



**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE BOND A LA
TRITURACIÓN DEL MINERAL SAPROLÍTICO
DEL PROYECTO DE FERRONÍQUEL
YAMANIGÜEY SA.**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
METALÚRGICO**

Yunia Osorio Gueje.

**Moa
2011**



**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA.**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE BOND A LA
TRITURACIÓN DEL MINERAL SAPROLÍTICO
DEL PROYECTO DE FERRONÍQUEL
YAMANIGÜEY SA.**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO
METALÚRGICO**

AUTOR: Yunia Osorio Gueje

TUTORES: Prof. Instructor. Ing. Orleidy Loyola Breffe

Prof. Instructor. Ing. Ángel Legra Legra

**Moa
2011**

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos ante todo y de manera muy especial a mis padres, hermanos y a mis hijos y por haber estado presentes en todas las etapas de nuestras vidas, a mi esposo, a todos nuestros amigos que estuvieron cerca y al tanto de cuantos sucesos atravesamos, y en general a todos nuestros familiares incluyendo a aquellos que ya no están y que hubiesen querido vernos graduados.

Agradecemos además a nuestro tutor Ing. Ángel Legra, a mi profesor Orleidis, por su paciencia, apoyo y comprensión mostrada en el trayecto de estos últimos meses de mi carrera.

Agradecemos al Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz por posibilitarnos estudiar en una revolución socialista donde el estudio es prioridad de toda persona y sin pedir nada más a cambio que el compromiso de ser cultos cada día más.

Y agradecemos a Dios por abrirnos cada puerta que se interpuso en nuestro camino.

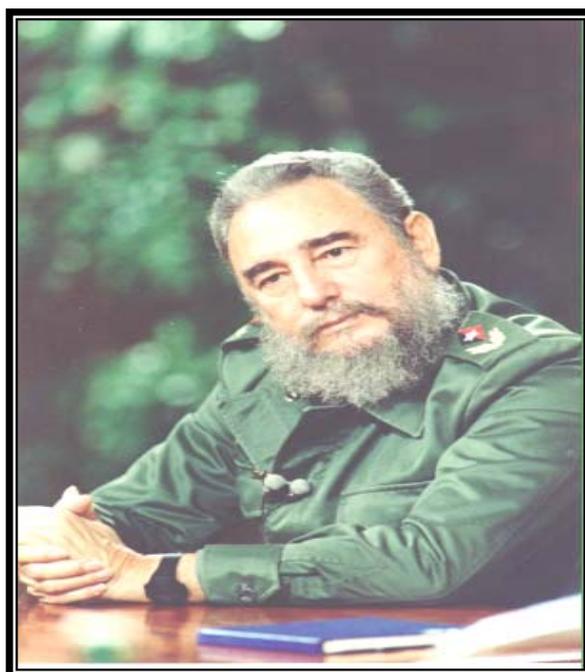
A todos muchas gracias.

DEDICATORIA

Yunia Osorio Gueje:

Le dedico este logro a mis hermanos, a mi papá y, a mi esposo, a mis hijas, a los que no imaginaron que esto sería posible, y de manera muy especial a mi mamá Ana, que es la razón de que todo esto fuera posible.

PENSAMIENTO



“Todo nuestro honor y toda nuestra vergüenza deben sumarse para levantar el valor del trabajo, la importancia del trabajo, para tomar conciencia de la importancia del trabajo. Y trabajar, consagrarse al trabajo; trabajar lo que establecen las leyes, lo que está establecido; aprovechar la jornada y erradicar indisciplinas...”

Fidel Castro Ruz

RESUMEN

El propósito de este trabajo es determinar el consumo específico de energía o índice de Bond a la trituración de los minerales saprolíticos del yacimiento Yamanigüey S.A. Para ellos se llevó a cabo el estudio en una trituradora de mandíbula ubicada en el CEDINIQ. La preparación de la muestra se realizó utilizando el método del anillo y el cono y a través de un cuarteador de Rifle. Se realizó un análisis de tamices a la alimentación y descarga con las cuales se determinó el F80 y P80. Las pruebas arrojaron como resultado promedio que el consumo específico de energía para la trituración es de 2,94 kWh/t, con una capacidad de 0,256 t/h; lo que significa que está en el rango establecido para los procesos de trituración.

Palabras Clave: Consumo específico de energía, Proceso de trituración, Minerales Saprolíticos.

SUMMARY

The purpose of this study is to determine the specific energy consumption or Bond index to the crushing of the reservoir minerals Yamanigüey saprolitic SA. For them, the study was carried out in a jaw crusher located at the CEDINIQ. The sample preparation was performed using the ring method and the cone and through a splitter Rifle. An analysis of sieves to food and unloading which determined the F80 and P80. The test results yielded average specific energy consumption for crushing is 2.94 kWh/t, with a capacity of 0.256 t/h, which means that it is in the range set for the process of grinding.

Key word:

Specific energy consumption, grinding process, Minerals saprolite.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
1.1 Trabajos precedentes sobre índice de Bond.....	6
1.2. Trabajos realizados sobre la trituración de minerales	8
1.3 Fundamentos teóricos del proceso de trituración.....	9
1.3.1 <i>Aproximación física al fenómeno de la rotura. Efecto de la</i> <i>velocidad de deformación</i>	<i>9</i>
1.4 Energía y reducción de tamaño. Medida de la reducción de tamaño.....	12
1.4.1 <i>Energía de rotura.....</i>	<i>13</i>
1.5 Acercamiento al índice de Bond.....	13
1.5.1 <i>Ley de Bond.....</i>	<i>14</i>
1.5.2 <i>Definición teórica del índice de Bond.....</i>	<i>14</i>
1.5.3 <i>Definición práctica del índice de Bond.....</i>	<i>15</i>
1.5.4 <i>El pragmatismo del índice de Bond</i>	<i>16</i>
1.6 Características y etapas de trituración	17
1.6.1 <i>Tamaño de partículas</i>	<i>18</i>
1.6.2 <i>Ley de Rittinger.....</i>	<i>19</i>
1.7 Conclusiones del capítulo 1	20
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1. Metodología y desarrollo del trabajo	21
2.1.1 <i>Determinación experimental del índice de Bond para la trituración ..</i>	<i>22</i>

INDICE

2.1.2 Toma y preparación de las muestra	24
2.1.3 Homogenización de la muestra por el método del cuarteo.....	25
2.1.4. Cortador de Rifles.....	26
2.1.5 Análisis de los tamices	27
2.1.6. Equipo para determinar el tamaño de la muestra	27
2.1.7. Característica de la trituradora utilizada para realizar los experimentos	28
2.2 Conclusiones del Capítulo 2	29
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	30
3.1 Determinación del índice de Bond a los minerales saprolíticos	30
3.1.1 Análisis de tamices de la alimentación y descarga.....	30
3.1.2. Desarrollo de cálculo general de la potencia (P) consumida por la trituradora	36
3.1.3. Determinación general del índice de Bond de la trituración.....	37
3.1.4. Determinación de la capacidad de la trituración	37
3.2 Desarrollo de cálculo para la primera muestra tecnológica (MT1)	38
3.3 Conclusiones del capítulo 3	40
CONCLUSIONES GENERALES	41
RECOMENDACIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS.....	I
ANEXO # 1.	I
ANEXO # 2	IV

INTRODUCCIÓN

Desde 1985 se iniciaron estudios en el mundo sobre el ferroníquel, el mismo es un material que tiene un 33 % de níquel y el resto es hierro, se cotiza en el mercado mundial al mismo precio del níquel contenido, varias compañías lo producen, La Falcombrige por ejemplo, está ubicada en Bonao Capital de la provincia de Monseñor Nouel de la Republica Dominicana y su principal explotación se concentra en el ferroníquel, es una de las empresas más grandes de ese país.

Se conoce que la pequeña isla en el Pacífico llamada Nueva Caledonia, produce anualmente 236 000 toneladas de ferroníquel, y recién se descubrió en ese lugar otro depósito de níquel de 200 millones de toneladas, según informaciones de la International Nickel Company (INCO). Entre los mayores productores de Ferroníquel en el mundo están también Colombia, cuya producción a cargo de un consorcio australiano es de 152 000 toneladas al año. Le siguen República Dominicana, Yugoslavia, Grecia, Japón y Venezuela. Otros países están en el estudio de proyectos para producir Ferroníquel o ampliar sus capacidades. China y los países desarrollados de Europa occidental, Canadá y Estados Unidos, están entre los mayores consumidores de este material. También son estas naciones de alto desarrollo industrial las que más demandan el níquel más cobalto.

En Guatemala la planta industrial de Ferroníquel fue construida entre 1974 y 1977 con una inversión de \$240 millones. Se planteó según banco central de República Dominicana que para los meses enero/octubre 2005, el mayor valor para las exportaciones de un producto correspondió a Ferroníquel con \$289,13 millones.

La principal empresa productora de ferroníquel en Brasil es la de Morro do Níquel S.A en Peatapolis, Minas Gerais que comenzó a funcionar en 1962. El mineral es de tipo silicato que contiene aproximadamente 2 % de Ni y 6 % de Fe. Es secado y precalentado a 815,56 °C en un horno rotatorio de 2,44 m de diámetro por 51,82 m.

Al calcinado se le añade carbón, el que es fundido en un horno eléctrico de 4800 kVA equipado con tres electrodos de autococción. El ferroníquel crudo que sale del horno contiene aproximadamente 30 % de Ni, 0,2 % de S, 0,2 % de Fe %, 2,5 % de Si (Beregovski, 1972).

En la actualidad nuestro país pasa por un bloqueo recrudescido donde la economía se ha apoyado mucho en uno de sus principales renglones que es la industria niquelífera, cuya producción representa una de las mayores entradas de divisa al país, por lo cual es necesario cada día mejorar los métodos y formas de obtención de tan preciado metal o de aleaciones de este con otros afines a él, como es el caso del ferroníquel, ya que con esto se eleva el producto interno bruto y se logra una mayor adquisición de otros productos necesarios para nuestra economía.

Desarrollo de la producción de ferroníquel en Cuba.

A inicios del año 1990 la industria del níquel de Cuba emprendió el proyecto de Ferroníquel Moa, con el objetivo de darle un uso integral a los yacimientos de lateritas de níquel de la planta de Moa. En mayo de ese mismo año fue llevada a cabo una prueba tecnológica de la producción a partir de la serpentina de Moa en el centro de ferro aleaciones de la ELKEM en Noruega, como resultado de la prueba se comprobó que el uso de la serpentina de Moa permite obtener excelentes índices económicos por el proceso de RKEF (Horno rotario-Horno eléctrico).

Esta prueba sirvió de base para iniciar de conjunto con la firma Avesta de Suecia un estudio de factibilidad económica para la instalación de una planta de ferroníquel de una capacidad de producción de níquel contenido de 10 000 t; los resultados preliminares indicaron que la capacidad de producción de níquel proyectada debía ser incrementada a valores superiores a 20 000 t

Corridas tecnológicas realizadas a finales del año 1990 en Rusia por la vía RKEF corroboraron que la serpentina de Moa constituye una materia prima adecuada para producir ferroníquel. En el año 1996 se inician negociaciones entre las firmas JCI Y CCN (posteriormente OMI-CCN) para la construcción de una planta de ferroníquel en Cuba, tomando como base la propuesta de conversión de la planta Las Camariocas, por el proceso de calcinación pre-reductora y electro fundición en

hornos de arco plasma por corriente directa DC. En la actualidad la firma cubana está negociando la conversión de Las Camariocas en una planta para la producción de Fe-Ni por electro fusión de los minerales saprolíticos de los yacimientos de Moa occidental. El nuevo proyecto de Fe-Ni de Moa lleva incluido la planta metalúrgica, que procesará más de un millón de toneladas por año de mineral saprolítico (base seca), para producir aproximadamente 90 000 t/año de Fe-Ni, con un 33 % de Ni, lo cual genera además, un volumen de escoria que se caracteriza por presentar una composición química variable, debido a que una de sus principales funciones es la de colectar las impurezas que acompañan al metal líquido durante los procesos de fusión y refinación.

En el municipio holguinero de Moa comenzó a construirse una planta de ferroníquel, con capacidad para producir anualmente 90 000 t/año de esta aleación, componente fundamental del acero inoxidable. Se trata de una de las mayores inversiones industriales del país, valorada en 700 millones de dólares, que tiene como contratista principal a la empresa mixta Cubano-Venezolana Cuba Quality S.A., y debe ejecutarse en un plazo de tres años. Como parte de estas labores están enfrascados también en la extracción y traslado hacia un depósito cercano de alrededor de 420 mil toneladas de mineral laterítico, rico en hierro y níquel, que serán procesados en la propia planta. Esta industria se edifica a unos nueve kilómetros de la ciudad, en medio del yacimiento y considerables elevaciones, por lo que se proyectó en niveles escalonados, en correspondencia con el accidentado relieve. Comprende en total nueve plataformas e igual cantidad de objetos de obra, que están situados desde los 280 m de altura sobre el nivel del mar y van hasta llegar a los 185 m. El proceso pirometalúrgico descendente comienza por el almacén de carbón, área de recepción del mineral, secadero, trituración terciaria, calcinadores, hornos de fusión y reducción, refinación del mineral, torres de enfriamiento y servicios mineros. Con esta planta prácticamente se duplicará el potencial productivo de la industria cubana del níquel, que cuenta con una de las mayores reservas de lateritas del mundo en las elevaciones del nordeste holguinero, utilizando como materia prima fundamental el mineral saprolítico que no utiliza la compañía mixta "Pedro Sotto Alba".

INTRODUCCIÓN GENERAL

La dirección técnica de esta entidad tiene enmarcada en el área de Preparación de Mineral la operación de trituración como básica, ya que define en gran medida la complejidad del esquema tecnológico a utilizar en esta sección, además del consumo energético. Una gran exigencia de la tecnología la constituye la preparación de la materia prima, que es la que va a determinar la buena operación de los posteriores procesos. Como se conoce este tipo de mineral a utilizar posee como características de ser muy duro, dada su compleja estructura cristalina, por lo que se hace muy costosa la preparación mecánica, cuya operación es la que más energía consume en una planta metalúrgica. Dentro de los trabajos que sobresalen por su importancia técnico-económica en la futura explotación de la planta de ferroníquel, está la determinación del índice de trabajo o de Bond durante la trituración del mineral que será utilizado para la producción, pues este parámetro permite dimensionar correctamente las trituradoras y definir el consumo energético de las mismas. Urgidos de esa necesidad, se propone como **problema científico**: Desconocimiento del consumo específico de energía del proceso de trituración de los minerales saprolíticos para la producción de ferroníquel.

El **objeto de la investigación** está dado por los minerales saprolíticos del Proyecto de Ferroníquel, y el **campo de acción** consiste en el consumo específico de energía del proceso de trituración de los minerales saprolíticos.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: Si se logra determinar el índice de Bond para la trituración de minerales saprolíticos, entonces se podrá diseñar un esquema de trituración para este tipo de material.

Por lo tanto se plantea como **objetivo general de la investigación**: Determinar el consumo específico de energía o índice de Bond a la trituración de los minerales saprolíticos del yacimiento Yamanigüey S.A.

Tareas específicas:

- Realizar búsqueda bibliográfica de trabajos realizados referente al tema.
- Caracterizar la materia prima desde el punto de vista físico, químico y mecánico.
- Caracterizar granulométricamente la materia prima.

INTRODUCCIÓN GENERAL

- Realizar la trituración a los minerales saprolíticos.
- Determinar por el método de Bond el índice de consumo de energía.
- Valorar los resultados obtenidos de los ensayos técnicos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Introducción del capítulo 1

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 trituración.

1.1 Trabajos precedentes sobre índice de Bond

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

Lafargue, (2005) hace un profundo estudio del consumo específico de energía para la laterita del proceso industrial mediante la prueba de Bond. Además determina el índice operacional real de la sección de molienda de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, el cual es comparado con el obtenido mediante la prueba de Bond, con el objetivo de valorar el comportamiento de la eficiencia energética y la

productividad de los molinos industriales, analiza la posibilidad de incrementar la productividad de los molinos, así como una disminución de los costos de producción.

Núñez & Pérez (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.

Según 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 del molibilidad, se pueden por lo tanto, estimar del valor de la friabilidad, que puede ser determinado más rápidamente que de la prueba en enlace.

Menéndez-Aguado (2004), el índice en enlace del trabajo es uno de los parámetros más útiles y más interesantes usados en diseñar un equipo de molienda. Sin embargo, debe ser obtenido bajo condiciones refrenadas, especialmente en referencia 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.

Tamayo-Alegría (2010), realiza un trabajo con el fin de aprovechar las fracciones gruesas (rechazo) de la planta de coral del Puerto de Moa, el cual 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, en el que se utilizó un molino de bolas 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, el que permitirá posteriormente hacer estudios para el diseño de un molino para el aprovechamiento de las fracciones gruesas (rechazo).

Ledesma-Peña (2008), realiza un estudio de la influencia que ha tenido el beneficio en el consumo específico de energía y la productividad del proceso de molienda del proceso industrial mediante el ensayo de Bond. El mismo fue realizado en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara del municipio Moa provincia Holguín. La investigación se realizó en el laboratorio de beneficio de minerales del Instituto Superior Minero Metalúrgico, el cual posee instalaciones para estos fines. En este se determina el consumo específico de energía y la productividad a escala de laboratorio para las clases (-200 mm, -10 mm y - 6,3 mm) mediante el ensayo de Bond. Se comparan los resultados obtenidos para la clase (-10 mm) con los valores del proceso industrial con el objetivo de valorar la productividad de los molinos industriales.

Se analiza la posibilidad de incrementar la productividad de los molinos en la actualidad y además se determina la productividad que deberán tener los molinos de bolas cuando se optimice el Scalping a (- 6mm).

Como se ha mostrado en los trabajos anteriormente expuestos, todos los estudios realizados han sido para la determinación del índice de Bond para la molienda de diferentes minerales, y no para el proceso de trituración.

1.2. Trabajos realizados sobre la trituración de minerales

Hernández-Blanco (2008), desarrolla un estudio experimental del comportamiento de la trituración por impacto del mineral de zeolita del yacimiento de San Andrés en la provincia de Holguín. El trabajo se desarrolló mediante la experimentación del proceso a escala industrial con el objetivo de determinar la influencia de las variables; flujo de alimentación de mineral, velocidad de impacto y regulación de la salida de la trituradora en el comportamiento de la distribución de tamaño del mineral de salida o producto. Fue posible valorar las variables de mayor influencia en el

proceso así como las dependencias de las interacciones de estas en la obtención de un producto más fino o más grueso, todo lo cual reviste una gran importancia para la toma de acciones en función del incremento de la eficiencia tecnológica de la instalación.

Jiménez-Barthelemis (2008), estudió la preparación mecánica del material serpentínico rechazado en el Taller de Secadero de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, en trituradores de mandíbulas para la posible utilización de sus productos en la Industria de los materiales de la construcción. Se evaluaron las características físico-mecánicas de los materiales serpentínicos para su uso como materiales de construcción, y se determinaron las características típicas de las trituradoras de mandíbulas TQ - 320 x 165 y TQ - 150 x 75. Además se evaluó la alternativa tecnológica de preparación mecánica de los residuos serpentínicos para la posible utilización de sus productos en la industria de materiales de construcción.

Guevara-Chávez (2007), aplicó métodos experimentales en la determinación del comportamiento de la trituración por impacto del mineral zeolitizado de San Andrés. Para la realización de la investigación se utilizó una instalación diseñada específicamente para estos fines, con la cual es posible variar los valores de variables de operación como: la cantidad de martillo la productividad y la velocidad de impacto. Los principales resultados obtenidos muestran la influencia del tamaño de las partículas, la productividad, la velocidad de impacto y el número de martillos en la función de clasificación característica del proceso. Se obtiene también la influencia de la velocidad de impacto y de la productividad en la función de distribución de la fragmentación.

1.3 Fundamentos teóricos del proceso de trituración

1.3.1 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, et, 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 & 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 **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 de una micra las partículas se deforman sin grietas y presenta un comportamiento totalmente plástico. Sin embargo, para el polietileno, 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 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 Orowan (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 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 del tamaño de las partículas.

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.

1.4.1 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, (EEC), y la energía específica externamente aplicada, (EEA) 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 conminación; 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, 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 está 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 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 como índice de bond:

$w_i = K_s \cdot \frac{1}{\sqrt{100}}$ que será la energía total requerida para reducir el tamaño de un

mineral desde un tamaño teóricamente infinito hasta un producto con un 80 % a 100 micras.

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**)

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 ± 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:

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

donde:

W: consumo energético específico, en kWh/t ;

d y D: 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.

1.5.4 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 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.

- **Ventajas del método de Bond**

1. El método de Bond permite estimar el consumo medio de energía a escala industrial con un error promedio de ± 20 %.
2. Mide la resistencia del material ante operaciones de fragmentación.
3. 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 una trituradora 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).

1.6 Características y etapas de trituración

La desintegración se realiza en distintas etapas y en una gran diversidad de máquinas. Así el material extraído de la cantera y que se trata en una trituradora, en esa etapa se realizará la trituración primaria. Si de allí el material producido pasa a una segunda trituradora, en esta fase efectuará la trituración secundaria, si sigue, en otra máquina la terciaria.

1.6.1 Tamaño de partículas

Tanto el mineral o roca extraído de cantera como el que ha sufrido una o más etapas de reducción, se puede clasificar de acuerdo a su tamaño. En general, se clasifican de la siguiente forma:

- Material grueso: trozos de un tamaño mayor a 75 cm ;
- Material mediano: trozos de un tamaño de 10 a 75 cm ;
- Material fino: trozos de un tamaño menor a 10 cm .

Por otra parte, según el tamaño que tienen las partículas a la salida de las máquinas de desintegración, se pueden distinguir las distintas etapas de trituración y molienda como sigue:

a) Trituración (desintegración gruesa)

- gruesa – tamaños de partículas de salida: 15 cm ;
- trituración mediana – tamaños de partículas de salida: entre 3 y 15 cm ;
- trituración fina – tamaños de partículas de salida: entre 0,5 y 3 cm .

b) Molienda (desintegración fina)

- molienda gruesa – tamaños de partículas de salida entre 0,1 y 0,3 mm ;
- molienda fina – tamaños de partículas de salida menores de 0,1 mm .

La trituración gruesa, mediana y fina corresponden, prácticamente, a la primera, segunda y tercera etapa de trituración; mientras que la molienda gruesa y fina corresponden a las etapas primaria y secundaria. Los tamaños de partículas se establecen en base a los diámetros de las mismas. Para un trozo de material se puede determinar, midiendo el ancho, espesor y largo del mismo, la media aritmética o geométrica del diámetro de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\text{Diámetro de partícula} = \frac{\text{AnchoEspesorLargo}}{3} \quad (1.2)$$

En realidad, los trozos de materiales constituyen conjuntos de diversos tamaños, por

consiguiente resultaría imposible, desde el punto de vista industrial, practicar las mediciones señaladas anteriormente.

En la industria, lo que se hace es clasificar los trozos con una serie de tamices (o zarandas) y, de acuerdo a los tamaños de los agujeros de los tamices, se le equiparan a las partículas dichos tamaños según pasen o no cada tamiz. Posteriormente, el tamaño medio de la muestra se calculará con la siguiente expresión:

$$D = \frac{\sum D_i k_i}{\sum k_i} \quad (1.3)$$

donde:

D: diámetro medio de las partículas, mm;

D_i : tamaños de los agujeros de cada tamiz, mm;

k_i : cantidades (en peso) de partículas que pasan cada tamiz, g.

1.6.2 Ley de Rittinger

Rittinger consideró que durante la reducción de tamaño de los sólidos la energía necesaria debe ser proporcional a la nueva superficie producida, y ésta se puede aplicar razonablemente cuando el suministro de energía por unidad de masa no es demasiado grande, y la alimentación al equipo de trituración es menor a 100 t/h:

$$\frac{P}{T} = K_r \left(\frac{1}{\bar{D}_{vs\delta}} - \frac{1}{\bar{D}_{vs\alpha}} \right) \quad (1.4)$$

P : potencia (CV) T : alimentación (ton / h)

$\bar{D}_{vs\delta}$ = Diámetro prom. vol - sup erficie producto (cm)

$\bar{D}_{vs\alpha}$ = Diámetro prom. vol - sup erficie a lim ento (cm)

K_r = cons tan te que depende del material

1.7 Conclusiones del capítulo 1

En este capítulo se llegó a la siguiente conclusión:

1. Para la determinación del índice de consumo específico de energía en la reducción de tamaño de los minerales se utiliza el método de Bond.
2. La mayoría de los trabajos realizados por el método de Bond han sido para el procedimiento de molienda.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción del capítulo 2

Para el tratamiento industrial de rocas y minerales, es necesario practicar una preparación de los mismos y dentro de esa preparación normalmente se requiere efectuar una reducción de tamaño. Las operaciones mediante las que se efectúan dichas reducciones de tamaño por medios físicos se denominan **trituración** y **molienda**. Estas operaciones son de aplicación habitual en los procesos industriales, tal como puede observarse en el proceso de fabricación del cemento Portland.

Las operaciones citadas se realizan con el objeto de facilitar el transporte de los materiales, las operaciones físicas (tales como mezclado, dosificación, aglomeración o disolución) y facilitar o permitir las reacciones químicas (como consecuencia de que la velocidad de reacción es función de la superficie de las partículas y es tanto más grande cuanto mayor es su grado de subdivisión).

Si bien no existe una diferencia clara entre la trituración y la molienda, en general se habla de trituración cuando se fragmentan partículas de tamaños superiores a 1 pulgada, y de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a ellas.

2.1. Metodología y desarrollo del trabajo

Para la realización de este trabajo se llevó a cabo un procedimiento lógico como se muestra en la figura 2.1.

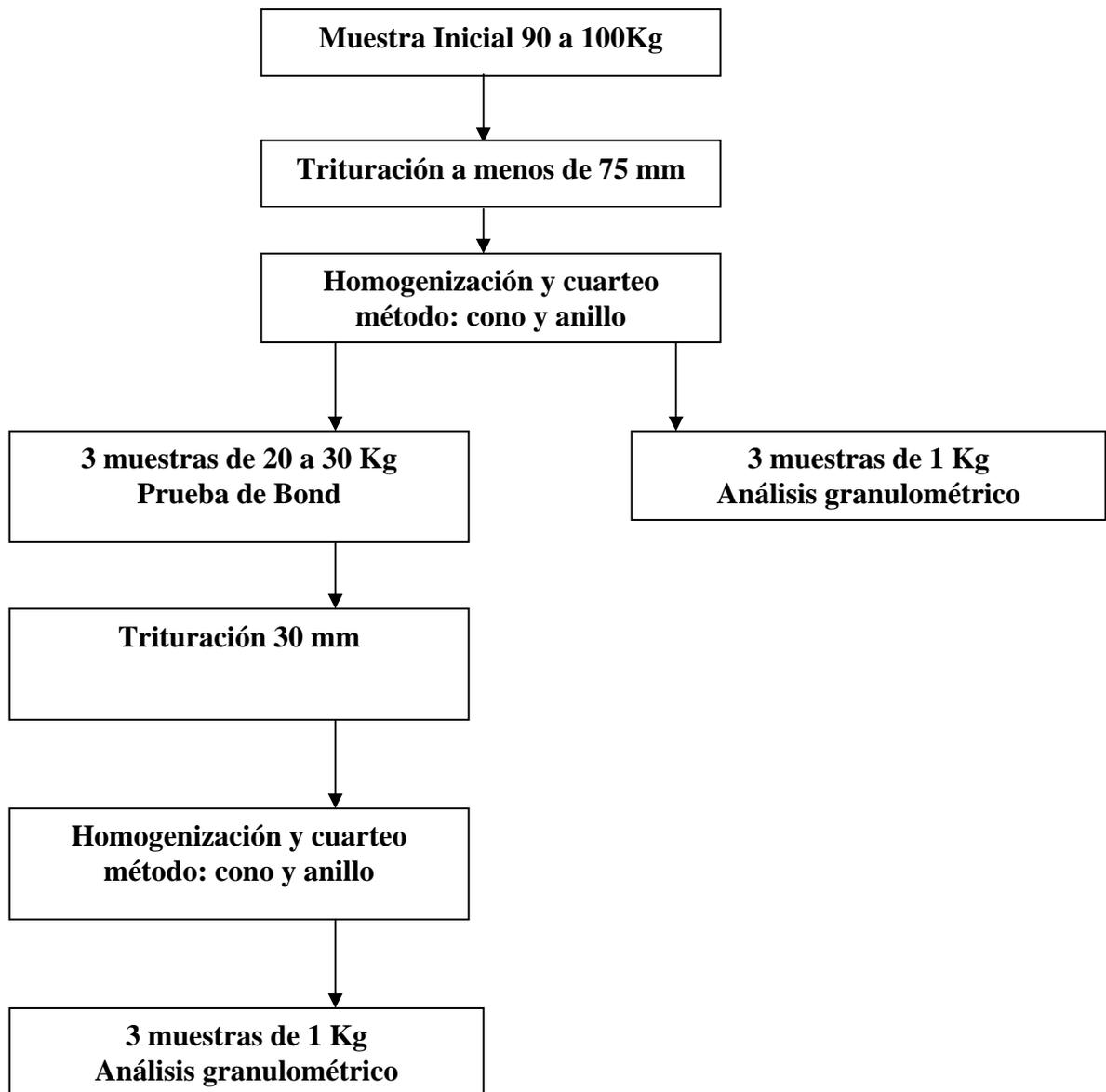


Figura 2.1 metodología de trabajo para la determinación del índice de Bond.

2.1.1 Determinación experimental del índice de Bond para la trituración

A continuación se ofrece una descripción de las operaciones a realizar en el desarrollo del ensayo de Bond para trituradoras de mandíbulas.

- 1- Se procede a tomar una muestra de 90 a 100 kg , representativa del mineral a utilizar;

CAPITULO 2. MATERIALES Y METODOS.

- 2- Se prepara la muestra garantizando que tenga un tamaño mínimo de 75 mm y que no contenga material fino;
- 3- Homogenización y cuarteo de la muestra, tomando tres muestras de 20 a 30 kg para realizar pruebas de Bond y tres para análisis granulométrico, (se utiliza el método de cono y anillos para la homogenización y cuarteo de las muestras, combinándolo con el divisor de Yong para los casos que proceda);
- 4- Se realiza análisis granulométrico a las muestras de mineral, para determinar el tamaño de la criba por donde pasa el 80 % de las partículas antes de la trituración de la alimentación (F_{80});
- 5- Se procede a triturar el 100 % del material, cada muestra por separado;
- 6- Después de la trituración se homogeniza y cuarteo el mineral de cada muestra por separado y se procede a tomar una muestra representativa con un peso aproximado de 1 kg ;
- 7- A la muestra representativa se le realiza un análisis de tamiz para determinar la malla por donde pasa el 80 % del material después de la trituración de la descarga (P_{80});
- 8- Se determina la energía consumida (P) por la trituradora, kW;

$$P = \frac{\Delta I \cdot E \cdot \sqrt{3}}{1000} \quad 2.1$$

donde:

P: energía consumida por la Trituradora, kW ;

ΔI : diferencia de amperaje cuando se trabaja en vacío y con carga, A ;

E: voltaje al cual trabaja el motor de la Trituradora,A;

$\sqrt{3}$: factor de conversión si el motor es trifásico.

- 9- Con los datos obtenidos se calcula el índice de trabajo (W_i) en kilowatts hora por tonelada corta según la ecuación 2.1a.

$$W_i = \frac{W}{10 \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right]} \quad ;\text{kWh/t} \quad 2.1a$$

donde:

P= Consumo Específico de Energía, kWh/t ;

F₈₀= Tamaño 80 % pasante en la alimentación, μm ;

P₈₀= Tamaño 80 % pasante en el producto, μm ;

Wi= Índice de Trabajo de Bond, indicador de la Tenacidad del mineral, kWh/t .

2.1.2 Toma y preparación de las muestra

Para realizar el estudio se tomaron muestras representativas del mineral saprolítico, para ello se aplica el método de puntos (Mitrofánov, 1982). 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 de largo cerca de 200 m por 70 m de ancho y 1,80 m de alto lo que equivale a un volumen igual a 25 200 m³. La Muestra tomado en cada punto es de aproximadamente 2 kg , hasta obtener un muestra lo suficientemente representativo.

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

$$Q_{\min.} = 0,02 (d_{\max})^2 + 0,5 (d_{\max}) \quad (2.2)$$

donde:

$Q_{\text{mín.}}$: es la masa de muestra para realizar el análisis granulométrico, (g).

$d_{\text{máx.}}$: diámetro del trozo mayor del mineral.

2.1.3 Homogenización de la muestra por el método del cuarteo

El método del cuarteo según Mitrofánov, (1982) se efectúa con el lanzamiento del material en forma de cono (ver figura 2.2) 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 90°. 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.

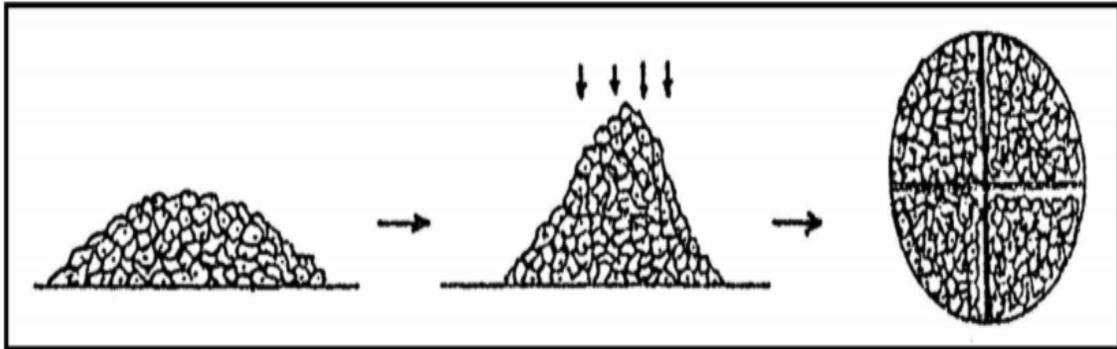


Figura 2.2. Método de cuarteo para la preparación de la muestra.

2.1.4. Cortador de Rifles

Después de la trituración se realizó el cuarteo del mineral para reducir el tamaño de la muestra, con vista a hacer el análisis de tamices, con el objetivo de determinar el diámetro a través del cual pasa el 80 % del mineral triturado. El mismo se realizó en un cuarteador de rifle, como se muestra en la figura 2.3. Del cual se extrajo muestras de 1 kg para cada análisis.

El cuarteador de rifle consiste en un recipiente en forma de V que tiene en sus costados una serie de canales o chutes que descargan alternativamente en 2 bandejas ubicadas en ambos lados del cortador. El material es vaciado en la parte superior y al pasar por el equipo se divide en 2 fracciones de aproximadamente igual tamaño.

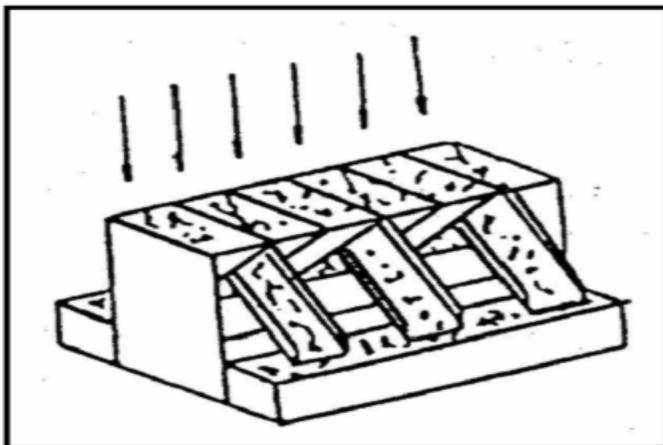


Figura 2.3. Homogenizador de rifle por el método de Jhon.

2.1.5 Análisis de los tamices

Antes y después de la trituración se realizó un análisis de tamices. Este análisis consiste en cernir la muestra a través de un juego estándar de tamices, y en determinar el porcentaje de residuos en cada uno de estos, con respecto a la masa de la muestra inicial. En este trabajo se utiliza la serie de Taylor, en el que el tamaño de la malla metálica anterior se diferencia del tamaño de la malla metálica posterior en $\sqrt{2}$ veces. El cernido se realizó manualmente en las dos etapas de trituración. Para la primera etapa y la segunda etapa se utilizó una escala de tamices como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Juego de tamices utilizado en las dos etapas de trituración.

Primera etapa		Segunda etapa	
Nº	Tamaño, mm	Nº	Tamaño, mm
1	30	1	9,5
2	25	2	6,3
3	20	3	3,5
4	12,5	4	1,6
5	9,5	5	0,8
6	6,3		
7	3,5		
8	1,6		
9	0,8		

2.1.6. Equipo para determinar el tamaño de la muestra

Tanto a la muestra inicial como a los productos de las etapas de trituración hubo que realizar pesaje. Con el objetivo de determinar el 80 % del mineral que pasa a través de un determinado tamiz. Para ellos se utilizó una balanza electrónica del tipo de la

figura 2.4. La cual posee las características siguientes: Rango de peso 2500 g, Error – 0,1 g.



Figura 2.4. Balanza electrónica marca Sartorius.

2.1.7. Característica de la trituradora utilizada para realizar los experimentos

Como es de esperar el índice de Bond se determina a un producto dada la reducción de tamaño, por lo tanto el procedimiento se llevó a cabo en una trituradora de quijada de tipo de la figura 2.5, la cual posee las siguientes características:

- 1- Dimensiones de las placas de trituración 4 x 6 pulgadas.
- 2- Motor eléctrico de 1,5 kw , 3,35 A, 220 V, 60 Hz, 1700 rpm .
- 3- Longitud de la quijada 150 mm .
- 4- Boca de alimentación:
 - Ancho ----55 mm ;
 - Largo -----75 mm ;
 - Boca de descarga: 6,3 mm .
- 5- Sistema de transmisión por poleas trapezoidales.



Fig. 2.5. Trituradora de mandíbula utilizada para realizar los experimentos.

2.2 Conclusiones del Capítulo 2

- Se realizó la metodología de 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 cuidadoso 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

Introducción

El estudio de los métodos de beneficio, constituyen una etapa imprescindible del conocimiento en la caracterización de los minerales saprolíticos del proyecto de Ferroníquel Minera SA. (FMSA), debido a que ello aportaría la información necesaria sobre el consumo de energía del proceso de trituración de estos minerales. Es por ello que en el presente capítulo se realiza un análisis de los resultados sobre el 'índice de Bond para la trituración de estos minerales.

3.1 Determinación del índice de Bond a los minerales saprolíticos

3.1.1 Análisis de tamices de la alimentación y descarga

Para efectuar el trabajo primeramente se hizo una valoración de los tamices a utilizar durante la prueba del mineral de alimentación a la trituradora, con el objetivo de determinar el diámetro por donde pasa el 80 % del mineral de alimentación (F_{80}) y descarga (P_{80}). Para esto fue necesario realizar 5 pruebas tecnológicas con el resto de las muestras utilizadas para efectuar la prueba de pilotaje de prerreducción y fundición del Proyecto FMSA.

Tomando como referencia la muestra tecnológica 1 (MT-1), ilustramos el ejemplo de los cálculos a realizar para la determinación del índice de Bond (W_i). Primeramente se muestran en la tabla número 3.1 los valores del juego de tamices que fueron utilizados para este análisis, así como el porcentaje de cada fracción en cada uno de los tamices, tanto en la alimentación como en la descarga de la trituradora.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Tabla 3.1. Resultados del análisis granulométrico durante la prueba de Bond del mineral de alimentación y descarga a la muestra tecnológica MT-1.

**Análisis de tamiz en la alimentación
de la trituradora**

**Análisis de tamiz en la alimentación
de la trituradora**

Malla (micras)	Tamaño, mm	Peso, %	Malla(micras)	Tamaño (mm)	Peso, %
30000/25000	-	29,51	30000/25000	-	0,00
25000/20000	-	23,87	25000/20000	-	0,00
20000/12500	-	35,01	20000/12500	-	0,00
12500/9500	-	8,44	12500/9500	-	0,00
9500/6300	-	0,63	9500/6300	-	1,91
6300/3500	-	0,35	6300/3500	-	48,73
3500/1600	-	0,24	3500/1600	-	22,59
1600/800	-	0,23	1600/800	-	10,97
800/0	-	1,74	800/0	-	15,79
-	-	100,00	-	-	100,00
- 30000	- 30	100,00	- 30000	- 30	00,00
- 25000	- 25	70,49	- 25000	- 25	00,00
- 20000	- 20	46,63	- 20000	- 20	00,00
- 12500	- 12,5	11,62	- 12500	- 12,5	00,00
- 9500	- 9,5	3,18	- 9500	- 9,5	100,00
- 6300	- 6,3	2,56	- 6300	- 6,3	98,09
- 3500	- 3,5	2,21	- 3500	- 3,5	49,35
- 1600	- 1,6	1,97	- 1600	- 1,6	26,76
- 800	- 0,8	1,74	- 800	- 0,8	15,79

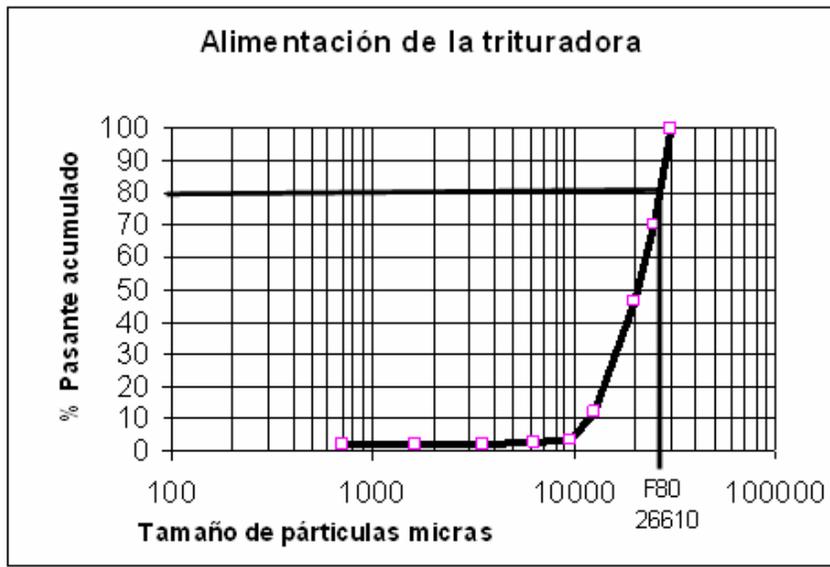


Figura.3.1. Determinación del F80, para la muestra MT-1.

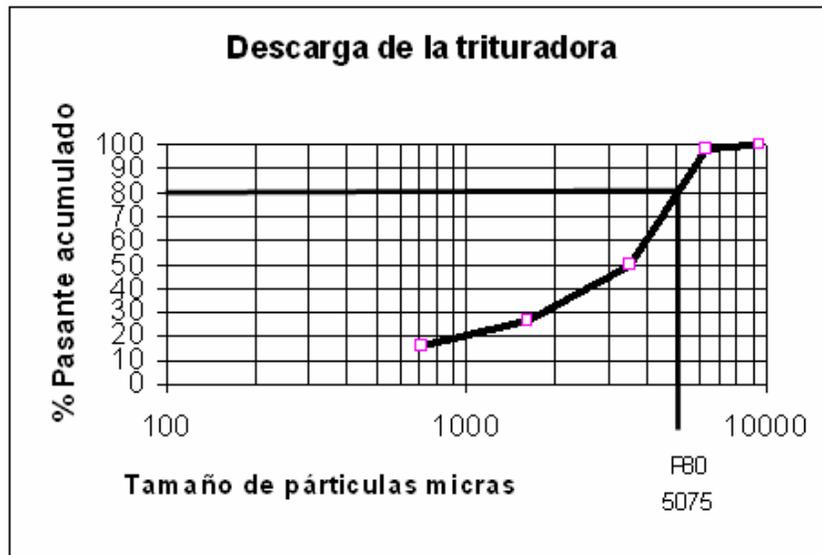


Figura 3.1a. Determinación del P80, para la muestra MT-1.

Con ayuda de los resultados de la tabla 3.1 y las figuras 3.1 y 3.1a se determinó el F_{80} y P_{80} , los resultados se muestran a continuación.

F_{80} 26610 micras

P_{80} 5075 Micras

La determinación del F80 y el P80 para las restantes muestra (MT-2, MT-3, MT-4 y MT-5) se efectuó similarmente con ayuda del análisis granulométrico mostrado en las figuras 3.2; 3.2a; 3.3; 3.3a; 3.4; 3.4a; 3.5; y 3.5a obtenidas de los datos de las tablas que aparecen en el anexo (1), y las replicas en el Anexo # 2

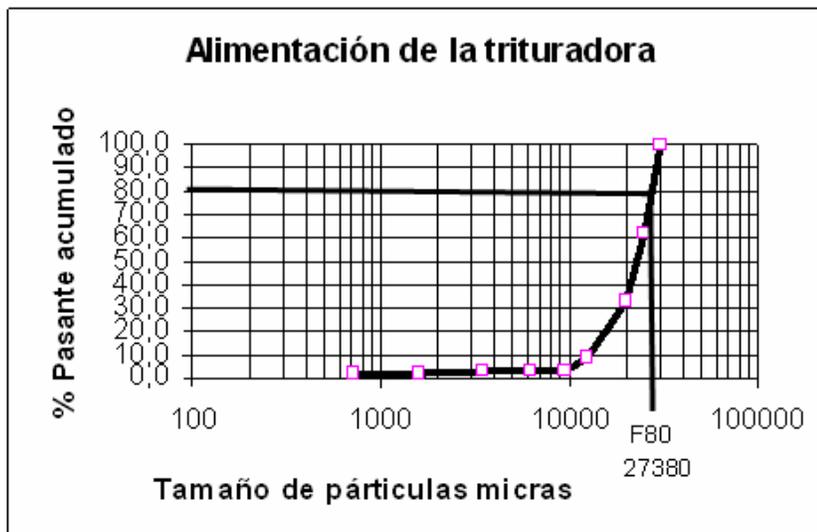


Figura.3.2. Determinación del F80, para la muestra MT-2.

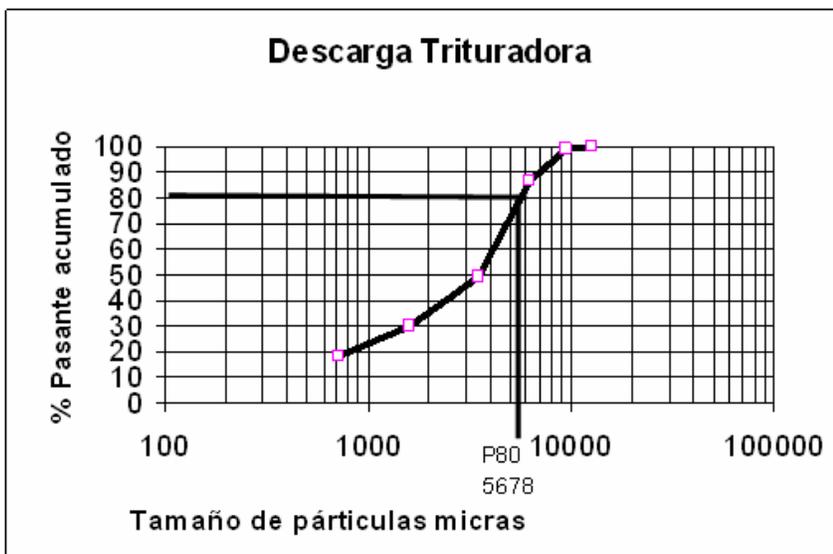


Figura 3.2.a. Determinación del P80, para la muestra MT-2.

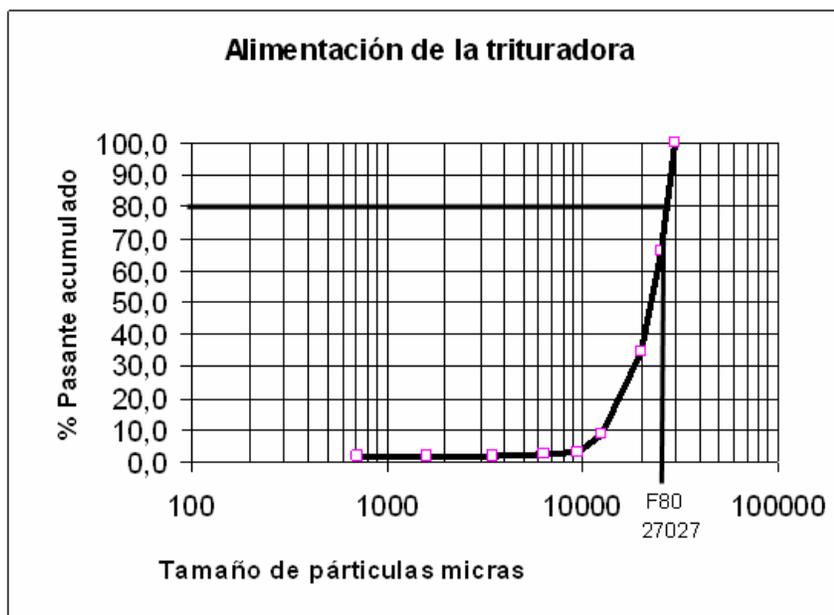


Figura.3.3. Determinación del F80, para la muestra MT-3.

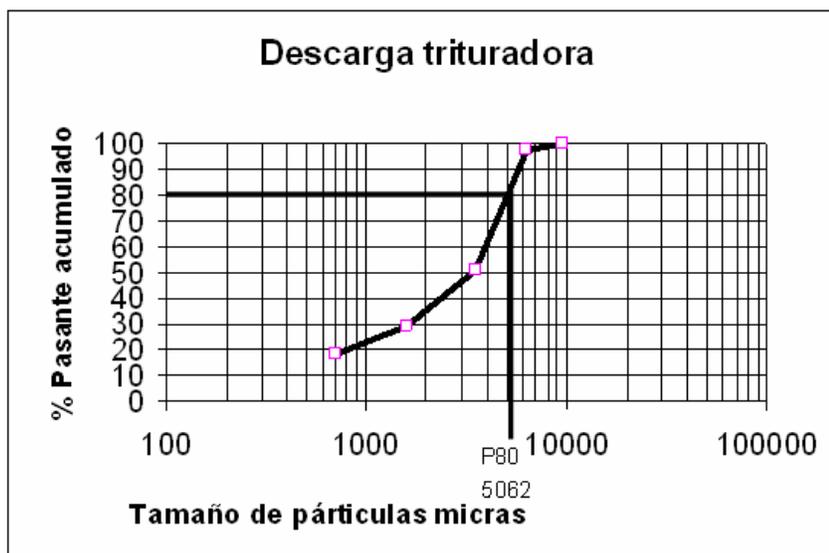


Figura.3.3.a. Determinación del P80, para la muestra MT-3.

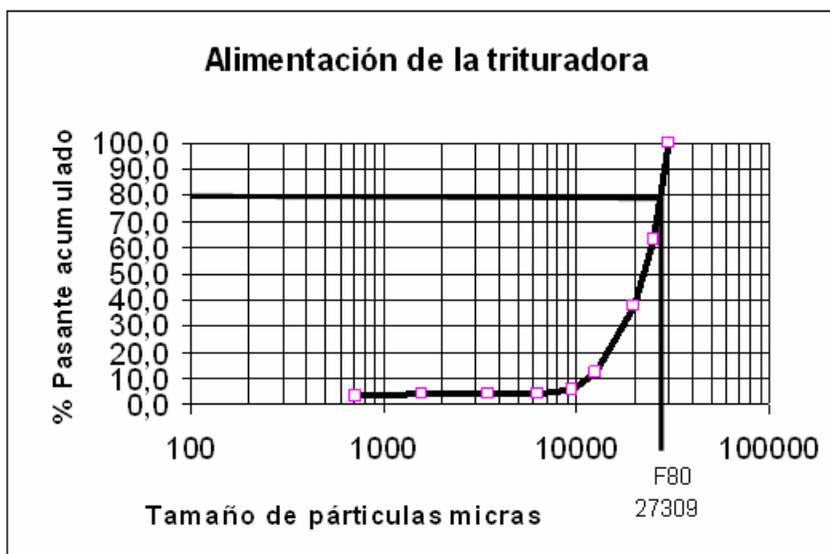


Figura. 3.4 Determinación del F80, para la muestra MT-4.

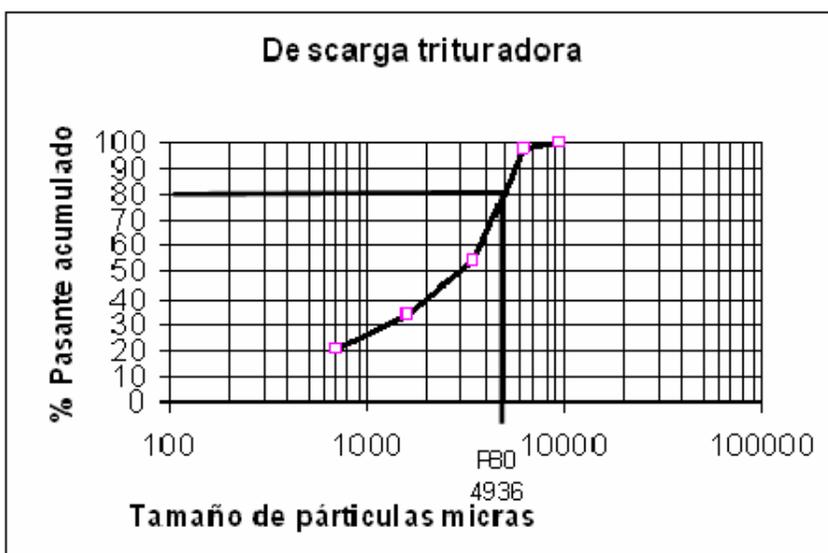


Figura. 3.4a. Determinación del P80, para la muestra MT-4.

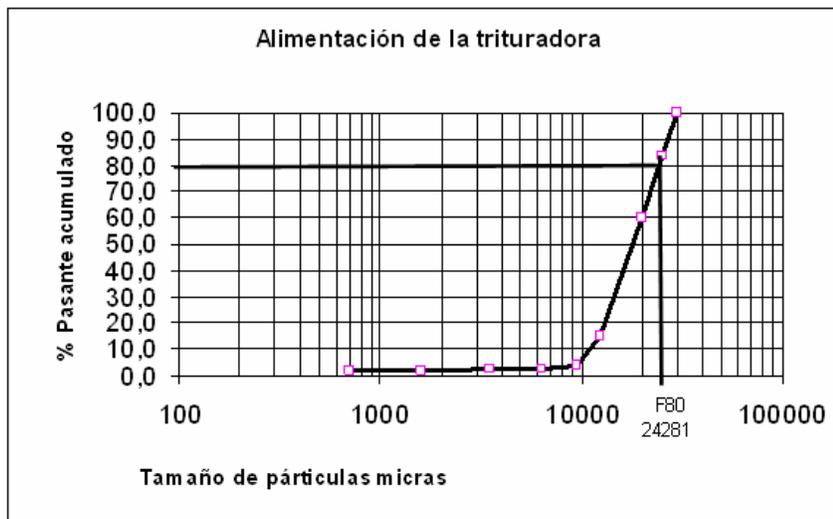


Figura. 3.5. Determinación del F80, para la muestra MT-5.

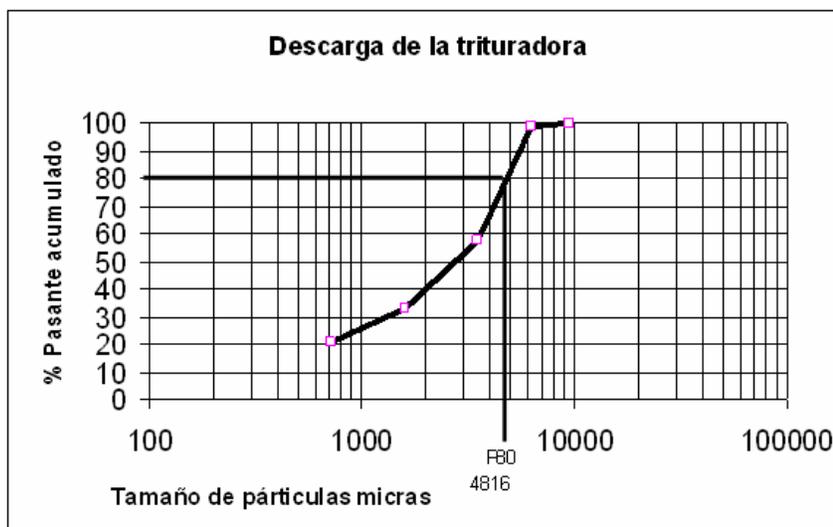


Figura. 3.5a. Determinación del P80, para la muestra MT-5.

3.1.2. Desarrollo de cálculo general de la potencia (P) consumida por la trituradora

Para la determinación de la energía consumida por la trituradora se determinó la potencia del motor que transmite moviendo a la quebrantadora (en hp), y la velocidad de rotación de la misma en min^{-1} ; se tomó la demanda de corriente que se requiere cuando la quebrantadora está vacía y con carga. Los valores de los parámetros

antes mencionados se pueden observar en la tabla 3.2, en la cual se observa que no existe prácticamente variación para ningunos de los parámetros.

Tabla 3.2. Mediciones de valores necesarios para el cálculo de la energía consumida por la trituradora

Parámetros	Números de Muestras				
	MT-1	MT-2	MT-3	MT-4	MT-5
F_{80} (micras)	26610	27380	27027	27309	24281
P_{80} (micras)	5075	5678	5062	4936	4816
I_0 (ampere)	1,98	1,99	1,95	1,95	2,01
I_1 (ampere)	2,11	2,07	2,08	2,18	2,21
W (kw.h/ tc)	0,25	0,16	0,22	0,23	0,30
W_i(kw.h/ tc)	3,14	2,25	2,77	2,81	3,72

A través de la ecuación 2.1 se determinó la energía consumida

Los resultados de la energía consumida para todas las muestras y para un valor promedio se pueden observar en la tabla, en la cual no se reflejan diferencias significativas entre las diferentes muestras.

3.1.3. Determinación general del índice de Bond de la trituración

Después de determinar el consumo de energía se determinó a partir de la ecuación 2.1a el índice de trabajo de Bond para la trituradora. Dichos resultados se muestran en la tabla 3.2 para todas las muestras tecnológicas, en las que tampoco se muestran resultados con variaciones significativas. Estos valores reflejan que para la trituración de cada tonelada de mineral saprolítico se consume como promedio una energía específica por la masa de mineral triturada de 2,94 kWh/t

3.1.4. Determinación de la capacidad de la trituración

Una vez realizado el cálculo del índice de Bond se determinó la capacidad de la trituradora a través de la ecuación siguiente, dichos resultados se muestran en la tabla 3.3; en la cual se puede observar que para las condiciones de trabajo la trituradora puede trabajar con una capacidad promedio de 0,255 t/h

$$CQ = \frac{W}{T} \cdot 3,6 \text{ t/h}$$

donde:

W: peso del mineral triturado, kg;

T: tiempo requerido en triturar el mineral, s

CQ: capacidad de la trituradora

3.2 Desarrollo de cálculo para la primera muestra tecnológica (MT1)

Con la ayuda de las características de la trituradora y empleando las ecuaciones siguientes se determinan los parámetros de operación de la misma.

Potencia consumida por el motor de la trituradora

$$P = \frac{\Delta I \cdot E \cdot \sqrt{3}}{1000}$$

$$I_2 = I_1 - I_0$$

$$P = 220 \cdot (2,11 - 1,98) \cdot \text{Raíz } 3 / 1000$$

$$P = 0,051 \text{ kw}$$

Masa procesada por la trituradora:

$$CQ = \frac{22,00}{422,8} \cdot 3,6$$

$$CQ = (22,00 / 422,8) \cdot 3,6$$

$$CQ = 0,19 \text{ t/h}$$

$$CQ = 0,19 / 0,907$$

$$CQ = 0,21; \text{ t/h}$$

Potencia consumida por la trituradora para procesar una tonelada por hora

$$W = P / T$$

W= Potencia consumida por la trituradora; kwh/t ,

$$W = 0,051/0,21$$

$$W = 0,25 \text{ kw}$$

Determinación del índice de Bond

Para la determinación de este parámetro utilizamos los resultados de los cálculos efectuado para la trituradora de laboratorio con que se efectuaron los experimentos programados. Se ilustra a continuación la ecuación correspondiente.

$$W_i = \frac{W}{10 \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right]}$$

W_i = Índice de trabajo o de Bond; kwh/t

$$W_i = \frac{0,25}{10 \left[\frac{1}{71,24} - \frac{1}{163,13} \right]}$$

$$W_i = 3,14 \text{ kwh/t}$$

Resultados del cálculo de la energía (w) y del índice de Bond (W_i) para la muestra MT-1

$$W = 0,25 \text{ kw}$$

$$W_i = 3,14 \text{ kWh/ t}$$

En la figura 3.6 se hace una representación gráfica del comportamiento del índice de Bond para la trituración de las cinco muestras tecnológicas analizadas, cuya variación está en correspondencia con el tamaño del tamiz a través del cual pasa el 80 % del material en el producto de la trituración, es decir, está en dependencia del grado de triturabilidad de los minerales.

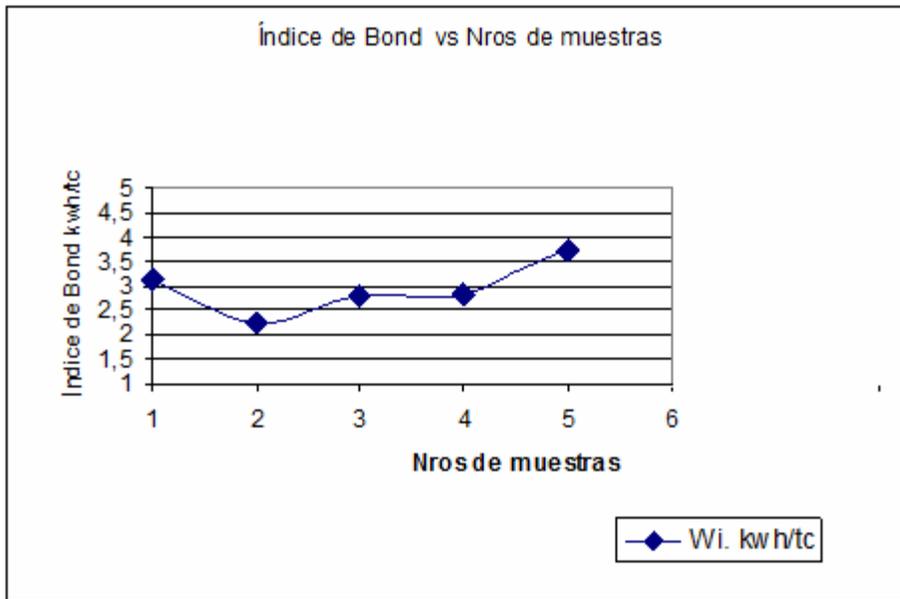


Figura.3.6. Índice de Bond en kWh/t, obtenido para cada muestra.

3.3 Conclusiones del capítulo 3

El índice de trabajo o de Bond, determinado experimentalmente para la realización de la operación de trituración de las muestras tecnológicas MT-1, 2, 3, 4, y 5, conformadas con mineral saprolítico-limonítico de futura explotación por la empresa Ferróniquel Minera SA; tiene un valor promedio de 2,94 kWh/t, con un máximo de 3,72 kWh/t para las muestras MT-5 y mínimo de 2,25 kWh/t para la MT-2.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

Después de realizado el trabajo se pudo llegar a la siguiente conclusión:

1. El resultado promedio del índice de trabajo de Bond a la trituración de los minerales saprolíticos de la Ferroníquel Minera S.A. es de 2,94 kWh/t.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Efectuar ensayos de Bond a todas las muestras tecnológicas que sean preparadas con mineral de futura explotación por la planta de ferroníquel, perteneciente a la empresa Ferroníquel Minera S.A, pues este parámetro permitirá dimensionar correctamente los equipos de trituración que serán utilizados.

BIBLIOGRAFÍA

- 3 ALDANA S. EUGENIO Y LEGRÁ L. ÁNGEL. 1996. Optimización de la productividad y fineza de la molienda en la planta de preparación de minerales de la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara. Centro de investigaciones de la Laterita, Moa, Holguín
- 4 ALDANA S. EUGENIO Y LEGRÁ L. ÁNGEL. 2001. Determinación del Índice de Trabajo del mineral de futura explotación. Índice de Bond. Centro de investigaciones de la Laterita, Moa, Holguín.
- 5 ANDREIEV, S. E. ANDERIEV; V. A. PEROV; V. V. ZVERIEVICH. Trituración, desmenuzamiento y cribado de los minerales. Editorial Mir, Moscú, 1980.
- 6 Apuntes sobre trituración. Folleto
- 7 ARTHUR F. Taggart Elements of Ore Dressing. New York, 1951.
- 8 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.
- 9 BEAVEN, C.H.J. (1980) How many measurements Proc. Powder Europa, Weisbaden, 22-24 June, Tech. Sessions, vol. 1, 1-25.
- 10 BOND, F. C., (1961) "Crushing and Grinding Calculations". Allis Chalmers Manufacturing Co., Milwaukee, Wisconsin.
- 11 BUSTAMENTE G. CESAR. 1989. Estudio de la capacidad instalada de los molinos. Moa
- 12 Catalogo de la Compañía Allis Chalmers. 1976.

BIBLIOGRAFÍA

- 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 E. C. BLANC – Colección rocas y minerales – Madrid "Tecnología de los Aparatos de Fragmentación y de clasificación dimensional" -.
- 15 FOMENKO, TG. 1980. Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación. Moscú, Editorial Mir..
- 16 GILDEMEISTER, H.H., & Schönert, K. (1972), "Berechnung zur wellenausbreitungin kugeln und bruchphänomene in kreisschiben bei prallbeanspruchung". Dechema Monograph 69, 233-267.
- 17 GRIFFITH, A.A. (1920), "*The phenomenon of rupture and flow in solids*". Phil. Trans. Royal Soc. A, 221, 163-198.
- 18 GUEVARA CHÁVEZ, 2007: Discusión Experimental del modelo de Nikolov para Trituradores de Martillo. Trabajo de diploma. ISMM. Dpto de Metalurgia.
- 19 HERNÁNDEZ-BLANCO, 2008: Estudio Experimental de la Trituración por Impacto a Escala Industrial en la Planta de Zeolita de San Andrés. Trabajo de diploma. ISMM. Dpto de Metalurgia.
- 20 IRWIN, G.R. (1947), "Fracturing of Metals". ASM Symp. Chicago, 147.
- 21 JIMÉNEZ-BARTHELEMIS, 2008: Estudio de la preparación mecánica de los minerales serpentínicos en trituradoras de mandíbulas para la utilización de sus productos en la industria de los materiales de la construcción. Trabajo de diploma. ISMM. Dpto de Metalurgia.
- 22 LABORDE B. REYNALDO. 2005. Modelación y simulación del proceso de molienda del mineral Laterítico, con composición sustancial variable. ISMM. Moa Holguín,
- 23 LAFARGUE, B.U. (2005). Análisis del comportamiento del consumo específico de energía en el proceso de molienda de minerales lateríticos en la empresa

BIBLIOGRAFÍA

- Comandante Ernesto Che Guevara. Laborde Brown, R. (tutor). Trabajo de Diploma. ISMM Moa. 83h.
- 24 LEDESMA-PEÑA, 2008: Influencia del beneficio en la productividad del proceso de molienda de la laterita en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma. ISMM. Dpto de Metalurgia.
- 25 LOPEZ, F.; et al. (1988). Determinación de los parámetros energéticos en un proceso de molienda de los minerales lateríticos. *Revista de Metalurgia*, 24 (4):
- 26 MENDOZA A. H MANUEL. Manual de prácticas de metalurgia. Universidad autónoma de México.
- 27 MENDOZA D. IDALBERTO. 2006. Diseños de planta para el reciclaje de escombros.
- 28 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).
- 29 MITROFÁNOV, S.I.; et al. (1982). Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú: Editorial Mir.
- 30 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. ISMM Moa.
- 31 OROWAN, E. (1949), "Fracture and strength in solids". *Rep. Prog. Phys.*, 12, 185-232.
- 32 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):
- 33 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. ISMM Moa. 66h.

BIBLIOGRAFÍA

- 34 ROSE, H.E., (1972), "A New Treatment of Comminution and its Application to the Calculations of Mill Capacity". Dechema Monograph 69 87-120.
- 35 RUMPF, H. (1961), "Problemstellungen und nuere ergebnisse der bruchtheorie". Materialprufung, 3, 253-265.
- 36 TAGGART "Manual de preparación de Minerales".
- 37 TAMAYO-ALEGRÍA, 2010: Determinación del índice de Bond para el cielo carbonatado de Cayo Moa. Trabajo de diploma. ISMM. Dpto de Metalurgia.
- 38 WAGANOFF – Editorial Alsina. "Trituración, Molienda y Separación de Minerales".

ANEXOS

ANEXO # 1.

INFORMACIÓN DETALLADA DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA CADA MUESTRA

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT-2

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1061,33	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	405,20	38,18	61,82
	20	20000/12500	308,53	29,07	32,75
	12,5	12500/9500	253,13	23,85	8,90
	9,5	9500/6300	60,50	5,70	3,20
	6,3	6300/3500	4,30	0,41	2,80
	3,5	3500/1600	3,83	0,36	2,43
	1,6	1600/800	2,70	0,25	2,18
	0,80	800/0	3,00	0,28	1,90
			20,13	1,90	0,00
			1061,33	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DE DESCARGA MT-2

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1070,07	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,67	0,06	99,94
	9,5	9500/6300	9,03	0,84	99,09
	6,3	6300/3500	128,73	12,03	87,06
	3,5	3500/1600	401,40	37,51	49,55
	1,6	1600/800	207,60	19,40	30,15
	0,80	800/0	122,60	11,46	18,69
			200,03	18,69	0,00
			1070,07	100,00	

ANEXOS

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT-3

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1048,00	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	352,60	33,65	66,35
	20	20000/12500	330,67	31,55	34,80
	12,5	12500/9500	271,40	25,90	8,91
	9,5	9500/6300	60,97	5,82	3,09
	6,3	6300/3500	5,87	0,56	2,53
	3,5	3500/1600	4,13	0,39	2,13
	1,6	1600/800	2,60	0,25	1,89
	0,80	800/0	2,50	0,24	1,65
			17,27	1,65	0,00
			1048,00	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DE DESCARGA MT-3

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1033,80	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	24,37	2,36	97,64
	3,5	3500/1600	486,47	47,06	50,59
	1,6	1600/800	220,57	21,34	29,25
	0,80	800/0	116,73	11,29	17,96
			185,67	17,96	0,00
			1033,80	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT-4

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1014,73	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	377,13	37,17	62,83
	20	20000/12500	256,33	25,26	37,57
	12,5	12500/9500	260,23	25,65	11,93
	9,5	9500/6300	66,50	6,55	5,37
	6,3	6300/3500	8,93	0,88	4,49
	3,5	3500/1600	4,57	0,45	4,04
	1,6	1600/800	2,70	0,27	3,78
	0,80	800/0	3,40	0,34	3,44
			34,93	3,44	0,00
			1014,73	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT-4

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1022,83	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	21,13	2,07	97,93
	3,5	3500/1600	443,87	43,40	54,54
	1,6	1600/800	215,10	21,03	33,51
	0,80	800/0	130,03	12,71	20,80
			212,70	20,80	0,00
			1022,83	100,00	

ANEXOS

**CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA
MUESTRA ALIMENTACIÓN MT-5**

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
985,57	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	163,90	16,63	83,37
	20	20000/12500	231,10	23,45	59,92
	12,5	12500/9500	442,67	44,91	15,01
	9,5	9500/6300	112,00	11,36	3,64
	6,3	6300/3500	10,93	1,11	2,53
	3,5	3500/1600	2,50	0,25	2,28
	1,6	1600/800	1,47	0,15	2,13
	0,80	800/0	1,77	0,18	1,95
			19,23	1,95	0,00
			985,57	100,00	

**CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA
MUESTRA DESCARGA MT-5**

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
985,10	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	14,10	1,43	98,57
	3,5	3500/1600	406,77	41,29	57,28
	1,6	1600/800	240,57	24,42	32,86
	0,80	800/0	122,87	12,47	20,38
			200,80	20,38	0,00
			985,10	100,00	

ANEXO # 2

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 1-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1004,20	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	373,9	37,23	62,77
	20	20000/12500	120,4	11,99	50,78
	12,5	12500/9500	382,3	38,07	12,71
	9,5	9500/6300	98,9	9,85	2,86
	6,3	6300/3000	4,1	0,41	2,45
	3,5	3500/1600	2,8	0,28	2,17
	1,6	1600/800	1,90	0,19	1,98
	0,80	800/0	1,80	0,18	1,80
			18,10	1,80	0,00
			1004,20	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 1-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1047,30	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3000	6,1	0,58	99,42
	3,5	3500/1600	442,3	42,23	57,19
	1,6	1600/800	266,70	25,47	31,72
	0,80	800/0	135,50	12,94	18,78
			196,70	18,78	0,00
			1047,30	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 1-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1021,40	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	328,5	32,16	67,84
	20	20000/12500	298,7	29,24	38,59
	12,5	12500/9500	299,7	29,34	9,25
	9,5	9500/6300	56,7	5,55	3,70
	6,3	6300/3500	11,5	1,13	2,57
	3,5	3500/1600	4,1	0,40	2,17
	1,6	1600/800	3,20	0,31	1,86
	0,80	800/0	2,80	0,27	1,59
			16,20	1,59	0,00
			1021,40	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 1-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1064,60	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	29,8	2,80	97,20
	3,5	3500/1600	510,8	47,98	49,22
	1,6	1600/800	227,80	21,40	27,82
	0,80	800/0	118,80	11,16	16,66
			177,40	16,66	0,00
			1064,60	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 1-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1017,60	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	195,5	19,21	80,79
	20	20000/12500	307,2	30,19	50,60
	12,5	12500/9500	383,3	37,67	12,93
	9,5	9500/6300	101,2	9,94	2,99
	6,3	6300/3500	3,5	0,34	2,64
	3	3000/1600	3,7	0,36	2,28
	1,6	1600/800	2,20	0,22	2,06
	0,80	800/0	2,30	0,23	1,84
			18,70	1,84	0,00
			1017,60	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 1-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1027,20	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	24,2	2,36	97,64
	3,5	3500/1600	576,7	56,14	41,50
	1,6	1600/800	214,70	20,90	20,60
	0,80	800/0	90,10	8,77	11,83
			121,50	11,83	0,00
			1027,20	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 2-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1059,90	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	525,7	49,60	50,40
	20	20000/12500	220,2	20,78	29,63
	12,5	12500/9500	259,4	24,47	5,15
	9,5	9500/6300	43,5	4,10	1,05
	6,3	6300/3500	1,1	0,10	0,94
	3,5	3500/1600	0,3	0,03	0,92
	1,6	1600/800	0,50	0,05	0,87
	0,80	800/0	0,80	0,08	0,79
			8,40	0,79	0,00
			1059,90	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 2-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1054,90	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	2,00	0,19	99,81
	9,5	9500/6300	27,1	2,57	97,24
	6,3	6300/3500	359,6	34,09	63,15
	3,5	3500/1600	303,5	28,77	34,38
	1,6	1600/800	135,60	12,85	21,53
	0,80	800/0	86,80	8,23	13,30
			140,30	13,30	0,00
			1054,90	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 2-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1044,10	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	281,8	26,99	73,01
	20	20000/12500	350,1	33,53	39,48
	12,5	12500/9500	312,5	29,93	9,55
	9,5	9500/6300	71,6	6,86	2,69
	6,3	6300/3500	5,0	0,48	2,21
	3,5	3500/1600	3,2	0,31	1,91
	1,6	1600/800	2,50	0,24	1,67
	0,80	800/0	2,10	0,20	1,47
			15,30	1,47	0,00
			1044,10	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 2-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1069,60	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	10,1	0,94	99,06
	3,5	3500/1600	425,2	39,75	59,30
	1,6	1600/800	244,50	22,86	36,44
	0,80	800/0	146,60	13,71	22,74
			243,20	22,74	0,00
			1069,60	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 2-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1080,00	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	408,1	37,79	62,21
	20	20000/12500	355,3	32,90	29,31
	12,5	12500/9500	187,5	17,36	11,95
	9,5	9500/6300	66,4	6,15	5,81
	6,3	6300/3500	6,8	0,63	5,18
	3,5	3500/1600	8,0	0,74	4,44
	1,6	1600/800	5,10	0,47	3,96
	0,80	800/0	6,10	0,56	3,40
			36,70	3,40	0,00
			1080,00	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 2-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1085,70	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	16,5	1,52	98,48
	3,5	3500/1600	475,5	43,80	54,68
	1,6	1600/800	242,70	22,35	32,33
	0,80	800/0	134,40	12,38	19,95
			216,60	19,95	0,00
			1085,70	98,48	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 3-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1076,70	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	320,1	29,73	70,27
	20	20000/12500	326	30,28	39,99
	12,5	12500/9500	319,1	29,64	10,36
	9,5	9500/6300	75,8	7,04	3,32
	6,3	6300/3500	8	0,74	2,57
	3,5	3500/1600	4,9	0,46	2,12
	1,6	1600/800	3,40	0,32	1,80
	0,80	800/0	2,90	0,27	1,53
			16,50	1,53	0,00
			1076,70	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 3-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
994,50	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	15,5	1,56	98,44
	3,5	3500/1600	438,5	44,09	54,35
	1,6	1600/800	230,20	23,15	31,20
	0,80	800/0	119,60	12,03	19,18
			190,70	19,18	0,00
			994,50	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 3-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
989,40	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	407,8	41,22	58,78
	20	20000/12500	286,8	28,99	29,80
	12,5	12500/9500	243,3	24,59	5,21
	9,5	9500/6300	35,7	3,61	1,60
	6,3	6300/3500	1,4	0,14	1,46
	3,5	3500/1600	1,1	0,11	1,34
	1,6	1600/800	0,8	0,08	1,26
	0,80	800/0	1,30	0,13	1,13
			11,20	1,13	0,00
			989,40	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 3-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1085,60	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	33,7	3,10	96,90
	3,5	3500/1600	562,5	51,81	45,08
	1,6	1600/800	210,90	19,43	25,65
	0,80	800/0	106,80	9,84	15,82
			171,70	15,82	0,00
			1085,60	84,18	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 3-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial	Mallas	Mallas	Masa	Retenido	Pasante
g	mm	micras	Retenida g	%	%
					100,00
1077,90	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	329,9	30,61	69,39
	20	20000/12500	379,2	35,18	34,21
	12,5	12500/9500	251,8	23,36	10,85
	9,5	9500/6300	71,4	6,62	4,23
	6,3	6300/3500	8,2	0,76	3,47
	3,5	3500/1600	6,4	0,59	2,88
	1,6	1600/800	3,6	0,33	2,54
	0,80	800/0	3,30	0,31	2,24
			24,10	2,24	0,00
			1077,90	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 3-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial	Mallas	Mallas	Masa	Retenido	Pasante
g	mm	micras	Retenida g	%	%
					100,00
1021,30	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	23,9	2,34	97,66
	3,5	3500/1600	458,4	44,88	52,78
	1,6	1600/800	220,60	21,60	31,18
	0,80	800/0	123,80	12,12	19,05
			194,60	19,05	0,00
			1021,30	97,66	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 4-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1001,30	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	383,6	38,31	61,69
	20	20000/12500	272,2	27,18	34,51
	12,5	12500/9500	273,2	27,28	7,22
	9,5	9500/6300	51	5,09	2,13
	6,3	6300/3500	3,9	0,39	1,74
	3,5	3500/1600	2,1	0,21	1,53
	1,6	1600/800	1,20	0,12	1,41
	0,80	800/0	1,10	0,11	1,30
			13,00	1,30	0,00
			1001,30	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 4-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
980,30	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	13,8	1,41	98,59
	3,5	3500/1600	397,9	40,59	58,00
	1,6	1600/800	218,10	22,25	35,75
	0,80	800/0	131,50	13,41	22,34
			219,00	22,34	0,00
			980,30	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 4-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1006,40	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	332,1	33,00	67,00
	20	20000/12500	311,6	30,96	36,04
	12,5	12500/9500	243,2	24,17	11,87
	9,5	9500/6300	55	5,47	6,41
	6,3	6300/3500	8,6	0,85	5,55
	3,5	3500/1600	3,2	0,32	5,24
	1,6	1600/800	2,30	0,23	5,01
	0,80	800/0	3,20	0,32	4,69
			47,20	4,69	0,00
			1006,40	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 4-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1053,50	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	27,1	2,57	97,43
	3,5	3500/1600	476,7	45,25	52,18
	1,6	1600/800	209,20	19,86	32,32
	0,80	800/0	126,30	11,99	20,33
			214,20	20,33	0,00
			1053,50	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 4-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1036,50	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	415,7	40,11	59,89
	20	20000/12500	185,2	17,87	42,03
	12,5	12500/9500	264,3	25,50	16,53
	9,5	9500/6300	93,5	9,02	7,51
	6,3	6300/3500	14,3	1,38	6,13
	3,5	3500/1600	8,4	0,81	5,32
	1,6	1600/800	4,60	0,44	4,87
	0,80	800/0	5,90	0,57	4,30
			44,60	4,30	0,00
			1036,50	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 4-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
1034,70	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	22,5	2,17	97,83
	3,5	3500/1600	457	44,17	53,66
	1,6	1600/800	218,00	21,07	32,59
	0,80	800/0	132,30	12,79	19,80
			204,90	19,80	0,00
			1034,70	97,83	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 5-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
1023,10	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	211,10	20,63	79,37
	20	20000/12500	259,00	25,32	54,05
	12,5	12500/9500	435,80	42,60	11,46
	9,5	9500/6300	98,10	9,59	1,87
	6,3	6300/3500	8,10	0,79	1,08
	3,5	3500/1600	1,90	0,19	0,89
	1,6	1600/800	0,50	0,05	0,84
	0,80	800/0	0,60	0,06	0,78
			8,00	0,78	0,00
			1023,10	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 5-1 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
994,60	30	30000/25000	0,00	0,00	100,00
	25	25000/20000	0,00	0,00	100,00
	20	20000/12500	0,00	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0,00	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0,00	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	25,70	2,58	97,42
	3,5	3500/1600	458,60	46,11	51,31
	1,6	1600/800	233,40	23,47	27,84
	0,80	800/0	108,20	10,88	16,96
		0	168,70	16,96	0,00
			994,60	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 5-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
958,40	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	83,9	8,75	91,25
	20	20000/12500	252,9	26,39	64,86
	12,5	12500/9500	424,8	44,32	20,53
	9,5	9500/6300	137,9	14,39	6,15
	6,3	6300/3500	16,6	1,73	4,41
	3,5	3500/1600	3,8	0,40	4,02
	1,6	1600/800	2,5	0,26	3,76
	0,80	800/0	3,2	0,33	3,42
			32,8	3,42	0,00
			958,40	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 5-2 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
987,20	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	7,4	0,75	99,25
	3,5	3500/1600	390,1	39,52	59,73
	1,6	1600/800	246,90	25,01	34,72
	0,80	800/0	127,50	12,92	21,81
		0	215,30	21,81	0,00
			987,20	100,00	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA ALIMENTACIÓN MT 5-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100
975,20	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	196,7	20,17	79,83
	20	20000/12500	181,4	18,60	61,23
	12,5	12500/9500	467,4	47,93	13,30
	9,5	9500/6300	100	10,25	3,05
	6,3	6300/3500	8,1	0,83	2,21
	3,5	3500/1600	1,8	0,18	2,03
	1,6	1600/800	1,4	0,14	1,89
	0,80	800/0	1,5	0,15	1,73
			16,9	1,73	0,00
			975,20	98,27	

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA MUESTRA DESCARGA MT 5-3 (RÉPLICA)

Masa Inicial g	Mallas mm	Mallas micras	Masa Retenida g	Retenido %	Pasante %
					100,00
973,50	30	30000/25000	0	0,00	100,00
	25	25000/20000	0	0,00	100,00
	20	20000/12500	0	0,00	100,00
	12,5	12500/9500	0	0,00	100,00
	9,5	9500/6300	0	0,00	100,00
	6,3	6300/3500	9,2	0,95	99,05
	3,5	3500/1600	371,6	38,17	60,88
	1,6	1600/800	241,40	24,80	36,09
	0,80	800/0	132,90	13,65	22,43
		0	218,40	22,43	0,00
			973,50	100,00	