1960, vol. 217, pp. 22-25, MINING ENGINEERING, February, 1960.
37. Rittinger R. P. von, Textbook of mineral dressing. Ernest and Korn. Berlin.1867.
38. Román Barban, G. 2016: Cinética de molienda de las clases granulométricas del carbón antracita, mineral laterítico y sus mezclas
39. Schönert, K. (1979, February). Aspects of the physics of breakage relevant to comminution. In Fourth Tewksbury Symposium, University of Melbourne (Vol. 3, No. 1, pp. 3-30).
40. Álvarez Rodríguez, B. (2010). Análisis de la influencia de los modelos de distribución de tamaños de partículas en la determinación de consumos energéticos en molienda mediante el método Bond.
41. Tijonov, Y.P. Nazarov, Teoria y praktika compleksnoy pererabotki polieznij izkapaeimij v Latinskoi Ameriki, Azii y Afriki, Nedra, Moscow, 1984.
42. WILLS, A. & NAPIER-MUNN, T. 2006: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Mineral Processing Technology. Pub. Date, ISBN: 0750644508.

ANEXOS

ANEXO 1 Caracterización granulométrica

Tabla .1 Resultados obtenidos del análisis granulométrico para el carbón antracita.

Tamiz	Peso M_1 g	Peso M_2 g	Peso promedio g	retenido	cernido
3,15/2,38	36,1	39,6	37,85	15,08	100,00
2,38/1,6	92,8	90,9	91,85	51,67	84,92
1,6/1	72,9	68,1	70,50	79,75	48,34
1/0,71	24,1	24,3	24,20	89,39	20,25
0,71/0,5	13,2	12,3	12,75	94,47	10,62
0,5/0,25	2,8	3,4	3,10	95,70	5,54
0,25/0,125	7,3	6,1	6,70	98,37	4,30
0,125/0,075	2,3	2,3	2,30	99,29	1,63
0,075/0	0,9	2,7	1,80	100,00	0,72
Total	252,4	249,7	251,05		

Tabla .2 Resultados obtenidos del análisis granulométrico para el mineral laterítico.

Tamiz	Peso M_1 g	Peso M_2 g	Peso M_3 g	Peso promedio g	retenido	cernido
3,15/2,38	6,1	5,6	6,3	6,00	2,73	100,00
2,38/1,6	13,4	19,6	17,7	16,90	10,41	97,27
1,6/1	24,4	32,6	30,0	29,00	23,59	89,59
1/0,71	21,8	21,9	22,5	22,07	33,62	76,41
0,71/0,5	17,1	18,3	17,0	17,47	41,56	66,38
0,5/0,25	33,6	33,7	32,9	33,40	56,74	58,45
0,25/0,125	21,4	24,6	26,5	24,17	67,72	43,27
0,125/0,075	70,4	69,5	73,2	71,03	100,00	32,28
0,075/0	0,0	0,0	0,0	0,00	100,00	0,00
Total	208,2	225,8	226,1	220,03		

Tabla .3 Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 1:3

Tamiz	**Peso M_1 g**	**Peso M_2 g**	**Peso promedio g**	**retenido**	**cernido**
3,15/2,38	27,2	22,7	24,95	14,30	100,00
2,38/1,6	**53,5**	**44,5**	**49,00**	**47,07**	**85,70**
1,6/1	**40,3**	**41,6**	**40,95**	**71,83**	**52,93**
1/0,71	24,2	23,2	23,70	80,53	28,17
0,71/0,5	16,8	15,9	16,35	84,71	19,48
0,5/0,25	10,9	9,2	10,05	86,43	15,30
0,25/0,125	19,9	23,3	21,60	89,59	13,58
0,125/0,075	17,9	19,8	18,85	93,25	10,42
0,075/0	45,2	51,8	48,50	100,00	6,76
Total	255,9	252,0	253,95		

Tabla .4 Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 1:1

Tamiz	**Peso M_1 g**	**Peso M_2 g**	**Peso promedio g**	**retenido**	**cernido**
3,15/2,38	26,3	23,9	25,10	10,04	100,00
2,38/1,6	**56,8**	**50,4**	**53,60**	**31,46**	**89,96**
1,6/1	**50,9**	**54,6**	**52,75**	**52,54**	**68,54**
1/0,71	21,5	22,8	22,15	61,39	47,46
0,71/0,5	14,6	14,8	14,70	67,26	38,61
0,5/0,25	6,2	7,2	6,70	69,94	32,74
0,25/0,125	14,9	15,7	15,30	76,05	30,06
0,125/0,075	12,5	12,9	12,70	81,12	23,95
0,075/0	46,6	47,9	47,25	100,00	18,88
Total	250,3	250,2	250,25		0

Tabla .5 Composición granulométrica de la muestra con una relación antracita/laterita 3:1

Tamiz	**Peso M_1 g**	**Peso M_2 g**	**Peso promedio g**	**retenido**	**cernido**
3,15/2,38	34,3	37,2	35,75	9,81	100,00
2,38/1,6	**78,8**	**85,1**	**81,95**	**29,11**	**90,19**
1,6/1	**62,8**	**61,0**	**61,90**	**45,24**	**70,89**
1/0,71	22,1	21,4	21,75	54,57	54,76
0,71/0,5	11,4	9,5	10,45	61,01	45,43
0,5/0,25	4,5	4,1	4,30	64,97	38,99
0,25/0,125	8,1	7,7	7,90	73,48	35,03
0,125/0,075	13,4	4,9	9,15	80,90	26,52
0,075/0	14,7	19,1	16,90	100,00	19,10
Total	250,1	250,0	250,05		

ANEXO 2 Caracterización del P_{80}

Tabla .6 Caracterización del P_{80} para la muestra de carbón antracita

Tamiz mm	**tamaño de partícula mm**	**Corridas g**	**Promedio**	**Composición**		
					%	**acumulado**
3,15/2,38	3,150	14,7	14,700	0,0245	2,45	100,00
2,38/1,6	2,380	26,2	26,200	0,0436	4,36	97,55
1,6/1	1,600	31,3	31,300	0,0521	5,21	93,19
1/0,71	1,000	22,6	21,600	0,0360	3,60	87,98
0,71/0,5	0,710	36,9	24,900	0,0415	4,15	84,38
0,5/0,4	**0,500**	**17,6**	**17,600**	**0,0293**	**2,93**	**80,23**
0,4/0,25	**0,400**	**94,3**	**94,300**	**0,1570**	**15,70**	**77,30**
0,25/0,15	0,250	190,9	203,900	0,3396	33,96	61,60
0,15/0	0,150	166,0	166,000	0,2764	27,64	27,64
Total		600,5	600,500			

Tabla .7Caracterización del P_{80} para la muestra de mineral laterítico

Tamiz mm	tamaño de	Corridas g		Composición		
	partícula mm	# 1	#2	1	%	acumulado
3,15/2,38	3,150	9,7	8,800	0,0111	1,11	100,00
2,38/1,6	2,380	22,8	24,600	0,0262	2,62	98,89
1,6/1	1,600	34,3	30,100	0,0394	3,94	96,27
1,0/0,71	1,000	28,6	29,000	0,0329	3,29	92,33
0,71/0,5	0,710	43,3	47,700	0,0497	4,97	89,04
0,5/0,25	0,500	132,9	144,300	0,1527	15,27	84,07
0,25/0,125	0,250	220,8	210,300	0,2536	25,36	68,80
0,125/0,075	0,125	205,3	190,400	0,2358	23,58	43,43
0,075/0	0,075	172,8	187,700	0,1985	19,85	23,58
Total		870,500	872,900		0,00	

Tabla .8Caracterización del P_{80} para la muestra con una relación antracita/laterita 1:3

Tamiz mm	Tamaño de	Corridas g	Promedio	composición		
	Partícula mm				%	acumulativo
3,15/2,38	3,150	19,7	19,700	0,0241	2,41	100,00
2,38/1,6	2,380	39,6	39,600	0,0485	4,85	97,59
1,6/1	1,600	48,7	48,700	0,0597	5,97	92,74
1/0,71	1,000	50,7	50,700	0,0621	6,21	86,77
0,71/0,5	0,710	79,5	79,500	0,0974	9,74	80,56
0,5/0,4	0,500	53,3	53,300	0,0653	6,53	70,82
0,4/0,25	0,400	131,5	131,500	0,1611	16,11	64,29
0,25/0,15	0,250	174,2	174,200	0,2134	21,34	48,18
0,15/0	0,150	219,1	219,100	0,2684	26,84	26,84
Total		816,3	816,300			

Tabla .9 Caracterización del P_{80} para la muestra con una relación antracita/laterita 1:1

Tamiz mm	tamaño de partícula mm	Corridas g	Fracción	%	acumulativo
3,15/2,38	3,150	15,6	0,0219	2,19	100,00
2,38/1,6	2,380	25,5	0,0358	3,58	97,81
1,6/1	1,600	47,6	0,0668	6,68	94,23
1/0,71	1,000	35,5	0,0498	4,98	87,55
0,71/0,5	0,710	43,1	0,0605	6,05	82,56
0,5/0,4	0,500	40,7	0,0571	5,71	76,51
0,4/0,25	0,400	125,5	0,1762	17,62	70,80
0,25/0,15	0,250	211,0	0,2962	29,62	53,18
0,15/0	0,150	167,8	0,2356	23,56	23,56
Total		712,3	1,0000		

Tabla .10 Caracterización del P_{80} para la muestra con una relación antracita/laterita 3:1

Tamiz mm	tamaño de partícula mm	Corridas g	Promedio	composición	%	acumulado
3,15/2,38	3,150	11,0	11,000	0,0174	1,74	100,00
2,38/1,6	2,380	21,1	21,100	0,0333	3,33	98,26
1,6/1	1,600	23,2	23,200	0,0366	3,66	94,94
1/0,71	1,000	22,4	22,400	0,0353	3,53	91,28
0,71/0,5	0,710	29,2	29,200	0,0461	4,61	87,74
0,5/0,4	**0,500**	**57,7**	**57,700**	**0,0910**	**9,10**	**83,14**
0,4/0,25	**0,400**	**115,4**	**115,400**	**0,1820**	**18,20**	**74,04**
0,25/0,15	0,250	179,5	179,500	0,2831	28,31	55,84
0,15/0	0,150	174,5	174,500	0,2752	27,52	27,52
Total		634,0	634,000	1,0000		

ANEXO 3 Caracterización del F_{80}

Tabla .1 Caracterización del F_{80} para la muestra de carbón antracita

Tamiz mm	tamaño de	Corridas g		composición	%	acumulado
	partículas mm	# 1	# 2			
3,15/2,38	3,150	36,1	39,6	0,1508	15,08	100,00
2,38/1,6	**2,380**	**92,8**	**90,9**	**0,3659**	**36,59**	**84,92**
1,6/1	**1,600**	**72,9**	**68,1**	**0,2808**	**28,08**	**48,34**
1/0,71	1,000	24,1	24,3	0,0964	9,64	20,25
0,71/0,5	0,710	13,2	12,3	0,0508	5,08	10,62
0,5/0,4	0,500	2,8	3,4	0,0123	1,23	5,54
0,4/0,25	0,400	7,3	6,1	0,0267	2,67	4,30
0,25/0,15	0,250	2,3	2,3	0,0092	0,92	1,63
0,15/0	0,150	0,9	2,7	0,0072	0,72	0,72
Total		252,4	249,7	1,0000	100,00	0,00

Tabla .2 Caracterización del F_{80} para la muestra de mineral laterítico

Tamiz mm	tamaño de partícula mm	Corridas g			Promedio	composición	%	acumulado
		# 1	# 2	#3				
3,15/2,38	3,150	6,1	5,6	6,3	6,00	0,0273	2,73	100,00
2,38/1,6	2,380	13,4	19,6	17,7	16,90	0,0768	7,68	97,27
1,6/1	1,600	24,4	32,6	30,0	29,00	0,1318	13,18	89,59
1/0,71	1,000	21,8	21,9	22,5	22,07	0,1003	10,03	76,41
0,71/0,5	0,710	17,1	18,3	17,0	17,47	0,0794	7,94	66,38
0,5/0,25	0,500	33,6	33,7	32,9	33,40	0,1518	15,18	58,45
0,25/0,125	0,250	21,4	24,6	26,5	24,17	0,1098	10,98	43,27
0,125/0,075	0,125	70,4	69,5	73,2	71,03	0,3228	32,28	32,28
0,075/0	0,075	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0000	0,00	0,00
Total		208,2	225,8	226,1	220,03			

Tabla .3 Caracterización del F_{80} para la muestra con una relación antracita/laterita 1:3

Tamiz mm	tamaño de partícula mm	Corridas g		Peso Promedio, g	%	acumulado
		# 1	# 2			
3,15/2,38	3,150	27,2	24,95	24,95	9,82	100,00
2,38/1,6	**2,380**	**53,5**	**49,00**	**49,00**	**19,30**	**90,18**
1,6/1	**1,600**	**40,3**	**40,95**	**40,95**	**16,13**	**70,88**
1/0,71	1,000	24,2	23,70	23,70	9,33	54,75
0,71/0,5	0,710	16,8	16,35	16,35	6,44	45,42
0,5/0,25	0,500	10,9	10,05	10,05	3,96	38,98
0,25/0,125	0,250	19,9	21,60	21,60	8,51	35,03
0,125/0,075	0,125	17,9	18,85	18,85	7,42	26,52
0,075/0	0,075	45,2	48,50	48,50	19,10	19,10
Total		255,9	253,95	253,95	100,00	0,00

Tabla .4 Caracterización del F_{80} para la muestra con una relación antracita/laterita 1:1

Tamiz mm	tamaño de partícula mm	Corridas g		Peso Promedio, g	%	acumulado
		# 1	# 2			
3,15/2,38	3,150	26,3	23,9	25,10	10,03	100,00
2,38/1,6	**2,380**	**56,8**	**50,4**	53,60	21,42	**89,97**
1,6/1	**1,600**	**50,9**	**54,6**	52,75	21,08	**68,55**
1/0,71	1,000	21,5	22,8	22,15	8,85	47,47
0,71/0,5	0,710	14,6	14,8	14,70	5,87	38,62
0,5/0,25	0,500	6,2	7,2	6,70	2,68	32,75
0,25/0,125	0,250	14,9	15,7	15,30	6,11	30,07
0,125/0,075	0,125	12,5	12,9	12,70	5,07	23,96
0,075/0	0,075	46,6	47,9	47,25	18,88	18,88
Total		250,3	250,2	250,25	100,00	0,00

Tabla .5 Caracterización del F_{80} para la muestra con una relación antracita/laterita 3:1

Tamiz mm	tamaño de partícula mm	Corridas g		Peso Promedio, g	%	acumulado
		# 1	# 2			
3,15/2,38	3,150	34,3	37,2	35,75	14,30	100,00
2,38/1,6	**2,380**	**78,8**	**85,1**	**81,95**	**32,77**	**85,70**
1,6/1	**1,600**	**62,8**	**61,0**	**61,90**	**24,76**	**52,93**
1/0,71	1,000	22,1	21,4	21,75	8,70	28,17
0,71/0,5	0,710	11,4	9,5	10,45	4,18	19,48
0,5/0,25	0,500	4,5	4,1	4,30	1,72	15,30
0,25/0,125	0,250	8,1	7,7	7,90	3,16	13,58
0,125/0,075	0,125	13,4	4,9	9,15	3,66	10,42
0,075/0	0,075	14,7	19,1	16,90	6,76	6,76
Total		250,1	250,0	250,05	100,00	0,00

Tabla 6. Resultados de los ciclos de molienda para determinar el Índice de Bond para la muestra con una relación antracita/laterita 1:3

Relación antracita/laterita	F80 µm	P80µm	Gbp, g/rev	wi, kWh/t
Antracita 100 %	2275,04	492,05	0,7137	76,85
Laterita 100 %	1163,31	440,44	12,43	11,33
3:1	2244,27	465,51	0,87	62,36
1:1	2016,92	621,03	1,72	50,52
1:3	1968,67	697,95	2,7988	39,46