



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Molienda de bolas con eje excéntrico

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Hazel Fernando González Rendón

DIRECTOR DE TESIS

M. C. Miguel Márquez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 4 |
| Capítulo 1 | 6 |
| I. Introducción | 6 |
| II. Objetivos..... | 8 |
| Capítulo 2: Aspectos Fundamentales..... | 9 |
| 2.1. Caracterización de la partícula | 11 |
| 2.2. Distribución Granulométrica | 13 |
| 2.3. Libración de partícula | 15 |
| 2.4. Consumo de energía..... | 16 |
| Capítulo 3: Tipos de Molienda y Factores que Intervienen..... | 20 |
| 3.1 Molinos de impacto | 21 |
| 3.2 Molino de rodillos | 22 |
| 3.3 Molinos de disco..... | 22 |
| 3.4 Molinos no convencionales | 22 |
| 3.5 Molinos de tambor giratorio..... | 23 |
| 3.5.1 Elementos fundamentales | 27 |
| 3.5.2 Partes principales en los equipos de tambor rotatorio | 33 |
| Capítulo 4: Análisis del Funcionamiento del Molino con Eje Excéntrico y Desarrollo Experimental. | 37 |
| 4.1 Funcionamiento del molino | 37 |
| 4.2 Desarrollo Experimental | 41 |
| 4.2.1 Material Utilizado | 42 |

| | | |
|--|--|----|
| 4.2.2 | Diseño y armado del molino | 43 |
| 4.2.3 | Prueba estándar | 46 |
| 4.2.4 | Pruebas variando distintos factores..... | 50 |
| Capítulo 5: Representación Gráfica y Discusión de Resultados. | | 52 |
| Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones..... | | 72 |
| Referencias | | 74 |

Resumen

El presente escrito describe la metodología seguida para el análisis del desplazamiento de la posición del eje como una nueva variante de estudio, para ello se realizaron diferentes pruebas modificando los parámetros usuales en los molinos de eje con tambor rotatorio. La nueva propuesta fue la variación del porcentaje de desplazamiento del eje del molino, con la intención de observar los cambios en el gasto de energía y el tiempo necesario para llegar al tamaño deseado de partícula en estas pruebas.

Los resultados de cada prueba fueron comparados con los resultados que arroja una prueba estándar, con el objetivo de disminuir el consumo energía y tiempo de molienda, en cada prueba se realizó un análisis gráfico.

Para llevar a cabo los experimentos necesarios, se diseñó y construyó un molino con las adecuaciones requeridas para el desplazamiento del eje a diferentes distancias del centro. Dicho molino tuvo algunas limitantes debido al presupuesto de la investigación, sin embargo, los resultados fueron los esperados.

Abstract

This paper describes the methodology followed for the analysis about the displacement of the axis position as a new variant of study, for which, different tests were performed modifying the usual parameters in rotary drum shaft mills.

The new proposal was to vary the displacement percentage of the axis mill, to observe the changes in the energy expenditure and the time necessary to reach the desired particle size in these tests.

The results of each test were compared with the results of a standard test, with the aim of decreasing energy consumption and grinding time, in each test a graphic analysis was performed. To carry out the necessary experiments, a mill was designed and built with the adjustments required for the displacement of the shaft at different distances from the center. This mill had some limitations due to the budget of the research; however, the results were as expected.

Capítulo 1

I. Introducción

En la Industria Minera Mexicana comúnmente el producto final es un concentrado, para llegar de la mena al concentrado el trabajo se divide en dos partes, la primera es la parte minera en donde se extrae la roca del subsuelo; y la siguiente es la parte metalúrgica, que a su vez se divide en dos operaciones, una dedicada a la reducción del tamaño y la otra a la concentración de los minerales. La conminución se realiza con el objetivo de que los distintos minerales presentes en la mena se liberen, sin embargo, este proceso se realiza en distintas etapas, trituración y molienda, siendo la última el proceso más costoso de todos los que conlleva la obtención del concentrado, debido a los altos requerimientos de energía.

La finalidad de la presente investigación es reducir el gasto energético y así optimizar el funcionamiento de los equipos de molienda. En otros trabajos experimentales se han buscado las condiciones donde se desarrolla la potencia máxima de molino con el análisis de los parámetros que resultan más fáciles de variar, como lo son la cantidad de mineral, la cantidad de mineral y de medios de molienda, el porcentaje de agua contenido en el material, la velocidad de rotación, el tamaño de alimentación y de cuerpos moledores, etc. A través del análisis del desplazamiento del eje fuera del centro como variable, se pretende buscar las condiciones óptimas de molienda, puesto que es parámetro que sólo se ha estudiado para métodos de molienda no convencional y a nivel laboratorio arrojando buenos resultados (Errol G. Kelly, 1990; Fueyo, 2002; Taggart, 1964).

El eje excéntrico es usado en equipos de molienda planetaria, los cuales dan producto ultra fino en tiempos relativamente cortos, esto se debe a que el eje rota a una alta velocidad y en posición vertical, aumentando la fuerza centrífuga y de gravedad, mientras el equipo rota en su propio eje. Los principios de este se pretenden utilizar en los molinos con eje de tambor rotatorio, que son los más

utilizados en la industria, desplazando su punto de giro del centro (Fueyo, 2002; Valladares, 2008).

Con un eje excéntrico las fuerzas centrífugas y de gravedad tendrán una mayor acción sobre los medios moledores, además, el casco a diferencia de cuando se tiene una molienda axial, el tambor también tendrá una elevación, de esta forma se presenta un mayor contacto entre el casco y la carga, por lo cual habrá una mayor fractura por abrasión y por ende, un producto más fino.

El estudio de la posición del eje se desarrolla en un molino diseñado con el objetivo de modificar la ubicación del eje y de esta forma también analizar cómo otros factores, ya estudiados, afectan el proceso de molienda cuando se tiene el eje fuera del centro, para comparar la operación y sus resultados con los de un equipo de eje axial.

En este trabajo se demuestra la disminución del gasto de energía y de manera análoga, la posible disminución en los costos, lo cual puede ser de interés en el ámbito industrial. En un futuro, con más estudios, se podría ver la posibilidad de tener un molino con eje excéntrico con una planta piloto o llevar este a equipo a molienda de otro tipo de materiales.

El molino que se utiliza en las pruebas fue diseñado con materiales en desuso y rehabilitados del laboratorio de metalurgia de la Facultad de Ingeniería, UNAM, por lo cual tiene limitantes las cuales no permiten la modificación de todas las variables (el contenido de agua en el material a moler, la velocidad de trabajo, las dimensiones del molino y la potencia del motor).

II. Objetivos

General

El objetivo principal de tesis consiste en estudiar de manera teórica y práctica la posición del eje en los molinos de tambor rotatorio, la forma en que modifica el movimiento de las partículas y los medios de molienda, cómo afecta el proceso, si es óptimo tener el punto de rotación fuera del centro y analizar cuánto impactan algunos de los factores presentes en la molienda cuando se tiene un eje excéntrico.

Particular

- Diseñar un molino a nivel laboratorio con la capacidad de poder desplazar el eje del centro.
- Determinar la viabilidad técnica para la industria.
- Encontrar campos de aplicación para la molienda excéntrica.

Capítulo 2: Aspectos Fundamentales

La preparación mecánica de minerales es fundamental en su procesamiento ya que gran parte de este se dedica a la separación de partículas, las partes con valor (mena) y sin valor económico (ganga). En la división de estas dos clases de minerales se utilizan procesos químicos, para tener un uso óptimo de los reactivos es necesario llevar las partículas a un tamaño específico. Comúnmente la reducción de tamaño de partícula se usa para liberar los diferentes minerales de una mena y tener una mayor superficie de contacto.

En los procesos de conminución se obtiene una gama de tamaños comprendidos entre el deseado y el infinitamente pequeño, con el análisis granulométrico (“el arte medir el tamaño, formas y porciones de los granos de una dispersión” (Fueyo, p.29)) se puede tener un control de calidad de los productos fragmentados además permite determinar la dimensión media granulométrica. Tener un control del tamaño de los minerales fragmentados es fundamental para un consumo de energía óptimo pues si se obtiene una media más fina de la esperada implica un mayor gasto energético.

Para realizar los procesos de reducción de tamaño se aprovecha las estructuras cristalinas que poseen los minerales y los enlaces que participan en la unión de sus átomos, estos últimos son efectivos a corta distancia, y son rotos por esfuerzos de tensión o compresión. Todos los materiales presentan fallas macroscópicas o microscópicas, se aplica energía para que se propague por las grietas y así se rompan los enlaces atómicos como es mostrado en la figura 2.1, esto también dependerá de la estructura cristalina pues es la forma en que los átomos están organizados (González, 2003).

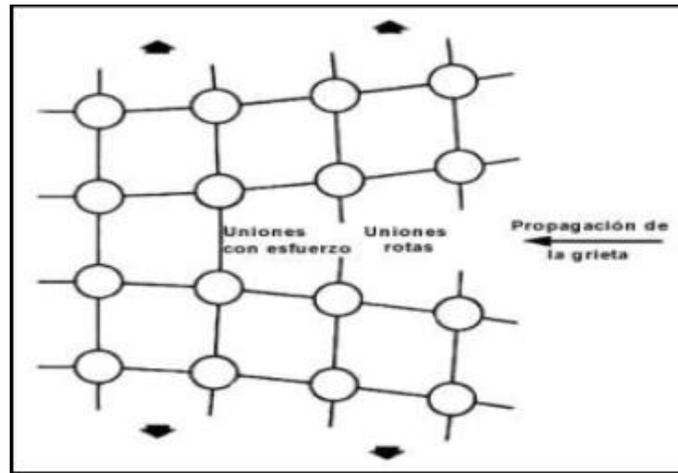


Figura 2.1 Propagación de la grieta por uniones atómicas. Apuntes de conminución, Universidad de Antioquia.

Para fragmentar la roca se aplican las siguientes fuerzas mecánicas: abrasión, compresión e impacto. Dependiendo de ellas será el mecanismo de fractura y la distribución granulométrica obtenida, como se ilustra en la figura 2.2 y se explica en la tabla 2.1. Los equipos de conminución utilizados en la metalurgia extractiva basan su funcionamiento aplicando las fuerzas ya mencionadas.

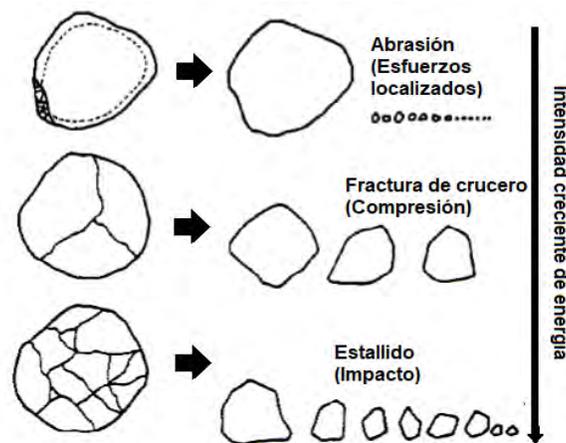


Figura 2.2. Relación de energía consumida por tipo de esfuerzo aplicado. Apuntes de conminución. Universidad de Antioquia

| TIPO DE CARGA APLICADA | MECANISMO DE FRACTURA | DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULA |
|------------------------|--|--------------------------------------|
| IMPACTO | ESTALLIDO POR FUERZAS DE TRACCIÓN APLICADAS A ALTA VELOCIDAD | HOMOGENEO |
| COMPRESIÓN | COMPRESIÓN | PARTÍCULAS GRUESAS Y ALGUNOS FINOS |
| FRICCIÓN | ABRASIÓN POR ESFUERZO CORTANTE SUPERFICIAL | FINOS Y GRUESOS |

Tabla 2.1. Tipos de cargas presentes en la reducción del tamaño de la partícula. Modificado de Apuntes de conminución, Universidad de Antioquia

Los procesos de reducción de tamaño para minerales se dividen en dos grandes etapas, trituración y molienda, aunque a veces se puede encontrar un método de molienda en la trituración, en este trabajo se abordara la última etapa.

2.1. Caracterización de la partícula

La clasificación de partículas por su tamaño es fundamental en el procesamiento de minerales. En la industria minero-metalúrgica el uso de tamaño como medida de control se implementa en los procesos de conminución, estos se llevan a cabo para el incremento de superficie de contacto y acelerar así un proceso químico, también porque el producto tiene que presentar un tamaño específico para su comercialización, manejo o almacenamiento. El motivo más común es para liberar los minerales presentes en la partícula proveniente de la mena (Errol G. Kelly, 1990).

Comúnmente el tamaño se toma como mediada del grado de liberación por su relativa facilidad de medir, sin embargo, no es lo único de lo que depende, por eso la importancia de caracterizar la partícula tomando en cuenta la asociación de los minerales presentes en ella, forma, tamaño de cada una y en promedio. Para caracterizar la partícula existen distintas formas de hacerlo, en la tabla 2.2 se ven 5 grupos de métodos.

| | |
|--|--|
| Medición directa de partícula (Grupo 1) | -Métodos microscópicos -Métodos de sedimentación (gravitacional o centrífugos) -Métodos en corriente de fluidos |
| Fraccionamiento de una muestra de partículas. (Grupo 2) | -Tamizado -Elutriación (gravitacional o centrífugos) |
| Determinación del área superficial por adsorción. (Grupo 3) | -Métodos estáticos -Métodos de flujo de gases |
| Estudios de permeabilidad. (Grupo 4) | -Permeámetros dinámicos. -Permeámetros estáticos. |
| Análisis composicional. (Grupo 5) | -Análisis químico por vía húmeda. -Difracción de rayos X. -Análisis por rayos X (EDAX, fluorescencia) |

Tabla 2.2. Grupos de métodos para la caracterización de la partícula. Modificado de Kelly, Errol, 1990.

Sólo hablaremos del fraccionamiento de una muestra (grupo 2) por tamizado, pues es el utilizado en las pruebas de este trabajo, a parte es el más usado por su practicidad y debido a que la separación por tamaños es lo usual dentro del procesamiento de minerales.

La forma de la partícula puede afectar el conocimiento cuantitativo del área superficial y volumen, por lo que conocer la dimensión real de los fragmentos se convierte en una tarea difícil, es por ello que se opta comúnmente por tomar como esferas a las partículas, por lo cual su dimensionamiento no es exacto, a la medida que se toma pensándolas como figuras geométricas se le llama diámetro nominal, se define en función de alguna propiedad, comúnmente se utiliza la que está dada por el tamaño de la abertura del tamiz, a este se le conoce como “diámetro de tamiz” (d_A). Es poco práctico medir cada una de las partículas individualmente, por esta razón se dividen en intervalos de tamaño y se representan gráficamente, se debe mencionar que para recabar datos es común que se defina un tamaño promedio por cada intervalo. (Errol G. Kelly, 1990)

2.2. Distribución Granulométrica

En la conminución no se obtienen partículas de un solo tamaño, por lo que existen muchos diámetros provenientes matriz fragmentada, esto nos da una distribución de tamaños, su clasificación se hace en intervalos, la selección de intervalos es importante para recabar datos y representarlos gráficamente, en donde convencionalmente el eje horizontal (x) es el tamaño de partícula y el eje vertical (y) es una propiedad medida, comúnmente son la masa, volumen, área superficial. La primera es la más usada por su practicidad al medir partículas finas. Existen dos sistemas para representar los datos del eje vertical, el primero (figura 2.3) se representa la cantidad que hay en cada fracción de tamaño (como cantidad absoluto, fracción o porcentaje), y el segundo (figura 2.4), donde el porcentaje de muestra que se encuentra en cada una de las dimensiones se indican que tanto paso o no de manera acumulativa, estas llevan el nombre de “curvas granulométricas” (Kelly, 1990; Fueyo, 2002).

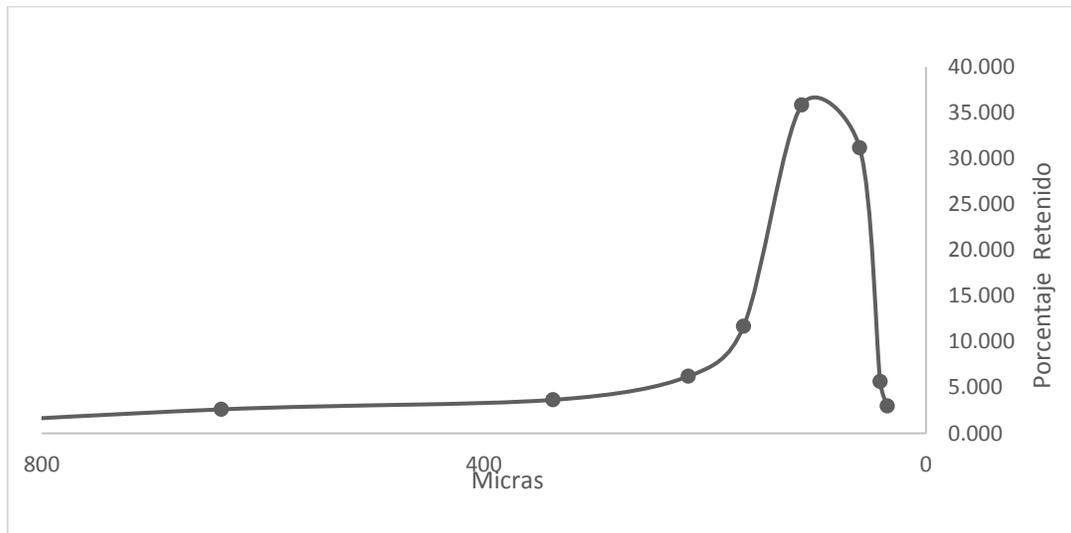


Figura 2.3 Ejemplo de la representación gráfica tomando como eje Y el porcentaje retenido en el tamiz.

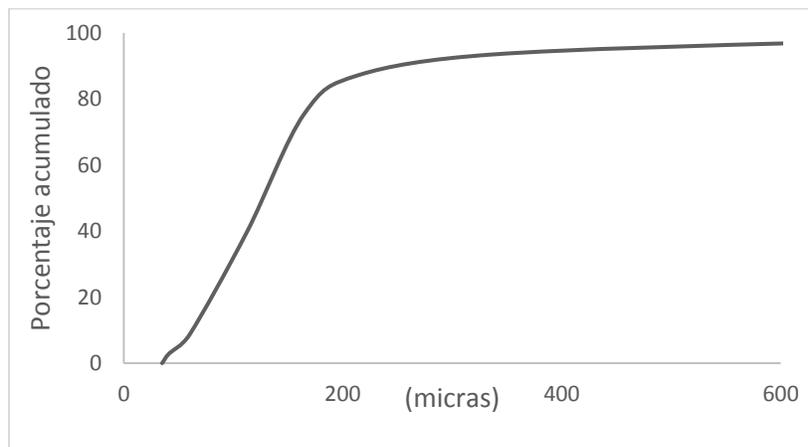


Figura 2.4. Ejemplo de la representación gráfica tomando como eje Y el porcentaje acumulado

En la interpretación de las curvas a veces “se encuentra d_{50} , d_{80} , d_{90} o d_{95} , que se refiere a la malla teórica que dejaría pasar el 50 %, 80%, 90% y 95% del material respectivamente” (Fueyo, p.24), a partir de ellos se determinan parámetros, por ejemplo el d_{80} se usa para calcular la carga circulante.

Los equipos utilizados en la industria para la clasificación por tamaños de las partículas son principalmente cribas y hidrociclones. Los primeros comúnmente se usan para separar tamaños mayores a 0.2 mm, en la superficie de la criba se encuentran aberturas por donde pasa el material, el cual va rodando debido a la inclinación y vibración del equipo.

Los equipos más utilizados son los hidrociclones, la clasificación la hacen por medio de un movimiento de vórtice el cual provoca una fuerza centrífuga que impulsa las partículas más gruesas hacia las paredes donde el movimiento es negativo y estas salen por la parte inferior (ápex), en el caso de las partículas más finas se concentran en el eje del equipo, donde el movimiento es positivo y son impulsadas a la parte superior (vortex), por donde salen. El material para clasificar debe estar en suspensión (pulpa), los hidrociclones tienen un cuerpo cónico, donde es el proceso anteriormente explicado, y la alimentación se hace por la parte superior con la ayuda de una bomba. En la clasificación de material micrométrico se utilizan neumociclones, los cuales funcionan con el mismo principio de los hidrociclones pero con material seco.

2.3. Libración de partícula

La liberación de los minerales presentes en una mena tiene como objetivo separar las partículas con valor y sin valor económico, existen dos clases de ellas, las no liberadas o intermedias (presentan minerales de mena y ganga) y las libres (sólo contienen una clase de mineral), de estas últimas depende el grado de liberación. Los procesos de reducción son para fracturar los minerales y como consecuencia inducir o aumentar su liberación, de esta se distinguen dos tipos, la intergranular y transgranular.

La liberación intergranular se refiere cuando la fractura se hace en el contorno de los granos porque existe una débil superficie de contacto entre ellos, por lo mismo la liberación es aproximadamente de la dimensión del grano del mineral, es por eso por lo que se debe de reducir aún más. La liberación transgranular la fractura ocurre a

través de los granos y puede lograr un alto grado de liberación, por su mecanismo más común que esta se presente (Errol G. Kelly, 1990).

2.4. Consumo de energía

Los procesos de preparación mecánica representan más del 45% del gasto energético de las operaciones minero-metalúrgicas, como lo detalla la figura 2.5, de ahí la importancia de tener un control del producto reducido de tamaño. Recordando que los minerales tienen fallas por su organización de enlaces atómicos, lo cual reduce la energía invertida en ellos para fragmentarlos, entre mayor sea el tamaño de una partícula, mayor serán la cantidad de fallas, es por eso que la cantidad de energía requerida para fragmentarla será menor, por otra parte mientras la partícula sea más pequeña, habrá menos fracturas que encontrar y requerirá un mayor consumo de energía, de este solo un pequeño porcentaje produce la aparición de nuevas superficies, entre el dos y el cinco por ciento, el resto se pierde en calor, vibraciones y ruido producidos por la interacción entre los equipos y las partícula (González, 2003; Alzate, 2016).



Figura 2.5 Participación energética de distintos procesos minero-metalúrgico, (Alzate, 2016)

Los estudios de la energía necesaria para fragmentar los minerales han sido llevados principalmente por tres personajes que propusieron los postulados de Rittinger, Kick y Bond, los cuales llevan el nombre de sus autores. El postulado de Rittinger en 1876 menciona que “la energía necesaria para la reducción de tamaño es proporcional a la superficie creada”. Kick en el año 1885 relaciona proporcionalmente el gasto energético con la reducción de volumen de las partículas.

En 1951 Bond publica su postulado, el cual es basado en los dos anteriores y se ubica como una posición intermedia donde relaciona la energía requerida para la reducción de tamaño con la longitud de fisura creada, la fórmula que lo representa es la siguiente:

$$W = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

W , consumo energético en kWh por tonelada corta (907.2 kg)

P_{80} , tamaño de la malla por el que pasa el 80% del producto (mm).

F_{80} , tamaño por el que pasa el 80% de la alimentación (mm).

W_i , Work index (índice de Bond o de trabajo), indica la resistencia que ofrece cada material a ser triturado o molido y depende de su naturaleza.

El índice de trabajo (W_i) es la resistencia de la partícula de un específico material a ser reducida de tamaño, este ha sido determinado para diversos materiales mediante pruebas de laboratorio, en la tabla 2.3 se ven los valores de algunos materiales, el índice de trabajo también es útil para evaluar otros parámetros del proceso como: material de fabricación del equipo, tipo de equipo, etc. (Fueyo, 2002; George & Angel, 2009; Deblas, 2013)

| <i>Material</i> | <i>W_i, kWhr/t</i> |
|----------------------|-------------------------------------|
| Todos los materiales | 15.19 |
| Barita | 6.86 |
| Basalto | 22.45 |
| Clinker de cemento | 14.84 |
| Arcilla | 7.81 |
| Carbón mineral | 12.51 |
| Mineral de cobre | 14.44 |
| Dolomita | 12.44 |
| Esmeril | 64.00 |
| Feldespato | 12.84 |
| Galena | 10.68 |
| Vidrio | 3.39 |
| Mineral de oro | 16.31 |
| Granito | 15.83 |
| Mineral de hierro | 16.98 |
| Mineral de plomo | 12.54 |
| Caliza | 12.77 |
| Mica | 148.00 |
| Lutita petrolífera | 19.91 |
| Roca fosfatada | 11.14 |
| Cuarzo | 14.05 |
| Taconita | 16.36 |

Tabla 2.3. Índice de Bond para algunos materiales. (Errol G. Kelly, 1990)

En el proceso de conminución es fundamental conocer la relación de energía aplicada para fragmentar el mineral con el tamaño de partícula obtenido, para que este proceso sea óptimo, también se debe tomar en cuenta que la resistencia de una

material a la fragmentación implicara un mayor consumo energético, si bien no es la única propiedad del material para tomar en cuenta en el área de la preparación mecánica del mineral es la más importante para el gasto energético que implica uno de los mayores costos en la industria del procesamiento de minerales.

Capítulo 3: Tipos de Molienda y Factores que Intervienen.

La molienda es la última etapa de reducción de tamaño de los minerales en donde regularmente se va a conseguir un tamaño de partícula menor a una pulgada. No sólo se presenta en la industria del procesamiento de minerales, la encontramos en la fabricación de cemento, molienda de escorias, procesamiento de residuos o de combustibles sólidos, preparación de farmacéuticos, alimentos, harinas, etc. En mayor proporción las fuerzas mecánicas implicadas en esta etapa son por impacto y en menor proporción fuerzas de abrasión y compresión, dentro del proceso de reducción de tamaño de minerales el mayor consumo de energía lo tiene la molienda. (Valladares, 2008; Larota, 2015)

Existen equipos de conminución que se pueden usar para casi cualquier material que se desee fragmentar, la elección depende de diversos factores como el tamaño de alimentación y del producto esperado, la presencia de agua, el tamaño de la operación, el tipo de material y el proceso que lleva antes y después de la molienda. Regularmente esta decisión se basa a los experimentos realizados en un molino piloto de laboratorio, cuando no es posible hacer pruebas se recurre a las investigaciones y resultados publicados para materiales similares a los de interés, cada vez es más frecuente que también se recurra a softwares que simulan las condiciones de reducción de partícula.

Los molinos son los equipos utilizados en esta etapa, comúnmente en la industria metalúrgica se utilizan molinos de tambor giratorio. La cantidad excesiva de energía requerida para el proceso de conminución de los minerales impulsa la investigación en el desarrollo de equipos que optimicen su uso, es por eso por lo que existen distintos tipos de molinos, los cuales comparten los mismos principios. En este trabajo se estudia específicamente un molino de tambor giratorio de bolas con la adaptación de poder mover el eje del centro, haciendo un eje excéntrico por medio de la vía seca (Hartman, 1992; Juan Fco. Hinojosa E., 2010).

3.1 Molinos de impacto

La fragmentación ocurre por choques bruscos entre el material y el elemento triturador, el cual está formado por barras, su campo de aplicación puede ir desde la etapa de trituración primaria hasta la pulverización del material. Funcionan a velocidades que van de los 15 m/s a 150 m/s, mientras la velocidad sea más alta, la granulometría será más fina (Fueyo, 2002).

Impactores con eje horizontal y vertical

Son formados por un rotor que gira al interior de forma cilíndrica ya sea con un eje horizontal o vertical, este sostiene barras las cuales impactan y proyectan los materiales en placas de choque, de tal forma que los fragmentos vuelven a rebotar al rotor, tanto las placas como las barras se pueden cambiar pues el desgaste en ellas es alto debido al choque con las partículas. (Fueyo, 2002; Valladares, 2008)

Molinos de martillos

Su funcionamiento es igual que el de los impactores, tienen un rotor que gira a alta velocidad sobre su eje vertical u horizontal al interior de una cámara con revestimiento, a diferencia de los molinos de impacto cuentan con una serie de discos que se montan en su periferia sobre los cuales se articulan masas de choque, el espacio presente entre el rotor y los revestimientos es importante pues indica el tamaño del producto. La molienda es el resultado del impacto y la fricción entre las partículas y los martillos, la finura del material se puede controlar vareando la velocidad de alimentación, la velocidad del rotor o la distancia entre el rotor y la placa de molienda. (Larota, 2015; Valladares, 2008)

3.2 Molino de rodillos

La fragmentación de las partículas en los molinos de rodillos sucede por fricción y compresión, se usa en vía seca, por lo cual requiere equipos para el control de polvos, comercialmente se encuentra para capacidades de 50 y 100 ton/hora, es común verlo en la industria cementera y de agregados pétreos.

En su interior contiene tres rodillos contenidos a presión por cilindros hidráulicos, a su vez se encuentran en un mecanismo giratorio con forma de disco, es alimentado por una boca ubicada al costado de la estructura principal y el material suministrado cae a los rodillos giratorios, los fragmentos son desplazados a las orillas a causa de la fuerza centrífuga, por la acción del molino el material es levantado hacia la zona superior y el producto pasa a través de un clasificador a la puerta de descarga. (Larota, 2015)

3.3 Molinos de disco

Consiste en dos discos lisos o dentados que giran uno contra otro, el material cae por gravedad entre ellos, los discos van provistos de una camisa, la cual puede ser lisa o dentada para tener una mejor conminución. Las fuerzas presentes son de compresión y fricción, en el caso de los cilindros lisos, cuando son dentados se suma la fragmentación por impacto. El proceso se usa únicamente si se necesita una producción regular y mínima de finos. Los molinos de disco están casi en desuso y han ido evolucionando al molino de rodillos. (Fueyo, 2002)

3.4 Molinos no convencionales

Los molinos no convencionales tienen un campo de aplicación limitado, es poca la investigación que se hace sobre ellos, sin embargo, son capaces de solucionar problemas muy particulares.

Molinos planetarios

Los molinos planetarios aumentan la fuerza gravitacional que actúa sobre los cuerpos de molienda a través de altas velocidades, el molino gira alrededor de su eje vertical mientras rota sobre un eje excéntrico a una velocidad elevada, el movimiento es parecido a la rotación de los planetas mientras giran alrededor del sol. Su principal uso es en laboratorio, donde se requiere que el material tenga una granulometría ultra fina pues tiene la capacidad de llegar a este tipo de tamaños relativamente muy rápido. (Valladares, 2008)

Molinos trepidatorios

Utilizan bolas como cuerpos moledores que se encuentran dentro de uno o varios cilindros sujetos en un sistema de estribos, apoyado sobre bloques elásticos y están sometidos a un movimiento vibratorio vertical, el cual es el responsable de que los medios realicen la molienda, algunos prototipos aprovechan la vibración para realizar la clasificación con una criba en la parte inferior (Fueyo, 2002).

Molinos por agitación

Están conformados por una rueda de paletas o armadura de propulsor que agita los medios de molienda a velocidades que van de 100 a 1500 rpm, su campo de aplicación es en materiales suaves, por esto y su funcionamiento el desgaste de sus medios y revestimientos es mínimo (Valladares, 2008).

3.5 Molinos de tambor giratorio

Los molinos de tambor giratorio tienen forma cilíndrica, cuentan con un casco diseñado para soportar los impactos y la carga, contienen cuerpos moledores sueltos en su interior llamados “medios de molienda” para que se produzca en su mayoría fractura por estallido, los pueden conformar comúnmente bolas (acero o cerámica), barras (acero), o partículas de la misma mena, al último se le conoce como molienda autógena (Errol G. Kelly, 1990; Apuntes de conminución, 2017).

Los molinos giran alrededor de su eje horizontal localizado al centro regularmente, la carga puede estar en pulpa (húmeda) o seca, con material fino o grueso y se pueden adecuar cribas o hidrociclones como sistema de clasificación, por ser tan versátil con buenos resultados es el más ocupado en la industria. La variante analizada en este trabajo es una nueva propuesta para equipos de tambor rotatorio, por lo cual se buscará profundizar en su teoría.

Los molinos rotatorios se caracterizan por el uso de cuerpos de molienda que son más densos con relación del material a moler, utilizados en vía seca y húmeda como medios de colisión, dentro de la carga del equipo ocupan un mayor porcentaje que las partículas de la mena, la cual ocupa menos de la mitad del volumen del molino (Martínez, 2006; Valladares, 2008).

En la rotación del molino los medios de molienda se elevan hasta que logran un equilibrio dinámico, donde los cuerpos de molienda caen en dos formas, catarata y cascada.

El primer tipo corresponde a la caída libre de los cuerpos moledores sobre la carga, produce impacto entre las bolas quedando en medio de ellas partículas, por este proceso estas son fracturadas y los fragmentos son comprimidos debido al impacto, este movimiento se ilustra en la figura 3.1, el producto obtenido es más grueso que con el proceso de cascada pero el desgaste del revestimiento es menor, para efectuar el movimiento se requiere una mayor velocidad que en el caso de cascada (Valladares, 2008; Apuntes de conminución, 2017; Martínez, 2006).

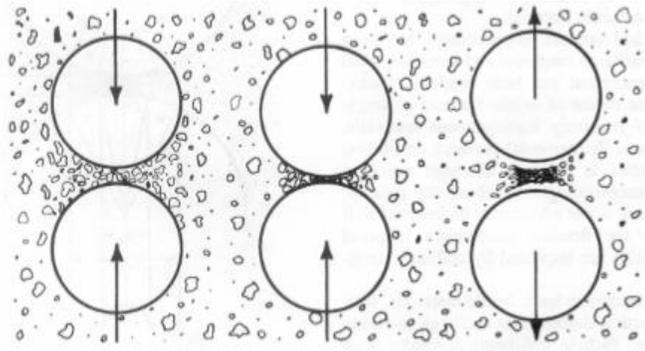


Figura 3.1 Partículas fragmentadas entre las bolas por las fuerzas de impacto y compresión, (Martínez, 2006)

El movimiento de cascada se presenta cuando los medios moledores caen rodando sobre la superficie, unos contra otros en capas concéntricas, la fractura se verifica por estallido, cruceo y en un, debido al impacto y compresión presente en el movimiento, el producto es fino y debido a la abrasión existe un alto desgaste del revestimiento. En la figura 3.2 se ilustra las zonas principales de molienda, en la zona A se tiene fractura por el efecto de cascada, en la zona B se encuentran de cascada y catarata, en este par de zonas son donde se encuentra la principal molienda y en la zona C la conminución es por el movimiento de catarata (Alzate, 2016; Errol G. Kelly, 1990).

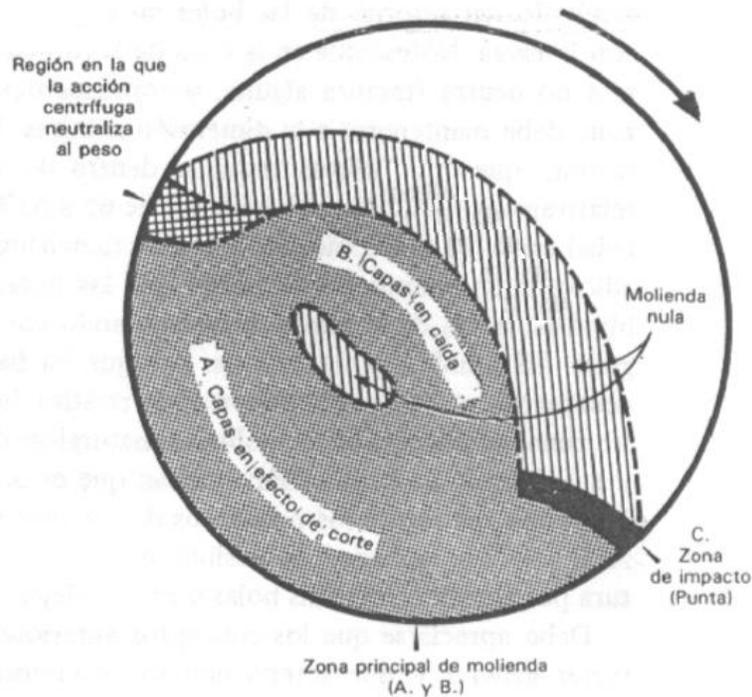


Figura 3.2 Comportamiento de los elementos moledores, modificado de Errol G. Kelly , 1990.

Como se ilustra los dos fenómenos hacen posible la molienda, en ellos están implicadas fuerzas que se ejercen sobre los medios, las cuales dependen de la velocidad del molino, masa de los medios y diámetro del molino. Siendo la velocidad la más importante pues de ella depende el tipo de movimiento que predomina y si es muy alta puede ser relativamente nula la molienda del mineral.

En la figura 3.3 se observa la acción de las fuerzas presentes en el movimiento de los medios, en el punto 1 se mantienen a los cuerpos de molienda contra la superficie, esto es la componente normal del peso ($F_g \cos \theta$), más la fuerza centrífuga (F_c), en el punto 2, la misma se eleva hasta un máximo y regresa al valor inicial en el punto 3, por la rotación sigue viajando en trayectoria circular en el casco del molino disminuyendo su fuerza hasta que la componente del peso equilibra la fuerza centrífuga en el punto 4 y es lanzada en trayectoria parabólica regresando al punto 1 (Errol G. Kelly, 1990).

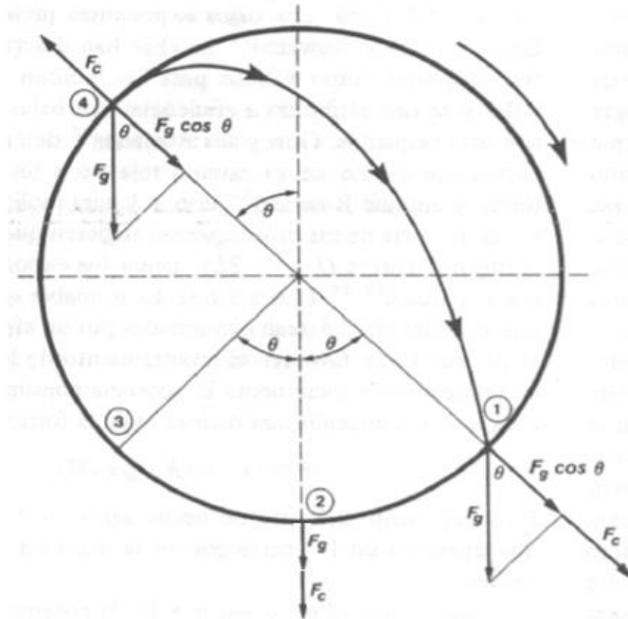


Figura 3.3 Fuerzas que actúan en una bola aislada en un molino de bolas, modificado de Errol G. Kelly, 1990.

Las fórmulas de las componentes que están presentes en el proceso de molienda son:

$$F_c = \frac{M_b v_m^2}{D_M} \quad F_g = M_b g \quad (3.1, 3.2)$$

Donde:

M_b , Masa de bola (g)

v_m , Velocidad tangencial de la bola (rpm)

D_M , Diámetro interno del molino (m)

3.5.1 Elementos fundamentales

La molienda depende de diversos factores capaces de modificar las condiciones del proceso, estos son:

- Tamaño de elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Presencia de agua.

- Energía requerida para el proceso.
- Velocidad crítica y de trabajo.
- Diámetro interno del molino

Diámetro interno del molino

Las dimensiones del molino también son un factor importante, principalmente el diámetro interno pues aparte de influir sobre la capacidad del equipo determina junto con la masa de los medios la velocidad crítica de rotación, mientras que la relación del largo del molino con el diámetro interno del mismo (L/D_M) controla el transporte del mineral y los tiempos de residencia en la operación (Alzate, 2016; Deblas, 2013; Larota, 2015).

Velocidad crítica y de trabajo

Para que exista un movimiento óptimo de la carga las revoluciones por minuto (rpm) deben de estar por debajo de la velocidad crítica (N_c) la cual se refiere a la velocidad mínima donde los medios se adhieren a la superficie interna del molino debido a la fuerza centrífuga y no ejercen el rozamiento necesario sobre el material para producir la molienda, normalmente para definir su cálculo se utiliza una relación de la fuerza centrífuga con el diámetro interno del molino que se expresa con la siguiente ecuación:

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}} \quad (3.3)$$

Empíricamente se ha observado que la mayor eficiencia de molienda se obtiene cuando los medios caen formando un ángulo de 135 grados con la horizontal, medido en sentido de las manecillas del reloj por lo cual, la velocidad de trabajo (V_t) será al 75% de la velocidad crítica sin embargo la velocidad utilizada se puede variar entre el 60% y 85%. (Taggart, 1964; Casillas, 1996; Duda, 1977)

Tamaño de elementos de molienda

El diámetro de los medios de molienda (D_m) presentes en el molino no es el mismo, sino que a partir de un tamaño máximo de los elementos moledores se hace una distribución

de tamaño inferiores, en la siguiente fórmula empírica se calcula el diámetro máximo (D_{max}) de la bola en función del tamaño de alimentación, índice de trabajo y diámetro interno del molino:

$$D_{max} = \left(\frac{F}{K}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{S_g W_i}{(\%V_t) \sqrt{D_m}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.4)$$

Dónde:

S_g , gravedad específica del mineral (ton/m^3).

K , constante de la fórmula para molienda húmeda su valor es de 350 y para molienda en seco es de 335.

V_t , velocidad de trabajo (rpm).

También se puede estimar por la siguiente relación en función de tamaño de alimentación (ϕ):

$$\phi = D_{max}^2 \quad (3.5)$$

Dónde:

ϕ , tamaño de alimentación (mm).

D_{max} , Diámetro máximo de bola (in).

En la distribución de medios de molienda Taggart (1964) propone la tabla 3.1 para molinos de operación donde la repartición de cuerpos es según al diámetro máximo de bolas, en el caso de molinos de laboratorio propone la tabla 3.2, la cual se utilizó en los cálculos en este trabajo.

| Diámetros de bolas (pulgadas) | Distribución de la carga para cada diámetro máximo de bolas (% en peso de la carga) | | | | | | |
|-------------------------------|---|-----|------|----|-----|----|-----|
| | 4.5 | 4 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 |
| 4.5 | 25 | | | | | | |
| 4 | 31 | 23 | | | | | |
| 3.5 | 18 | 34 | 24 | | | | |
| 3 | 15 | 21 | 38 | 31 | | | |
| 2.5 | 7 | 12 | 20.5 | 39 | 34 | | |
| 2 | 3.8 | 6.5 | 11.5 | 19 | 43 | 40 | |
| 1.5 | 1.7 | 2.5 | 4.5 | 8 | 17 | 45 | 51 |
| 1 | 0.5 | 1 | 1.5 | 3 | 6 | 15 | 49 |

Tabla 3.1 Distribución de la carga de bolas para molinos en operación, modificado de Taggart, 1964.

| Diámetro de bolas (Pulgadas) | Distribución de la carga para cada diámetro máximo de bolas (% en peso de la carga) | | | | | |
|------------------------------|---|------|------|------|------|------|
| | 1 1/4" | 1" | 3/4" | 1/2" | 1/4" | 1/8" |
| 1 1/4" | 54.5 | 26.0 | 13.5 | 5.0 | 1.0 | |
| 3/4" | | | 79.5 | 18.5 | 2.0 | |
| 1/2" | | | | 78.0 | 19.0 | 3.0 |

Tabla 3.2 Distribución para tres tamaños de carga de bolas para molinos de laboratorio, modificada de Taggart, 1964.

Un par de artículos (Larota, 2015; Apuntes de conminución, 2017) mencionan las siguientes relaciones entre la molienda y el diámetro de las bolas:

-A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes y mejora la molienda del material duro debido a la percusión.

-A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de las partículas pequeñas por la mayor superficie de los cuerpos (fricción).

Volumen de carga

Los equipos de molienda no trabajan completamente llenos, el volumen ocupado por los materiales a moler y los cuerpos de molienda es al que se le denomina volumen de carga:

$$V(\%) = \frac{V_{\text{material a moler}} + V_{\text{elementos molidores}}}{V_{\text{interior del molino}}} 100\% \quad (3.6)$$

Se recomienda que este sea del 30% al 45% pues es donde se desarrolla la potencia máxima, en la gráfica 2.1, se observa que cuando el volumen de carga se encuentra en el 50% la potencia está en su máxima, sin embargo como la curva es bastante plana se vuelve muy similar y en operación con estos porcentajes se puede evitar el derrame de carga. (Errol G. Kelly, 1990; Larota, 2015; Deblas, 2013)

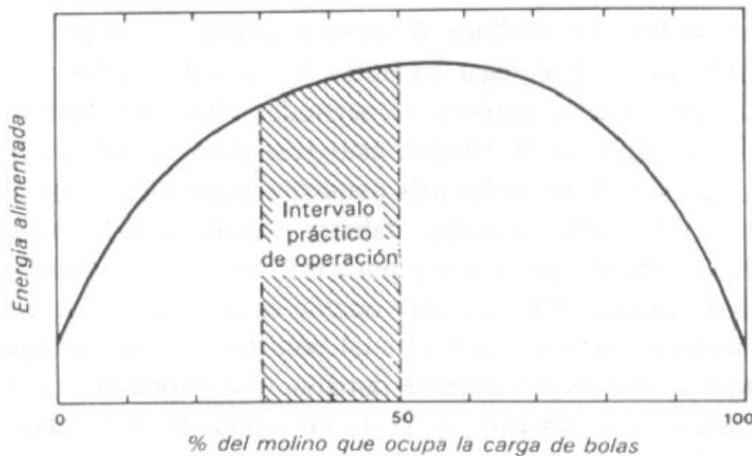


Figura 3.4, Potencia consumida por un molino de tambor giratorio en función del volumen de carga, (Errol G. Kelly, 1990).

Presencia de agua

La etapa de conminución en molinos se puede hacer seca o húmeda (suspensión de sólidos en líquidos), en la industria del cemento y los agregados pétreos la molienda se hace en seco, mientras en la preparación de minerales para su concentración

comúnmente es en pulpa pues favorece su manejo y transporte además que las plantas modernas utilizan hidrociclones para su clasificación después de la reducción de partículas.

El autor Errol G. Kelly (1990, p.161, 163) menciona los siguientes factores que influyen en la decisión del tipo de molienda que se debe efectuar:

- El proceso subsecuente que llevara el material.
- La disponibilidad de agua.
- La molienda en húmedo precisa menos energía por tonelada de mineral.
- La clasificación en húmedo requiere menos espacio que la clasificación en seco.
- La molienda en húmedo no necesita equipos de control de polvos.
- Para efectuar la molienda en seco se necesita un bajo porcentaje de humedad y en consecuencia puede utilizarse una operación de secado.
- La molienda en húmedo utiliza más medios de molienda y revestimiento debido a la corrosión.
- La molienda en seco no requiere de procesos para la eliminación de agua del producto.
- En la molienda en húmedo el material puede reaccionar con el agua.

Energía requerida para el proceso

En el capítulo anterior se menciona que el proceso de conminución requiere grandes cantidades de energía, dentro de este proceso la molienda es la que implica un mayor uso, entre un 30% y 50% de la utilizada en todos los procesos de la planta metalúrgica, este gasto se debe a que la operación se basa en la transformación a energía potencial, la cual es proporcionada a la bola cuando es levanta por la rotación y así general la sucesión de impactos que desencadena la fragmentación del mineral (González, 2003; Alzate, 2016).

Para calcular el trabajo requerido para la molienda de un mineral se utiliza la ecuación empírica (2.1) de Bond, la cuales se explicó en el capítulo anterior sin embargo los valores para el índice de trabajo que se utiliza y que se encuentran en la tabla 2.3 son

para molienda húmeda, en el caso que se requiera calcular el trabajo por vía seca se le debe aplicar un factor de corrección de 1.3, pues Bond estimó que este tipo de condición requiere 1.3 más veces de potencia (Errol G. Kelly, 1990; Ampuero, 2012).

3.5.2 Partes principales en los equipos de tambor rotatorio

Tambor o casco

Está diseñado para soportar los impactos producidos de la molienda que se lleva a cabo en su interior y la carga pesada, se constituye por placas de acero y tiene perforaciones en donde salen pernos, los cuales sostienen el blindaje o revestimiento, para conseguir la rotación tiene bridas grandes en los extremos, estas se conectan a las cabezas de los muñones responsables del movimiento (Valladares, 2008).

Blindaje

El objetivo principal del blindaje es proteger al tambor del desgaste producido por corrosión, impacto y abrasión, debido a que estas piezas son intercambiables, su vida útil es mayor a la de los medios de molienda pero el costo de mantenimiento es alto pues se debe de parar la operación para cambiarlo, existen blindajes de caucho y acero, los primeros tienen un costo más alto pero una vida más larga, hacen menos ruido y su reposición es segura (Errol G. Kelly, 1990).

Cabezas de los muñones

Son los responsables de transmitir el movimiento al tambor, comúnmente están hechas de acero fundido y aparte son nervadas, para diámetros menores de 1m se pueden encontrar de hierro fundido o nodular (González, 2003; Valladares, 2008).

Molinos de bolas

Estos equipos están compuestos por cámaras cilíndricas revestidas dispuestas horizontalmente, utilizan como medios de molienda bolas de diferentes tamaños, comúnmente son de acero o cerámica, el proceso puede ser en vía húmeda o seca, esta elección depende del proceso y material en el que se requiera emplear la molienda, los cuerpos mueven en su interior haciendo los efectos de catarata y cascada. (Fueyo, 2002)

La alimentación es menor de 5”, los tamaños producidos se encuentran entre las 30 y 200 micras, las principales variantes de este método se basan a la descarga del material como se ilustra en la figura 3.5.

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| Tipos de Descarga |  |  |
| | Rebalse | Diafragma |
| Tipos de Molienda | Húmeda | Seca o Húmeda |
| Tipos de Circuitos | Cerrado | Cerrado |
| Tamaño de Molienda | Fino – Malla 200 | Intermedio (Vía Húmeda) – Malla 65-100; Fino (Vía Seca) – Malla 325 |
| Tamaño Máximo de Alimentación | Malla 10-14 | < 1/2" |
| Relación L/D | 1-1,5:1 | 1-1,5:1 |
| % Típico de Vel. Crítica | 65-70 % | 68-78% |
| % de Carga | 40-45 % | 35-50 % |

Figura 3.5 Criterios de selección para el tipo de descarga, (Larota, 2015).

Molinos de barras

Están constituidos por un cuerpo cilíndrico al igual que los molinos de bolas, los medios de molienda son barras sueltas que se encuentran a lo largo del eje, de una longitud aproximada a la del tambor, las barras se mueven por las paredes del casco, elevándose y cayendo entre ellas, es por eso que el efecto de cascada es el único presente, la fractura del material se produce por frotamiento y por impacto, el producto de este tipo de cuerpos es menos fino que el de bolas, las principales variantes al igual que en los equipos anteriores se deben a la descarga del material, en la figura 3.6 se muestra los criterios para elegir el tipo de variante (Larota, 2015).

| | | | |
|-------------------------------|---|--|---|
| Tipos de Descarga |  |  |  |
| | Rebalse | Periférica Final | Periférica Central |
| Tipos de Molienda | Húmeda | Seca o Húmeda | Seca o Húmeda |
| Tipos de Circuitos | Abierto | Abierto | Abierto |
| Tasa Máxima de Reducción | 15-20:1 | 12-15:1 | 4-8:1 |
| Tamaño de Molienda | Malla 10-35 | Malla 4-12 | Malla 3-6 |
| Tamaño Máximo de Alimentación | < 3/4" | < 3/4" | < 3/4" |
| Relación L/D | 1,25:1 | 1,25:1 | 1,25:1 |
| % Típico de Vel. Crítica | 60-65 % | 65-70 % | 65-70 % |
| % de Carga | 40-45 % | 35-50 % | 30-50 % |
| Capacidad | Normal | Normal | Doble |

Figura 3.6 Criterios para la selección de descarga de un molino de barras. (Larota, 2015).

Molinos semiautógenos y autógenos

La molienda autógena (AG) utiliza como medios de molienda las partículas más gruesas de la misma mena, cuando se agregan bolas adicionales (entre el 4% y el 15% del volumen de la carga) se le conoce como semiautógena (SAG), este mecanismo se desarrolló buscando reducir los costos de operación por el uso de cuerpos de molienda y por las distintas etapas de trituración, los equipos autógenos pueden reducir un material grueso a partículas menores de 200 milímetros dejando la trituración a una sola etapa.

La reducción de tamaño se da por dos formas, la primera es por la separación de fragmentos de las partículas más gruesas por impacto y la segunda es por la desintegración de las más pequeñas por abrasión (Fueyo, 2002).

Capítulo 4: Análisis del Funcionamiento del Molino con Eje Excéntrico y Desarrollo Experimental.

El análisis de la posición del eje en molinos de tambor rotatorio es una variable poco estudiada, a pesar de que en la molienda planetaria se utiliza uno excéntrico con buenos resultados, sólo es usado a nivel laboratorio. La intención de modificar el punto de rotación es observar cómo afecta en el proceso y el porcentaje de reducción de tamaño según el tiempo de molienda y el gasto requerido de energía, con el objetivo de reducir los costos por el uso de esta en la molienda, buscando un equipo que se pueda implementar en un futuro en la industria. Para obtener resultados se diseñó un molino a nivel laboratorio de metalurgia, con la capacidad de desplazar el eje fuera del centro.

4.1 Funcionamiento del molino

En el capítulo dos se mencionó que la molienda de bolas se da por dos efectos en la carga, al tener el eje desplazado el movimiento rotacional será distinto y afectará los dos fenómenos antes descritos. Primero comenzaremos con el arranque, para conocer la energía requerida por el equipo al mover los medios Resnick (2002) menciona que se debe de calcular el momento de inercia (I), el cual se refiere a la oposición de la carga al movimiento. Cuando se tiene un punto de giro al centro (figura 4.1), se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (4.1)$$

Dónde:

m , Masa de la carga (kg).

r , Radio del molino (m).

I , Momento de inercia (kg/m²)

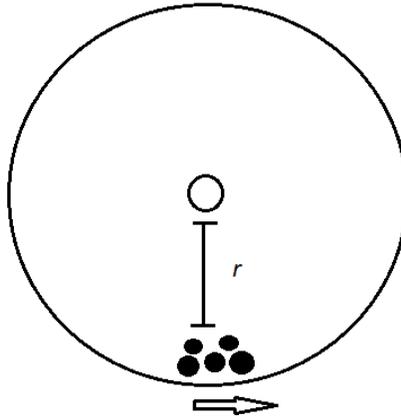


Figura 4.1, Molino con eje al centro, Elaborada por Hazel González.

Cuando se tiene el desplazamiento del eje (figura 4.2) la distancia entre él y la carga será mayor, por lo que necesitará una mayor fuerza para poder mover la masa de la carga, el momento de inercia se calculará con la siguiente fórmula:

$$I_d = I + md_e^2 \quad (4.2)$$

Dónde:

I_d , Momento de inercia de un punto de giro fuera del centro (kg/m^2).

d_e , Distancia del eje a la base del molino (m)

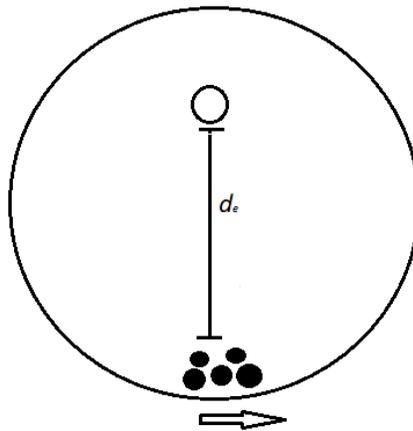


Figura 4.2 Molino con eje desplazado, Elaborado por Hazel González.

Comprendiendo estos dos principios en el movimiento rotatorio podemos ver que la potencia requerida para el arranque será mayor, por lo tanto, habrá un mayor gasto de energía, esto solo es en el arranque del molino, una vez que el equipo se encuentre en movimiento continuo el gasto energético se mantendrá estable.

El movimiento del molino cuando se encuentra en una rotación continua se idealiza en dos momentos, el primero cuando el eje ésta en el punto más alejado de la carga y el segundo es cuando se encuentra más cerca de la carga, en el primero existe una menor proyección de los medios porque la elevación de ellos es baja, sin embargo, la abrasión aumenta porque el tambor se eleva junto con la carga , debido a que rota en un eje que no se encuentra en el centro por eso el rodamiento entre los medios es mayor y el impacto disminuye, en la figura 4.3 se ilustra el movimiento explicado. Se puede observar como el tambor y una partícula se mueven respecto al eje, es visible el poco impacto y que la abrasión ésta presente en el rodamiento de los medios por el casco.

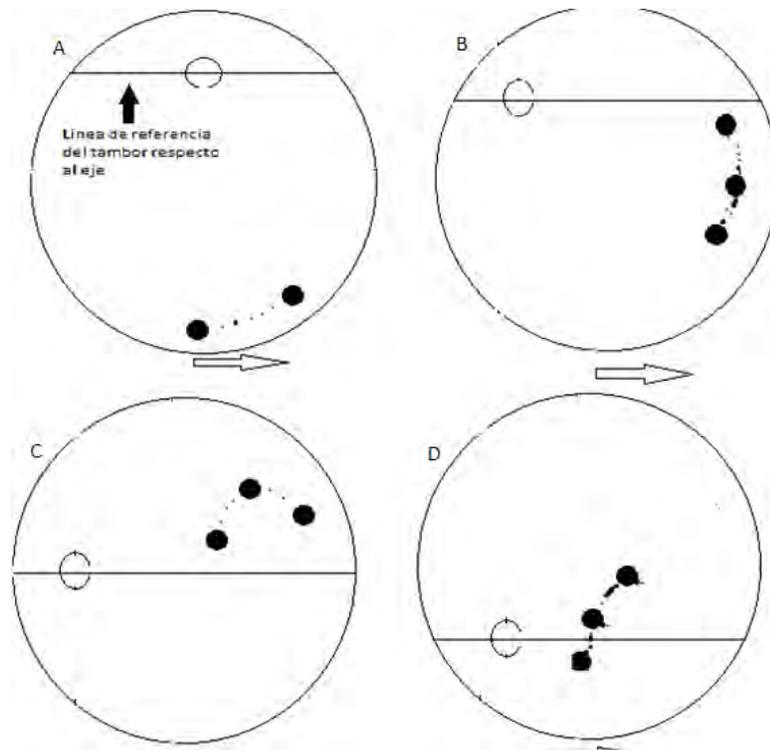


Figura 4.3, Movimiento del tambor respecto al eje, Elaborada por Hazel González.

En la otra parte del movimiento, la rotación del molino, la cual se ilustra en la figura 4.4, existe una mayor proyección de la partícula aumentando el impacto, esto se debe a la corta distancia entre el eje y la carga, por lo cual la fuerza requerida para levantar los medios es menor, sin embargo, sigue predominando la conminución por abrasión pues el tambor se mueve respecto al eje al igual que los medios, lo cual mantiene un mayor contacto entre el casco y los medios, debido a esto el producto esperado es más fino que cuando se tiene un eje al centro.

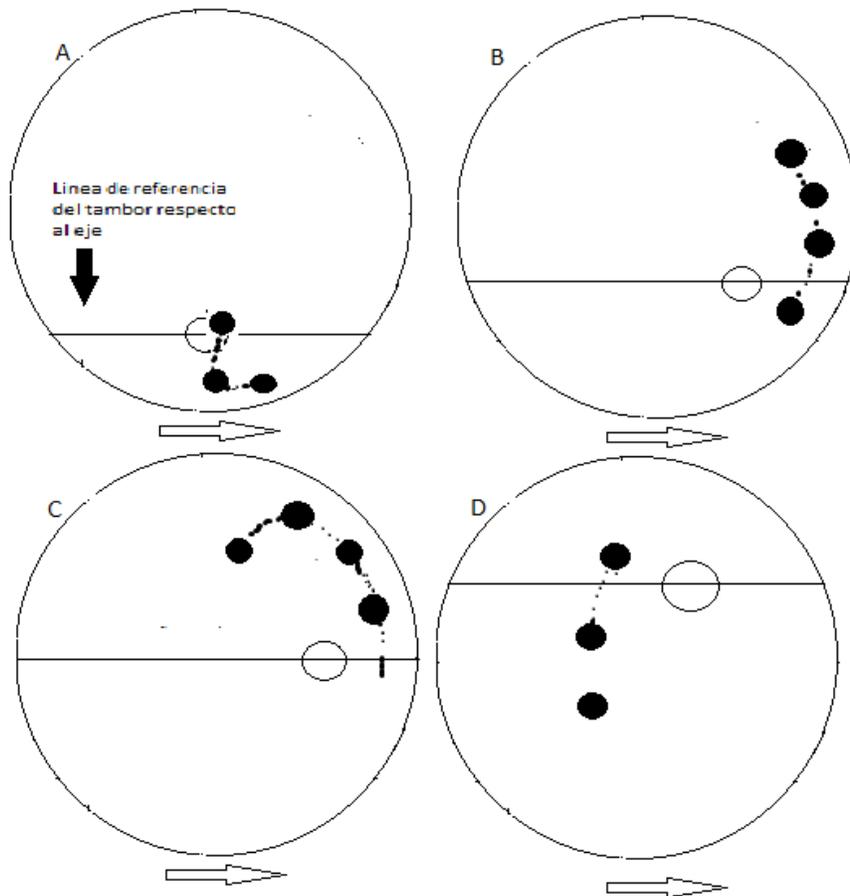


Figura 4.4 Movimiento del tambor y los medios con respecto del eje, Elaborado por Hazel González

4.2 Desarrollo Experimental

Para comprobar el funcionamiento de la molienda con eje excéntrico se diseñó en el laboratorio de metalurgia de la Facultad de Ingeniería, UNAM un molino de bolas al cual se le pudiera desplazar el eje del centro, al ser una variable poco estudiada se tomó como base para los parámetros la teoría de molinos con tambor rotatorio de bolas.

Para todas las pruebas se utilizó como medios de molienda bolas de acero y basalto como material a moler debido a su abundancia en el lugar donde se llevaron a cabo los experimentos y que, al ser el primer trabajo en estudiar el molino diseñado, la intención es observar el comportamiento de las principales componentes en la molienda despreciando las condiciones mecánicas y morfológicas del mineral. Los factores mostrados en la tabla 4.2 permanecieron como constantes, la razón es porque el equipo no permitía su modificación, por lo cual en todas las pruebas se trabajaron con el mismo valor.

| Parámetros Constantes | Valores |
|--|----------------|
| Volumen del molino (m ³) | 0.001 |
| Peso específico de bolas (t/m ³) | 7.85 |
| Peso específico del mineral (t/m ³) | 2.85 |
| Diámetro interno del molino (m) | 0.1 |
| Tipo de molienda | Seca |

Tabla 4.1 Valores de los parámetros que permanecen constantes durante todas las pruebas

Los productos obtenidos en todas las pruebas se clasificaron por dos procesos de tamizado cada uno de 10 minutos. En el primero se utilizaron los tamices con abertura de 14# a 100# mallas y en el segundo se usaron los de tamaño más pequeño de 200# a 400# mallas, se hizo de la manera mencionada para reducir la perdida por polvos y tener una mejor separación de tamaños.

4.2.1 Material Utilizado

- Juego de Tamices (10#, 14#, 20#, 35#, 60#, 80#, 100#, 200#, 325# y 400#).
- Bolas de acero (3/4", 1/2" y 1/4").
- Molino con eje desplazado.
- Brocha
- Cribadora.
- Bascula
- Charolas

4.2.2 Diseño y armado del molino

Para la instalación del equipo se rehabilito una mesa de concreto en la parte externa trasera del laboratorio (figura 4.5), se adecuó colocando una placa de acero con perforaciones donde se instalaron las diferentes piezas que conforman el molino, también se utilizaron dos aumentos de altura para permitir la rotación del molino.



Figura 4.5 Mesa de concreto antes de rehabilitarla.

Se utilizó un motor de inducción con interruptor centrífugo (figura 4.6) de 127 volts, potencia de 1 hp y una velocidad de 1000 rpm, como las revoluciones eran muy altas se acopló un reductor para trabajar con 80 rpm, a su vez este se conectó a una polea por medio de una banda, la cual era la responsable del movimiento del molino. Todos los equipos estaban en el laboratorio en desuso y fueron rehabilitados para usarse en este trabajo.



Figura 4.6 Motor acoplado a reductor.

El tambor del molino (figura 4.7) se hizo de 13 cm de largo y 10 cm de diámetro, para una capacidad de un litro, por practicidad en los cálculos, como material del cilindro se utilizó acero, con paredes internas lisas, sin revestimiento y sin empaque, por lo que el equipo no puede retener agua.



Figura 4.7 Vista interior del tambor del molino.

En la figura 4.8 se pueden ver cuatro perforaciones en las tapas de los extremos del tambor con el 0%, 20%, 40% y 80% de desplazamiento del centro, en ellas se acopla el eje, con la intención de poderlo mover y así estudiar la posición de él. Se distribuyeron los orificios así por el espacio de las tapas y para que existiera un análisis con parámetros variados.

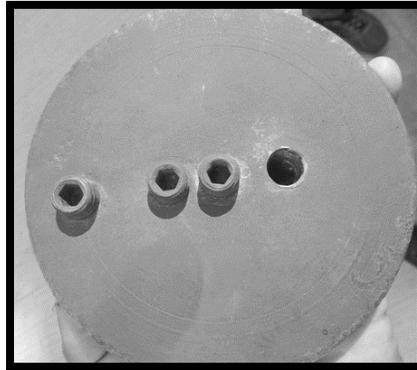


Figura 4.8, Tapa del extremo del casco, con las cuatro perforaciones.

Las perforaciones tienen tornillos, los cuales se quitan para acoplar el eje, si el orificio no se utiliza debe tener puesto el tornillo para evitar que la muestra se salga, los ejes van a baleros para permitir el giro del equipo, el movimiento del molino viene de una polea unida con una banda al reductor, el equipo armado se muestra en la figura 4.9.

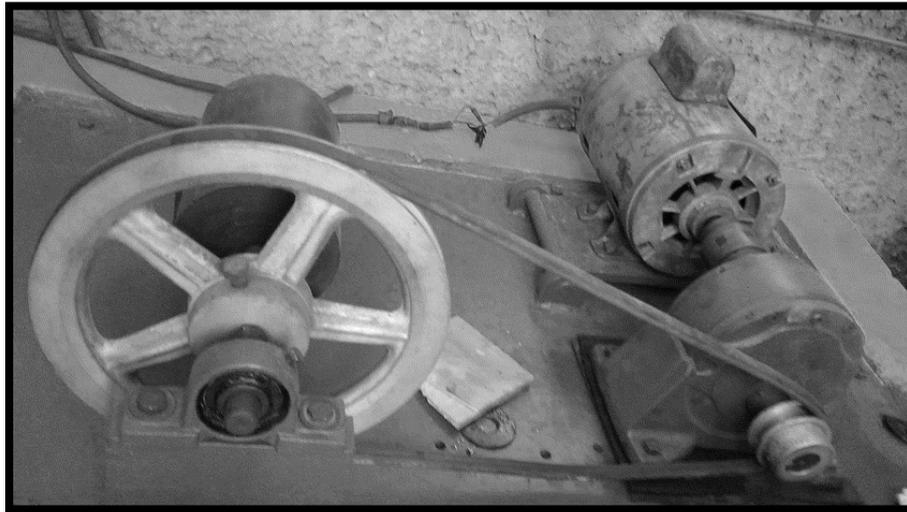


Figura 4.9. Molino con eje excéntrico a nivel laboratorio.

4.2.3 Prueba estándar

Se diseñó una prueba estándar (tabla 4.1) con medidas teóricas ideales para molienda con eje axial, los valores se obtuvieron por cálculos, tablas o recomendaciones de distintos autores, sin embargo, se usó el eje desplazado un 40% del centro, pues de las tres posiciones fuera del medio, es la que está más próxima a la mitad de las otras dos. El objetivo de esta prueba es poder variar los parámetros en ella, teniendo los demás fijos y así analizar cómo afecta en verdad cada uno.

| Prueba Estándar | |
|---------------------------------------|----------------|
| Variables | Valores |
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 40% |
| Volumen de carga (%) | 30% |
| Tamaño de alimentación (micras) | 1015 |
| Tiempo de molienda (min) | 30 |

| | |
|--|--------------------------|
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 |
| Distribución de volumen de carga (%) | Elementos a moler (30%) |
| | Medios de molienda (70%) |
| Distribución en porcentaje del tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" 79.5% |
| | 1/2" 18.5% |
| | 1/4" 2% |

Tabla 4.3, Valores de los parámetros para la prueba estándar

4.2.3.1 Descripción y cálculo de los parámetros

Tamaño de alimentación

Al basalto se le dio una preparación mecánica previa a la molienda, el producto obtenido se clasificó por medio de un tamizado durante diez minutos. La granulometría estándar elegida fue la de las partículas que se encontraban entre la malla 14# y la malla 20# que equivalen 1180 micras y 850 micras respectivamente, el promedio de las dos granulometrías es de 1015 micras, el cual fue tomado como el tamaño estándar para los cálculos y representación gráfica de los resultados. En la etapa de molienda fina se recomiendan tamaños de alimentación de 14 a 20 mallas, es por eso por lo que se utilizaron esas medidas para la prueba estándar.

Tamaño de medios de molienda

Para la elección de los tamaños de bola se aplicó la distribución de la tabla 3.2, el diámetro máximo de bola se determinó por medio de la relación con la granulometría de alimentación (ecuación 3.5).

$$\sqrt{1.015} = 1.007 \sim 1''$$

La tabla 3.2 no tiene distribución para un diámetro máximo de 1", sin embargo, en este caso Taggart (1964) recomienda utilizar la distribución para el tamaño máximo siguiente menor, por lo cual se usó el reparto para un diámetro máximo de 3/4".

Peso específico.

Para bolas de acero el peso específico es de 7.85 t/m^3 (Casillas, 1996; Duda, 1977; Errol G. Kelly, 1990), en el caso del basalto es de 2.85 t/m^3 , se midió por medio del principio de Arquímedes.

Volumen de carga

El volumen de carga total para molinos de bolas en circuito cerrado y de un solo compartimento se recomienda que sea de un 30 % a 40%, del cual el material a moler debe ser entre el 30% y 40% (Errol G. Kelly, 1990; Larota, 2015; Duda, 1977; Fueyo, 2002).

En la prueba estándar se decidió trabajar con un volumen de carga del 30 %, del mismo, el 30% es de material a moler (figura 4.10), las cantidades que fueron usadas y expresadas en unidades de peso son las siguientes:

- 1,65 kg de bolas.
- 285 g de mineral.



Figura 4.10, Molino cargado

Velocidad de trabajo.

Para calcular la velocidad crítica y así conocer la de trabajo, se recurrió a la fórmula 3.3, el valor obtenido fue de 134 rpm, tomando en cuenta la recomendación de trabajar con revoluciones al 75% de la velocidad crítica, la rapidez optima sería de 100 rpm, no obstante, los experimentos se llevaron a cabo con 80 rpm (60% de la velocidad crítica), pues las revoluciones entregadas por el reductor nos limitaban a trabajar con tal rapidez.

Tiempo de molienda

Se eligió un P_{80} menor de 0.150 mm (malla 100), pues comúnmente a partir de este tamaño comienzan a liberarse los minerales de la partícula. Los parámetros obtenidos junto con lo antes mencionado se utilizaron para calcular el tiempo de molienda. Casillas (1996) aconseja realizar una molienda cada 5 minutos, teniendo un control del peso inicial de la muestra, después de cada proceso se clasifica el material y el que pase la malla deseada se debe acumular, al resto se le adiciona más muestra para completar el

peso original, así se hace consecutivamente hasta que el mineral acumulado sea igual al peso inicial suministrado.

La suma de los tiempos de las pruebas hechas será el tiempo necesario para que el 100% de la muestra se obtenga en el tamaño buscado, pero esto en la molienda es poco viable por el gasto de energía, por esa razón el tiempo de molienda es el 80% del antes mencionado. Por medio del anterior proceso se determinó que el tiempo estándar de molienda es de 30 min.

4.2.4 Pruebas variando distintos factores.

El molino diseñado tiene como principal objetivo el estudio de la posición del eje como variable, el cual puede tener 4 distintas ubicaciones, estas se expresarán en porcentaje de desplazamiento del centro, una es como se encuentra comúnmente al 0%, la cual ayuda a poder comparar en el mismo equipo los resultados de la molienda en un eje axial y en uno excéntrico. Las otras tres serán las que den datos para analizar que tanto afecta la posición del eje en el funcionamiento del molino, los desplazamientos son del 20%, 80% y 40%, siendo la última la ubicación estándar.

Además de la posición del eje se consideraron modificar otros factores, para observar cuánto impactan en la molienda y deducir las condiciones óptimas de la misma cuando se tiene un punto de giro fuera del centro. Se debe recordar que, en las pruebas para cada parámetro el factor variado es el único que se modifica, los demás permanecen como constantes. Las medidas variadas fueron las siguientes:

- Posición del eje
- Tiempo de molienda.
- Volumen de carga.
- Distribución del volumen de carga.
- Tamaño de medios de molienda.
- Tamaño de alimentación.

Capítulo 5: Representación Gráfica y Discusión de Resultados.

En este capítulo se representarán y analizarán los resultados obtenidos a través de los experimentos con la variación de los parámetros anteriormente mencionados. Los datos se analizaron primero por factor, de esa forma se llegó a un resultado general del proceso donde se logró comparar todas las variables, los tamaños de partícula están expresados como tamaño medio en micras, el cual se obtuvo promediando las granulometrías de las dos mallas en micras, donde quedaba atrapado el mineral.

Análisis de las pruebas variando la posición del eje.

En el análisis del desplazamiento del eje, se realizaron tres pruebas, manteniendo los demás factores estándar constantes. En la tabla 4.1 se muestran los valores utilizados para dichas pruebas.

| Variable | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 0 | 20 | 80 |
| Constantes | Valores estándar | | |
| Volumen de carga (%) | 30 | 30 | 30 |
| Tamaño de alimentación (micras) | 1015 | 1015 | 1015 |
| Tiempo de molienda (min) | 30 | 30 | 30 |
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 | 90 | 90 |
| Distribución del volumen de carga (%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) |
| | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) |
| Distribución de tamaño de Distribución de tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" 72% | 3/4" 72% | 3/4" 72% |
| | 1/2" 18.5% | 1/2" 18.5% | 1/2" 18.5% |
| | 1/4" 2% | 1/4" 2% | 1/4" 2% |

Tabla 5.1, Valores de los parámetros para las pruebas 1,2 y 3.

| Granulometría media (micras) | Porcentaje Retenido (%) | | | |
|------------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|
| | Prueba Estándar | Prueba 1 | Prueba 2 | Prueba 3 |
| 1015 | 0.250 | 1.538 | 0.399 | 0.145 |
| 637.5 | 2.608 | 4.077 | 2.972 | 4.971 |
| 337.5 | 3.644 | 6.438 | 5.872 | 6.096 |
| 215 | 6.217 | 7.296 | 6.452 | 7.039 |
| 165 | 10.611 | 17.411 | 11.453 | 12.046 |
| 112.5 | 36.906 | 42.104 | 43.277 | 39.768 |
| 60 | 31.154 | 17.096 | 24.465 | 26.161 |
| 41.5 | 5.645 | 2.969 | 3.407 | 3.012 |
| 35 | 2.965 | 0.072 | 1.704 | 0.762 |

Tabla 5.2, Distribución granulométrica para las pruebas 1, 2 y 3.

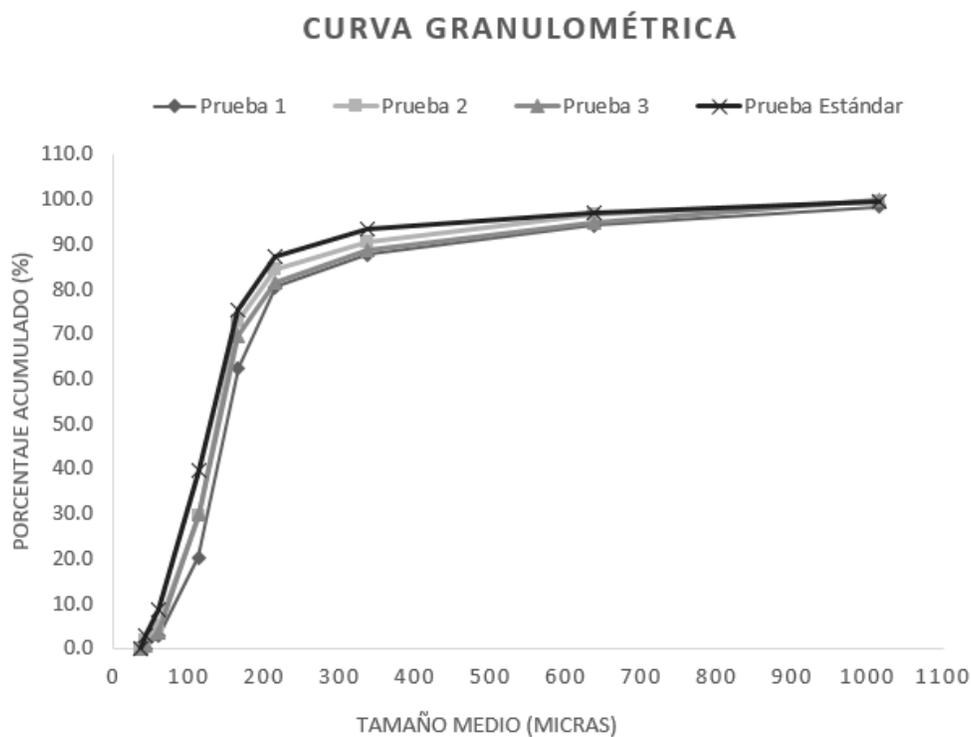


Figura 5.1, Representación gráfica del porcentaje acumulado para el tamaño medio para las pruebas 1, 2 y 3.

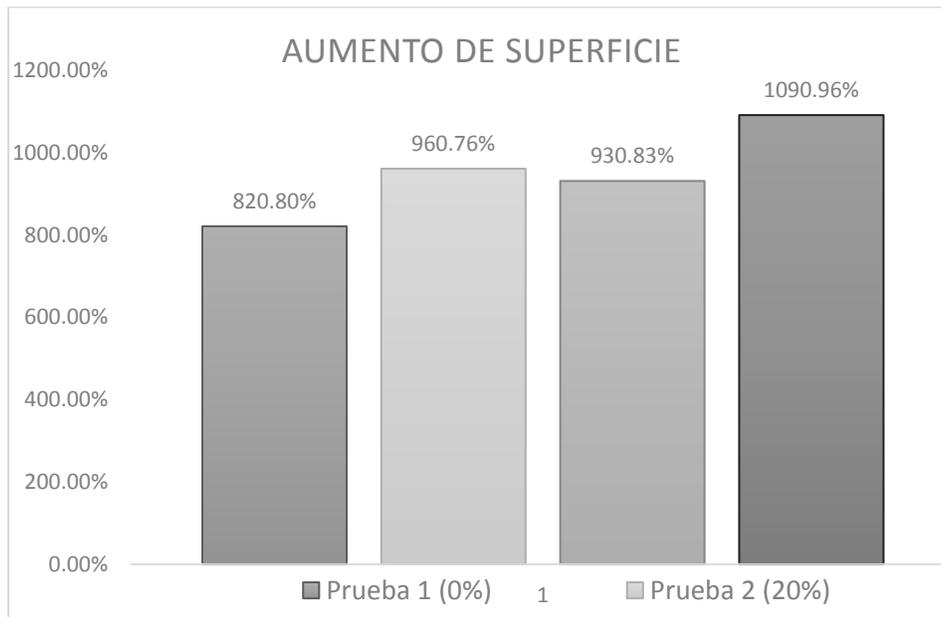


Figura 5.3, Gráfico de barras para el porcentaje de aumento de superficie en cada prueba.

En la tabla 5.2 y figura 5.1 se muestra y compara la distribución de tamaños del producto de la prueba estándar y las realizadas variando la ubicación del punto de giro. En la prueba 1 se encuentra la granulometría más gruesa, la cual se reduce cuando se comienza a desplazar el eje (prueba 2), alcanzando el menor diámetro de partícula en la prueba estándar, pues en la prueba 3 aumenta el tamaño de grano de la distribución, las curvas granulométricas están considerablemente pegadas y se podría realizar una interpretación errónea, con curvas casi igual, sin embargo, si se observa las curvas de la prueba 1 y la prueba estándar en realidad tienen un distanciamiento en el área de los finos, en el caso de la prueba 2 y 3 se muestran con valores medios entre ellas, no obstante en las granulometrías finas se ven superiores, a la prueba con el 0% de desplazamiento .

En la figura 5.3 se muestra el aumento de superficie en porcentaje, recordemos que mientras la muestra se fragmente en partículas más finas aumentará su área de contacto, el menor aumento de superficie se encuentra en la prueba 1, mientras que en las otras tres se obtuvieron porcentajes más altos, siendo la prueba estándar la de mayor aumento.

Análisis de pruebas modificando el tiempo de molienda.

Se modificó el tiempo de molienda 10 minutos más y 10 minutos menos, en dos distintas pruebas con los demás valores constantes, la intención es observar cuanto es el cambio en la granulometría del producto, y comparar si se comporta igual que en el eje axial al tiempo.

| Variable | Prueba 4 | Prueba 5 |
|---|--------------------------|--------------------------|
| Tiempo de molienda (min) | 20 | 40 |
| Constantes | Valores estándar | |
| Volumen de carga (%) | 30 | 30 |
| Tamaño de alimentación (micras) | 1015 | 1015 |
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 40 | 40 |
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 | 90 |
| Distribución del volumen de carga (%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) |
| | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) |
| Distribución de tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" 72% | 3/4" 72% |
| | 1/2" 18.5% | 1/2" 18.5% |
| | 1/4" 2% | 1/4" 2% |

Tabla 5.3, Valores de los parámetros para las pruebas 4 y 5.

| Granulometria media (micras) | Porcentaje Retenido (%) | | |
|------------------------------|-------------------------|----------|----------|
| | Prueba Estándar | Prueba 4 | Prueba 5 |
| 1015 | 0.250 | 1.322 | 0.071 |
| 637.5 | 2.608 | 8.503 | 0.286 |
| 337.5 | 3.644 | 9.825 | 0.785 |
| 215 | 6.217 | 12.683 | 5.532 |
| 165 | 10.611 | 27.617 | 8.315 |
| 112.5 | 36.906 | 24.366 | 33.976 |
| 60 | 31.154 | 8.932 | 28.801 |
| 41.5 | 5.645 | 5.395 | 15.703 |
| 35 | 2.965 | 1.358 | 6.531 |

Tabla 5.4, Granulometría obtenida para las pruebas 4 y 5.

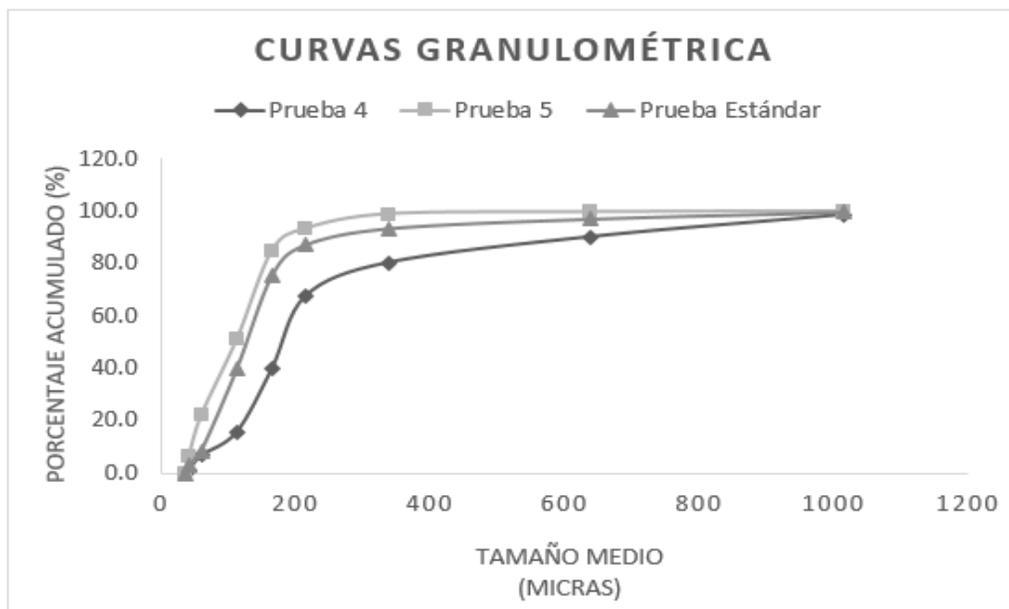


Figura 5.4 Curvas granulométricas, de las pruebas 4 y 5.

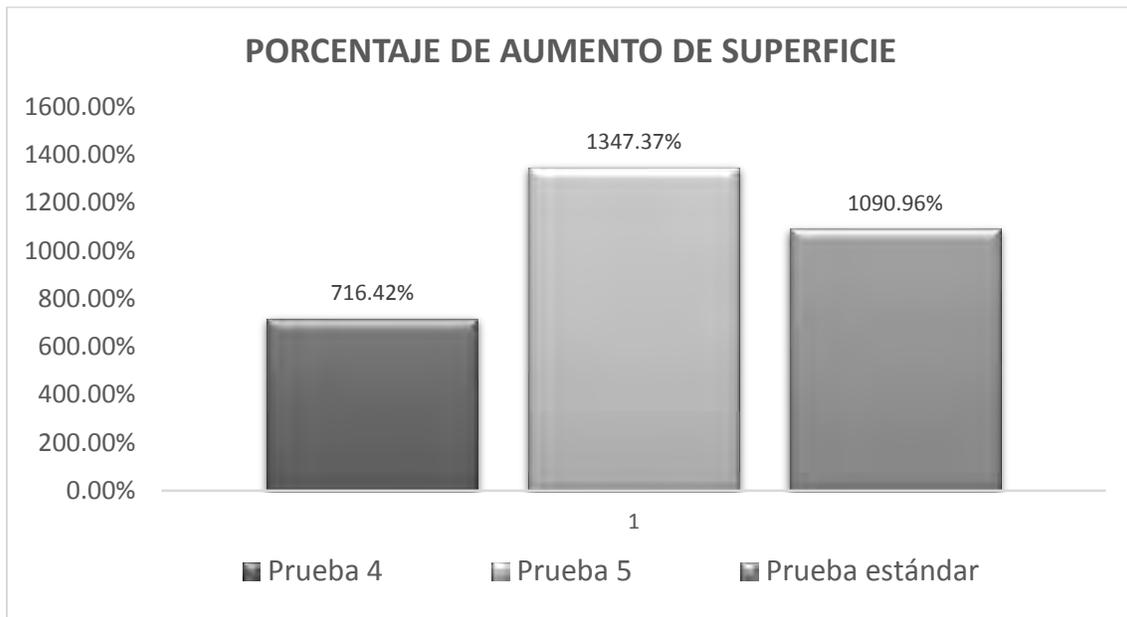


Figura 5.5, Aumento de superficie modificando el tiempo.

Observando la tabla 5.4 y las figuras 5.4 se ve que el cambio en la distribución granulométrica en finos es mayor cuando se aumenta de 20 min a 30 min la molienda, en el caso de 30 min a 40 min la cantidad de tamaños gruesos es similar, en el porcentaje menor a 165 micras sólo se amplió un 10%, sin embargo, existe un 20% más en tamaños menores de 60 micras, en la figura 5.5 se puede observar que en los dos incrementos de tiempo, la superficie aumenta alrededor del 300%.

Análisis de las pruebas modificando el volumen de carga

La variación del volumen de carga se vareo al 40% y 50%, pues la literatura de molinos con tambor rotatorio de eje axial (Errol G. Kelly, 1990; Larota, 2015) recomienda estos porcentajes, debido a que la potencia del molino se desarrolla en su máximo punto en esos valores.

| Variable | Prueba 6 | Prueba 7 |
|---|--------------------------|--------------------------|
| Volumen de carga (%) | 40 | 50 |
| Constantes | Valores estándar | |
| Tiempo de molienda (min) | 30 | 30 |
| Tamaño de alimentación (micras) | 1015 | 1015 |
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 40 | 40 |
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 | 90 |
| Distribución del volumen de carga (%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) |
| | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) |
| Distribución de tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" 72% | 3/4" 72% |
| | 1/2" 18.5% | 1/2" 18.5% |
| | 1/4" 2% | 1/4" 2% |

Tabla 5.6 Valores de los parámetros de las pruebas 6 y 7

| Granulometría media (micras) | Porcentaje Retenido (%) | | |
|------------------------------|-------------------------|----------|----------|
| | Prueba Estándar | Prueba 6 | Prueba 7 |
| 1015 | 0.250 | 0.270 | 2.139 |
| 637.5 | 2.608 | 7.132 | 13.060 |
| 337.5 | 3.644 | 9.440 | 27.486 |
| 215 | 6.217 | 11.208 | 7.418 |
| 165 | 10.611 | 12.466 | 10.148 |
| 112.5 | 36.906 | 24.393 | 16.633 |
| 60 | 31.154 | 13.485 | 9.420 |
| 41.5 | 5.645 | 12.286 | 7.122 |
| 35 | 2.965 | 9.320 | 6.576 |

Tabla 5.7 Granulometría obtenida por las pruebas 6 y 7

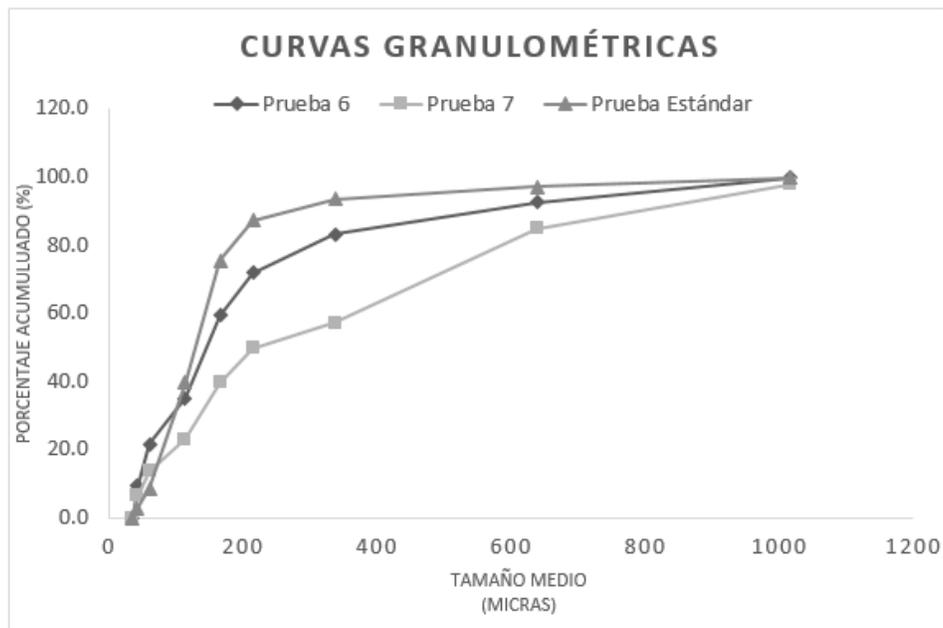


Figura 5.6 Curvas granulométricas de las pruebas 6 y 7

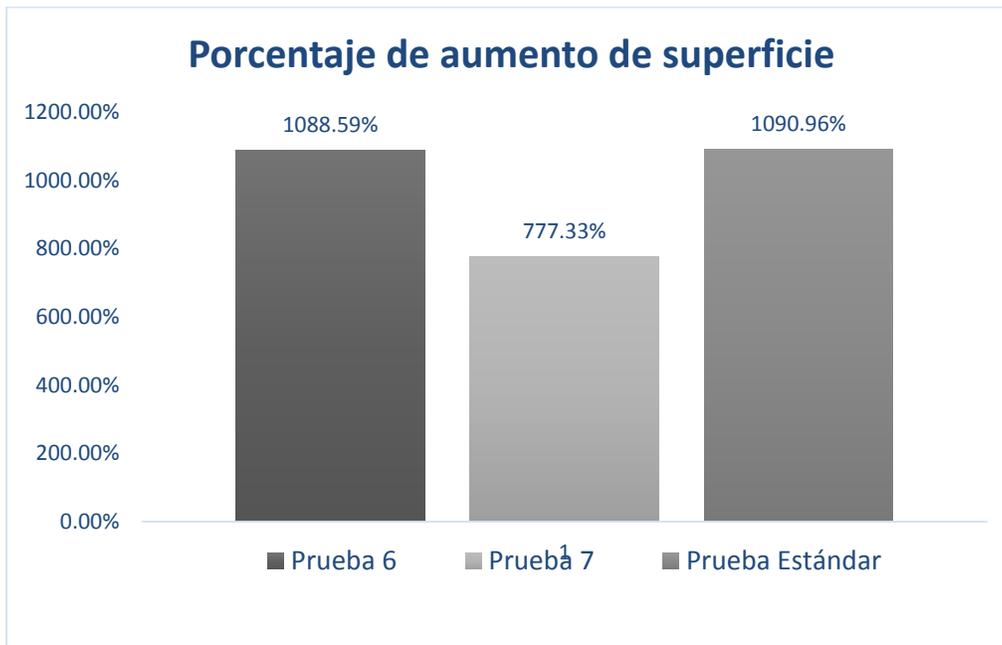


Figura 5.7 Aumento de superficie para las pruebas 6 y 7

En las curvas granulométricas (figura 5.6) y la tabla 5.7 se puede observar la mayor distribución en las granulometrías más gruesas en la prueba 7 a diferencia de la 6 y la estándar, en comparación con la última se obtuvieron un mayor porcentaje en los dos tamaños más finos (41.5 - 35 micras). De la prueba estándar a la 6 existe un aumento del 3% al 5% en los tamaño más gruesos (1015 micras-165 micras), en el caso de los más finos ocurren dos situaciones, la primera cuando llega a un diámetro de partícula de 112.5 y 60 micras, se encuentra un 10% y 20% menos, respectivamente en la prueba 6, sin embargo, en los dos menores al último vuelve a haber un incremento del 7% aproximadamente en ambos.

Análisis de la prueba modificando la distribución en el volumen de carga

Para esa variable sólo se realizó una prueba porque la teoría para molienda con eje axial dicta que la distribución del volumen de carga debe tener los elementos moledores de un 30% a un 40% y el resto de medios de molienda.

| Variable | Prueba 8 | |
|---|--------------------------|-------|
| Distribución del volumen de carga (%) | Elementos a moler (40%) | |
| | Medios de molienda (60%) | |
| Constantes | Valores estándar | |
| Tiempo de molienda (min) | 30 | |
| Tamaño de alimentación (micras) | 1015 | |
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 40 | |
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 | |
| Volumen de carga (%) | 30 | |
| Distribución de tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" | 72% |
| | 1/2" | 18.5% |
| | 1/4" | 2% |

Tabla 5.8, Valores de los parámetros para la prueba 8.

| Granulometría media (micras) | Porcentaje Retenido (%) | |
|------------------------------|-------------------------|----------|
| | Prueba Estándar | Prueba 8 |
| 1015 | 0.250 | 0.448 |
| 637.5 | 2.608 | 9.761 |
| 337.5 | 3.644 | 16.746 |
| 215 | 6.217 | 6.806 |
| 165 | 10.611 | 13.433 |
| 112.5 | 36.906 | 22.478 |
| 60 | 31.154 | 13.642 |
| 41.5 | 5.645 | 12.925 |
| 35 | 2.965 | 3.761 |

Tabla 5.9, Tamaño de partícula obtenida para la prueba 9.

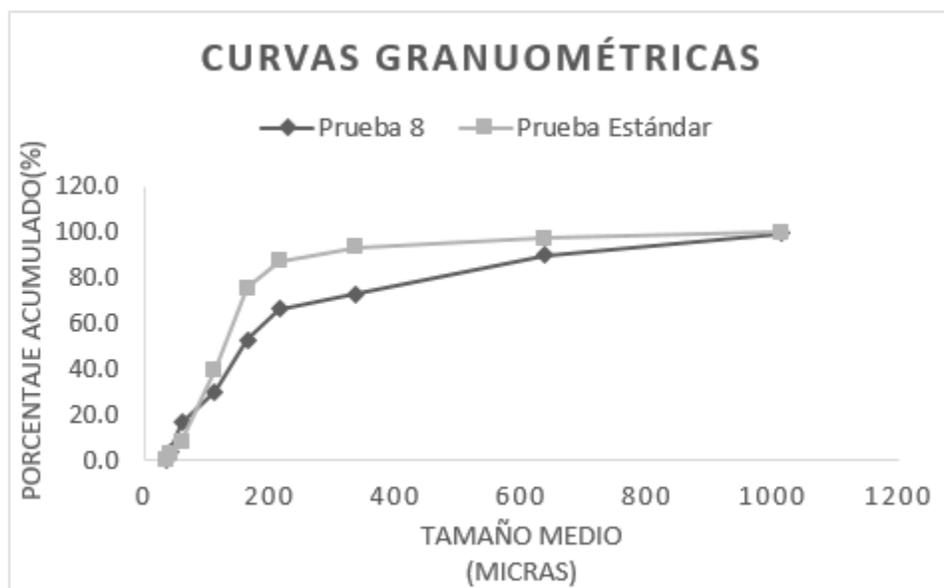


Figura 5.8, Curva granulométrica para la prueba 8.

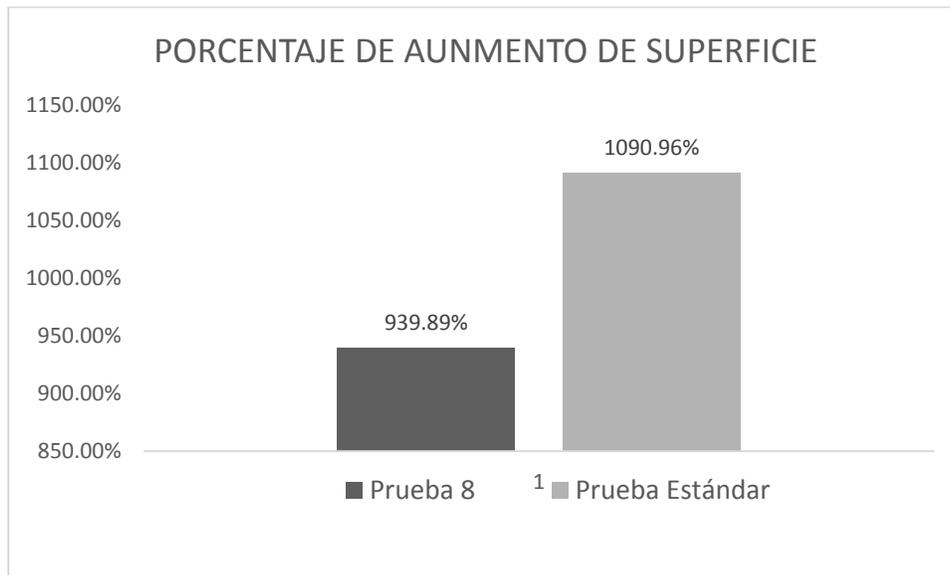


Figura 5.9, Aumento de superficie para la prueba 8.

Los datos de la prueba 8 en comparación con la estándar (tabla 5.8 y figura 5.8), se encontró, en las granulometrías que van de 1015 micras a 165 micras (diámetros más gruesos), con la excepción de la primera y la de 215 micras, un aumento en la distribución del 3% al 13 %, en las dos restantes se mantuvo similar, en el caso de los tamaños de 112.5 micras y 60 micras hubo un decremento de entre el 10% y el 20%. En los dos diámetros más pequeños (41.5 y 35 micras) se halló un mayor porcentaje en la prueba 8. El incremento más grande en la superficie de las partículas (figura 5.9) estuvo en la prueba estándar, 130% más que en la 8.

Análisis de las pruebas cuando se modifica el tamaño de medios de molienda

En el caso de esta variable se realizaron tres pruebas sin distribución de medios de molienda, los tamaños que se ocuparon fueron los sugeridos para la repartición de bolas, esto con el objetivo de ver si en la molienda excéntrica existe una mejor respuesta cuando se tiene un solo tamaño de bola.

| Variable | Prueba 9 | Prueba 10 | Prueba 11 |
|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" | 1/2" | 1/4" |
| Constantes | Valores estándar | | |
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 40 | 40 | 40 |
| Tamaño de alimentación (micras) | 1015 | 1015 | 1015 |
| Tiempo de molienda (min) | 30 | 30 | 30 |
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 | 90 | 90 |
| Volumen de carga (%) | 30 | 30 | 30 |
| Distribución del volumen de carga (%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) |
| | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) |

Tabla 5.10, valores de los parámetros para las pruebas 9, 10 y 11.

| Granulometría media (micras) | Porcentaje Retenido (%) | | | |
|------------------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|
| | Prueba Estándar | Prueba 9 | Prueba 10 | Prueba 11 |
| 1015 | 0.250 | 0.036 | 0.036 | 0.72 |
| 637.5 | 2.608 | 5.568 | 3.35 | 2.02 |
| 337.5 | 3.644 | 9.725 | 5.062 | 2.87 |
| 215 | 6.217 | 7.701 | 10.269 | 7.29 |
| 165 | 10.611 | 12.111 | 12.017 | 6.98 |
| 112.5 | 36.906 | 28.380 | 28.441 | 32.31 |
| 60 | 31.154 | 17.064 | 15.696 | 19.71 |
| 41.5 | 5.645 | 18.004 | 15.805 | 20.16 |
| 35 | 2.965 | 1.410 | 9.323 | 7.94 |

Tabla 5.11, granulometría obtenida para las pruebas 9, 10 y 11.

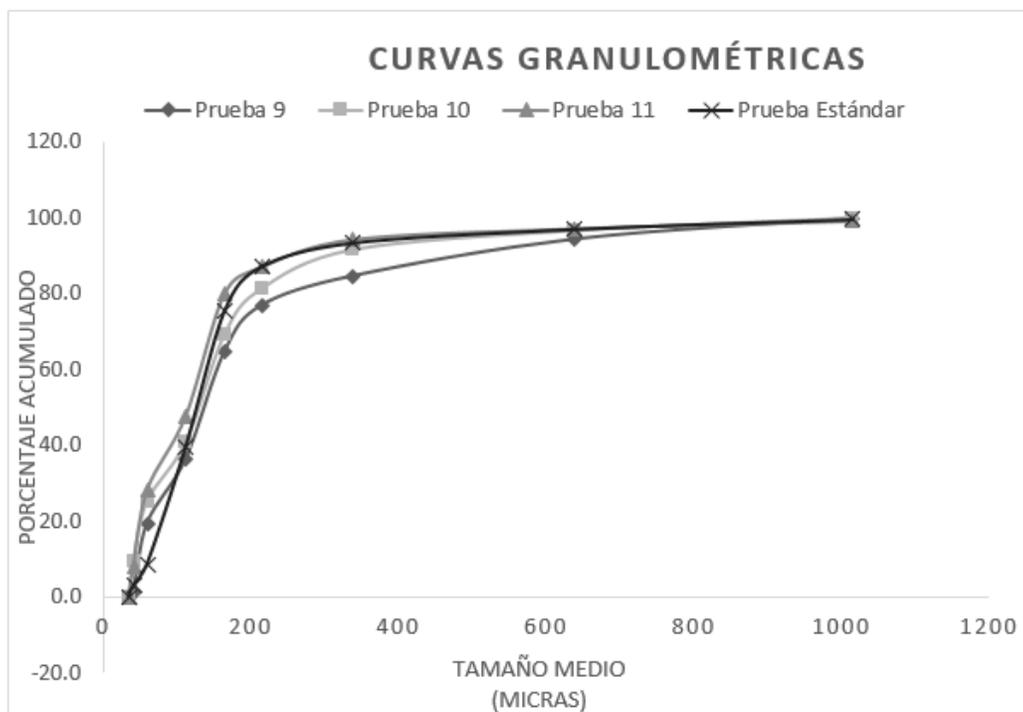


Figura 5.10, Curvas granulométricas para las pruebas 9, 10 y 11.

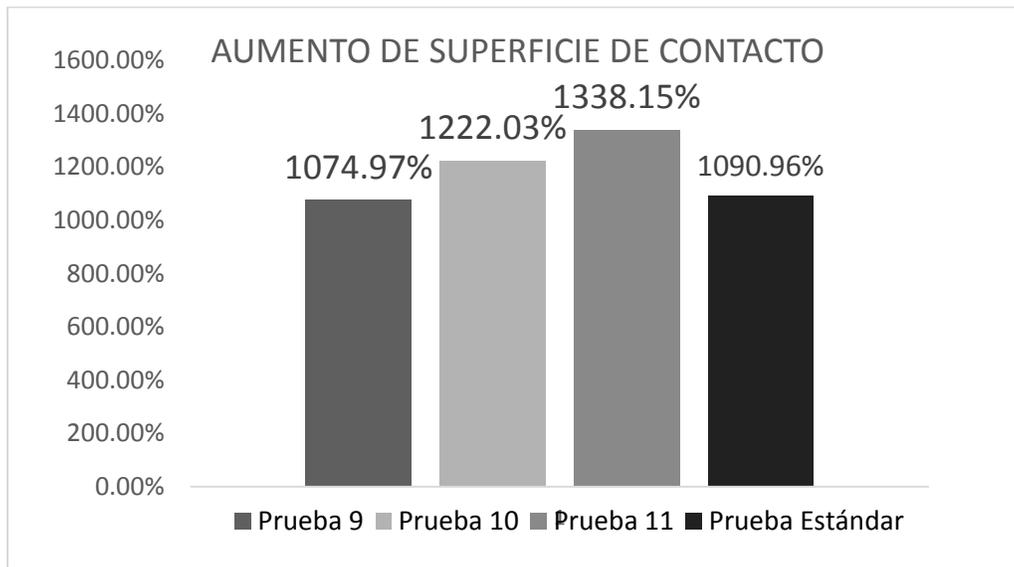


Figura 5.11, aumento de superficie de contacto para la prueba 9, 10 y 11.

Con las curvas de la figura 5.10 se observa un comportamiento similar en las pruebas 9, 10 y estándar. En el caso de la prueba 11 hubo una menor cantidad de muestra en los tamaños de 1015 micras a 60 micras con respecto a la prueba estándar, en los dos tamaños más finos (41.5 micras y 35 micras) se halló incremento del 20 %, con lo cual alcanzo un aumento de superficie del 248% (figura 5.11) más que en la estándar. En la figura 5.11 se ve el segundo mejor acrecentamiento de superficie en la prueba 10, esto se debe a que el porcentaje de muestra retenido en el tamaño de 41.5 micras fue un 13% mayor que cuando se utilizaron los valores estándar.

Análisis de las pruebas cuando se modifica el tamaño de alimentación.

El tamaño de alimentación se varió a dos granulometrías, con el fin de encontrar si el aumento de superficie era similar, ver qué tamaño de alimentación era el óptimo y si podría servir como molino para granulometrías ultrafinas, en el caso de las curvas granulométricas se utilizó una escala semilogarítmica, debido a las diferencias de tamaños de partículas.

| Variable | Prueba 12 | Prueba 13 |
|---|--------------------------|--------------------------|
| Tamaño de alimentación (micras) | 1440 | 215 |
| Constantes | Valores estándar | |
| Volumen de carga (%) | 30 | 30 |
| Desplazamiento del eje del centro (%) | 40 | 40 |
| Tiempo de molienda (min) | 30 | 30 |
| Velocidad de trabajo (rpm) | 90 | 90 |
| Distribución del volumen de carga (%) | Elementos a moler (30%) | Elementos a moler (30%) |
| | Medios de molienda (70%) | Medios de molienda (70%) |
| Distribución de tamaño de medios de molienda (in) | 3/4" 72% | 3/4" 72% |
| | 1/2" 18.5% | 1/2" 18.5% |
| | 1/4" 2% | 1/4" 2% |

Tabla 5.12 Valores de los parámetros para las pruebas 12 y 13

| Granulometría media (micras) | Porcentaje Retenido (%) | | |
|------------------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| | Prueba Estándar | Prueba 12 | Prueba 13 |
| 1440 | N/A | 0.909 | N/A |
| 1015 | 0.250 | 2.254 | N/A |
| 637.5 | 2.608 | 6.688 | N/A |
| 337.5 | 3.644 | 11.923 | N/A |
| 215 | 6.217 | 9.415 | 5.811 |
| 165 | 10.611 | 9.851 | 14.240 |
| 112.5 | 36.906 | 26.027 | 44.118 |
| 60 | 31.154 | 13.631 | 14.957 |
| 41.5 | 5.645 | 12.141 | 9.397 |
| 35 | 2.965 | 7.161 | 11.478 |

Tabla 5.13 Granulometría obtenida por las pruebas 12 y 13.

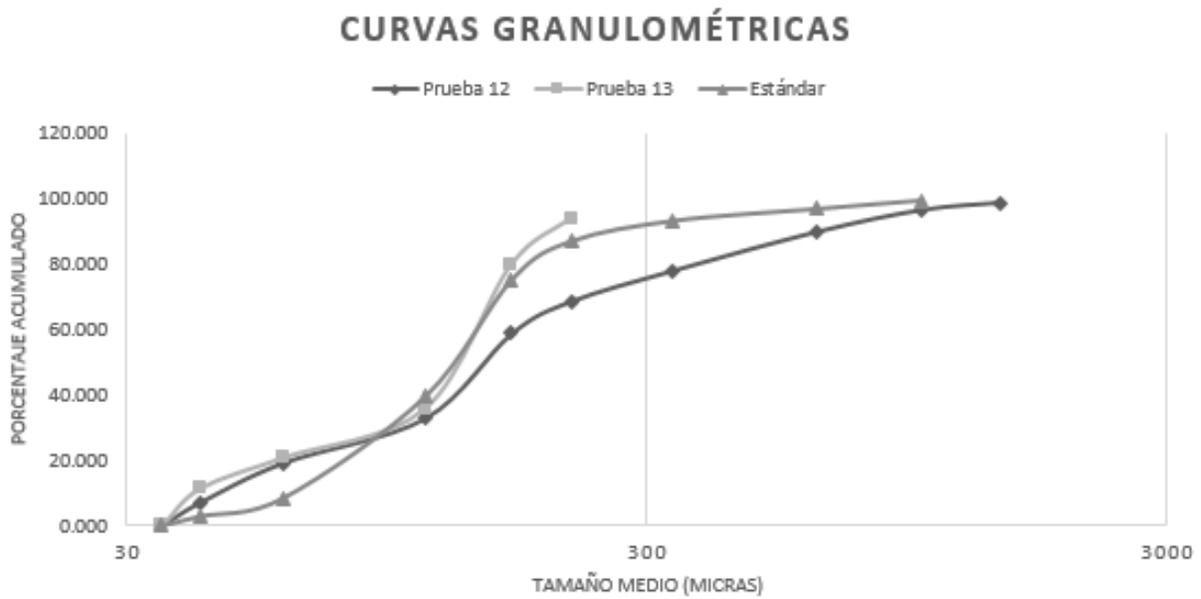


Figura 5.12, Curvas granulométricas para las pruebas 12 y 13

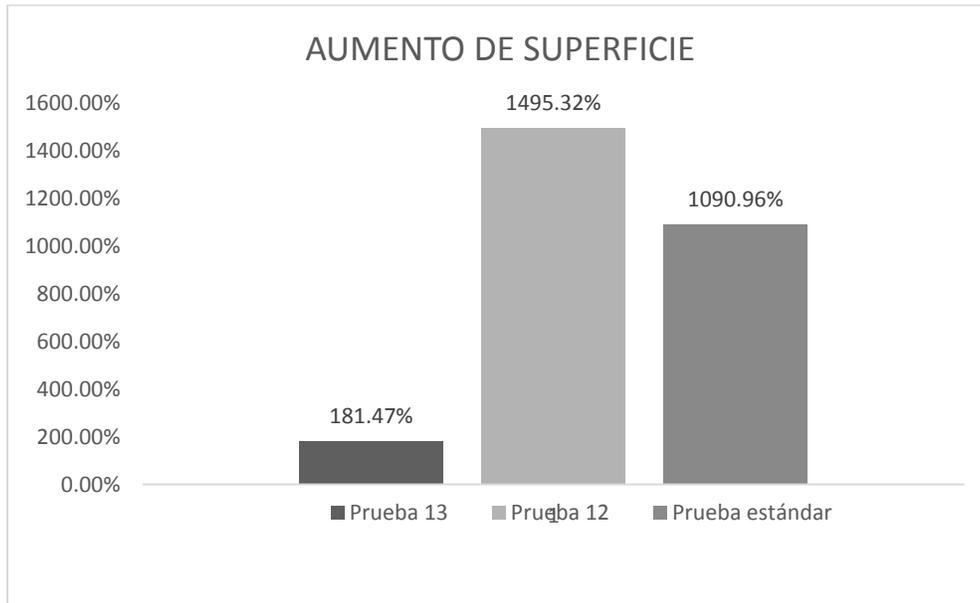


Figura 5.13, Aumento de superficie de las pruebas 12 y 13.

En las curvas granulométricas (figura 5.12) es visible la poca distribución de tamaños de la prueba 13, con la tabla 5.12 nos podemos dar cuenta que el mayor porcentaje de la muestra se concentró en 112.5 micras y en el menor tamaño (35 micras) un 9 % más que en la prueba estándar. En la prueba 12 se obtuvo un mayor porcentaje de tamaños en las granulometrías que van de 1015 micras a 112.5 micras (gruesas), sin embargo en las dos granulometrías más finas (41.5 micras y 35 micras) se obtuvo un 12% más aproximadamente que en la prueba estándar. En la cuestión del aumento de superficie (figura 5.13), la prueba con el tamaño de alimentación más fino tuvo un incremento demasiado pequeño en comparación de todas las pruebas, lo cual fue todo lo contrario con la prueba 13 la cual tuvo el mayor aumento de superficie de las pruebas incluyendo la estándar.

Discusión

Los mejores resultados en el desplazamiento del eje se encontraron cuando hay se movió el eje un 40% del centro (prueba estándar), esto puede deberse a la velocidad de trabajo, la cual se encuentra por debajo de la rapidez recomendada para los molinos con eje axial (Errol G. Kelly, 1990; Deblas, 2013), pues al tener un movimiento excéntrico la fuerza centrífuga aumenta y esto causa que se requiera una menor velocidad que en un equipo de eje al centro. Se alcanzan productos más finos ya que la principal molienda es por abrasión. Cuando el eje es desplazado del centro un 80%, se encuentra un producto más grueso que en la prueba estándar, esto puede ser debido a que la velocidad es alta si se compara el aumento de la fuerza centrífuga.

El factor tiempo presenta un aumento proporcional como en la molienda axial, en este caso el tamaño de grano depende de lo fino que se requiera el material y con ello el tiempo que se dejará trabajar el equipo.

En el caso del volumen de carga, en las pruebas 6 y 7 (principalmente en la primera), existió una mayor cantidad de tamaños finos, pues al existir una mayor cantidad de medios y mineral existe un mayor contacto, por lo tanto una mayor abrasión, sin embargo, en comparación de la prueba estándar, el aumento de superficie fue mayor en la última mencionada, en el caso de la distribución se obtuvo un aumento de superficie con los valores de la prueba estándar, aunque fue de sólo un 100% más, al parecer no es un factor que impacte tanto en la molienda excéntrica.

Como se ha reiterado ya la molienda con eje excéntrico depende principalmente de la abrasión para la fragmentación de las partículas, por lo cual funciona mejor con un solo tamaño de bola, cuando es de 1/2" y un 1/4", al igual que en la molienda planetaria (Fueyo, 2002; Valladares, 2008) pues el área de contacto es mayor, esto aumenta la superficie de fricción entre las bolas y las partículas, dándole mayor oportunidad a la abrasión.

El equipo funciona bien para alimentaciones que van de -10# mallas a -20# mallas gruesas, incluso se obtiene un incremento de superficie mayor, pues por el mecanismo las fragmenta por compresión y después, las partículas son reducidas de tamaño por abrasión, sin embargo, el aumento en la fricción entre la carga no es la suficiente para tener fragmentación por abrasión en partículas menores a las -100 mallas.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

- Se tienen productos más finos con un eje excéntrico, con el desplazamiento del eje al 40% se obtuvieron los mejores resultados.
- Se recomienda hacer modificaciones en el equipo para tener un desplazamiento en el eje del 60% y un eje fuera del molino, el primero con el objetivo de ver si se tiene una molienda mejor que con el 40% o si es en este punto donde comienza a decaer la eficiencia del molino; el segundo punto es con el fin de ver si es posible obtener una molienda más fina, ya que aumentarían la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga.
- A pesar de que la velocidad de trabajo es menor que la recomendada para molinos con eje axial, se obtienen buenos resultados. Como recomendación, se deberán hacer modificaciones a la polea del equipo y así ver el efecto de la variación de la velocidad con eje excéntrico.
- El mayor aumento de superficie se encontró a un volumen de carga del 30% con una distribución de medios de molienda del 70%.
- En el caso del tamaño de medios de molienda es un factor que afecta el tamaño del producto, el mejor es cuando las bolas tienen un tamaño de $\frac{1}{4}$ de pulgada.
- Los desplazamientos sugeridos son para los tamaños de alimentación recomendados en molinos con eje axial, pues la aplicación en molienda ultrafina no es óptima.
- Se deben hacer modificaciones en el equipo para estudiar la molienda excéntrica por vía húmeda además de un análisis en el desgaste de revestimientos y medios de molienda debido a la mayor fractura por abrasión, lo cual podría impactar en los costos, así como las transformaciones que se deben hacer una planta para implementar un molino con eje excéntrico.

- Para su uso en la industria se deben hacer más estudios en las variables analizadas teniendo como base los resultados aquí mostrados, también modificar factores como la velocidad de trabajo y la potencia del motor, sin embargo su uso en pruebas para laboratorio donde se requiera llegar a un aumento alto de superficie en las partículas es viable utilizarlo
- En otros trabajos se deben hacer pruebas combinando las condiciones óptimas descritas en esta tesis.

REFERENCIAS

- Alzate, L. M. (2016). *ESTUDIO DEL CONSUMO DE ENERGÍA EN MOLIENDA HUMEDA DE UN MINERAL CONSIDERANDO REOLOGÍA DE SUSPENSIONES*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Ampuero, P. (2012). *Dimensionamiento de molinos de bolas por el método de Bond, aplicando factores correctores de la fórmula*. Universidad de Atacama.
- (2017). *Apuntes de conminución*. tomado de <http://portal.udea.edu.co>: Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.
- Casillas, J. d. (1996). *Prácticas de laboratorio de la asignatura preparación mecánica de minerales*. México, Distrito Federal.: Facultad de Ingeniería, UNAM:.
- Deblas, J. M. (2013). Balance energético, leyes de desintegración y distribución del tamaño durante el proceso. . *Recuperado de <http://tecnologiafarmaceutica.blogspot.mx>*.
- Duda, W. H. (1977). *Manual Tecnológico del Cemento*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados.
- Errol G. Kelly, D. S. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. Primera edición. México: Limusa.
- Fueyo, L. (2002). *Equipos de trituración, molienda y clasificación*. Segunda edición: Editorial rocas y minerales.
- George, R. R., & Angel, R. C. (2009). *EVALUACION DEL CHANCADO, MOLIENDA Y FLOTACIÓN PARA LA AMPLIACIÓN DE PLANTA DE 3 600 A 4 200 TMSD EN LA UNIDAD MINERA Y AULIY ACU - EMPRESA MINERA LOS QUENUALES S. A. (Tesis licenciatura)*. Peru, Huancayo: Universidad Nacional del Centro de Perú .
- González, J. L. (2003). *Metalurgia Mecánica* . México, D.F.: Limusa.
- Hartman, L. H. (1992). *SME Mining Engineering Handbook*. Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc .
- Juan Fco. Hinojosa E., J. I. (2010). *Informe final del Taller de diseño Mecánico*. Chile, Santiago: Univeridad de Chile.
- Larota, S. E. (2015). *Apuntes de molienda*. Industrias I .
- Martínez, R. R. (2006). *Efecto de la distribución del tamaño de bola en la molienda de Cu y CuO y el aleado mecánico de Cu-15% atómico de Al en un molino horizontal de bolas (tesis licenciatura)*. Hidalgo, Pachuca: U.A.E.H.

O. J. A. Barragán, M. M. (2001). MOLIENDA TREPIDATORIA Y CLASIFICACIÓN SIMULTANEA DE WOLLASTONITA A NIVEL LABORATORIO. *A.I.M.M.G.M. Convención Internacional.* , 261-265.

Robert Resnick, H. K. (2002). *Fisica Volumen 1.* Ed. 4 Grupo Editorial Patria.

Taggart, A. F. (1964). *Handbook of Mineral Dressing.* USA: Jhon Wiley & Sons, Inc.

Valladares, J. R. (2008). *Diseño práctico de un molino de bolas (tesis licenciatura).* México, D.F.: I.P.N.