



*Ministerio de Educación Superior  
Instituto Minero-Metalúrgico  
"Doctor A. Núñez Jiménez"*

*Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia*

# *Trabajo de Diploma*

*En opción al título de Ingeniero Metalúrgico*

*Determinación del índice de Bond para el cieno carbonatado  
de Cayo Moa.*

*Lester Jorge Tamayo Alegria.*

*Moa, 2010*



*Ministerio de Educación Superior  
Instituto Minero-Metalúrgico  
"Doctor A. Núñez Jiménez"  
Facultad de Metalurgia y Electromecánica  
Departamento de Metalurgia*

# *Trabajo de Diploma*

*En opción al título de Ingeniero Metalúrgico  
Título: Determinación del índice de Bond para el cieno  
carbonatado de Cayo Moa.*

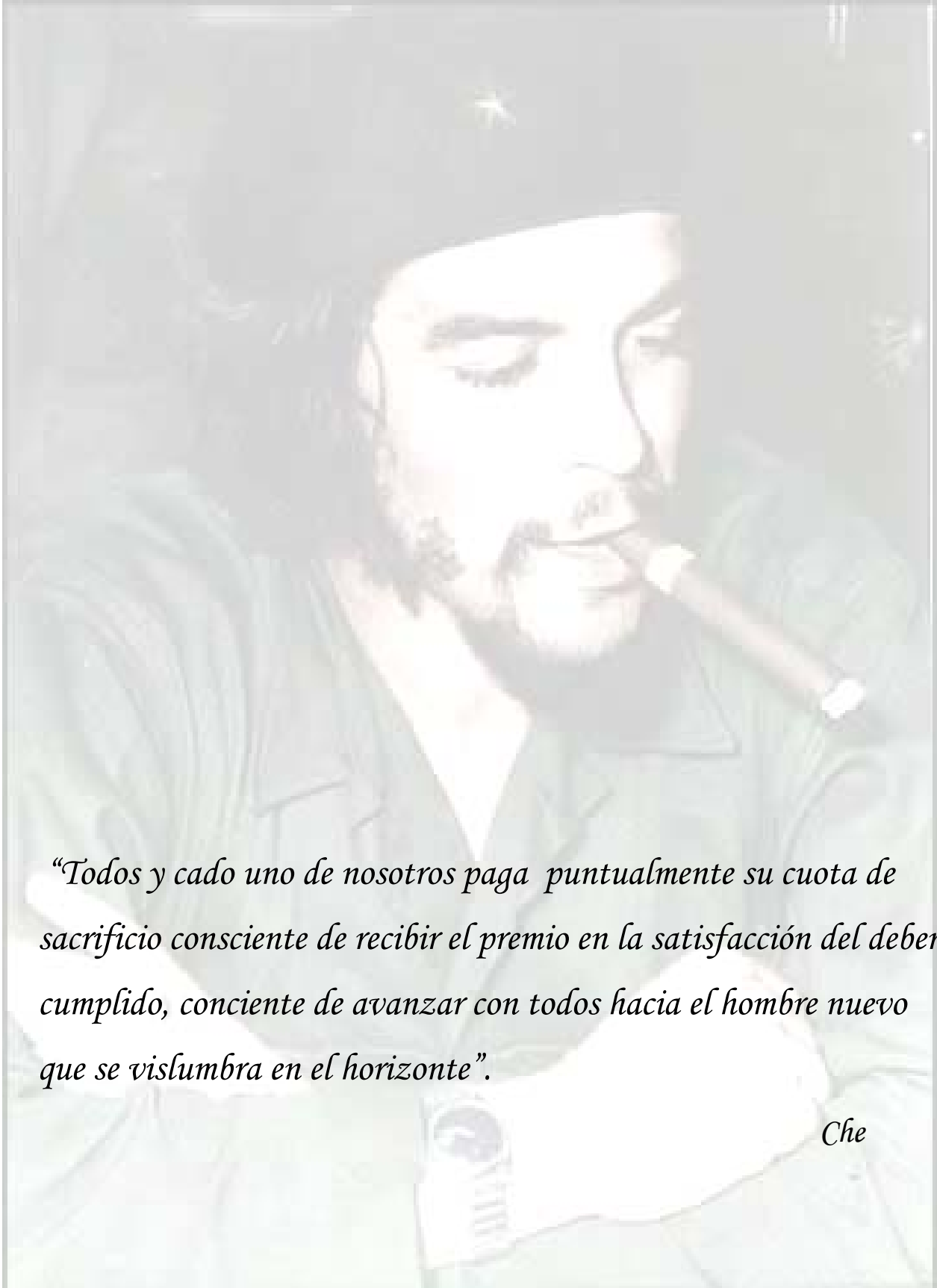
*Diplomante: Lester Jorge Tamayo Alegria.*

*Firma*

*Tutores: Ms.C. Rodney Martínez Rojas*

*Moa, 2010*

## *Pensamiento*



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

*Che*



## *Dedico este trabajo de diploma*

*A mis padres Jorge Agustín y Victorina como recompensa por su esfuerzo, dedicación y confianza cuando todo se volvió imposible a la mitad del camino. Con todo cariño y amor aquí esta la culminación de siete años de sacrificios, alegrías y tristezas.*

*A la memoria de Josefina, para que desde el cielo, se sienta orgullosa de verme realizado como profesional.*

*A toda la familia y en especial a mis hermanos y sobrinos, José Luís, Luisito, Herminia, Yordankis, Pedrito y Lesme.*

*A mis amigos Machelo, Néstor, Guille, Adrián y los muchachos del cuarto.*



## *AGRADECIMIENTO*

*En estos momentos en que tantas personas han dado su aporte desinteresado e incondicional a la realización de este trabajo, se hace tan difícil hacerle llegar este mi más sincero agradecimiento, por su apoyo, su orientación y guía, sin los cuales no hubiera llegado hasta este momento. Desde lo más profundo de mi corazón gracias sin ustedes no hubiera llegado.*

*A mis Amigos y colegas Machelo, Néstor y Guille que no han dejado de insistir a que siga hacia delante junto a ellos.*

*A mis amigos y colegas del departamento de Metalurgia, a todos, les llegue mi agradecimiento. A ellos con los que siempre pude contar. Gracias.*

*A mi novia Lisbeth Hernández Mora que me ayudó a obtener este resultado.*

*Por favor, son tantos a los que agradecer, aunque no los mencione en estas líneas. Sepan que les estoy agradecido por siempre*

*A todos Gracias*



## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Yo: Lester Jorge Tamayo Alegria, autor de este trabajo de diploma declaro la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

\_\_\_\_\_  
Diplomante Lester Jorge Tamayo Alegria

\_\_\_\_\_  
Ms.C. Rodney Martínez Rojas

Diplomante Lester Jorge Tamayo Alegria



## *Resumen*

Trabajo de Diploma titulado "Determinación del índice de Bond para el cieno carbonatado de Cayo Moa" se realiza con el fin de resolver una de las problemáticas existente en la planta de coral del Puerto de Moa la cual es el no aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo) de este material que es utilizado en la planta de neutralización en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. La investigación se realizó en el laboratorio de beneficio de minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico, el cual no posee instalaciones para estos fines. Es por eso que se hizo necesario utilizar un molino de bola de 185 mm de diámetro y 240 mm longitud. En este se determina el consumo específico de energía a escala de laboratorio para la clase (<6,3 mm) mediante el ensayo de Bond. Luego de determinar el índice de trabajo, se define el índice operacional en kWh/t se podrá posteriormente hacer estudios para el diseño de un molino para el aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo).

**Palabras claves:** consumo específico de energía, ensayo



## *Abstract*

Titled Diploma Work "Determination of the index of Bond for the carbonated mud of Moa Key " is made with the purpose of solving one of problematic the existing one in the plant of chorale of the Port of Moa which is the no advantage of the heavy fractions (rejection) of this material that is used in the plant of neutralization in the Company Comandante Pedro Soto Alba. The investigation was made in the laboratory of mineral benefit of the Metallurgical Mining Superior Institute, which does not have facilities for these aims. It is why one became necessary to use a mill of ball of 185 mm of diameter and 240 mm long .En this determines the specific consumption of energy scale of laboratory for the class ( $< 6,3$  mm) by means of the test of Bond. After determining the work index and it defines the operational index in kWh/t it will be possible later to be made studies for the design of a mill for the advantage of the heavy fractions (rejection).

**Key words:** specific consumption of Energy, test of Bond.





# Índice

	<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo 1</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	5
1.1	Trabajos precedentes sobre el Cieno Carbonatado	5
1.2	Génesis del Cieno Carbonatado	5
1.3	Trabajos precedentes sobre índice de Bond	8
1.4	Fundamentos teóricos del proceso de molienda	10
1.4.1	Aproximación física al fenómeno de la rotura. Efecto de la velocidad de deformación	10
1.4.2	Energía y reducción de tamaño. Medida de la reducción de tamaño	12
1.4.3	Energía de rotura	13
1.5	Acercamiento al índice de Bond	13
1.5.1	Ley de Bond	14
1.5.2	Definición teórica del índice de Bond	15
1.5.3	Definición práctica del índice de Bond	15
1.6	Ensayo estándar de Bond	17
1.7	Factores de corrección del índice de Bond	19
	Conclusiones del Capítulo 1	20
<b>Capítulo 2</b>	<b>Materiales y Métodos</b>	21
2.1	Toma y preparación de las muestras	21
2.2	Ajuste de la carga de bolas para la prueba de Bond	22
2.3	Materiales y equipos que fueron utilizados para cumplir con los objetivos trazados	24
2.4	Técnica experimental	24
2.4.1	Método del cuarteo	25
2.4.2	Técnica para el análisis de tamices	26
2.5	El pragmatismo del índice de Bond	26
2.6	Determinación experimental del índice de Bond	27
2.7	Determinación del factor de corrección del volumen para el molino de bola	31
	Conclusiones del Capítulo 2	32



---

<b>Capítulo 3</b>	<b>Análisis de los resultados</b>	33
3.1	Resultados experimentales	33
3.2	Composición química y granulométrica de la mena	34
3.2.1	Composición química	34
3.2.2	Caracterización granulométrica del material	34
3.3	Determinación de los parámetros para el cálculo del factor de corrección para el molino de laboratorio	37
3.4	Determinación del índice de Bond a escala de laboratorio	41
3.4.1	Análisis de los resultados del índice de Bond para la muestra	41
3.5	Cálculo del índice de Bond de la muestra	41
3.5.1	Corrección de unidades de masa	46
3.5.2	Corrección a molienda en vía seca	47
	Conclusiones del Capítulo 3	47
	<b>Conclusiones</b>	48
	<b>Recomendaciones</b>	49
	<b>Bibliografía</b>	50



## INTRODUCCIÓN

El níquel a partir del año 2000 se convierte en uno de los principales rubros de exportación, representado por la Industria Cubana del Níquel con más de 60 años de creada, la cual se encuentra enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades y modernización de su tecnología, lo que permitirá incrementar su aporte a la economía nacional.

En la resolución económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba (1997) se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria Minero Metalúrgica, y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrados de níquel con mayor eficiencia en las inversiones.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo de la producción se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones y el equipamiento tecnológico, para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos de la región oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de extracción minera; lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

En la actualidad, Cuba representa el cuarto lugar en la exportación de níquel superado por países desarrollados como Canadá, Nueva Zelanda y Estados Unidos.

Los yacimientos lateríticos constituyen la materia prima para la obtención de Níquel + Cobalto, aunque en nuestro país se concentran reservas importantes, las producciones mundiales de este estos elementos nos obligan a incrementar el control del proceso metalúrgico para poder competir en el mercado internacional con productos de alta calidad.

Existen actualmente tres fábricas que son las encargadas de toda la producción de Ni + Co en Cuba, ellas son: la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba“, la cual produce sulfuros de Ni + Co; y las empresas “René Ramos Latour” y “Ernesto Che Guevara”, que obtienen como producto final sínter de Ni + Co.

La empresa mixta cubana canadiense, Comandante Pedro Sotto Alba. Moa Nickel SA, utiliza un proceso hidrometalúrgico, mediante la lixiviación ácida a presión, única en su



tipo en la nación cubana y líder en cuanto a su rendimiento en el mundo. Por su eficiencia significa un valuarte de la Economía Cubana.

Además del mineral laterítico, la utilización del Carbonato de Calcio, ( $\text{CaCO}_3$ ) contenidos en los Cienos Carbonatados, constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la Planta de Neutralización para lograr el pH óptimo del licor lixiviado obtenido a partir de la lixiviación del mineral níquelífero con vista a su posterior procesamiento en el área de Precipitación de Sulfuros.

Es la única planta en el mundo de tecnología ácida que utiliza este material en el proceso de neutralización, ya que el resto de las plantas, como es el caso de las plantas australianas (Murrin – Murrin, Cawse, Bulong) utilizan calizas beneficiadas más un producto llamado calcreta resultado de la molienda de restos fósiles recientes.

La pulpa de Cieno Carbonatado es de color gris y es extraída de una de las minas más grandes del mundo, situada al oeste de cayo grande de Moa, la cual es sometida a un proceso de beneficio, en la planta de preparación de pulpa de coral en la zona portuaria, las partículas mayores que 20 mesh forman el rechazo, esto se logra por medio de un sistema de cribado, las de menor diámetro son enviadas a los sedimentadores con el objetivo de incrementar el % de sólido hasta el valor de diseño de 40 - 45 % bajo condiciones idóneas, esta pulpa es enviada a la planta de neutralización por medio de un sistema de transporte hidráulico por tuberías para ser almacenada en los tanques de dicha planta.

El transporte hidráulico por tubería juega un rol fundamental en el transporte de pulpas, debido a su efectividad económica y medioambiental respecto a los demás tipos de transporte, el mismo ha tomado mayor auge con el estudio de los sistemas de hidrotransporte de pulpa.

En estos sistemas los costos son mínimos tanto por el mantenimiento, como por la inversión, siendo un proceso continuo que puede ser llevado a cabo automáticamente con un esfuerzo mínimo, los procesos de carga y descarga se llevan a cabo automáticamente con un esfuerzo mínimo en este proceso continuo, se garantiza que se amorticen los gastos de la instalación.



La situación actual del transporte del Cieno Carbonatado, desde la torre de beneficio hacia los tanques sedimentadores, así como el bombeo desde la planta de coral hasta la planta de neutralización, se caracteriza por las siguientes **deficiencias**:

Bajo conocimiento del personal que operan las Plantas acerca de las propiedades físico – mecánicas del Cieno Carbonatado.

- No aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo) del mineral.
- No se garantiza el % de sólido de diseño de la pulpa que se envía al proceso de neutralización, provoca afectaciones en el bombeo, y en el proceso de neutralización.
- Variaciones frecuentes en la granulometría de las pulpas beneficiadas, según las características geotecnológicas de los sectores de minería, que provoca el arenamiento e incrustaciones en los sedimentadores y las tuberías.
- Reconversión tecnológica al sistema de beneficio actual.
- Aumento del parámetro % de cloruro en las mezclas debido a la naturaleza del mineral y la composición química del agua de lavado (agua de reboso).

Es por eso que en este trabajo se atiende una de las principales deficiencias, como es el no aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo) del mineral, es de gran importancia su utilización se plantea el siguiente:

**Problema científico:**

Desconocimiento del índice de trabajo o índice de Bond para la molienda del Cieno Carbonatado de Cayo Moa.

Como **objeto de estudio de la investigación** se plantea:

Material de Cieno Carbonatado que forma parte del Rechazo

**Campo de acción:**

Determinación del Índice de Bond para la molienda del Cieno Carbonatado.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:

Si se logra determinar el índice de Bond para la molienda del Cieno Carbonatado de Cayo Moa entonces se podría estudiar la posibilidad de diseñar un sistema de molienda para dicho material.



En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo:**  
Calcular el índice de Bond para el Cieno Carbonatado de Cayo Moa.

**Objetivos específicos**

1. Establecer la composición granulométrica del material objeto de estudio.
2. Determinar el consumo específico de energía del molino.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo:**

1. Búsqueda bibliográfica sobre los principales trabajos realizados concernientes al tema.
2. Definición de los parámetros que influyen en el proceso de molienda.
3. Caracterización granulométrica inicial de la mena.
4. Determinación del factor de corrección del volumen de los molinos de Bond con respecto al molino de bola de la planta de beneficio del ISMM.
5. Realizar el ensayo de Bond para la muestra  $< 6,3$  mm para determinar el consumo específico de energía del molino.



## **CAPÍTULO1 MARCO TEÓRICO**

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema expuesto en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

El **objetivo** de este capítulo es: Exponer los principales trabajos que han tratado sobre el tema en cuestión para poder aprovechar sus principales aportes y experiencias, así mismo analizar sus principales deficiencias y poder superarlas. También se exponen los fundamentos teóricos del proceso de molienda.

### **1.1 Trabajos precedentes sobre el Cieno Carbonatado**

El antecedente más lejano acerca de este yacimiento se remonta a la década del 50, con el proceso de dragado por parte de los norteamericanos; la información al respecto debió atesorarse en los archivos del entonces Servicio Geológico Norteamericano, donde es obvio que se debió haber realizado una valoración geólogo – económica que permitiera tomar la decisión de crear y emplazar una tecnología de tal magnitud y complejidad, (hasta décadas recientes única en su tipo en el mundo) y que hasta la actualidad se haya sostenido una explotación continuada del yacimiento de cienos carbonatados.

Los primeros estudios de los que hay referencia, se remontan a (Correa 1957) quien realizó un estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al Oeste de Cayo Moa Grande.

En la década de los 60 se inicia la extracción de los Cienos Carbonatados (denominados en esa época “coral” o “fangos coralinos”). En 1964 el Centro Coordinador para el Desarrollo del Norte de Oriente, solicitó al I.C.R.M. (Instituto Cubano de Recursos Minerales) la realización de estudios de localización y ubicación de las reservas de “coral”, para después tomar decisiones respecto a la tecnología a adoptar en el proceso de refinación del níquel.



Posteriormente Nedved (1966) presento el informe final de los trabajos de búsquedas de fangos coralinos, donde se tomaron diferentes muestras en las mismas el contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y granulométricamente por las mallas 20, 48, 100, 200 mesh.

Se reportan en la literatura (Castillo 1988) problemas con la extracción y utilización de la materia prima, se recomienda el empleo de la fracción gruesa (fracción retenida en la malla de 20 mesh) constituidos por conchas de moluscos, algas calcáreas y restos de corales teniendo en cuenta sus perspectivas por contenidos de carbonato de calcio.

En los trabajos realizados por (Nápoles 1992) se evaluó la materia prima para contenido de  $\text{CaCO}_3$  y granulométricamente en las mallas +20, +100, +325 y -325 mesh y se calcularon reservas en categoría industrial.

La principal deficiencia en la ejecución de estos trabajos radica en que no se contó con los recursos técnicos adecuados que garanticen el posicionamiento confiable de las labores realizadas en correspondencia con las exigencias de las escalas de los trabajos.

Con posteridad especialistas de (CEPRONIQUEL, 1997) recalcularon las reservas sobre la base de la información de (GEOMAR, 1992) se obtuvieron reservas muy inferiores a las reportadas por esta última.

El Cieno Carbonatado, como ya se ha dicho es minado en la bahía y transportado hasta la planta de coral establecida en áreas aledañas al puerto de Moa. En dicha planta es sometido a un proceso de beneficio para la utilización del material menor de 20 mesh, y el resto constituye el rechazo que es almacenado en depósitos cercanos a dicha planta.

Este material después de beneficiado se somete a un proceso de aumento de la concentración entre un 30 a un 45 % de sólido en dos tanques el cual es requerido en el proceso de neutralización y es transportado hasta la fabrica Comandante Pedro Sotto Alba. Moa Nickel SA ubicada a 4 km, mediante un sistema de transporte por tuberías.

Sin embargo en los trabajos anteriormente descritos, no se ha logrado hacer un estudio para el aprovechamiento de las fracciones gruesas del mineral (rechazo) en un proceso de molienda para la obtención de fracciones finas.





## 1.2 Génesis del Cieno Carbonatado

El yacimiento de Cienos Carbonatados de la bahía de Cayo Moa es un depósito compuesto por sedimentos clásticos friables cuaternarios, de carácter biodetrítico y terrígeno que se caracterizan en su conjunto por un elevado contenido de carbonato de calcio.

Es apreciable el carácter discordante del depósito de sedimentos clásticos carbonatados con relación a su basamento; de esta forma los sedimentos carbonatados son parte de una secuencia sedimentaria sin relación con el basamento de la cuenca en que se depositaron; al transportarse fueron sedimentándose en una zona de aguas tranquilas y de poca circulación en un ambiente de laguna retroarrecifal.

En las proximidades de la ciudad de Moa, los restantes elementos que conforman el substrato plegado no afloran y en la zona costera y la plataforma marina, las rocas de la asociación afiolítica y en ocasiones su corteza de intemperismo, son cubiertas por depósitos sedimentarios del Neógeno – Cuaternario que en su base están compuestos por caliza arrecifales, calizas biodetríticas, margas, rocas arcillosas y depósitos palustres sobre los que yacen en el área de la bahía de Cayo – Moa, arenas y sedimentos arena limosos y limosos calcáreos que en su conjunto forman el yacimiento de cieno carbonatado.

Los sedimentos que conforman el yacimiento presentan una estratigrafía matizada por la carencia de una verdadera estratificación y donde predominan los cambios granulométricos graduales en la vertical y los cambios faciales laterales.

En estos sedimentos marinos cuaternarios de edad Holoceno – Reciente, la deposición estuvo controlada, no sólo por el régimen de transporte hidrodinámico específico de la zona costera, sino también por el relieve e inclusive las características litológicas de las fuentes de suministro.

En el perfil litológico generalizado del depósito aparecen con diferente grado de mezcla, las siguientes “capas” u horizontes: **arena carbonatada, cieno carbonatado de limoso a arenoso, y cieno terrígeno.**



Las rocas del basamento están constituidas por calizas arrecifales y biodetríticas, además de areniscas, que por lo general contienen fragmentos de corales. Por zonas aparecen arcillas y turbas que por lo general se mezclan con la parte inferior más arenosa del yacimiento de cienos carbonatados.

Se establecen dos tipos litológicos útiles de este material. Nedved (1966). El primero, de color gris claro, con alta plasticidad y poco arenoso, con fuerte olor a  $H_2S$ , en el prevalecen las partículas menores de 0.08 mm que pasan la malla 200 mesh (entre 50 y 90 %) y las partículas gruesas sobre mallas 200 mesh no sobrepasan el 10 %. El segundo tipo de color gris oscuro, menos plástico, con incremento de las partículas gruesas (abundantes conchas) carece de olor a  $H_2S$  y aumenta el contenido de partículas gruesas sobre la malla 20 mesh hasta 30 %.

### **1.3 Trabajos precedentes sobre índice de Bond**

López, F.; Nieto, J.; Ortiz, J. (1988) en este trabajo se describe un método de laboratorio para el estudio de los parámetros característicos del proceso de molienda. El estudio se realiza a partir de experimentos en un molino estándar y la aplicación de la tercera teoría de Bond, los que permiten obtener los parámetros energéticos del proceso que, posteriormente se utiliza en el dimensionado de los molinos industriales.

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

Lafargue B. U. (2005) hace un profundo estudio del consumo específico de energía para la laterita del proceso industrial mediante la prueba de Bond. Además determina el índice operacional real de la sección de molienda de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, el cual es comparado con el obtenido mediante la prueba de Bond, con el objetivo de valorar el comportamiento de la eficiencia energética y la productividad de los molinos industriales, analiza la posibilidad de incrementar la productividad de los molinos, así como una disminución de los costos de producción.



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

H.T. Ozkahraman (2005). La friabilidad de rocas y de minerales se puede determinar por las pruebas de la fragilidad. Un aparato de la prueba para determinar valor de la friabilidad ha sido diseñado para satisfacer las características de la fuerza de la piedra caliza usadas en la producción del cemento. Los valores de la friabilidad de la baritina, mármol, piedra caliza y la bauxita se ha determinado y se ha comparado con el (G) en enlace correspondiente del índice del trabajo ( $W_i$ ) y del índice de molibilidad de éstos materiales. El índice en enlace del trabajo y el índice de molibilidad se pueden por lo tanto estimar del valor de la friabilidad, que puede ser determinado más rápidamente que de la prueba en enlace.

J.M. Menéndez-Aguado (2004) El índice en enlace del trabajo es uno de los parámetros más útiles y más interesantes usados en diseñar el equipo que muele. Sin embargo, debe ser obtenido bajo condiciones refrenadas, especialmente en respeto al molino estándar de laboratorio. El objetivo de este estudio es demostrar cómo este índice se puede obtener usando un molino de bola Denver, que está presente en la mayoría de los laboratorios. La metodología consistió en realizar una serie de determinaciones en ambos molinos (que siguen el procedimiento en enlace) y comparar los resultados para diversos materiales que tienen una amplia gama del molibilidad. El análisis de los resultados demuestra una relación directa entre el índice en enlace del trabajo y el índice del trabajo de Denver.

En los trabajos anteriormente expuestos no se han hecho estudios sobre el cálculo del índice de Bond para la molienda del Cieno Carbonatado de Cayo Moa.



## 1.4 Fundamentos teóricos del proceso de molienda

### 1.4.1 Aproximación física al fenómeno de la rotura. Efecto de la velocidad de deformación

Aunque por conveniencia se piensa en los esfuerzos de compresión e impacto como diferentes formas de aplicación de las fuerzas, realmente sólo difieren en la velocidad de aplicación de la fuerza, lo cual no quiere decir que sus consecuencias puedan llegar a ser bien distintas, como la práctica lo demuestra.

Las velocidades de deformación plásticas varían considerablemente con el método de conminución como sigue: trituradoras, molinos de bolas, etc., entre 0.1 y 10 m/s; molinos de impactos, entre 20 y 200 m/s; molinos fluido energía (jet mills), hasta 500 m/s.

Se pueden distinguir dos efectos principales del cambio de velocidad y su consiguiente influencia en la velocidad de deformación de la partícula.

El primero de los efectos mencionados es el cambio del campo de tensiones elástico. Cada distorsión causada por una fuerza de contacto se distribuye por el cuerpo como ondas elásticas, que por reflexión interna chocan con las nuevas ondas cambiando los valores de tensiones asociados con los frentes de onda. Ha sido demostrado por **Gildemeister y Schonert (1972)** que mientras en las esferas las grietas pueden ser producidas por tales ondas, en el caso de partículas de forma irregular es muy improbable que eso ocurra.

El segundo es un cambio en el comportamiento deformacional en un cuerpo visco elástico causado por el cambio en la velocidad de deformación. Cuanto mayor es la velocidad, menor la deformación pero mayor la tensión. Esto es característico de algunos materiales, como el polietileno, que es fragmentado mejor mediante impacto que con compresión.

La segunda razón está asociada a la energía elástica almacenada dentro de la partícula en el momento de liberación de la grieta, cuya energía decrece proporcionalmente con el volumen de la partícula. En todo caso, la energía necesaria para la propagación de la grieta disminuye proporcionalmente con la sección transversal. Al ser reducido el



tamaño de partícula, puede suceder que se almacene menos energía que la requerida y la grieta se detendrá. Entonces se precisará mayor aporte de energía antes de que se produzca la rotura final. Este fenómeno se presenta especialmente en materiales plásticos, que deben recibir varios impactos antes de romper finalmente.

En tercer lugar, los efectos de la deformación plástica aumentan en importancia al reducir el tamaño de la partícula.

Los experimentos de **Steiner y Schoenert (1972)** sobre partículas de cuarzo y caliza con tamaños entre 1 y 100 micras, observaron la fractura en el microscopio electrónico y mostraron hasta 5 micras el número de grietas radiales disminuyen con el tamaño de la partícula. Por debajo de 5 micras la deformación plástica se esparce aún más, de forma que ya no aumentan las grietas. Finalmente, a tamaños 1 micra las partículas se deforman sin grietas y presenta un comportamiento totalmente plástico. Sin embargo, para el poliestireno, la transición a la deformación sin grietas se produce al tamaño de 10 micras. Varios investigadores han obtenido este tamaño para diferentes materiales, e incluso se han propuesto fórmulas para su obtención. De esta forma se puede definir el tamaño límite de aplicación de la continuación, que por ejemplo para el carbonato cálcico es del orden de una 1 micra.

Debe mencionarse el efecto de las tensiones residuales en partículas suficientemente pequeñas que pueden desembocar en rotura. Se ha comprobado la existencia de zonas comprimidas a una mayor densidad que el resto de la esfera.

Ese campo de tensiones permanece incluso una vez cesado el esfuerzo, y puede ser el responsable de la degradación del material en su posterior manejo.

El criterio de Griffith para la propagación de la grieta establece las siguientes condiciones:

- Que sea energéticamente posible, es decir, que la energía de la nueva superficie producida sea menor que la energía liberada por la relajación de la deformación en el material adyacente.
- Que haya un mecanismo por lo cual pueda ocurrir; por ejemplo, el flujo plástico inadecuado para liberar las tensiones, como si ocurre en los materiales frágiles.



Aunque originalmente Griffith (1920) consideraba únicamente la pérdida del campo de deformaciones elástico, investigaciones posteriores Irwin (1947) y Orovan (1949) incorporaron la corrección de la deformación plástica y Rumpf (1961) han considerado otras fuentes energéticas tales como tensiones elásticas residuales debidas a un pretratamiento mecánico o térmico, energías térmicas de átomos, iones o moléculas y reacción química o adsorción en el frente de grieta, como la energía cinética del material justo después que la grieta pase por una sección, la deformación plástica en la grieta y las cargas eléctricas producidas sobre la nueva superficie.

#### **1.4.2 Energía y reducción de tamaño. Medida de la reducción de tamaño**

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

En el caso de **rotura de partículas individuales**, dichas condiciones de tamaño puede ser, en el caso de partículas esféricas, el diámetro; y en el caso de partículas irregulares, un tamaño entre dos luces de malla de tamices suficientemente cercanos.

En el caso de roturas de colectivos de partículas (**rotura de lechos de partículas**), será preciso conocer en general la distribución de tamaños antes y después de la rotura. En el caso de que la distribución granulométrica no varíe mucho en la alimentación y el producto, (como es el caso de los molinos de bolas, en los que se puede suponer un desplazamiento casi paralelo), suele usarse un parámetro característico, como el  $d_{80}$ , lo cual en todo caso queda abierto a objeciones ya que es necesaria mucha más energía para la rotura de las partículas finas que las gruesas, y el cambio en los rasgos de tamaños finos no puede ser descrito bien sólo por dicho parámetro.

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



la superficie específica puede ser obtenido a partir de diferentes distribuciones de tamaños.

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

### **1.4.3 Energía de rotura**

Es conocido que no toda la energía suministrada en el proceso de reducción de tamaño es efectivamente utilizada, por lo que cabe distinguir entre energía específica de conminución (por unidad de masa),  $E_{ec}$ , y la energía específica externamente aplicada,  $E_{ec}$  siendo la primera realmente utilizada en la reducción de tamaño.

En el caso de la medida de la energía específica de conminución, al ser dependiente de la estructura de las partículas individuales, debe manejarse un valor medio estadístico obtenido a partir de un número suficientemente grande (**Beaven, 1980**) de partículas. Lo mismo puede decirse acerca de la energía específica aplicada externamente, aunque esa última permite una misma medida más sencilla que aquella.

Para rotura de partículas individuales, dentro del mismo material, tamaño de partícula y geometría, la energía específica aplicada externamente es siempre superior a la energía de conminución; pero en el caso de rotura de partículas en multicapa, este valor es muchísimo mayor, ya que los niveles de tensión en muchas partículas no alcanzan los valores necesarios para la rotura, disipándose dicha energía como calor.

## **1.5 Acercamiento al índice de Bond**

El científico Fred C. Bond, a principios de la década de los 50 (Bond, 1952; Bond, 1961), como consecuencia de la proposición de la tercera ley de la fragmentación, fue el responsable de la introducción del parámetro denominado índice de trabajo o índice de Bond.

El mismo Bond (Bond, 1961), se basa en una gran cantidad de datos, de los que dispuso como ingeniero jefe en el departamento de Maquinarias de Procesamiento de



Allis-Chalmers, definió los ensayos experimentales que llevan a la determinación de este parámetro, tanto en el caso de la trituración, como en los casos de molienda en molinos de barras o molinos de bolas, ensayos que siguieron siendo objeto de publicación años después (Deister, 1987).

### 1.5.1 Ley de Bond

**Bond (1952)** concluyó que el trabajo necesario para romper un cubo de lado  $d$  es proporcional al volumen  $d^3$  de dicho cubo; pero al formarse la primera grieta, la energía fluye a las nuevas superficies resultantes, que serán proporcionales a  $d^2$ .

Cuando se produce la rotura de una partícula de forma irregular, la energía de deformación se distribuye irregularmente según dicho autor, y por tanto la energía requerida para la rotura esta entre  $d^2$  y  $d^3$ , siendo la media geométrica  $d^{2.5}$ , un compromiso entre Kick y Rittinger. Como el número de partículas con, supuestamente, la misma forma, es proporcional a  $1/d^3$ , el trabajo necesario para romper la unidad de volumen será  $d^{2.5}/d^3=1/d^{0.5}$ . Así en este caso se puede escribir:

Bond definió el **índice de trabajo** o **índice de Bond** " como  $w_i = K_5 \cdot \frac{1}{\sqrt{100}}$ , que será la energía total requerida para reducir el tamaño de un mineral desde un tamaño teóricamente infinito hasta un producto con un 80 % inferior a 100 micras.

$$E_{ee} \equiv W = w_i \cdot 10 \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (1.1)$$

En la que  $d$  y  $D$  son expresados en micras y corresponden al tamaño por el que pasa el 80 % de producto y alimentación respectivamente.

También en este caso se puede expresar la ley de Bond en términos utilización energética (**Rose, 1972**)

$$\frac{\Delta s}{E_{ee}} = \frac{1}{K_6} E_{ee} + \frac{1}{K_7} \cdot \frac{1}{\sqrt{D}} \quad (1.2)$$





### 1.5.2 Definición teórica del índice de Bond

Es el consumo energético específico (kWh/t) necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (teóricamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras.

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

### 1.5.3 Definición práctica del índice de Bond

El índice de Bond se define a partir de la formulación de la tercera Ley de la fragmentación propuesta por el propio Bond, la cual plantea:

$$W = 10 \cdot w_i \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) \quad (1.3)$$

Donde la  $W$  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, expresado en micras, y  $w_i$  es el índice de trabajo o índice de Bond en kWh/t.



De la fórmula se puede deducir una definición, de valor más teórico que práctico, del índice de Bond, que sería el consumo energético específico en kWh/t necesario para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande 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 comportara de manera homogénea ante la reducción de tamaño (caso que es muy habitual) el valor de su índice de trabajo se mantendrá constante en las etapas sucesivas de conminución.

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

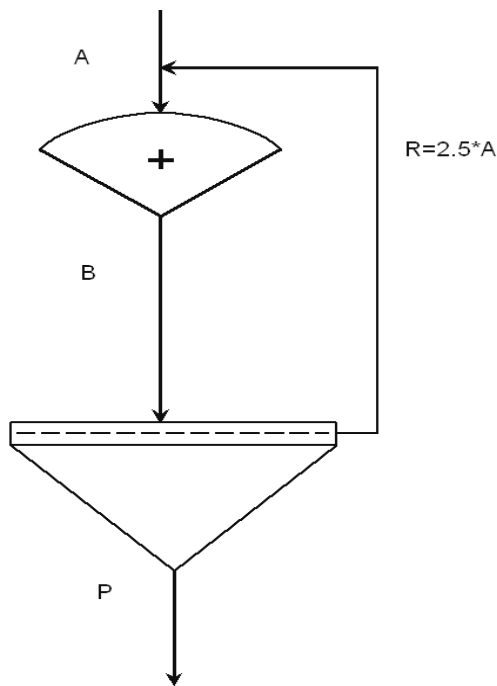
La eficacia de la operación estará influenciada enormemente por las características de la máquina. Es por ello que Bond definió con bastante precisión las condiciones en las que se debería realizar el ensayo. Por tanto las determinaciones del índice de Bond mediante ensayos de laboratorios muestran el comportamiento del material en un rango estrecho de tamaños y cualquier desviación puede acusar la influencia de esa heterogeneidad, lo que puede traducirse en variaciones que pueden ser importantes del índice de trabajo, es por esto que es recomendable que la determinación del índice de trabajo se realice lo más cerca posible del tamaño requerido de molienda industrial.

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

## 1.6 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 305 mm de diámetro y 305 mm de largo, 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 Taylor (entre 600 y 40 micras). En la figura 1 se presenta dicho circuito.



**Figura 1: Esquema del circuito cerrado utilizado en el ensayo de Bond.**



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

$$Wi = \frac{44,5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (1.4)$$

Donde:

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

**P<sub>100</sub>** es la abertura en micras de la malla de corte utilizada para cerrar el circuito.

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

**F<sub>80</sub>** es el tamaño correspondiente al 80 % de pasante de la alimentación fresca, en micras,

**P<sub>80</sub>** es el tamaño correspondiente al 80 % de pasante del producto final, en micras.

Este valor es consistente con la potencia mecánica de salida de un motor capaz de accionar un molino de bolas del tipo de descarga por rebose, de 8 pies de diámetro interno, trabajando en vía húmeda y en circuito cerrado con un clasificador.

### 1.7 Factores de corrección del índice de Bond

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



### **Corrección de unidades de masa**

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

### **Corrección a molienda en vía seca**

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

### **Ventajas del método de Bond**

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

### **Desventajas**

Es objeto de rechazo entre diversos investigadores 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 dispongan del mismo).

### **Pérdidas de energía en el proceso de molienda**

Las principales pérdidas de energía están dadas, en forma de calor y ruido, en las transmisiones de 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.

Además, ocurren pérdidas de energía cinética y potencial en las deformaciones plásticas y elásticas durante la molienda y en la propia emisión de ruido del molino.

**Conclusiones del Capítulo 1**

En los trabajos investigativos desarrollados con el Cieno Carbonatado de Cayo Moa, no se han realizado pruebas para determinar el consumo de energía y la productividad del mismo en el proceso de molienda.

El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió conocer aspectos generales del proceso de molienda. Se pudo conocer que se han realizado múltiples investigaciones en Cuba y el extranjero sobre el consumo energético y la productividad de los molinos de bolas, caracterizar por vías alternativas el comportamiento ante la fragmentación de los diversos materiales y fijar siempre como referencia comparativa en primera instancia el análisis de Bond.



## Capítulo 2 Materiales y Métodos

En este capítulo se hace referencia a los materiales y métodos utilizados en la realización del trabajo. Luego se desarrolla la toma de muestras y su ulterior preparación para la realización de los distintos experimentos.

Se proyecta:

1. Exponer las técnicas y materiales utilizados en la investigación.
2. Argumentar el procedimiento a seguir durante la investigación.

### 2.1 Toma y preparación de las muestras

Para realizar el estudio se tomaron muestras representativas en el depósito de rechazo de Cieno Carbonatado para ello se aplica el método de puntos (Mitrofánov, 1984). El número de puntos de obtención de muestra depende de la regularidad del área de minado y la dimensión de la superficie sujeta al muestreo. Esta área tiene cerca de 200 m de largo por 70 m de ancho y 1.80 m de alto lo que equivale a un volumen igual a 25200 m<sup>3</sup>. El volumen tomado en cada punto es de aproximadamente 2 Kg, hasta obtener un volumen lo suficientemente representativo. El muestreo se realizó durante un viaje realizado a la planta de coral, luego fue transportado hacia el laboratorio de beneficio de minerales del ISMM " Dr. Antonio Núñez Jiménez ".

Primeramente se homogeniza el material por el método de del anillo y el cono, luego se determina la composición granulométrica del material traído de la empresa aplicando la selección de los tamices por la serie de Taylor, Además tomando como masa mínima para el ensayo de la molienda y el cribado con la resultante de la ecuación.

$$Q_{\min.} = 0,02 (d_{\max})^2 + 0,5 (d_{\max}) \quad (2.1)$$

Donde:

$Q_{\min.}$ : es la masa de muestra para realizar el análisis granulométrico.

$D_{\max.}$ : diámetro del trozo mayor del mineral.



## 2.2 Ajuste de la carga de bolas para la prueba de Bond

El índice de trabajo de un material, aplicable a la molienda fina de un molino de bolas, se determina en un molino de laboratorio de dimensiones estándar, 305 mm de diámetro y 305 mm de largo, el mismo gira a 65 rpm, posee esquinas redondeadas y revestimiento liso, con una carga de bolas de acero determinada.

En su publicación más conocida (**Bond, 1961**), define la carga de bolas mostrada en la tabla 2.1

**Tabla 2.1 Distribución recomendada por Bond inicialmente**

Carga recomendada por Bond 1961				
Tamaño de bolas			Área	Peso
Pulgadas	cm	Nº de bolas	(cm <sup>2</sup> )	(g)
1,45	3,683	43	1832,4	8803
1,17	2,972	67	1858,9	7206
1,0	2,540	10	202,7	672
0,75	1,905	71	809,5	2011
0,61	1,549	94	708,9	1433
Total :		285	5412,4	20125

Según especialistas de BICO empresa fabricante del molino utilizado para la realización de los ensayos recogidos en el presente trabajo, Bond admitió la dificultad de especificar un número de bolas de cada peso para dar el área superficial y el peso total





especificado, realizar una corrección que según la mencionada referencia debería ser la siguiente:

**Tabla 2.2 Distribución recomendada por Bond finalmente**

<b>Carga recomendada por Bond 1961</b>				
<b>Tamaño de bolas</b>			<b>Área</b>	<b>Peso</b>
<b>Pulgadas</b>	<b>cm</b>	<b>Nº de bolas</b>	<b>(cm<sup>2</sup>)</b>	<b>(g)</b>
1,500	3,810	25	1832,4	8803
1,250	3,175	39	1858,9	7206
1,000	2,540	60	202,7	672
0,875	2,223	68	809,5	2011
0,750	1,905	93	708,9	1433
Total :		285	5706,8	20592

Aclaración: Los valores de áreas y peso (tabla 2.2) han sido calculados considerando bolas perfectamente esféricas y con la misma densidad de las propuestas inicialmente, debido a que Bond en este caso simplemente corrigió el número de bolas.



### 2.3 Materiales y equipos que fueron utilizados para cumplir con los objetivos trazados

A continuación se relacionan los materiales y equipos que se utilizaron para la realización de los experimentos.

**Tabla 2.4 Juego de tamices que fue utilizado**

N <sup>o</sup>	Tamaño (mm)	N <sup>o</sup>	Tamaño (mm)	N <sup>o</sup>
1	25	6	3,5	11
2	18	7	2	12
3	10	8	1,6	13
4	6,3	9	1,18	14
5	4,75	10	0,85	15

#### Balanza técnica

**Características:** Rango de peso 1 - 2500 g, Error – 0,1 g

#### Trituradora de mandíbulas

Longitud de la quijada-----150 mm

Boca de alimentación:

Ancho ----55 mm.

Largo -----75 mm.

Boca de descarga: 6,3 mm



Molino utilizado para el ensayo de Bond

Características:

D= 185 mm

L= 240 mm

Nr= 75 rpm

## **2.4 Técnica experimental**

### **2.4.1 Método del cuarteo**

El método del cuarteo según [Mitrofánov 1982] se efectúa con el lanzamiento del material en forma de cono 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 delgada de madera 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  $90^{\circ}$ . 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.

#### **2.4 .2 Técnica para el análisis de tamices**

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

El cernido se realizó manualmente, el tamizado se consideró terminado cuando el aumento de peso del residuo en el más fino de los tamices, durante el cernido, constituyó no más del 5 %.

En la mayoría de los casos durante el cernido seco sobre todo en tamices menores de 1 mm, no se logra evitar la aglomeración y prácticamente la obstrucción completa de estos.

#### **2.5 El pragmatismo del índice de Bond**

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 molienda. 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 molienda en molinos de bolas, por ejemplo.

Podría incluso suponerse que cuanto más duro y/o resistente a la tracción fuese un material, más difícil sería su molienda, 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.

Como se hace referencia en la introducción de este trabajo, el objetivo principal del mismo es determinar la influencia del beneficio en la productividad de la molienda, para ello se determina el índice de trabajo o índice de Bond para la clase ( $< 6$  mm). Para esto nos basamos en la caracterización del material a tratar, mediante la realización de ensayos de laboratorio, como parte del trabajo se persigue buscar el método más sencillo en cuanto a las operaciones y cálculos a realizar, que precisen de personal no tan especializado y que supongan un ahorro de tiempo de laboratorio; para ello se determinara el índice de trabajo o índice de Bond para una clase de tamaño y para asegurar la veracidad de los resultados. Como paso previo a todo ello es necesario realizar una descripción del ensayo propuesto por Bond.

## **2.6 Determinación experimental del índice de Bond**

A continuación se pretende ofrecer una descripción de las operaciones a realizar en el desarrollo del ensayo de Bond para molinos de bolas de la determinación experimental del índice de Bond para los minerales lateríticos.

1. Preparación de la alimentación: Homogenización y cuarteo del mineral.
2. Determinación de la densidad aparente en la alimentación: Se determinó mediante la medición en un cilindro graduado, donde se prestó especial cuidado al máximo empaquetamiento posible en dicho cilindro, recurriéndose para esto al cribado del mismo.
3. Determinación del peso de la corrección de alimentación mediante el valor de la densidad aparente, o directamente por pesada de dicho volumen: Este será el



peso de alimentación en el primer ciclo, y en todo caso, el peso total al molino alimentado en cada ciclo.

4. Determinación del peso de producto ideal o peso ideal de finos, suponiendo una carga circulante de 250 %. Este valor será determinado por la siguiente expresión:

Peso ideal

$$P_i = \frac{\text{Peso}(x) \text{cm}^3}{3,5} \quad (2.2)$$

5. Caracterización granulométrica de la alimentación, con especial cuidado en la obtención del valor característico a  $F0^{\circ}_{80}$ , y el porcentaje de material en la alimentación inferior al tamaño de corte.
6. En el caso de que el análisis granulométrico realizado a la alimentación, se obtenga un porcentaje pasante por el tamiz de corte superior al 28 %, se realizará un ciclo vacío, se asignará cero al número de revoluciones y al número de granos netos por revolución en el primer periodo, se llevará a cabo el tamizado del total de la carga al tamiz de corte, separándose el cernido y completando el rechazo con alimentación fresca representativa hasta completar el peso inicial.
7. Introducción de la carga de alimentación en el molino, teniendo especial cuidado en el cierre del mismo. Es conveniente comprobar regularmente el estado de las juntas de cierre, para garantizar que no se produzcan acumulaciones de material no molido en los espacios que puedan quedar, o incluso pérdidas de material en el giro del molino.
8. Se hace girar el molino un número arbitrario de revoluciones: En nuestro experimento se comenzó con 75 rpm; para esto se determinó la frecuencia de rotación del molino utilizado (en los ensayos del índice de Bond) en un minuto, el cual permitió por regla de tres determinar cuál será el tiempo de molienda para 75 revoluciones.



9. Se descarga el molino sobre una superficie tipo chapa perforada, para facilitar la separación de las bolas del material, se limpia el interior del molino y las bolas para recuperar en lo posible la totalidad de la masa introducida, posteriormente se cargan las bolas limpias.
10. Se tamiza cuidadosamente la descarga del molino, con el tamiz de corte seleccionado.
11. Se procede al pesado de rechazo tamizado, con precisión al menos de décimas de gramos.
12. Se determina el peso del cernido por diferencia entre el peso total del producto y el peso del rechazo, aunque si es posible, se recomienda realizar la pesada directa como comprobación, o incluso podría realizarse directamente la pesada del material pasante.
13. Se determina la cantidad de material de tamaño menor que el tamiz de corte en la alimentación, según el análisis realizado en el paso 5, para conocer así el peso adicionado de finos en la carga de alimentación al actual período.
14. Se calcula el valor de los gramos de finos netos producidos, que corresponde al peso pasante producido (determinado en el paso 12), menos el peso de finos introducidos en la alimentación (determinado en el paso 13).
15. Se calcula el valor de los gramos netos producidos por revolución (Gbp), dividiendo el número de gramos netos (obtenidos en el paso 14), entre el número de revoluciones del período.
16. Se añade una cantidad de muestra representativa de alimentación fresca al rechazo obtenido, para construir de nuevo el peso definido en el paso 3.
17. Se calcula la cantidad aproximada de finos ya presentes en la cantidad añadida en el paso 16, basándose en el análisis granulométrico del paso 5. este valor debe ser anotado para usarlo en el cálculo de los finos netos producidos en el siguiente período, como se describió en el paso 12.



18. Se calcula el peso que deberá ser molido en el próximo período para obtener la carga circulante deseada, se obtiene restando al peso ideal de finos, según el paso 4, la cantidad de finos presentes en la alimentación al molino.
19. Se determina el número de revoluciones correspondientes al siguiente período. El mismo se obtiene dividiendo la cantidad de material que debe ser molido (calculada en el paso 18), entre el número de gramos netos por revolución del período anterior (calculado en el paso 15).
20. Se añade nueva alimentación al rechazo del ensayo (como en el paso 16) y se repiten los pasos del 7 al 20. Deben realizarse, como mínimo, 5 períodos de molienda.
21. Según Bond es de esperar una convergencia del sistema donde el número de gramos netos por revolución frente al número de períodos muestre una tendencia creciente o decreciente, de forma, que en un determinado ciclo se produzca una inversión de tal tendencia, y pasados al menos los 5 ciclos, puede darse por terminado el ensayo. En todo caso, este tipo de convergencia no es general, y de no presentarse tal inversión de tendencia, se debería continuar el ensayo hasta que no haya variación significativa en el número de gramos netos por revolución.
22. Promediando los valores de gramos netos por revolución obtenidos en los tres últimos períodos (si hubo la inversión tendencia comentada en el paso 21) se obtiene mediante el índice de molturabilidad en molinos de bolas, Gbp.
23. Mediante el análisis por tamizado, se determina la distribución granulométrica del pasante del tamiz de corte en el último ensayo realizado, con el fin de determinar el valor  $P_{80}$ .
24. Se calcula el índice de trabajo  $W_i$  en molinos de bolas, mediante la ecuación

propuesta por Bond: 
$$W_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0.23} \cdot (x)Gbp^{0.82} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{F_{80}} \right)} \quad (2.3)$$





## 2.7 Determinación del factor de corrección del volumen para el molino de bola

Las pruebas de enlace se realizan en un molino de laboratorio con dimensiones 305 mm longitud, 305 mm diámetro y 70 rpm, con una carga de 20,125 kg de bolas de acero que tienen una distribución adecuada. La muestra constante del peso agregada en el molino corresponde con un volumen de 700 cm<sup>3</sup> de la alimentación inicial, y al moler en ciclos continuos se hace simular el equilibrio en una operación continua que muele con una carga el 250 % que recircula. Las pruebas realizadas en el molino Denver siguen la metodología en enlace pero fue realizado con las adaptaciones necesarias siguientes:

**Factor de la corrección del volumen:** El molino del laboratorio tiene 185 mm de diámetro y 240 mm longitud. Para determinar la carga de acero y el peso inicial de las muestras, es necesario primero determinar un factor de corrección del volumen entre los molinos, porque ambos molinos tienen diferentes longitud y diámetro. Este factor de corrección fue determinado al corregir la diferencia en volúmenes internos.

**Determinación de acero de la carga para del molino:** El acero total, el peso y su distribución pueden ser obtenidos dividiéndose pesos de acero demostrados en la carga del enlace por el volumen factor de la corrección.

El volumen inicial de la muestra que se probará puede ser calculado de la misma manera, al dividir por el factor de corrección del volumen.

Adaptación de la metodología de la prueba en enlace al molino Denver: Una vez que se aplique la corrección del volumen, el método de prueba puede ser realizado de la misma manera que en la prueba estándar en enlace.

Ecuación en el caso del molino el valor de  $W_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0.23} \cdot Gbp^{0.82} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{F_{80}} \right)}$  (2.4)



Gbp se debe corregir por el factor de la corrección del volumen (x), como se demuestra

en la siguiente ecuación. 
$$W_i = \frac{44,5}{P_{100}^{0.23} \cdot (x)Gbp^{0.82} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{F_{80}} \right)} \quad (2.5)$$

### Conclusiones del Capítulo 2

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



## Capítulo 3 *Análisis de los resultados*

### 3.1 Resultados experimentales

En el presente capítulo se discuten los resultados obtenidos durante la realización de nuestra investigación, para esto nos trazamos los siguientes objetivos:

- Analizar el comportamiento de la molienda a través del ensayo de Bond.
- Comparar el índice de trabajo real operacional con los estimados mediante Bond.

### 3.2 Composición química y granulométrica de la mena

#### 3.2.1 Composición química

**Tabla 3.1 Composición química del Cieno carbonatado**

Clase de tamaño	% Cr	%Mg	% Al	% Na	% K	% Ca	% Ni	% Fe	%CaCO <sub>3</sub>
-6,3+4,75	0,017	0,868	0,185	0,826	0,060	<b>44,338</b>	0,014	0,911	<b>89,78</b>
-4,75+3,5	0,017	0,951	0,196	0,801	0,060	<b>37,875</b>	0,014	0,901	<b>91,05</b>
-3,5+2,0	0,053	1,334	0,382	0,655	0,043	<b>34,625</b>	0,032	0,226	<b>83,82</b>
-2,0+1,6	0,016	1,250	0,204	0,743	0,049	<b>39,175</b>	0,014	0,918	<b>88,93</b>
-1,6+1,18	0,025	1,320	0,242	0,701	0,038	<b>38,238</b>	0,017	1,120	<b>88,28</b>
- 1,18+0,83	0,015	1,140	0,204	0,898	0,097	<b>46,925</b>	0,013	0,895	<b>89,89</b>
-0,83	0,034	0,920	0,252	0,724	0,042	<b>43,739</b>	0,015	0,733	<b>90,84</b>

Como se puede apreciar en esta tabla existe un predominio del calcio en la composición química del Cieno Carbonatado con más del 40 %, lo cual es de gran importancia para su utilización en la industria.

#### 3.2.2. Caracterización granulométrica del material

La caracterización granulométrica inicial del material se realizó mediante el análisis de tamices. Después de haber determinado el juego de tamices mediante la serie de Taylor inicial  $\sqrt{2}$ ; los tamices elegidos fueron los siguientes: (25; 18;



10; 6,3; 4,75; 3,5; 2; 1,6; 1,18; 0,85) mm. La composición granulométrica del material, se realizó mediante el tamizado por vía seca de las fracciones seleccionadas: (+ 25; - 25+ 18;-18+ 10; -10+ 6.3; -6.3+4.75; -4.75 +3.5;-3.5+2.2;+1.6-1.6;+1.18-1.18;+0.85-0.85).

El material obtenido por cada clase de tamaño es pesado de forma independiente para determinar los diferentes índices tecnológicos, luego se determinó un promedio del peso de las distintas clases de tamaño y se calculó el por ciento de salida sumaria de la cantidad de material cernido y retenido según los diferentes tipos de granulometrías, para determinar las características de tamaño parcial y acumulativas del material inicial.

**Tabla 3.2 Resultados del análisis de criba**

Clases (mm)	Peso (Kg)	%	Sumaria por más %	Sumaria por menos %
+25	3,50	4,9	4,9	100
-25 +18	4,50	6,3	11,2	95,1
-18 +10	4,85	6,8	18,0	88,8
-10 + 6.3	6,60	9,2	27,2	82,0
-6.3 + 4.75	3,45	4,8	32,0	72,8
-4.75 +3.5	7,00	9,7	41,7	68,0
-3.5 + 2	1,50	2,1	43,8	58,3
-2 + 1.6	9,50	13,2	57,0	56,2
-1.6 + 1.18	9,50	13,2	70,2	43,0
-1.18 + 0.85	5,40	7,5	77,7	29,8
-0.85	16,00	22,3	100,0	22,3
<b>Total</b>	<b>71,8</b>	<b>100</b>		

Se pudo comprobar que la clase - 0,85 mm es la que predomina en el material con un 22%.



### 3.3 Determinación de los parámetros para el cálculo del factor de corrección para el molino de laboratorio

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la determinación del factor de corrección.

#### Cálculo del volumen para el molino de Bond

Diámetro---305 mm

Largo -----305 mm

$$V = \pi \cdot (r^2) \cdot l \quad (3.1)$$

$$V = 3,14 \cdot (152,5^2) \cdot 305$$

$$V = 22272510,6 \text{ mm}^3$$

#### Análisis de unidades

$$V = \text{mm}^2 \cdot \text{mm}$$

$$V = \text{mm}^3$$

#### Cálculo del volumen para el molino del Laboratorio

Diámetro---185 mm

Largo -----240 mm

$$V = 3,14 \cdot (r^2) \cdot l$$

$$V = 3,14 \cdot (92,5^2) \cdot 240 \quad (3.1)$$

$$V = 6447990,000 \text{ mm}^3$$

#### Cálculo del factor de corrección para el molino del Laboratorio

Designaremos a la letra X como factor de corrección:

Volumen del molino de Bond: Vb

Volumen del molino del Laboratorio: Vl

$$X = \frac{Vb}{Vl} \quad (3.2)$$

$$X = \frac{22272510,6}{6447990,000}$$

$$X = 3,45$$



### Análisis de unidades

$$X = \frac{mm^3}{mm^3}$$

$$X = \text{Adimensional}$$

### Factor de corrección del volumen de alimentación

Alimentación para Bond:  $700 \text{ cm}^3$

Factor de corrección: 3,45

Alimentación para el molino del Laboratorio: A

$$A = \frac{700}{X}$$

$$A = \frac{700}{3,45} \tag{3.3}$$

$$A = 203 \text{ cm}^3$$

### Análisis de unidades

$$X = \frac{cm^3}{\text{Adimensional}}$$

$$X = cm^3$$

### Determinación de acero de la carga para del molino:

Factor de corrección: 3,45

#### Para el diámetro 3,810 cm

Nº de bolas para Bond:  $N_b = 25$

Nº de bolas para el molino del Laboratorio:  $N_l$

$$N_l = \frac{N_b}{X} \tag{3.4}$$

$$N_l = \frac{25}{3,45}$$

$$N_l = 7$$

#### Para el diámetro 3,175 cm

Nº de bolas para Bond:  $N_b = 39$



Nº de bolas para el molino del Laboratorio: NI

$$NI = \frac{Nb}{X}$$

$$NI = \frac{39}{3,45}$$

$$NI = 11$$

**Para el diámetro 2,540 cm**

Nº de bolas para Bond: Nb = 60

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: NI

$$NI = \frac{Nb}{X}$$

$$NI = \frac{60}{3,45}$$

$$NI = 17$$

**Para el diámetro 2,223 cm**

Nº de bolas para Bond: Nb = 68

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: NI

$$NI = \frac{Nb}{X}$$

$$NI = \frac{68}{3,45}$$

$$NI = 20$$

**Para el diámetro 1,905 cm**

Nº de bolas para Bond: Nb = 93

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: NI

$$NI = \frac{Nb}{X}$$

$$NI = \frac{93}{3,45}$$

$$NI = 27$$

**El resultado de los cálculos son adimensionales.**

**Para el diámetro 3,810 cm**

Peso de bolas para Bond: Pb para una bola = 271 g

Peso de bolas para el molino del Laboratorio: PI

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: NI



$$Pl = Nl \cdot Pb$$

$$Nl = 7 \cdot 271$$

$$Nl = 1894 \text{ g}$$

(3.5)

**Para el diámetro 3,175 cm**

Peso de bolas para Bond: Pb para una bola = 140 g

Peso de bolas para el molino del Laboratorio: Pl

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: Nl

$$Pl = Nl \cdot Pb$$

$$Nl = 11 \cdot 140$$

$$Nl = 1542 \text{ g}$$

**Para el diámetro 2,540 cm**

Peso de bolas para Bond: Pb para una bola = 75 g

Peso de bolas para el molino del Laboratorio: Pl

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: Nl

$$Pl = Nl \cdot Pb$$

$$Nl = 17 \cdot 75$$

$$Nl = 1275 \text{ g}$$

**Para el diámetro 2,223 cm**

Peso de bolas para Bond: Pb para una bola = 56 g

Peso de bolas para el molino del Laboratorio: Pl

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: Nl

$$Pl = Nl \cdot Pb$$

$$Nl = 20 \cdot 56$$

$$Nl = 1114 \text{ g}$$

**Para el diámetro 1,905 cm**

Peso de bolas para Bond: Pb para una bola = 56 g

Peso de bolas para el molino del Laboratorio: Pl

Nº de bolas para el molino del Laboratorio: Nl

$$Pl = Nl \cdot Pb$$

$$Nl = 27 \cdot 56$$

$$Nl = 1504 \text{ g}$$



**Tabla 3.3 Distribución de bolas recomendada finalmente**

Tamaño de bolas (cm)	Nº de bolas	Peso (g)
3,810	7	1894
3,175	11	1542
2,540	17	1275
2,223	20	1114
1,905	27	1504
Total	83	7328

### 3.4 Determinación del índice de Bond a escala de laboratorio

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la determinación experimental del índice de Bond a la muestra procesada tomada en el depósito de rechazo de Cieno Carbonatado del Puerto de Moa.

Como tamiz de corte se utilizó el 0,85 mm como se precisó en el capítulo anterior.

**Tabla 3.4 Denominación de la muestra**

Muestra	< 6,3 mm
---------	----------

#### 3.4.1 Análisis de los resultados del índice de Bond para la muestra

A continuación en la tabla 3.4 se muestran los resultados obtenidos mediante la técnica de tamizado, para dar a conocer la composición granulométrica inicial de la muestra.

**Tabla 3.5 Caracterización granulométrica de la alimentación**

Clases de tamaño	Peso(g)	Peso (%)	salida sumaria(+)	salida sumaria(-)
+ 3,15	57,9	33,08	33,08	100
- 3,15 + 2	11,3	6,45	39,53	66,92
- 2 + 1,6	44,1	25,2	64,73	60,47
- 1,6 + 1,18	40,4	23,08	87,81	35,27
- 1.18 + 0,85	8,0	4,57	92,38	12,19
- 0,85	13,3	7,62	100	7,62

**Análisis de los resultados para el primer ciclo.****Tabla 3.6 Resultados obtenidos en el primer ciclo de molienda****Peso de 175 g**

Clases de tamaño	Peso(g)	Peso (%)	salida sumaria(+)	salida sumaria(-)
+ 3,15	21,4	12,22	12,22	100
- 3,15 + 2	2,4	1,37	13,59	87,78
- 2 + 1,6	16,3	9,31	22,9	86,41
- 1,6 + 1,18	22,7	12,97	35,87	77,1
- 1.18 + 0,85	7,7	4,4	40,27	64,13
- 0,85	104,5	59,71	100	59,71

**Cálculo del Gbp para el primer ciclo.**

Se calcula el valor de los gramos netos de fino producidos por revolución (Gbp), dividiendo el número de gramos netos, entre el número de revoluciones del período.

Gramos netos (Gn) =104,5

Número de revoluciones del período (Nrp) =100

$$Gbp = \frac{Gn}{Nrp}$$

$$Gbp = \frac{104,5}{100} \tag{3.6}$$

$$Gbp = 1,05$$

**Análisis de los resultados para el segundo ciclo.****Tabla 3.7 Resultados obtenidos en el segundo ciclo de molienda****Peso de 175 g**

Clases de tamaño	Peso(g)	Peso (%)	salida sumaria(+)	salida sumaria(-)
+ 3,15	25,6	14,62	14,62	100
- 3,15 + 2	5,2	2,97	17,59	85,38
- 2 + 1,6	15,2	8,68	26,27	82,41
- 1,6 + 1,18	21,7	12,4	38,67	73,73
- 1.18 + 0,85	7,0	4	42,67	61,33
- 0,85	100,3	57,31	100	57,31

**Cálculo del Gbp para el segundo ciclo.**

Se calcula el valor de los gramos netos de fino producidos por revolución (Gbp), dividiendo el número de gramos netos, entre el número de revoluciones del período.

Gramos netos (Gn) =100,3

Número de revoluciones del período (Nrp) =85

$$Gbp = \frac{Gn}{Nrp}$$

$$Gbp = \frac{100,3}{85}$$

$$Gbp = 1,18$$

**Análisis de los resultados para el tercer ciclo.****Tabla 3.8 Resultados obtenidos en el tercer ciclo de molienda****Peso de 175 g**

Clases de tamaño	Peso(g)	Peso (%)	salida sumaria(+)	salida sumaria(-)
+ 3,15	27,6	15,77	15,77	100
- 3,15 + 2	6,2	3,54	19,31	84,23
- 2 + 1,6	20,8	11,88	31,19	80,69
- 1,6 + 1,18	19	10,85	42,04	68,81
- 1.18 + 0,85	2,1	1,2	43,24	57,96
- 0,85	99,3	56,74	100	56,74

**Cálculo del Gbp para el tercer ciclo.**

Se calcula el valor de los gramos netos de fino producidos por revolución (Gbp), dividiendo el número de gramos netos, entre el número de revoluciones del período.

Gramos netos (Gn) =99,3

Número de revoluciones del período (Nrp) =70

$$Gbp = \frac{Gn}{Nrp}$$

$$Gbp = \frac{99,3}{70}$$

$$Gbp = 1,42$$

**Análisis de los resultados para el cuarto ciclo.****Tabla 3.9 Resultados obtenidos en el cuarto ciclo de molienda****Peso de 175 g**

Clases de tamaño	Peso(g)	Peso (%)	salida sumaria(+)	salida sumaria(-)
+ 3,15	35,2	20,11	20,11	100
- 3,15 + 2	7,1	4,05	24,16	79,89
- 2 + 1,6	25,4	14,51	38,67	75,84
- 1,6 + 1,18	20,9	11,94	50,61	61,33
- 1.18 + 0,85	3,0	1,71	52,32	49,39
- 0,85	83,5	47,71	100	47,71

**Calculó del Gbp para el cuarto ciclo.**

Se calcula el valor de los gramos netos de fino producidos por revolución (Gbp), dividiendo el número de gramos netos, entre el número de revoluciones del período.

Gramos netos (Gn) =83,5

Número de revoluciones del período (Nrp) =55

$$Gbp = \frac{Gn}{Nrp}$$

$$Gbp = \frac{83,5}{55}$$

$$Gbp = 1,51$$

**Análisis de los resultados para el quinto ciclo.****Tabla 3.10 Resultados obtenidos en el quinto ciclo de molienda****Peso de 175 g**

Clases de tamaño	Peso(g)	Peso (%)	salida sumaria(+)	salida sumaria(-)
+ 3,15	40	22,85	22,85	100
- 3,15 + 2	8	4,57	27,42	77,15
- 2 + 1,6	29,2	16,68	44,1	72,58
- 1,6 + 1,18	25,7	14,68	58,78	55,9
- 1.18 + 0,85	7,1	4,05	62,83	41,22
- 0,85	65	37,14	100	47,71

**Calculó del Gbp para el quinto ciclo.**

Se calcula el valor de los gramos netos de fino producidos por revolución (Gbp), dividiendo el número de gramos netos, entre el número de revoluciones del período.

Gramos netos (Gn) =65

Número de revoluciones del período (Nrp) =40

$$Gbp = \frac{Gn}{Nrp}$$

$$Gbp = \frac{65}{40}$$

$$Gbp = 1,62$$

El procedimiento utilizado se explicó en el capítulo 2, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación durante el procesamiento de la muestra.

**Tabla 3.10 Resultados obtenidos en el índice de Bond (Muestra)****Peso de 175 g**

# de ciclos	# de Rev.	Finos presentes(g)	Finos producidos(g)	Finos Netos(g)	Gbp
1	100	13,3	91,2	104,5	1,05
2	85	13,8	86,5	100,3	1,18
3	70	14,5	84,8	99,3	1,42
4	55	15	68,5	83,5	1,51
5	40	16,4	48,6	65	1,62



Después de realizado el análisis granulométrico de los finos en este último ciclo se determinan mediante la interpolación el valor  $P_{80}$  que es el orificio del tamiz por donde pasa el 80% de los productos ( $P_{80}=850$  micras) y el  $F_{80}$  orificio del tamiz por donde pasa el 80% del material alimentado ( $F_{80}=2500$  micras), así como el valor de  $P_{100}$  orificio del tamiz por donde pasa el 100% del producto ( $P_{100}=3150$  micras) respectivamente, y promediando los Gbp correspondientes a los últimos tres ciclos ( $Gbp = 1,51$ ), se puede determinar el índice de trabajo del material, válido para la molienda en molinos de bolas, mediante la expresión propuesta por Fred Bond, la cual fue comentada en el capítulo anterior:

### 3.5 Cálculo del índice de Bond de la muestra

$$W_i = \frac{44.5}{P_{100}^{0.23} \cdot (3,45) Gbp^{0.82} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

$$W_i = \frac{44,5}{3150^{0,23} \cdot (3,45) 1,51^{0,82} \cdot \left( \frac{10}{\sqrt{850}} - \frac{10}{\sqrt{2500}} \right)}$$

$$W_i = \frac{44,5}{6,376 \cdot 4,837 \cdot \left( \frac{10}{29,15} - \frac{10}{50} \right)}$$

$$W_i = \frac{44,5}{6,376 \cdot 4,837 \cdot (0,34 - 0,2)}$$

$$W_i = 10,308 \text{ kWh/t}$$

#### 3.5.1 Corrección de unidades de masa

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

$$W_i = 10,308 \cdot 1,1 = 11,338 \text{ kWh/t}$$



### 3.5.2 Corrección a molienda en vía seca

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

$$W_i = 11,338 \cdot 1,3 = 14,740 \text{ kWh/t}$$

Después de realizar las correcciones pertinentes el resultado del índice de Bond del Cieno Carbonatado de Cayo Moa es de 14,740kWh/t.

#### **Conclusiones del Capítulo 3**

1. Con el valor de corrección para el molino de laboratorio de la Planta de Beneficio se logro hacer el estudio deseado.
2. La aplicación de la metodología de Bond permitió determinar el índice de trabajo del material investigado.



## *Conclusiones*

1. En este trabajo se determina un factor de corrección de 3,45 para calcular el índice de Bond con el molino de bola (185 mm de diámetro y 240 mm de longitud) de la Planta de Beneficio.
2. El resultado del índice de Bond del Cieno Carbonatado de Cayo Moa es de 14,740 kWh/t.





## *Recomendaciones*

1. Dar continuidad al trabajo, profundizar en el aspecto de un estudio para diseñar un molino de bola para el aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo) del cieno carbonatado de Cayo Moa.
2. Para posteriores estudios sobre índice de trabajo de otros materiales en la Planta de Beneficio utilizar el molino de bola de 185 mm de diámetro y 240 mm longitud, y su factor de corrección.
3. Estudiar el índice de Bond del Cieno Carbonatado de Cayo Moa con un molido de Bond y así, comparar los resultados.



## *Bibliografía*

- 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
- BEAVEN, C.H.J. (1980) *How many measurements* Proc. Powder Europa, Weisbaden, 22-24 June, Tech. Sessions, vol. 1, 1-25.
- BICO (Braun Internacional Co.)(1999) *Manual de operación del molino de bolas estándar de Bond*.
- BOND, F. C., (1961) *"Crushing and Grinding Calculations"*. Allis Chalmers Manufacturing Co., Milwaukee, Wisconsin.
- CASTILLO, D. (1988). *Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado*.
- CEPRONIQUEL (2000). *Proyecto de extracción del fango coralino al sur de Cayo Moa Grande*.
- CORREA, F. (1957). *Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande*.
- DEISTER, R.J., (1987), *"How to Determine the Bond Work Index Using Lab Ball Mill Grindability Test"*. Eng. And Min, Jour., February 1987, 42-45
- .GILDEMEISTER, H.H., and Schönert, K. (1972), *"Berechnung zur wellenausbreitung in kugeln und bruchphänomene in kreisschiben bei prallbeanspruchung"*. Dechema Monograph 69, 233-267.
- GRIFFITH, A.A. (1920), *"The phenomenon of rupture and flow in solids"*. Phil. Trans. Royal Soc. A, 221, 163-198.
- IRWIN, G.R. (1947), *"Fracturing of Metals"*. ASM Symp. Chicago, 147.
- LAFARGUE, B.U. (2005). *Análisis del comportamiento del consumo específico de energía en el proceso de molienda de minerales lateríticos en la empresa*



- Comandante Ernesto Che Guevara*. Laborde Brown, R. (tutor). Trabajo de Diploma. ISMMMoa. 83h.
- LOPEZ, F.; et.al. (1988). Determinación de los parámetros energéticos en un proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Revista de Metalurgia*, 24 (4):
- MENÉNDEZ, A.J. (2000). *Aplicación de la simulación matemática a la determinación de consumos energéticos en la fragmentación*. Tesis de Doctorado. Universidad de Oviedo
- MENÉNDEZ, A.J.; A.L. COELLO-VELAZQUEZ. (2004). Determinación del índice del trabajo en el molino común del laboratorio. *Minerales y Procesos Metalúrgicos*, 22 (3):
- MITROFÁNOV, S.I.; et. al. (1982). *Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales*. Moscú: Editorial Mir.
- NÁPOLES, E. (1992). *Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande*.
- NEDVED, M. (1966). *Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande*.
- NÚÑEZ, G.; G.S. PÉREZ. (2003). *Modelación a escala de laboratorio del proceso de molienda del mineral laterítico del yacimiento de Punta Gorda*. Trabajo de Diploma. ISMMMoa.
- OZKAHRAMAN, H.T. (2005). Una expresión significativa entre el índice en enlace del trabajo, grindability Índice y valor de la friabilidad. *Ingeniería en Minerales*, (18):
- OROWAN, E. (1949), "Fracture and strength in solids". *Rep. Prog. Phys.*, 12, 185-232.
- REINA, L.Y. (2004). *Determinación del índice de trabajo o de Bond para los minerales lateríticos*. Beyris Mazar, P.E; Laborde Brown R. (tutores). Trabajo de Diploma. ISMMMoa. 66h.



ROSE, H.E., (1972), *“A New Treatment of Comminution and its Application to the Calculations of Mill Capacity”*. Dechema Monograph 69 87-120

RUMPF, H. (1961), *“Problemstellungen und nuere ergbenisse der bruchtheorie”*. Materialprufung, 3, 253-265.