



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“Molienda de bolas en húmedo y en  
seco con eje excéntrico externo”**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero en Minas y Metalurgia**

**P R E S E N T A:**

Carlos Eduardo Ortíz Ríos.

**DIRECTOR DE TESIS**

M.C. Miguel Márquez Martínez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**



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.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIA.....	i
RESUMEN.....	ii
SUMMARY.....	ii
JUSTIFICACIÓN.....	iv
OBJETIVO GENERAL.....	v
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	v
1	INTRODUCCIÓN..... 1
1.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS ..... 1
1.2	TAMAÑO DE PARTÍCULA .....2
1.3	MOLIENDA .....2
1.4	FACTORES QUE DETERMINAN EL TIPO DE MOLIENDA (húmeda o seca) 4
1.5	MECANISMO DE MOLIENDA .....5
1.5.1	MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME .....6
1.6	MECANISMOS DE FRACTURA ..... 10
1.7	DEFORMACIÓN..... 13
1.7.1	FRACTURAS ..... 16
1.8	EQUIPOS DE MOLIENDA ..... 17
1.9	MOLINOS ..... 18
1.9.1	MOLINOS DE BOLAS ..... 18
1.9.1.1	CLASIFICACIÓN POR SU TIPO DE DESCARGA (bolas)..... 19

1.9.2	MOLINOS DE BARRAS .....	20
1.9.2.1	CLASIFICACIÓN POR SU TIPO DE DESCARGA (barras).....	22
1.9.3	MOLINOS SEMIAUTÓGENOS Y AUTÓGENOS.....	23
1.10	MEDIOS DE MOLIENDA .....	26
1.11	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	29
2	MÉTODOS DE MOLIENDA .....	31
2.1	VELOCIDAD CRÍTICA .....	31
2.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA DENTRO DE UN MOLINO ..	35
3	GENERALIDADES DEL MOLINO CON EJE EXCÉNTRICO .....	37
3.1	PROCESOS DE FRAGMENTACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DENTRO DE UN MOLINO.....	41
3.2	RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS VARIABLES DE LOS MOLINOS	46
3.3	SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MOLIENDA.....	47
3.4	TIPOS DE MOLINOS .....	48
3.4.1	CONSIDERACIONES DEL DISEÑO .....	48
3.5	POTENCIA ÚTIL DE UN MOLINO .....	51
3.5.1	POTENCIA.....	52
3.5.2	CONSUMO DE ENERGÍA .....	53
3.6	RELACIÓN ENERGÍA-REDUCCIÓN .....	56
3.7	MÉTODO DE BOND .....	57
3.7.1	ECUACIONES DE SIMILARIDAD .....	60
3.8	VOLUMEN DE CARGA.....	60
3.9	TIPOS DE MOLIENDA: HÚMEDA Y SECA .....	61
3.10	COSTO DE PRODUCCIÓN .....	61

3.11	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN MOLINO CON EJE EXCÉNTRICO .....	64
4	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	66
4.1	PROCESO DE MOLIENDA .....	66
4.2	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL UTILIZADO .....	68
4.3	MATERIAL USADO EN LAS PRUEBAS .....	68
4.4	EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO .....	69
4.4.1	TAMBOR.....	69
4.4.2	BOLAS .....	70
4.4.3	APRIOSIONADORES .....	71
4.4.4	MOTOR.....	73
4.4.5	REDUCTOR DE VELOCIDAD .....	73
4.4.6	POLEAS Y CHUMACERAS .....	74
4.4.7	HERRAMIENTAS .....	75
4.5	SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS .....	76
4.6	ELEMENTOS TÉCNICOS.....	79
4.7	VELOCIDAD CRÍTICA DE MOLINO CON EJE EXCÉNTRICO .....	80
4.8	CARGA DE MOLINO.....	80
4.9	CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA .....	81
4.10	CURVAS DE INCREMENTO DE ÁREA.....	88
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
5.1	PRUEBAS A 74 rpm.....	96
5.2	PRUEBAS A 104 rpm.....	97
	CONCLUSIONES.....	98
	RECOMENDACIONES.....	98
	REFERENCIAS.....	101



**Agradecimientos:**

A Dios, familia, M.C. Miguel Márquez,  
Licenciado Carlos A. Bernal, Quim. Guadalupe Contreras mis sinodales,  
maestros y amigos

**Dedicado a:**

A mi papá que en su ausencia encontré el aliento para comenzar. A mis madres, Florentina, Mari y Edith que han sido participes de los triunfos y desvelos. Mis hermanos que con su apoyo incondicional son mis pilares. A Dani, que en poco tiempo se convirtió en el amor de mi vida y a todas las personas que comparten este sueño.

## **RESUMEN**

La industria donde se requiere de materiales finamente molidos, es indiscutible el uso de molinos que a su vez requieren de grandes cantidades de energía convirtiéndose así en un gran impacto en el costo del proceso. En el campo de la minería es muy importante la molienda, porque el mineral se lleva a su tamaño de liberación o a un tamaño en el que es útil comercialmente. La tecnología para la conminución ha ido evolucionando en la minería, ya sea cambios en los medios de molienda, diseño de los molinos, a un nivel donde se obtengan mejores resultados con el menor consumo de energía. En este trabajo se estudia un molino de bolas, a éste se le desplazó el eje de giro, a diferentes distancia desde su posición central, además se analizó el efecto al agregar agua a la carga.

Existe un aparente incremento de volumen por desplazar el eje, se reduce la velocidad crítica, cambia el mecanismo de molienda y aumenta la capacidad. Se presentan resultados de un estudio previo de molienda de Wollastonita en donde se utilizaron medios esféricos de vidrio y en la segunda fase otro de basalto con medios esféricos de acero, lo que permite analizar el efecto en la molienda del desplazamiento del eje dentro y fuera del molino y la velocidad de giro. La tercera fase está basada directamente de la segunda, haciendo pruebas con medios de molienda de acero y material de basalto; mostrando un resultado favorable en la prueba estándar y en húmedo de mayor velocidad. Cada una de las pruebas se realizó en dos velocidades, en seco y en húmedo.

## **SUMMARY**

The industry where finely ground materials are required is unquestionable the use of mills that in turn require large amounts of energy thus becoming a great impact on the cost of the process. In the field of mining, milling is very important, because the ore is brought to its release size or to a size in which it is commercially useful. The technology for comminution has been evolving in mining, be it changes in the grinding media, mill design, at a level where better results are obtained with the



lowest energy consumption. In this work a ball mill is studied, the axis of rotation was moved to it, at different distances from its central position, and the effect of adding water to the load was also analyzed.

There is an apparent increase in volume by moving the shaft, the critical speed is reduced, the grinding mechanism changes and the capacity increases. Results of a previous study of grinding of Wollastonite are presented where spherical means of glass were used and in the second phase another of basalt with spherical means of steel, which allows to analyze the effect in the grinding of the displacement of the axis inside and outside the mill and turning speed. The third phase is based directly on the second, testing with grinding media of steel and basalt material; showing a favorable result in the standard and wet test of higher speed. Each of the tests was performed in two speeds, dry and wet.

## **JUSTIFICACIÓN**

En la industria en donde se requiere de materiales finamente pulverizados es indiscutible el uso de molinos que consumen una enorme cantidad de energía convirtiéndose así en un gran impacto en la economía; en el campo de la minería es muy importante la molienda, pues es donde comienza a darse la separación de especies minerales; las cuales en un proceso posterior se concentran. Durante la historia de la industria minera este proceso ha ido evolucionando junto o aún más que el mismo de la minería debido a un notable decremento de los recursos con los que se cuenta, el constante aumento de la energía y otros factores que se auxilian de la fragmentación de los materiales. Los equipos utilizados hoy en día fueron creados dentro de una era industrial generosa de materia prima más accesible y de mucho menor impacto en la economía. Pero estos tiempos han cambiado y es preciso realizar una investigación adecuada sobre otros usos radicales de los molinos convencionales.

En estos trabajos (primera y segunda fase) se perfila una base para completar una nueva forma de trabajo en la conminución ya sea con los molinos de bolas o de barras y también con la molienda SAG y AG subiendo a un nivel donde se obtengan mejores resultados y con el mejor uso de la energía puesta en el proceso.

## **OBJETIVO GENERAL**

Encontrar parámetros adecuados para la molienda con éste molino a distintas excentricidades para obtener un mejor uso para su aplicación mediante el cambio de distintas variables como son: la distancia externa del eje, húmedo o seco y el cambio de frecuencia del las revoluciones por minuto.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer el comportamiento del molino en el manejo de carga con pulpa.
- Revisar la granulometría obtenida al desplazar el eje fuera del casco del molino.
- Especificar las condiciones de las pruebas considerando los mejores resultados.
- Mejorar las pruebas para futuros proyectos.

## **1 INTRODUCCIÓN**

Aumentar el grado de liberación de entre las especies minerales contenidas en las rocas es el principal objetivo de la industria minera. También facilita el manejo de los sólidos y permite obtener un material de tamaño apropiado para un mejor control de partículas (Antioquia). A su vez, la importancia de la fragmentación también radica en el proceso metalúrgico que prevalece, está estrictamente ligada al proceso de beneficio; pues se puede deducir que cuando la molienda es efectiva la liberación de las distintas especies es mejor, ya que las reacciones implicadas, por ejemplo en la flotación, acontecen de forma más eficaz.

La molienda es una operación de reducción de tamaño de minerales pétreos, comúnmente se habla de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a 1", se obtienen fragmentos más pequeños y regulares que los surgidos de trituración. Principalmente se establece para efectuar la liberación de las especies minerales para procesos posteriores o por su uso comercial del producto obtenido.

### **1.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS PARTÍCULAS**

La evaluación de las características de las partículas es un aspecto importante del procesamiento de minerales. El material puede reducirse de tamaño para incrementar el área de superficie y acelerar así un proceso químico (Errol G. Kelly, 1990). Cada una de estas características hace particulares a los materiales y esta es la parte en la que el mineral no permite que se desarrollen estudios exactos sobre el procesamiento de fragmentación de partículas y que el diseño de cada planta sea específicamente para la mena que se requiere; sumándose a esto las

propias características con las que se encuentra el material (la intemperización) o las mismas condiciones geológicas.

## **1.2 TAMAÑO DE PARTÍCULA**

Sólo las figuras geométricas regulares pueden ser descritas en forma conveniente en cuanto a su tamaño. Por ejemplo, el tamaño de una esfera se define claramente por su diámetro, y el de un cubo por su longitud de su borde. Un mineral fracturado, en cambio, aun cuando originalmente haya sido regular, está formado por partículas distintas de forma irregular que no pueden ser definidas con exactitud. Es por esto que casi siempre se le otorga un diámetro nominal a las partículas (Errol G. Kelly, 1990). Esto se ha determinado por practicidad; conforme las partículas fragmentadas se aproximan a los tamaños más finos tienden a aproximarse a una figura menos angular. Para el conteo de partículas se toma como referencia la figura geométrica de una esfera y esto hace más práctico su manejo.

## **1.3 MOLIENDA**

La molienda de minerales orientada a la reducción de tamaño con el fin de lograr la liberación de especies minerales, es en su contexto un proceso de transferencia energética en el cual se disipa energía mecánica a través de los diferentes eventos de fractura (Alzate, 2016). Donde se aprovechan las múltiples características que cohabitan en la estructura interna del mineral, logrando así el máximo rompimiento del material. Los factores que intervienen en el proceso de la molienda son:

- Tamaño del alimentación (partículas a moler y medios de molienda).
- Movimiento de la carga dentro del molino (mecanismo de molienda).
- Espacios vacíos existentes entre la carga del molino.

La molienda puede ser subdividida en varias etapas; por el tipo de molino, el tipo de los medios de molienda y si se efectúa en medio húmedo o seco (Errol G. Kelly, 1990).

Siempre; en un proceso de molienda, se buscan múltiples aspectos para llegar a una operación más eficiente del proceso, como son: reducir el consumo de energía, medios de molienda y desgaste de partes mecánicas, utilizar baja potencia, equipo compacto y simple, tener bajos costos de operación y mantenimiento, además de ciclos cortos de molienda-clasificación y por último ser un proceso controlable y de baja carga circulante (O. J. A. Barragán). Todos los factores deben de manera armoniosa garantizar que la planeación de todo el sistema trabaje lo más cercano al plan de estimado.

Para comprobar que el trabajo realizado sea adecuado, es importante realizar paulatinamente pruebas que confirmen los resultados obtenidos y permitan corregir las variables. Estas deben ser representativas y reproducibles, pues la población de datos obtenidos aportará condiciones que dan confianza a lo que se hace. Por lo anterior la molienda es un proceso sujeto a leyes de probabilidad, cualquier partícula se encuentra en un punto en el que prevalece un tipo de fuerza en un momento determinado (M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M. Msc). La molienda es la última etapa del proceso de conminución o fragmentación de partículas. La fragmentación se va a conseguir por medio de la combinación de fuerzas de compresión, cizalladura y abrasión (Preparación).

- Forma discontinua: cuando el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, al terminar la operación, el molino se abrirá para separar el mineral de los medios de molienda. Esta forma de trabajar se utiliza en molinos pequeños de laboratorio (Preparación).
- Forma continua: El molino se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo (o por el centro según el caso). La operación únicamente se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de los medios de molienda; aunque esto no siempre es así, ya que existen sistemas de carga continua y que se vierten junto con la pulpa sin necesidad de parar el equipo en operación. En la industria minera y agregados pétreos, se trabaja de forma continua (Preparación).

#### **1.4 FACTORES QUE DETERMINAN EL TIPO DE MOLIENDA (húmeda o seca)**

Saber todas las características físicas y químicas del material a moler es importante al momento del diseño de un sistema de molienda, y esto está determinado por distintos factores que involucran la operación en seco o en húmedo. A continuación se muestran distintos puntos de la operación:

- Etapa siguiente a la molienda (húmeda o seca).
- La disponibilidad del agua.
- La molienda húmeda precisa menos energía por tonelada de mineral tratado (la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos).
- La clasificación en medio húmedo exige menos espacio que la clasificación en seco.

- La molienda por vía húmeda no necesita captadores de polvo y existe menos calentamiento de los equipos.
- La molienda por vía húmeda tiene un mayor desgaste de cuerpos molidores y blindajes que la molienda por vía seca (principalmente debido a la corrosión y oxidación), hasta 6 u 8 veces superior.
- Existen sustancias que reaccionan con el agua, produciéndose cambios físico-químicos (clinker del cemento).

## 1.5 MECANISMO DE MOLIENDA

Se pueden hacer numerosos estudios sobre el desplazamiento de una partícula que se encuentra dentro de un molino al girar. Sin embargo, todo este tipo de estudios y análisis se basan mucho en conjeturas; ya que es complicado determinar lo que sucede dentro del proceso de molienda.

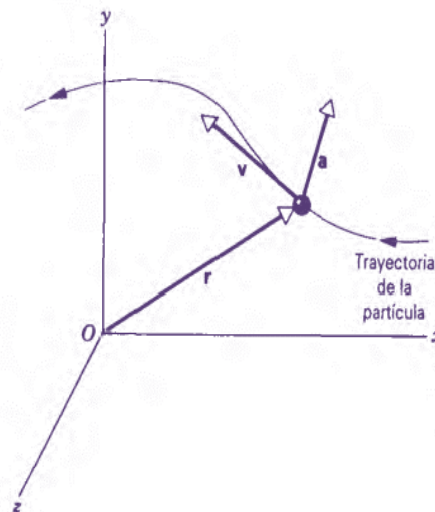


Figura 1.5.1 Vectores de posición que se mueven en una trayectoria arbitraria (Robert Resnick, 2001).

En la figura 1.5.1 se muestra el recorrido de una partícula en el tiempo  $t$  que se mueve en una trayectoria curva en tres dimensiones dentro de un sistema finito



que es el tambor. Su posición, o desplazamiento desde el origen, está medida por el vector  $r$ , la velocidad está indicada por el vector  $v$ , debe ser tangente a la trayectoria de la partícula. La aceleración está indicada por el vector  $a$ , cuya dirección no guarda en lo general ninguna relación única con la posición de la partícula o la dirección de  $v$  (Robert Resnick, 2001).

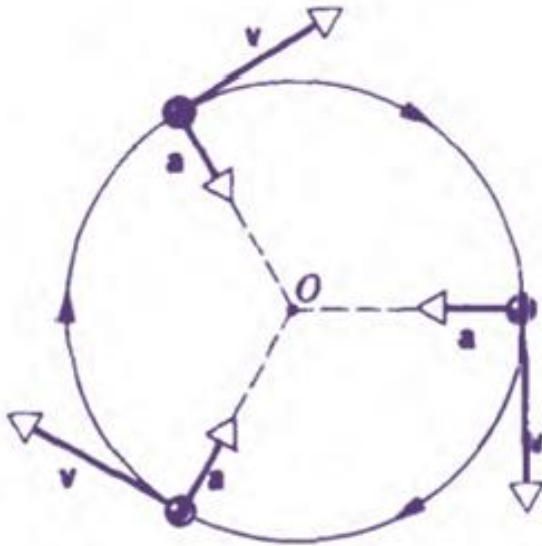
En coordenadas cartesianas, la partícula se localiza por  $x$ ,  $y$ , y  $z$ , las cuales son las componentes del vector  $r$ , que da la posición de la partícula:

$$r = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \qquad \text{Ec. 1.5.1}$$

En la Figura 1.5.1 se muestran los vectores de posición, velocidad y aceleración de una partícula que se mueve en una trayectoria arbitraria. Las longitudes relativas de los tres vectores son independientes entre sí, como lo son sus direcciones relativas (Robert Resnick, 2001). De esta forma es como una partícula (material o medios de molienda) se haya dentro del tambor y su posición u origen de trayectoria comienza al momento de separarse del revestimiento del molino.

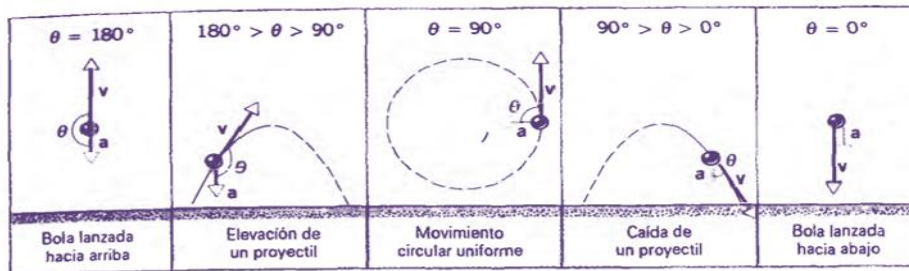
### 1.5.1 MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME

Es un caso especial en el que la partícula se mueve a velocidad constante en una trayectoria circular. Tanto la velocidad como la aceleración son de magnitud constante, pero ambas cambian de dirección continuamente, como se muestra en la Figura 1.5.1.1 en donde la aceleración  $a$  está siempre dirigida hacia el centro del círculo y, por lo tanto, siempre es perpendicular a  $v$  (Robert Resnick, 2001) aplicándose al efecto cascada.



**Figura 1.5.1.1 Movimiento circular uniforme (Robert Resnick, 2001)**

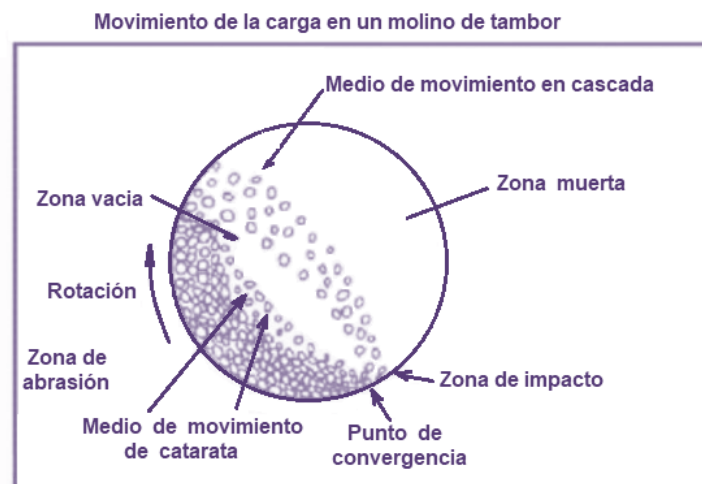
La magnitud de  $v$  es constante, pero su dirección cambia continuamente. Esta da lugar a una aceleración  $a$ , que a su vez es también constante en su magnitud pero cambia continuamente de dirección. Siempre  $v$  es tangente al círculo en dirección del movimiento;  $a$  siempre está dirigida radialmente hacia el centro; por esto se llama aceleración radial, o centrípeta. Vale la pena recalcar que no se necesita que haya algún movimiento en la dirección de una aceleración y que, en lo general, no existe una relación fija entre las direcciones de  $a$  y de  $v$  (Robert Resnick, 2001). En la Figura 1.5.1.2 se dan algunos ejemplos.



**Figura 1.5.1.2 Relación geométrica para varios entre  $v$  y  $a$  para varios movimientos (Robert Resnick, 2001).**

Una partícula que se mueve a lo largo de un arco de una circunferencia experimenta una aceleración centrípeta. Aun cuando su velocidad no sea constante, todavía debe de tener una aceleración centrípeta, pero también tendrá una aceleración tangencial que cause un cambio en su velocidad tangencial (Robert Resnick, 2001).

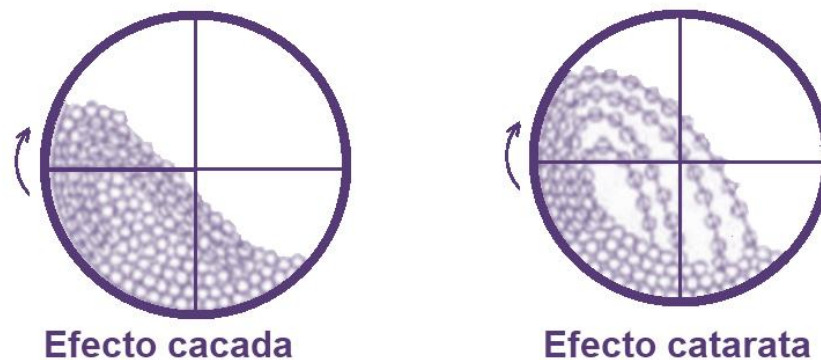
En el proceso de molienda son muy importantes los efectos producidos dentro de éste; que son: efecto cascada y catarata como se muestra en la Figura 1.5.1.3. Cada uno es distinto y por consiguiente produce diferente resultado, también asumen distinto consumo de energía.



**Figura 1.5.1.3 Esquema de un mecanismo de molienda con los movimientos (Castillo).**

Mientras que el efecto cascada produce la molienda por abrasión de las partículas con el mismo mineral o con los medios de molienda; el efecto catarata realiza la molienda por estallido al momento de caer explicado en la Figura 1.5.1.4. El trabajo realizado de la catarata causa la cizalla y la fragmentación de una manera más rápida y produce un mayor número de partículas mientras que la cascada es

lenta y solo hace la fragmentación con el desgaste superficial. Se podría pensar que la catarata produce un mayor consumo de energía, pero al reducir el menor tiempo de incidencia se considera más efectivo.



**Figura 1.5.1.4 Representación de los dos tipos de movimiento (Castillo).**

No solo la energía es la encargada de la molienda, existen múltiples factores que intervienen, como son: la naturaleza de las partículas (dureza, resistencia mecánica, discontinuidades, etcétera), el tamaño inicial y final de las partículas a moler y el medio de molienda (húmedo, seco). Y todo esto a su vez, enmarca la energía requerida con el tamaño de alimentación (volumen de carga y tamaños de los cuerpos moledores).

La cantidad de energía invertida en el proceso, solo le corresponde una fracción al producto que sale, ya que la gran mayoría es disipada en calor, ruido, desgaste de elementos moledores así también como el del revestimiento y es la molienda el proceso de mayor consumo como se refleja en la Figura 1.5.1.5.



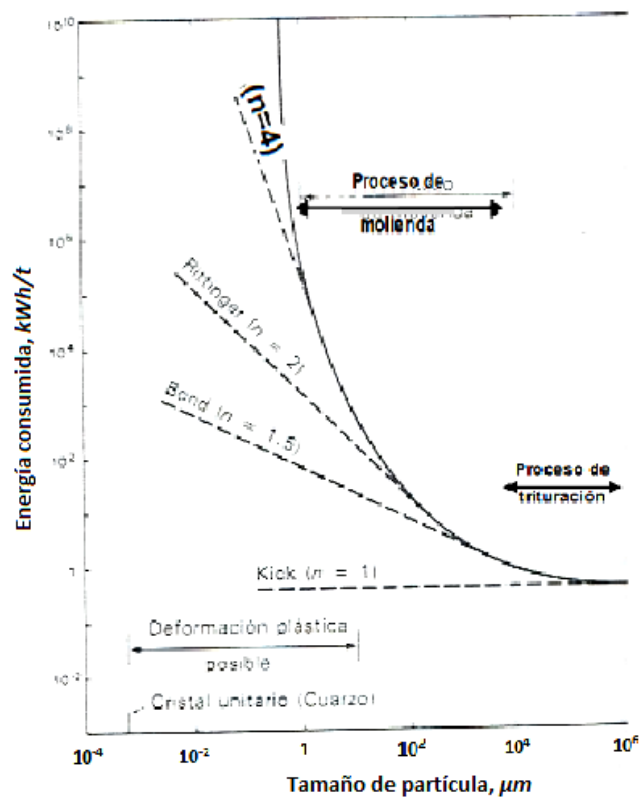
**Figura 1.5.1.5 Repartición de energía requerida en el proceso industrial de procesamiento de minerales (Alzate, 2016).**

## 1.6 MECANISMOS DE FRACTURA

Se han realizado múltiples estudios sobre los mecanismos implicados en la conminución de partículas; esto se debe a que ocurre en un medio complicado para su observación y solo se pueden inferir ideas con base a fenómenos físicos y que también por distintas pruebas infieren numerosos resultados en donde se pueden aplicar ciertas teorías que son apoyadas en los experimentos.

En esta parte, se busca encontrar los medios propicios para realizar la conminución del material del cual se quiere obtener un beneficio económico mediante su molienda, de la mejor forma posible y con el mejor aprovechamiento en la energía que se ocupa.

Para que se fracture una partícula se requiere un esfuerzo de suficiente magnitud para rebasar la resistencia a la fractura de la partícula. La fuerza que actúa sobre la partícula puede ser una fuerza de compresión que ocasione que la partícula se fracture por tensión. Además, una partícula podría someterse a una fuerza cortante, tal como la que se ejerce cuando dos partículas se rozan una con la otra. Los términos mejor empleados para la reducción de partículas son: abrasión, de crucero y estallido (Errol G. Kelly, 1990). En la Figura 1.6.1 se muestra una gráfica que alude a la cantidad de energía requerida para el proceso de trituración y molienda que obtuvieron Bond y Rittinger.



**Figura 1.6.1 Forma general de la relación energía-reducción de tamaño (Errol G. Kelly, 1990).**

Claramente en la Figura 1.6.1  $n$  no es constante en toda la gama de tamaños de partículas. Sin embargo, dentro de intervalos limitados de tamaños puede usarse un valor constante para  $n$ .

Esta ecuación empírica es entonces la forma generalizada de las ecuaciones teóricas y empíricas de energía-reducción de tamaño de Rittinger, Kick, Bond, Holmes, Charles, Svensson, Murkes y otros (Errol G. Kelly, 1990).

La fractura por abrasión ocurre cuando se aplica insuficiente energía para causar la fractura generalizada de la partícula. Más bien ocurren esfuerzos localizados y se fractura un área pequeña para dar una distribución de partículas muy finas (Errol G. Kelly, 1990). Es decir que, la abrasión se lleva a cabo mediante el rozamiento del mismo material más que por los medios de molienda; que también, a su vez, puede ser material pegado en los medios y actúan como medio de abrasión. También en la fractura que ocurre por un impacto a alta velocidad en el que la energía es insuficiente para ocasionar la fragmentación total, puede todavía causar la fragmentación en la superficie de la partícula; la fractura resultante es esencialmente de abrasión (Errol G. Kelly, 1990).

La fractura de crucero ocurre cuando la energía aplicada es precisamente la suficiente para cargar comparativamente pocas regiones de la partícula hasta el punto de fractura y sólo resultan unas cuantas partículas (Errol G. Kelly, 1990). Estas cargas son puntuales y es donde comienza la división más amplia de una partícula grande en unas más pequeñas; promoviendo que el paso dentro del molino sea rápido.

La fractura de estallido ocurre cuando la energía aplicada es mucho mayor que la necesaria para efectuar la fractura; bajo estas condiciones, muchas áreas de la partícula están sobrecargadas y el resultado es un número relativamente grande de partículas con un amplio espectro de tamaños (Errol G. Kelly, 1990). Es mucho

más efectiva que la fractura de crucero, y requiere de más energía, pero a su vez podemos definir la fractura como muy efectiva y su amplia gama de tamaños ayudan a la separación de especies minerales y es causada por el efecto catarata.

Estos resultados están estudiados bajo comportamientos aislados de fragmentación de partículas y que en un molino estos impactos ocurren a altas velocidades y en cantidades mayores; pero que aún así definen de manera importante el estudio del comportamiento de la reducción de partículas (Errol G. Kelly, 1990).

Existe un enfoque alternativo que se menciona de forma extensa en la literatura. En un proceso de reducción de tamaño, una partícula tiene cierta probabilidad de ser fracturada. En cualquier fracción de tamaño, se selecciona una proporción de las partículas para su fractura y las restantes pasan por el proceso sin fracturarse. A partir de este concepto se ha definido una función de selección que es la probabilidad de fractura que hay en cada fracción de tamaño (Errol G. Kelly, 1990). De esta forma se puede determinar cuál es la manera de fractura de una partícula, su incidencia dentro del molino sin hacer mucho énfasis en la clasificación; estos modelos son de gran ayuda para el estudio del funcionamiento del molino y sus medios de molienda, ayudando a hacer una mejor elección de los equipos utilizados respecto a la mecánica del mineral a tratar.

## **1.7 DEFORMACIÓN**

La deformación es proporcional al esfuerzo aplicado hasta el momento en que ocurre la fractura. Griffith analizó la fractura de los materiales frágiles, y este estudio ha servido de base para mucho trabajo de investigación subsecuente. Observó que estando bajo esfuerzo, la presencia de fallas en un material puede



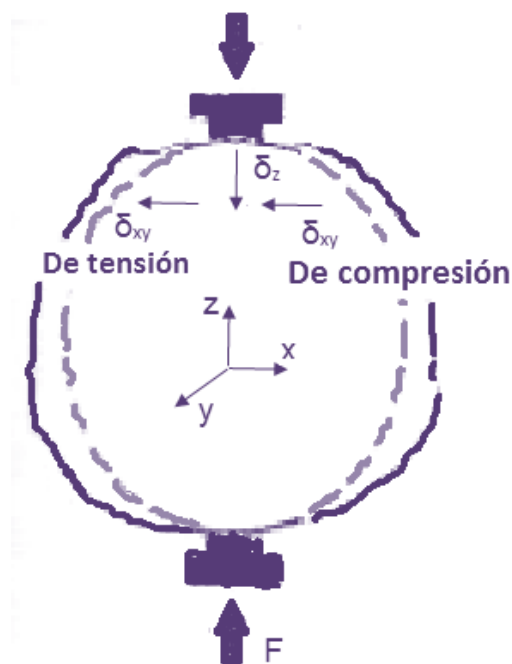
conducir a una concentración de esfuerzos en un sólido (Errol G. Kelly, 1990) propiciando la ruptura. El concepto de propagación de grietas a partir de fallas diminutas de un material tiene gran aceptación; si bien se ha hecho modificación a la teoría de Griffith para explicar aspectos tales como la energía cinética asociada con el campo de esfuerzo que se propaga en la punta de la grieta, dicho de otro modo, incrementar más las grietas, y el comportamiento plástico localizado (deformación irreversible) de un material en la punta de la grieta (Errol G. Kelly, 1990).

No es necesario aportar suficiente energía para deformar todas las uniones hasta el punto de ruptura (debido a la presencia de las fallas), se necesita más energía que la que es justamente suficiente para aportar la energía libre de las nuevas superficies, porque las uniones alejadas de las superficies eventuales de fractura se deforman también, y por lo tanto absorben energía (Errol G. Kelly, 1990). Es decir que toda la energía aplicada al momento de romper el material va siendo disipada hacia otras discontinuidades pero con menor impacto.

La teoría de Griffith precisa que exista un esfuerzo de tensión transversalmente a una grieta para abrirla más. Una carga de compresión uniforme sólo puede cerrar una grieta. Sin embargo, la carga de compresión no uniforme lleva a esfuerzos localizados de tensión; de aquí que en la conminución, las partículas se fracturan normalmente por tensión, no por compresión (Errol G. Kelly, 1990).

También se ha investigado la fractura de partículas aisladas de tamaños muy pequeños. En esta situación la deformación plástica se convierte en un factor, y cuando puede ocurrir deformación significativa sin fractura, es cuando ha alcanzado el límite de capacidad de molienda (Errol G. Kelly, 1990) o en el material no existe la conminución. Este límite es el tamaño más pequeño de partícula del producto (el cual puede ser más pequeño que el límite de capacidad

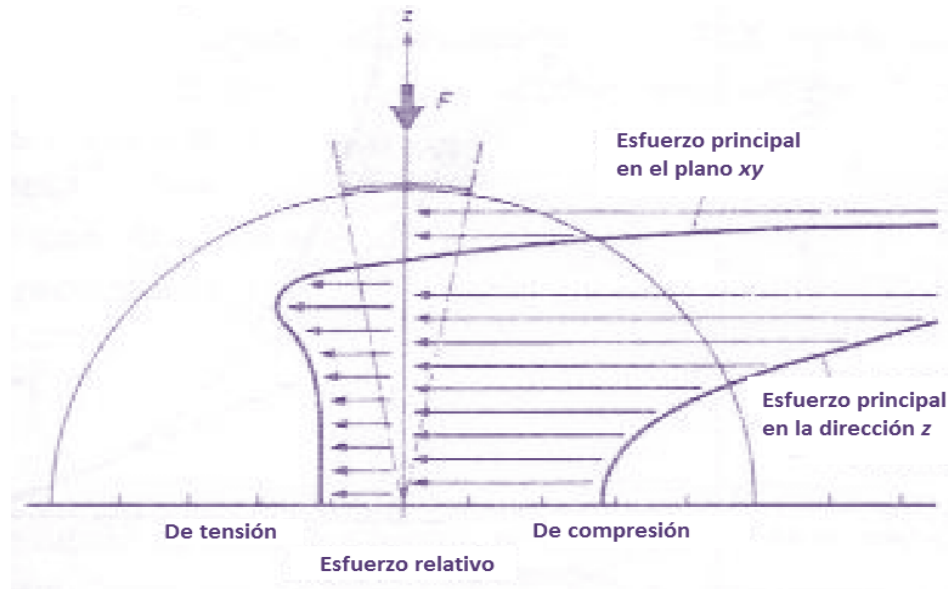
de molienda). Las características de esfuerzo y deformación en una partícula irregular aparecen como similares a las de una esfera sometida a las mismas condiciones, y por tanto el análisis se basa en una esfera. La distribución de esfuerzos en el eje de la esfera (partícula) se muestra en la Figura 1.7.1 en donde se muestran la distribución de esfuerzos principales que obran en una partícula bajo carga de compresión localizada. Se ve que el esfuerzo principal está en dirección del eje z es un esfuerzo de compresión en toda la partícula, el esfuerzo principal que actúa en el plano x-y es un esfuerzo de compresión adyacente a los puntos de carga pero es un esfuerzo de tensión dentro de la partícula.



**Figura 1.7.1 Partícula sometida a esfuerzos (Errol G. Kelly, 1990).**

Puesto que las partículas de mineral son mucho más débiles a la tensión que a la compresión (es decir, su resistencia a la tensión es mucho menor que su resistencia a la compresión), la fractura de la partícula ocurre primordialmente a causa concentrada como se observa en la Figura 1.7.2, el resultado es un

pequeño número de fragmentos grandes debido a la fractura por tensión, además de un gran número de fragmentos pequeños cuya separación se debe a la compresión adyacente a los puntos de carga (Errol G. Kelly, 1990).



**Figura 1.7.2 Distribución de esfuerzos principales (Errol G. Kelly, 1990).**

### 1.7.1 FRACTURAS

Puede esperarse que la naturaleza química de una superficie afecte a la energía de fractura (intemperizada: oxidación-abrasión). Existe una superficie en equilibrio con su medio circundante, y la naturaleza eléctrica y química de la superficie depende de dicho medio circundante. El efecto del medio circundante más común según Somasundaran y Li es; la presencia de agua, la cual resulta a menudo en una mejora del rendimiento de fractura. Sin embargo, la adición de iones inorgánicos y agentes orgánicos activadores de superficie puede tener también un

efecto importante disminuyendo o aumentando la resistencia a los esfuerzos. En general, la rapidez de fractura se mejora con la adición de cantidades moderadas de agentes preparadores de superficie o surfactivos (actúan en la superficie), aún cuando el agente surfactivos es de carga opuesta a la superficie de mineral, el efecto puede ser la disminución de la rapidez de fractura. Una práctica común de operación consiste en agregar reactivos de flotación en la etapa de molienda húmeda (Errol G. Kelly, 1990).

## **1.8 EQUIPOS DE MOLIENDA**

Los requisitos de diseño en maquinas para la reducción de tamaño cambian notablemente al cambiar el tamaño de las partículas. Prácticamente en todas las maquinas, las fuerzas para lograr la fractura se aplican ya sea por compresión o por impacto (Errol G. Kelly, 1990). La selección del tamaño de los medios de molienda es una discrepancia entre dos factores en conflicto. Al disminuir el tamaño relativo de los medios, aumenta el área de superficie para molienda, aumentando la capacidad y disminuye la densidad de toda la carga. Por otra parte, al aumentar el tamaño de los medios, aumenta la fuerza que se ejerce entre las superficies de molienda de tal manera que se pueden quebrar partículas más grandes aumentando la densidad dentro del molino. También, tanto las velocidades del molino como su mayor diámetro contribuyen a incrementar la alimentación de energía a los medios y permite utilizar medios de mayor tamaño, ya que los minerales más duros necesitan de medios de mayor tamaño (Errol G. Kelly, 1990).

## **1.9 MOLINOS**

Se llaman así a las máquinas en donde se produce la operación de molienda. Existen diversos tipos según sus distintas aplicaciones, los más importantes son:

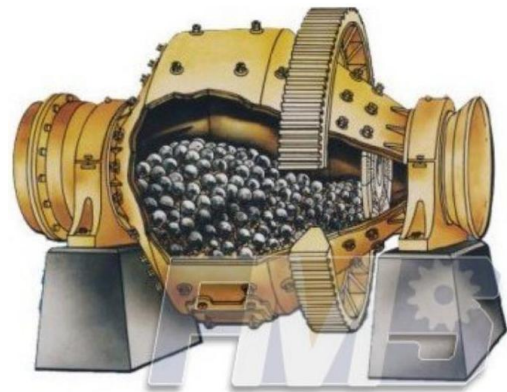
- de Rulos y Muelas. (Animales o de viento)
- de Discos. (molinos que giran en sentido opuesto)
- de Barras.
- de Bolas.
- de Rodillos.

Pero solo se hará un enfoque práctico en los más comunes y especializados en la molienda de minerales (Molienda, 2015).

### **1.9.1 MOLINOS DE BOLAS**

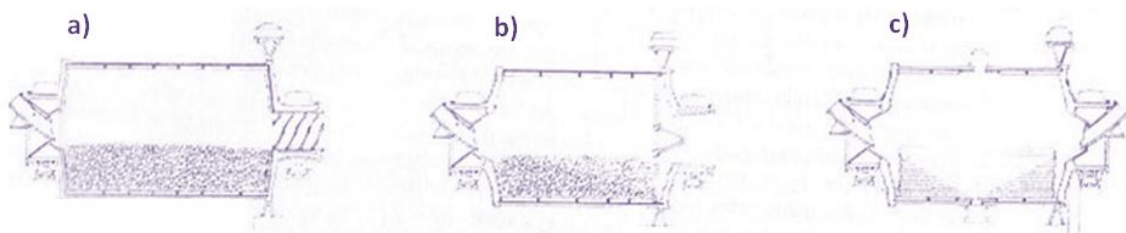
En este tipo de molino, los medios de molienda lo constituyen bolas de acero o cerámica (también llamados guijarros) o partículas del mismo mineral (Errol G. Kelly, 1990). En la molienda de minerales es utilizado comúnmente bolsas de acero. Aunque también en la producción de materiales muy finos y alimenticia son usados los guijarros o bolas de material cerámico. El funcionamiento de este molino es muy básico, el tambor gira a una frecuencia determinada previamente a un 90% de la velocidad crítica; haciendo que la carga del mineral y los medios de molienda puedan ser llevados a la parte superior de las paredes internas del molino y poder hacerlas caer para realizar los efectos cascada y catarata; siendo este último el que logra mayor efecto al momento de la molienda. Parte del esquema de este molino se puede observar en la Figura 1.9.1.1.

**Figura 1.9.1.1 Esquema de un molino de tambor giratorio de bolas (Formats Construction Machinery Co, 2014).**



### **1.9.1.1 CLASIFICACIÓN POR SU TIPO DE DESCARGA (bolas)**

A la vez que se agrupan tomando en consideración el medio de molienda, los molinos de tambor giratorio pueden subdividirse atendiendo al método de alimentación y descarga, o si operan en húmedo o en seco (Errol G. Kelly, 1990) como se muestra en la Figura 1.9.1.1.1.



**Figura 1.9.1.1.1 Tipos de carga y descarga de los molinos de bolas (Errol G. Kelly, 1990).**

En la imagen a) se puede apreciar que tanto la carga como la descarga son al centro de las tapas del tambor (de extremo a extremo). En la Figura b) se observa

que mientras la carga es al centro en la tapa del tambor, la descarga se encuentra en la periferia del mismo tambor, en diafragma. Y en la Figura c) la carga se hace en los extremos y la descarga se sitúa de la misma forma, en diafragma pero al centro del tambor.

### **1.9.2 MOLINOS DE BARRAS**

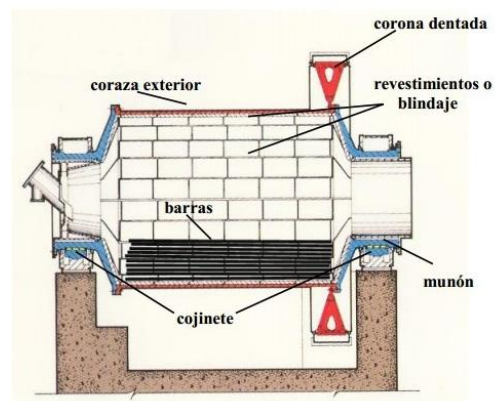
Los molinos de barras, aunque presentan características muy comunes con los molinos de bolas, son completamente diferentes. Por ejemplo: la velocidad de giro del molino se encuentra entre el 65 y el 70 % de la velocidad crítica (Refugio Rodriguez James George, 2009). Ya que la barra de acero es aún más pesada que una bola y estas abarcan casi toda la longitud del interior del tambor como se puede ver en la Figura 1.9.2.1. También el recubrimiento interno es distinto, pues la barra debe ser levantada de la parte más baja para así poder caer en la dirección adecuada. La manera en que se lleva a cabo la molienda es casi similar que en uno de bolas; pero aún así en distinta manera. Regularmente estos se ponen en sistemas abiertos para garantizar la molienda.



**Figura 1.9.2.1 Vista interna de un molino de barras (Procesamiento de minerales).**

Las características de estos dos tipos de molinos son muy parecidas; ya que prácticamente lo que cambia es la forma de los medios de molienda y el revestimiento interno como se explica en la Figura 1.9.2.2. Contando igual con un muñón, cojinetes y un sistema de carga y descarga como lo es en el molino de bolas (de rebalse), pretende usar el mismo sistema y como ya se había mencionado, este tipo de molinos se usa dentro de un sistema abierto en donde el material pasa primero por el molino de barras y lo clasificado se dirige al molino de bolas.

**Figura 1.9.2.2 Partes principales de un molino de barras (Procesamiento de minerales).**



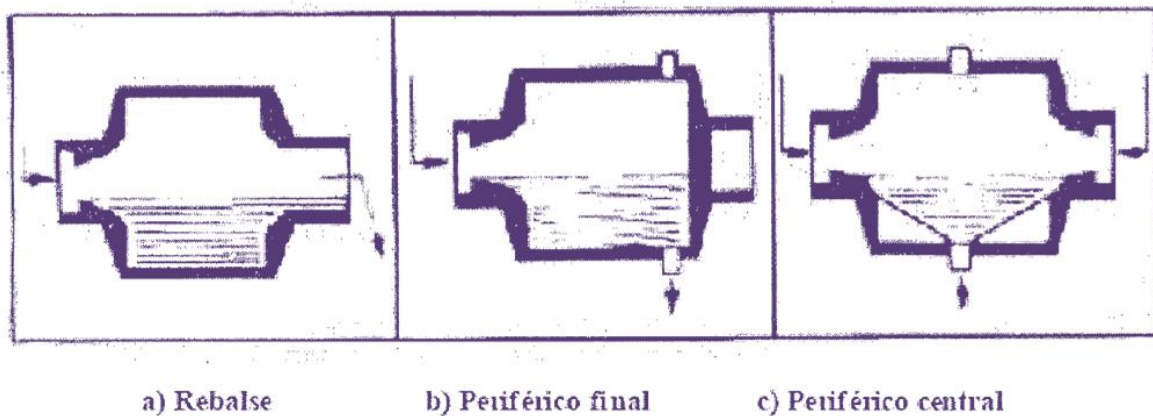


Una diferencia a tener en cuenta entre los molinos de bolas y los de barras (dado que sus tamaños son similares y sus capacidades) es la máxima velocidad que pueden alcanzar; en el primero la máxima posible puede llegar a alcanzar hasta un 90% de la velocidad crítica mientras que en segundo puede alcanzar hasta un 70% de la velocidad crítica. Otra diferencia es el desgaste en los elementos moledores (Molienda, 2015).

#### **1.9.2.1 CLASIFICACIÓN POR SU TIPO DE DESCARGA (barras)**

Las barras, fabricadas generalmente de acero al carbono aleado a su vez con múltiples materiales, deben ser ligeramente inferiores a la longitud de la cámara del molino entre 100-150 mm. Por encima de los 6.8 m de longitud la calidad de las barras se pierde produciéndose fracturas y pérdidas en la rectitud.

Se utilizan con frecuencia en la molienda de materiales que posteriormente van a un molino de bolas o pebbles (Refulio Rodriguez James George, 2009). En la Figura 1.9.2.1.1 se muestra también como es la descarga en molinos de barras y de bolas. Teniendo como descarga la más común en rebalse en donde entra por un extremo y se descarga por el otro. El periférico final es cuando la carga entra en la parte central y descarga al otro extremo en diafragma y otro similar que es el periférico central en donde la carga se hace por los extremos y al centro del tambor se da la descarga; en este sistema, al interior del molino hay una pendiente que logra mantener las barras dentro de una forma diferencial y así se ubican en un sitio en donde su trabajo se pretende aprovechar más y la descarga que es por gravedad se regula por la frecuencia de las revoluciones por minuto.



**Figura 1.9.2.1.1 Tipos de descarga de molinos de barras (Refulio Rodriguez James George, 2009).**

En la Figura 1.9.2.1.1 se muestra como es el tipo de carga y descarga de un molino. Como se puede apreciar, lo único que cambia es la descarga del molino y no en la carga. La carga es al centro de las tapas del tambor mientras que la descarga puede ser al otro extremo de la carga o bien en diafragma.

### **1.9.3 MOLINOS SEMIAUTÓGENOS Y AUTÓGENOS**

La molienda AG se utiliza como medio de molienda los gruesos de la misma mena del material. Cuando se agrega una cierta cantidad de bolas como elementos molidores adicionales, el proceso se conoce como molienda SAG o semiautogena (Molienda, 2015). En la industria podemos encontrar de forma más común la molienda SAG, debido a que se requiere de menor tiempo para la molienda; sin embargo, se puede reconocer que preferentemente se busca llegar a la molienda autógena por el menor consumo de energía.

- **MOLIENDA AUTOGENA (AG):**

Es aquella molienda en la cual la fragmentación se realizara por medio del propio mineral. Los esfuerzos que producirán la fragmentación serán esfuerzos combinados de percusión y atrición (Molienda, 2015). El mineral se fragmenta en el interior del molino sin ayuda de otro tipo de medios de molienda que no sea el propio mineral. El mineral será de mina o material previamente triturado en fragmentos gruesos. Las características de estos molinos son que el diámetro es más grande que la longitud de éste.

- **MOLIENDA SEMI-AUTOGENA (SAG):**

Se provoca la fragmentación del mineral por efecto combinado del propio mineral y de un pequeño porcentaje de bolas de acero (Molienda, 2015). De este modo se mantiene baja la densidad del contenido del molino. La molienda Ag o SAG, es empleada en molienda primaria. Se alimentan con el mineral de la etapa de trituración primaria o con mineral todo-uno (Molienda, 2015). Este pasa solo por la clasificación de mina y si cumple con las características de tamaño, se introduce dentro del molino directamente sin hacer más fragmentación.

La molienda semiautogena se caracteriza por el hecho de que los medios de molienda son en gran medida las mismas rocas, ya que debido a la geometría del molino y el gran tamaño de las rocas, efectúan en mayor parte el efecto de molienda, puesto que ocurren dentro del molino una gran cantidad de impactos entre ellas mismas; utilizando tan solo un bajo porcentaje de carga de bolas, para atacar los tamaños críticos *PEBBLES* (Compañía Fresnillo S.A. de C.V., 2018).

Las variables que afectan la operación del molino SAG son:

- **GRANULOMETRIA DE ALIMENTACIÓN:** la distribución de tamaños en la alimentación se controla con los alimentadores en el almacenamiento del mineral grueso.
- **VELOCIDAD DEL MOLINO:** es controlada por medio de un variador instalado en el motor del molino, dependiendo de la dureza del mineral y de la granulometría es la velocidad de giro del molino.
- **RAZON DE ALIMENTACIÓN:** cuando el tonelaje de alimentación es bajo se dañan los revestimientos del molino, si por el contrario es alto hay sobrecarga del molino demandando una mayor potencia del motor y consumo de energía.
- **AGUA:** ayuda en la entrada del mineral al molino y proporciona la relación correcta de porcentaje de sólidos, para una adecuada molienda.
- **DUREZA DEL MINERAL:** la resistencia del mineral a ser quebrado, cuando esta aumenta, hay que regular la distribución de tamaños en la alimentación y aumentar la velocidad del molino.
- **PRESIÓN DE LOS DESCANSOS:** es un punto de vital importancia, cuando la presión de los descansos aumenta indica que el molino está sobrecargado, por lo tanto hay que regular la densidad de la pulpa y la distribución de tamaños de alimentación, verificando también que la razón de alimentación no haya aumentado.
- **DENSIDAD DE LA PULPA:** la densidad de la pulpa es importante para saber si la molienda está siendo adecuada.
- **CARGA DE BOLA:** es necesario el porcentaje de bola para una molienda adecuada.

## 1.10 MEDIOS DE MOLIENDA

La acción de los medios se considera mejor inicialmente en función de un blindaje liso, y considerando la acción de una bola aislada en la Figura 1.10.1 en el punto 1, la fuerza que mantiene a la bola contra el casco es la componente normal del peso  $M_b g \cos \theta$ , más la fuerza centrífuga,

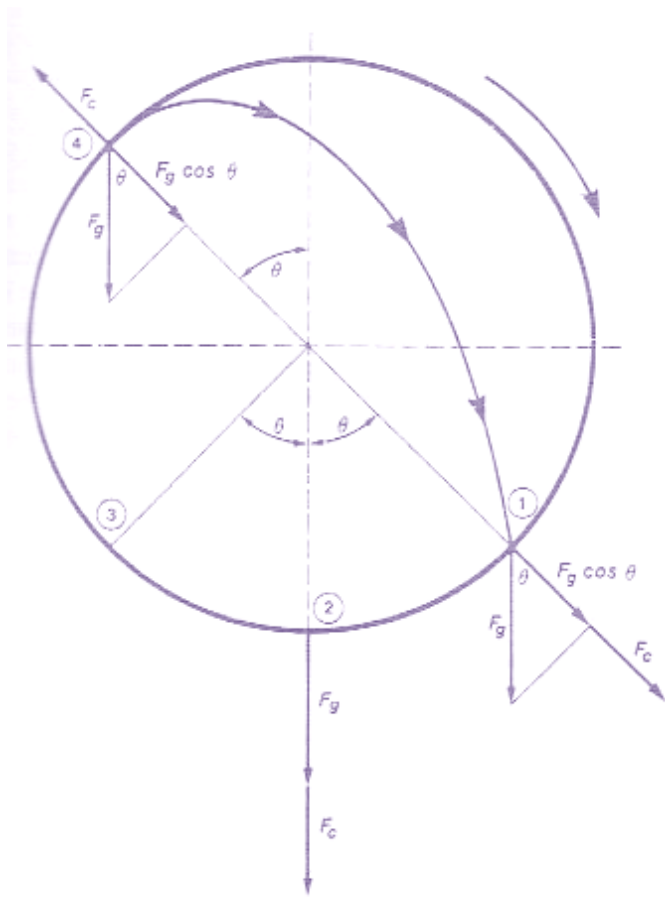
$$F_c = \frac{2M_b v_m^2}{D_M} \quad \text{Ec. 1.10.1}$$

Donde:

$M_b$ = masa de la bola

$v_m$ = velocidad tangencial de la bola

$D_M$ = diámetro del molino

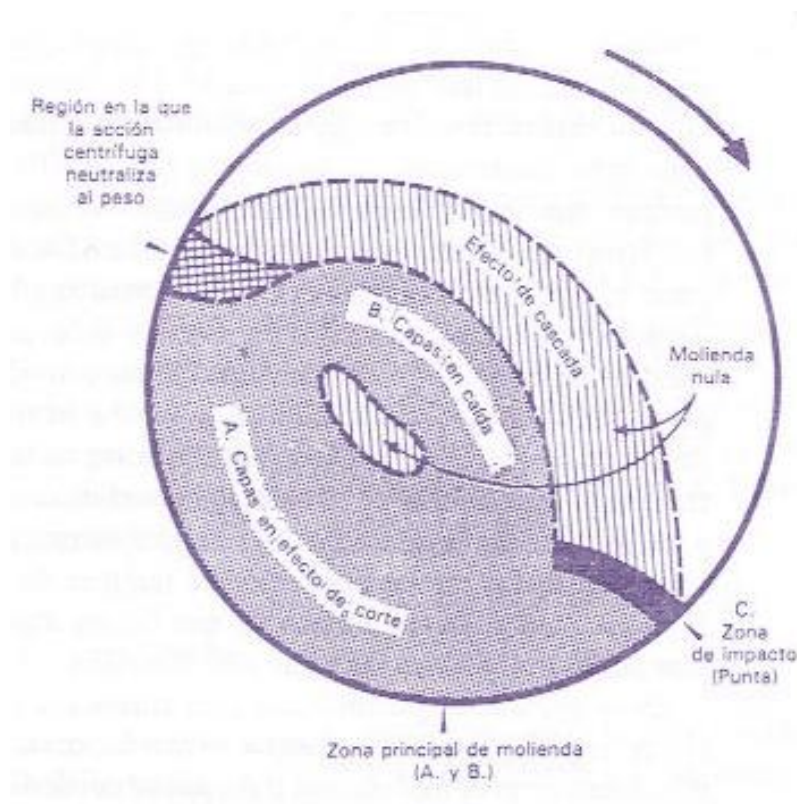


**Figura 1.10.1**  
**Fuerzas que**  
**actúan sobre una**  
**bola aislada en un**  
**molino (Errol G.**  
**Kelly, 1990).**

Esta fuerza tangencial se eleva hasta un punto máximo en el punto 2 y regresa al valor inicial en el punto 3. Viajando todavía en una trayectoria circular, la fuerza disminuye hasta que en el punto 4 la componente del peso justamente equilibra la fuerza centrífuga. En este punto la bola es lanzada desde el casco y regresa al punto 1 siguiendo una trayectoria parabólica (Errol G. Kelly, 1990).

Cuando el molino tiene una carga normal de bolas, la situación es ligeramente distinta. En la Figura 1.10.2 se muestra que en la zona A, las bolas se mueven unas sobre otras en capas concéntricas, y la fractura se verifica por estallido y posiblemente por algo de crucero. El límite superior de esta zona resulta de la neutralización del peso de las bolas por la fuerza centrífuga. Este límite es más

alto que lo que sugiere el análisis presentado, básicamente por la acción que ocurre entre las bolas. Las bolas más alejadas del casco (zona B) se separan y comienzan su rodamiento de regreso más pronto, produciendo la región de acción de molienda más vigorosa; es decir, toda la fractura se logra por estallido, en este caso por el resultado del retorno de las bolas en catarata para unirse con la carga. Nótese que en la zona de la formación de catarata no ocurre fractura alguna, y consecuentemente dicha zona debe mantenerse a la dimensión mínima. Por esta razón los molinos trabajan dentro de un intervalo relativamente estrecho de alrededor de 65 a 82% y hasta un 90% de la velocidad crítica.



**Figura 1.10.2 Comportamiento de la carga de bolas completa (Errol G. Kelly, 1990).**

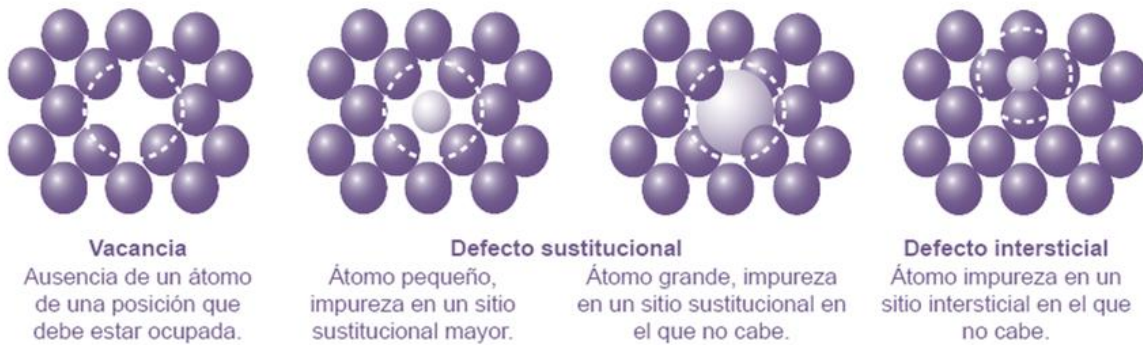
Existe cierto desacuerdo respecto a la importancia relativa de las diferentes zonas de fractura de un molino, la naturaleza del producto y su régimen de producción indican que es prácticamente imposible distinguir los productos de fractura de las zonas A, B y C. sin embargo, es posible que ocurra algo de fractura por abrasión ente las bolas y los blindajes (Errol G. Kelly, 1990).

### **1.11 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES**

Los materiales juegan un papel muy importante dentro de la parte de molienda; estos determinan toda la operación y se involucran dentro de todas las variables que participan en el trabajo que se requiere para que sea una operación lo más apegada a un porcentaje alto de eficiencia. Esto se debe a que los materiales asumen ciertas particularidades dentro de una alta gama de ellos y es responsable darles un manejo particular a sus características. Dependiendo de su densidad, dureza, composición, entre otras condiciones.

La correspondencia entre la composición, el tipo de enlace químico y la estructura de un material determina las características y propiedades que poseerá para desempeñar una función específica, así como el tipo de procesamiento o maquinado mediante el cual se puede obtener un producto particular. Dicha combinación (composición-enlace-estructura-propiedades) determina que los materiales sean especialmente útiles o únicos para desempeñar tareas específicas (Estructura y Propiedades de los Minerales).





**Figura 1.11.1 Combinación de átomos que generan debilidad en su estructura (Estructura y Propiedades de los Minerales).**

Como es posible apreciar en la Figura 1.11.1 la molienda se ayuda de estos defectos contenidos dentro de la estructura de la partícula, y ayudan a la separación de las especies minerales contenidas dentro de los fragmentos de la partícula. La cizalla se vale de estos defectos que en un sentido más amplio forman las discontinuidades desenlazando en la ruptura de partículas.

## 2 MÉTODOS DE MOLIENDA

Existen numerosos procesos de reducción de tamaño en los distintos materiales; estos se utilizan para la separación de sus diferentes componentes; un manejo efectivo de las partes que se necesitan de las que no, y para un uso específico de estos como en la industria cementera, alimenticia, de fármacos, entre otros. Los métodos de reducción de tamaño más empleados en los equipos son: compresión, impacto y cizalla usándose en seco o con un porcentaje de humedad. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando por medios mecánicos hasta el tamaño deseado (EcuRed contributors, 2012) con la ayuda de varios factores para poder obtener el resultado deseado.

### 2.1 VELOCIDAD CRÍTICA

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales como son la velocidad de rotación, la carga del molino, el peso específico del material, el siguiente proceso, entre otros. Es común definir a la velocidad crítica como aquella a la cual la bola aislada se mantiene contra el casco durante el ciclo completo.

$$M_b g = \frac{2M_b v_m^2}{D_M} \quad \text{Ec. 2.1.1}$$

o bien

$$\mathcal{N}_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}} \quad \text{Ec. 2.1.2}$$

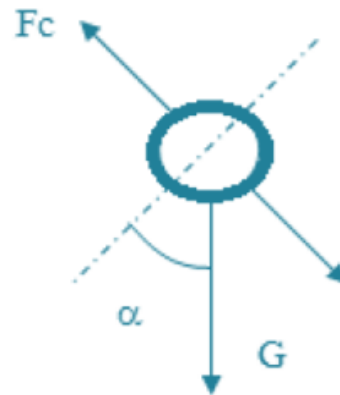
Donde:

$\mathcal{N}_c$ = velocidad crítica, rpm

$D_M$ = diámetro interno del molino [m]

Esta hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados”. En la figura 2.1.1 se muestra cómo es que la fuerza centrífuga supera la acción de la fuerza de gravedad con la masa de la partícula.

**Figura 2.1.1**  
**Representación de**  
**velocidad crítica de una**  
**partícula dentro de un**  
**molino (Molienda, 2015).**



$$F_{centrifuga} = m \cdot a_c \quad \text{Ec. 2.1.1}$$

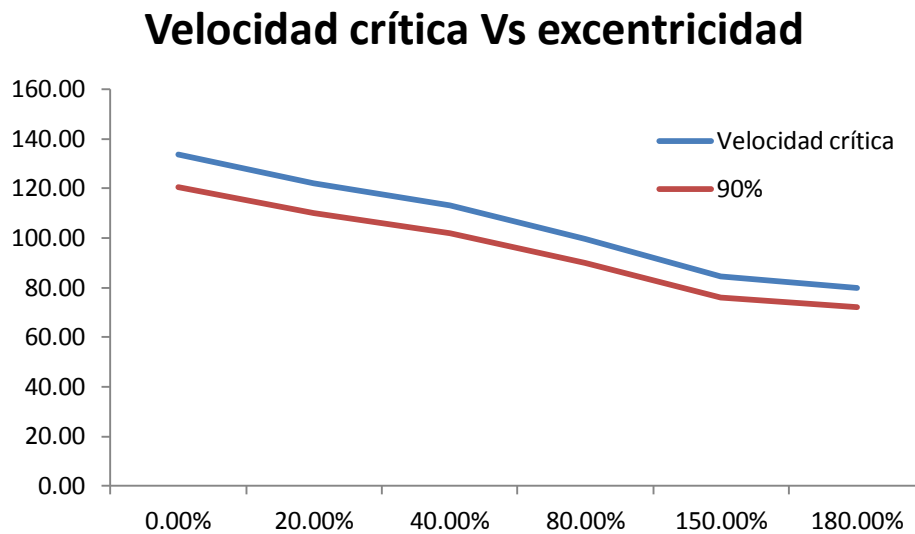
$F_{entrifuga}$ = Fuerza centrífuga

$m$ = Masa

$a_c$ = Aceleración centrífuga

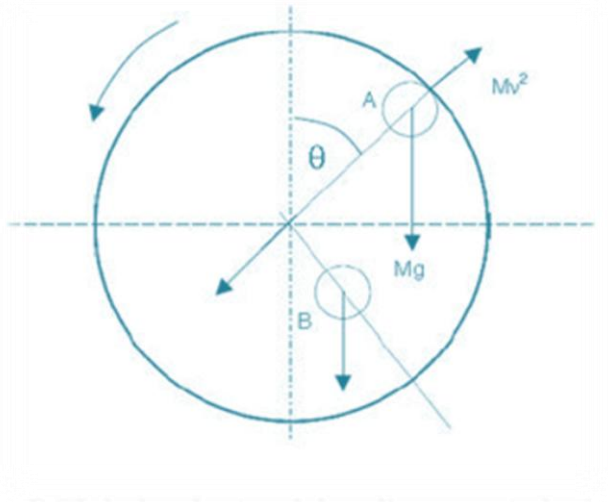
La Fuerza Centrífuga, dentro de la operación de la carga de un molino, es la que permite que la carga quede pegada a la pared interior de este. Es por eso que la

Velocidad Crítica se utiliza a un máximo de 90%. En la siguiente grafica se muestra la velocidad adecuada para distintos diámetros con la Ecuación 2.1.2 haciendo una relación directa entre la fuerza centrífuga y la velocidad crítica. En la Figura 2.1.2 se muestra como se reduce la frecuencia conforme aumenta el diámetro del molino.



**Figura 2.1.2 Grafica comparativa de velocidad crítica con la idónea.**

En la Figura 2.1.3 resalta un esquema básico de lo que ocurre dentro. En la posición *A* la partícula se mantiene en contacto en la pared interior con la fuerza  $Mv^2$  sin deslizamiento entre la partícula y la pared. En la partícula *A* se puede ver que está llega al punto máximo dentro de la pared de un molino siendo el punto en el que se separa del escudo y se precipita por caída por la fuerza  $Mg$  mientras que la partícula *B* se encuentra dentro de la carga en dirección a la pared. Para la simplificación del problema; se considera el sistema *A* componente centrípeta de la fuerza debido a la gravedad  $Mg \cos\theta$  igual a la componente centrífuga de la fuerza  $Mv^2/(R-r)$ . (Alejandro Font F., 2010).



**Figura 2.1.3 Rotación del molino y velocidad crítica (Alejandro Font F, 2010).**

$$\cos\theta = \frac{v^2}{(R-r)g} \quad \text{Ec. 2.1.2}$$

Donde:

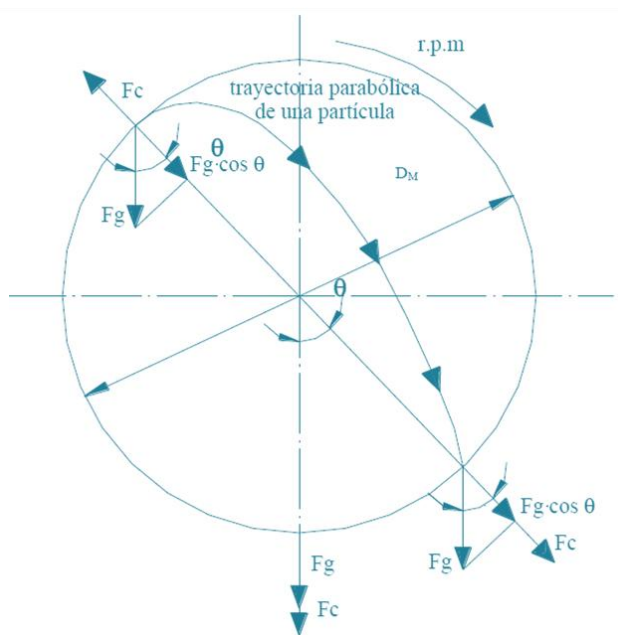
M = masa de la partícula

g = aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

v = velocidad lineal de la bola [m/s]

R y r = radios del molino y bola respectivamente [m]

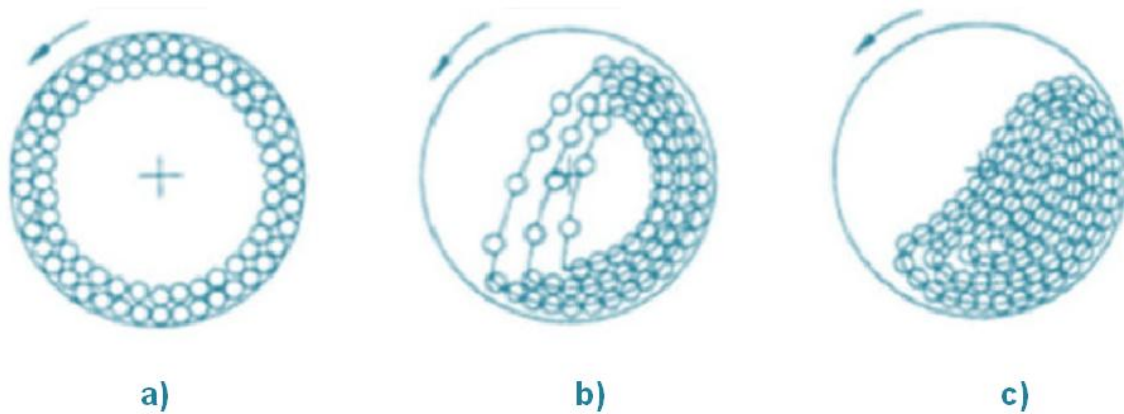
**Figura 2.1.4 Esquema de una partícula dentro de un molino (Molienda, 2015).**



En la Figura 2.1.4 se muestra un esquema más amplio del fenómeno que ocurre dentro del molino. La fuerza radial de la fuerza centrífuga del molino hace que la partícula permanezca en las paredes del revestimiento; esto limitaría por mucho el efecto de la molienda en este sistema; sin embargo cuando la partícula está con el coseno del ángulo respecto a la fuerza de la gravedad adecuado se produce el efecto catarata en donde se piensa que hay mejor efecto de molienda.

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA DENTRO DE UN MOLINO**

El proceso que lleva la carga dentro del molino es imprescindible y se encuentra ligado a numerosos factores que determinan que un proceso sea efectivo o no. Dependiendo de lo que se está buscando, es la forma en que se llevara la planeación óptima y se adecuará la magnitud de la frecuencia.



**1Figura 2.2.1. 2 Especificación grafica de la velocidad crítica (Iglesias, 2014-2015).**

En la Figura 2.2.1 a) la rotación en la parte interior del cilindro ocasiona que las bolas queden unidas en su pared interior y no se perpetré la molienda debido a la Fuerza Centrifuga. En la b) las bolas ascienden adheridas al cilindro hasta una altura en la cual su peso sobrepasa la fuerza centrifuga y caen al fondo de la cámara sobre el material y se produce un área de estallido del material cuando llega a la parte inferior. Y en la figura c) la rotación en la parte interior del molino, la velocidad es menor que en la anterior; de esta forma se da un efecto de abrasión y compresión entre el material y las bolas.

### 3 GENERALIDADES DEL MOLINO CON EJE EXCÉNTRICO

Actualmente el uso de molinos con eje excéntrico está limitado solo a laboratorios. Su investigación no ha sido muy extensa, los prototipos similares en uso, tienen la característica que funcionan con un eje vertical y a parte de su giro axial tienen un giro en su propio eje; es por eso que le llaman molinos planetarios; este tipo de sistemas arrojan buenos resultados. Sin embargo, actualmente la investigación sobre este tipo de molinos es reducido y dentro de la industria no se encuentra ninguno en funcionamiento. La finalidad de investigar éste prototipo es reducir el gasto energético mediante la disminución de carga dentro del tambor a la vez que disminuye la velocidad de giro, pues existe relación con la Velocidad Crítica.

En anterior trabajo, los movimientos del eje se dieron dentro del tambor con tres posiciones fuera del axial con 20, 40 y 80% (Rendón, 2018). Ahora, al sacar por completo el eje, el incremento de diámetro del tambor es igual a 150 y 180%.

Como se muestra en la Figura 3.1 el eje está completamente desplazado fuera del tambor, este desplazamiento corresponde a 150% respecto al axial. Se muestra el sitio donde se coloca el eje (flecha). El 150% de desplazamiento representa 5 centímetros a partir del casco del tambor, lo que significa que el diámetro de giro aumenta significativamente.



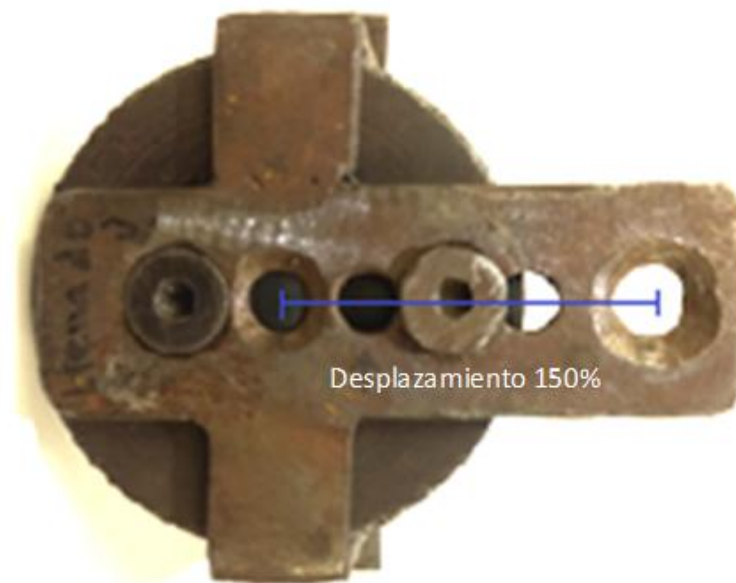


Figura 3. 1 Desplazamiento del eje fuera del tambor a 150%.

Al desplazar el eje fuera del tambor, teóricamente, el volumen aparente se incrementa considerablemente de  $1178.09 \text{ cm}^3$  (eje axial) a  $10249.4 \text{ cm}^3$ , lo que implica que al aumentar la carga del molino en 30% respetando la última cifra, éste llegaría a  $3074.8 \text{ cm}^3$  y esto en el tambor representa que superaría el volumen real.

De la misma forma ocurre con el aumento del eje axial a 180%, el volumen aparente se incrementa superando la capacidad del tambor.

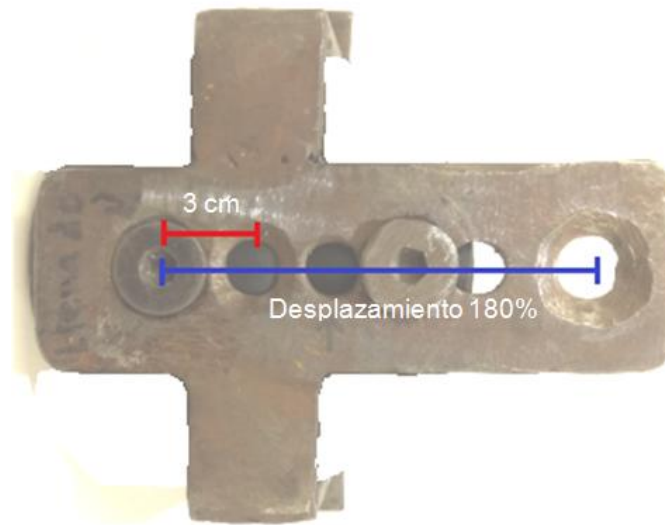
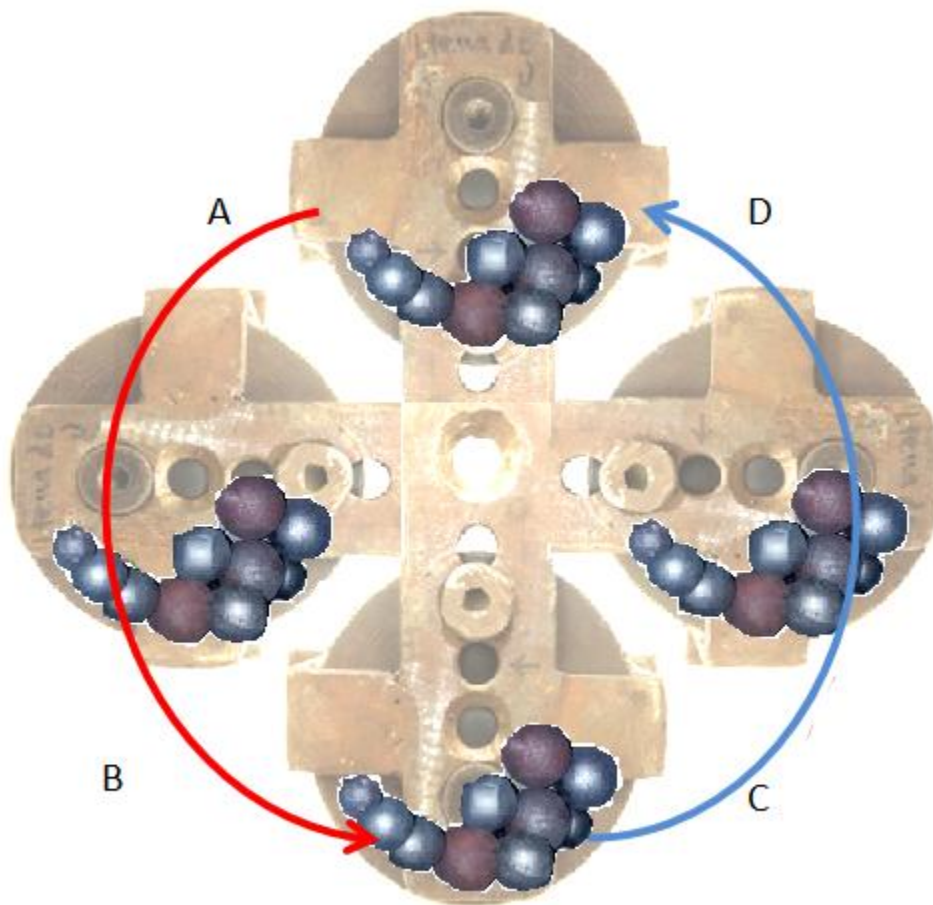


Figura 3. 2 Desplazamiento del eje fuera del tambor a 180%.

En la Figura 3.2 se aprecia el mismo fenómeno que en la Figura 3.1; en donde al desplazar aún más el eje, el volumen aparente se incrementa. Éste es el propósito principal de sacar el eje del tambor, aumentando su diámetro teórico y propiciar una mayor caída dentro, reduciendo la velocidad del motor debido a la velocidad crítica.

Mientras más distancia más trabajo costara romper el momento de inercia ya que la distancia del centro al eje es mayor, la energía requerida también. Pero una vez que se haya logrado el arranque, se descarta el momento de inercia pues el sistema es estable. Y aún así, se pretende que sea un proceso continuo (carga-descarga) para no detener a cada momento.



**Figura 3. 3 Movimiento de carga dentro del molino con eje fuera del tambor.**

En la Figura 3.3 se muestra cómo se desarrolla en el molino la molienda. Existen diferentes áreas donde actúa este proceso debido a su extensión; pues el efecto tiende a incrementar (no en dimensiones considerables en el efecto catarata) en el mismo espacio dentro del tambor.

En la zona A se encuentra la caída y el estallido es más efectivo por un leve incremento de altura; mientras que en la zona A-B probablemente siga existiendo el efecto de catarata pero es reducido debido a que la mayor parte de la carga se

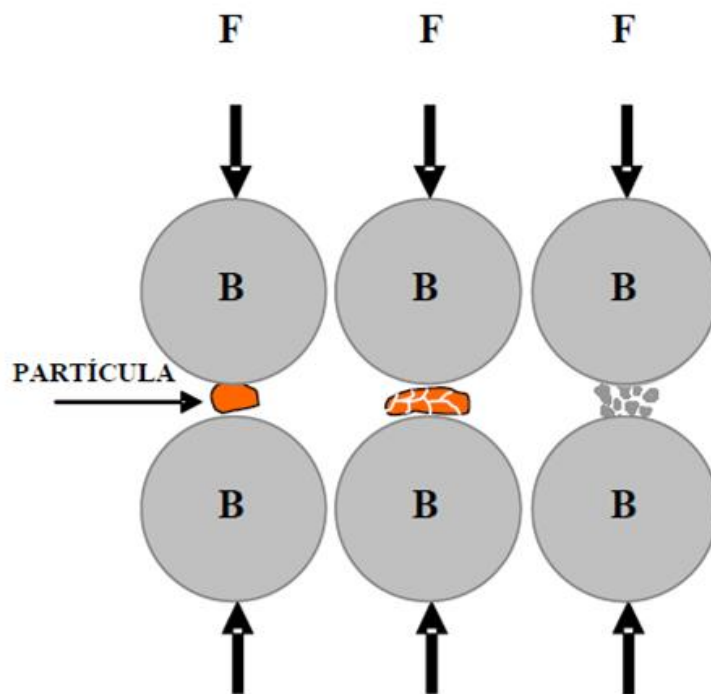
encuentra en la parte baja del tambor, sin embargo se promueve la compresión del material por el peso del mismo dentro del molino.

A partir de la zona entre B-C se promueve la abrasión del material en los medios de molienda, haciendo un trayecto más largo hasta la posición de C-D, siendo aquí mayor que la zona A-B y juntando la abrasión con la compresión; éste último efectuándose con el mismo movimiento rotatorio del tambor.

Por las características propias del tambor, el efecto catarata siempre será menor, pues la carga dentro de este no puede alcanzar la distancia necesaria para caer una distancia considerable, ya que las mismas paredes del casco lo impiden; sí existe un incremento de altura pero no es para considerarlo efectivo. Es por eso que predomina la abrasión en la carga pues el tambor se mueve respecto al eje (Rendón, 2018) aumentando el trayecto de toda la carga que está más tiempo en frotamiento por el aumento del arco en circunferencia.

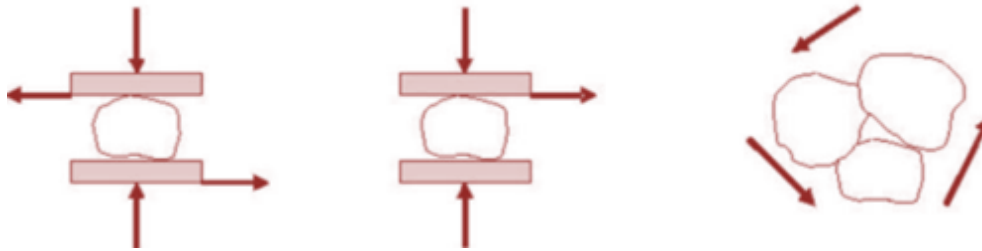
### **3.1 PROCESOS DE FRAGMENTACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DENTRO DE UN MOLINO**

Durante la molienda, hay cuatro tipos de fuerza que actúan sobre las partículas del material: impacto, atrición, corte y compresión. El impacto es la aplicación de una fuerza en un intervalo de tiempo muy pequeño. Ambos objetos pueden ser móviles o pueden ser estacionarios como se puede observar en la figura 3.1.1 los instantes donde se produce la atrición.



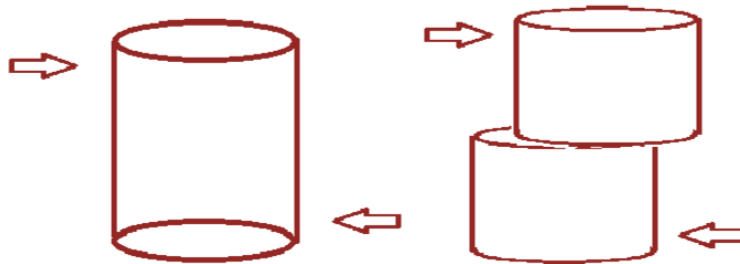
**Figura 3.1.1 Fragmentación de una partícula por el choque de dos bolas (Martínez, 2006).**

La atrición es la producción de detritos o partículas creadas por la acción de frotamiento entre dos cuerpos. Las partículas se disgregan debido a fuerzas de fricción que se generan entre dos superficies duras o entre ellas mismas. El resultado; se producen partículas pequeñas y grandes. En la Figura 3.1.2 se ven estos tipos de atrición involucrados en un proceso de molienda



**Figura 3.1.2 Fragmentación por atrición (Etapas en el Beneficio de los Minerales: Trituración, Molienda, Decantación y Flotación).**

El corte consiste en aplicar una o varias fuerzas paralelas al plano de corte y usualmente es combinado con otro tipo de fuerzas. La Figura 3.1.3 muestra el corte en una partícula.



**Figura 3.1.3 Fuerza de corte de una partícula**

La compresión es la aplicación de una o varias fuerzas en dirección normal al plano de donde se aplica dicha fuerza. Este tipo de acción de molienda usualmente es asociado con trituradoras de quijada y el rompimiento de aglomeraciones largas, duras, y material no dúctil. En la Figura 3.1.4 se ve como estas fuerzas están directamente sobre el plano.



**Figura 3.1.4 Fuerza de compresión de una partícula**

Conforme incrementa el número de partículas debido al efecto de la molienda; es más difícil aumentar la superficie, pues entre el material a moler y los medios de molienda se generan espacios intersticiales, es por eso que el tamaño de los medios de molienda es diferido y aumenta la probabilidad de ser molido de la forma más óptima. Existen factores que contribuyen a que los materiales a moler frenen su reducción; esto es, que la resistencia a la fractura de las mismas aumenta (Martínez, 2006). La fineza de las partículas alcanza un límite por los siguientes factores:

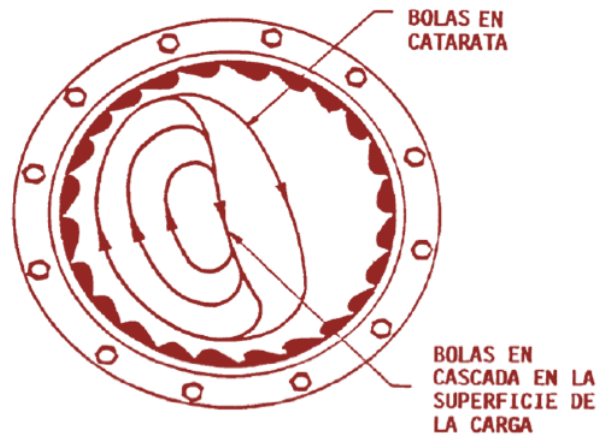
- Aumento de la resistencia a la fractura de las partículas.
- Aumento de cohesión entre partícula, con decrecimiento en el tamaño de partícula, causando la aglomeración.
- El medio de molienda se cubre de una capa de partículas finas las cuales amortiguan el impacto.
- La aspereza superficial del medio de molienda.
- El incremento de la densidad aparente del polvo debido a la disminución de tamaño de la partícula.

Dentro de una cámara de molienda (tambor); ocurren múltiples fenómenos que para su medición son complicados. El escurrimiento de las suspensiones minerales a través del lecho poroso de bolas ocurre simultáneamente con los eventos de fractura de minerales y por lo tanto, la unión de estos dos procesos puede estar mediado por el comportamiento mecánico de las suspensiones, esto es, a la intensidad de la viscosidad, de los esfuerzos de cedencia (esfuerzo que produce en un material una deformación específica, permanente y limitadora), y en general de la viscoelasticidad (comportamiento reológico anélastico). Sin embargo, se desconocen las relaciones explícitas que permitan modelar la fragmentación versus reología (Alzate, 2016).

Para comprender el funcionamiento interno de un molino es necesario conocer la distribución de tamaño de la fractura primaria, esto es; la distribución de tamaños de las partículas resultantes de la reducción de un fragmento. Si un material se rompe y los fragmentos producidos se mezclan de nuevo con la masa de polvo en el molino, y si esta distribución de fragmentos pudiese ser medida antes que algunos de ellos sean fracturados, entonces el resultado obtenido sería la distribución de fractura primaria (Leonard G. Austin). Para intentar comprender el comportamiento de las partículas que sufren reducción de tamaño al interior de un molino, es necesario conocer el promedio de fragmentación del mineral que se encuentra dentro de este. Esto va dirigido al tiempo retenido dentro del molino y especialmente al costo de energía que lleva a la reducción del tamaño inicial.



**Figura 3.1.5**  
**Movimiento en un**  
**molino de bolas a**  
**velocidad normal**  
**(Leonard G. Austin).**



En régimen de cascada en un molino de bolas se genera la fractura a través de colisiones continuas de las bolas, las cuales son levantadas por la rotación del tambor. En régimen de catarata de bolas tiene una velocidad de rotación más alta y una cantidad mayor de bolas son lanzadas de la superficie en lo alto del molino (Leonard G. Austin) como se puede ver en la Figura 3.1.5.

### **3.2 RELACIONES ENTRE LOS ELEMENTOS VARIABLES DE LOS MOLINOS**

Durante la operación de un equipo de molienda; existen múltiples elementos que obligan a hacer un determinado número de pruebas para encontrar la mejor manera de su funcionamiento. Es el proceso donde se busca una medida adecuada para la operación de este en una forma ordenada en el laboratorio, planta piloto y equipo en operación. Sin embargo; en la operación todavía se deben realizar algunos ajustes; sin interferir en el diseño propio del molino y solo se harán ajustes mínimos que no afecten tanto lo económico como son: velocidad o diámetro de elementos molidores.

- A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión).
- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas (Molienda, 2015).

### **3.3 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE MOLIENDA**

La selección de un equipo adecuado de molienda es una de las decisiones más importantes dentro de la industria; ya que es donde ocurre el mayor gasto de energía. Para seleccionar el tipo de equipo (bolas o barras) acorde con las necesidades de la planta, se tienen en consideración los siguientes parámetros principales:

- Razón largo/diámetro (entre 0.5 y 3.5).
- “Feed Size” o tamaño del material de alimentación.
- Razón de reducción (en el caso de los molinos de bolas, varía entre 20:1 y 200:1, muy arriba de las razones típicas de los molinos de barras que está entre 15:1 y 20:1).

### 3.4 TIPOS DE MOLINOS

En la industria se encuentran distintos tipos de molinos; respetan a una gama muy variada de la atrición de partículas y su uso se encuentra desde el beneficio de minerales, en la industria cementera, en la producción alimenticia, en la fabricación de medicinas, en la generación de pigmentos para pinturas y en cualquier tipo de generación de partículas que respetan la dimensión de los micrómetros. A continuación en la Tabla 3.4.1 se presentan algunas características generales sobre los molinos más comunes:

**Tabla 3.4.1 Características generales de los molinos de barras bolas y rodillos (Molienda, 2015).**

Tipo de molino	Tipo de Barras	Tipo de Bolas	Tipo de Rodillos
Tamaño en pies (metros)	D: 10 (3.05) L: 14 (4.3)	D: 10 (3.05) L: 16 (4.9)	D: 10 (9.15) Altura: 70 (21.3)
Potencia máxima en Hp	800	1000	2000
Capacidad de producción en toneladas por día	2700	3000	5000
Descarga	Rebalse periféricas	Rebalse diafragma	Neumática
Molienda	Húmeda Húmeda y seca	Húmeda Húmeda y seca	Húmeda menor al 20%

#### 3.4.1 CONSIDERACIONES DEL DISEÑO

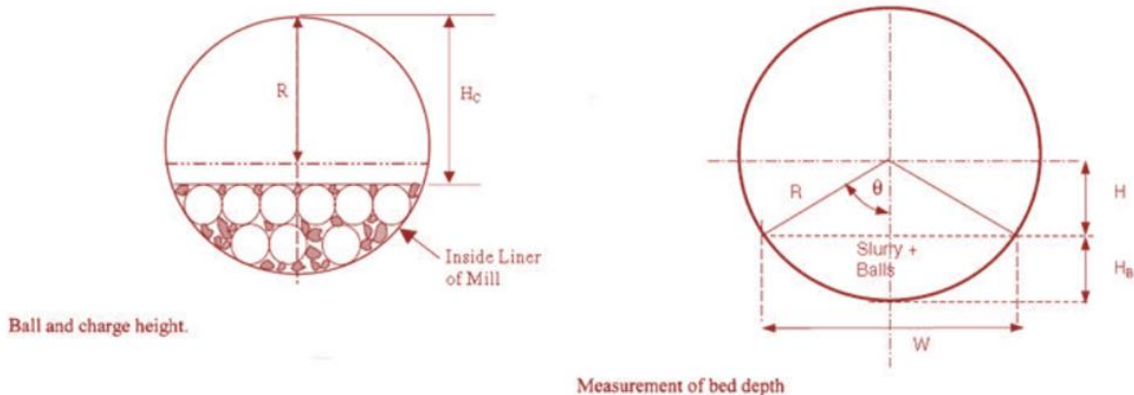
El diseño de un molino va de la mano de numerosos parámetros estudiados respecto a lo que se tiene (mineral), lo que se necesita obtener (beneficio en

planta) y también al resultado de una proyección a futuro de la planta. A su vez, se tienen los siguientes enfoques y consideraciones al momento de diseñar el molino:

- Tamaño del molino (razón largo/diámetro).
- Estimación inicial de la capacidad del molino. De manera de poder estimar los parámetros siguientes:
  - Sistema de alimentación (ángulos, diámetros de entrada, etcétera).
  - Alimentador de material a procesar (doble, simple, etcétera).
  - Sistema de descarga (simple, doble, etcétera; al centro del tambor o en un extremo, etcétera).
- Número de elevadores del molino.
- Material de Recubrimientos (entre varios, se encuentra el acero con magnesio, níquel endurecido, acero de alto carbono, etcétera. También se conocen con camisas de goma endurecida o sintética como recubrimiento.)
- Tipo de superficie interna del molino (suave, rugosa u ondulada).
- Reducción de tamaño de las partículas consideradas. Como antecedente, se tiene que la reducción del tamaño de las partículas de mineral es proporcional a la masa de la bola y al área de superficie de ésta.
- La reducción en el material a su vez depende de los siguientes factores, expresados de manera cualitativa:
  - Características de carga (masa, volumen, dureza, densidad, distribución de tamaño de la partícula de material procesado, etcétera)
  - Características de la molienda (masa, densidad, número de bolas, tamaño de bolas, etcétera).
  - Velocidad de rotación del molino.

- Densidad de la pulpa, y por lo tanto, de la cantidad de agua que se haya agregado.
- Volumen de carga de material procesado. Dependiendo del nivel de carga del molino se tendrán diversos resultados (varía la carrera de las bolas, la amortiguación del impacto, etcétera). El óptimo llenado del molino depende del tipo de molienda que se lleva a cabo y la potencia invertida en el proceso. Normalmente el volumen ocupado por material procesado con respecto al total del molino representa entre un 20 y un 25% (Alejandro Font F., 2010).

El volumen de carga debe darse de forma adecuada y controlada; pues éste también está en relación directa con el desempeño de un molino y su producción. Como ya se menciona, en la Figura 3.4.1.1 se muestra el índice adecuado de llenado de un molino es entre el 20 y 25%.



**Figura 3.4.1.1 Cantidad de bolas y material a moler dentro de un molino visto de perfil (Alejandro Font F., 2010).**

Como se puede observar en la Ecuación 3.4.1.1, en el trabajo efectivo influye el llenado adecuado de un molino, pues de esta manera se garantiza el efecto de cascada y catarata y el gasto de energía se encuentra dentro de lo planeado. El volumen de carga es el porcentaje del volumen interior del molino que está ocupado por los medios de molienda e incluye los espacios huecos que existen entre los medios. Este valor puede obtenerse de una forma aproximada (Errol G. Kelly, 1990). Esta relación se determina de la siguiente manera:

$$V. C. (\%) = 113 - 126 \frac{H_C}{D_M} \quad \text{Ec. 3.4.1.1}$$

Donde:

V. C. = Volumen de Carga

$H_C$  = Distancia interior máxima entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo.

$D_M$  = Diámetro interior del molino

### 3.5 POTENCIA ÚTIL DE UN MOLINO

Este tipo de relación entre el gasto de energía, lo que debe moler y el trabajo de todo el sistema de molienda ha sido tema de múltiples estudios y se ha llegado a distintas formulas que representan numéricamente la utilidad de un molino. Comúnmente se usa una expresión creada por Bond; sin embargo, hay otras

tantas que son también muy útiles y de las cuales se ahondará un poco más adelante (Tamaño de Molienda). Como ya se mencionó; Bond creó una expresión muy general ya que está basada en varias pruebas; y sobre todo muchos autores realizaron sus estudios con base a la obtenida por Bond como se muestra en la Ecuación 3.5.1:

$$kW = M_C \left( 4.879 * D_M^{0.3} (3.2 - 3V_p) C_S \left( 1 - \frac{0.1}{2^{9-10C_S}} \right) \right) + S_S$$

Ec. 3.5.1

Donde:

kW = Potencia útil del molino

$M_C$  = Peso de la carga de bolas [ton]

$D_M$  = Diametro interior entre revestimiento [m]

$V_p$  = Volumen de carga ocupado por las bolas [%]

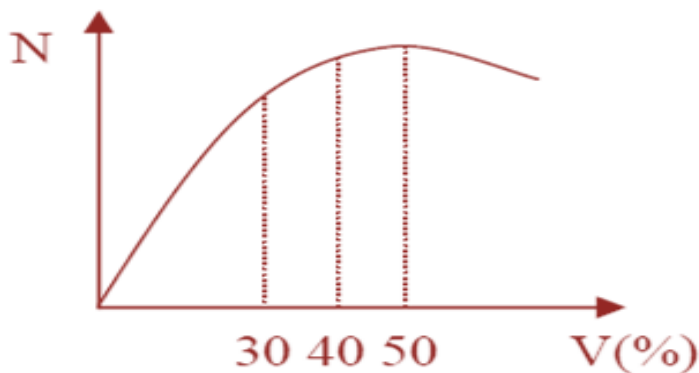
$C_S$  = Porcentaje de la velocidad crítica

$S_S$  = Factor de tamaño de las bolas [kW/ton bolas]

### 3.5.1 POTENCIA

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga es del 50% aproximadamente, sin embargo, generalmente se trabaja entre un 30 y un 40% ya

que como la curva es bastante plana, la potencia entregada es similar a la del 50% como se puede apreciar en la Figura 3.5.1.1.



**Figura 3.5.1.1 Gráfica de rendimiento adecuado de potencia de un molino (Molienda, 2015).**

En el proceso de molienda solo el 1% de la energía aplicada es utilizada en la fractura de las partículas (M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M. Msc).

### 3.5.2 CONSUMO DE ENERGÍA

Cinco parámetros determinan la potencia tomada por el molino: el diámetro, la longitud, el volumen de carga, la velocidad y el tipo de tambor. Teóricamente la potencia tomada  $P$  es proporcional a la longitud  $L$ , a la masa de la carga ( $D_M^{2.5}$ ), a la longitud del brazo de torsión ( $D_M$ ) y la velocidad angular ( $1/\sqrt{D_m}$ ); así (Errol G. Kelly, 1990) que se muestra en la Ecuación 3.5.2.1.

$$P = LD_M^{2.5}$$

Ec. 3.5.2.1

$P$ = potencia que requiere el molino

$L$ = longitud del tambor del molino

$D_M^{2.5}$ = masa de la carga



Diversos estudios como el de Gow y sus asociados determinaron un porcentaje de 2.6 para el exponente en su estudio relativo a los molinos de bolas, y Rowland cito 2.3 para molienda autógena. Es probable que las cifras que exceden de 2.5 sean ocasionadas por un efecto de límite de pared que favorece el levantamiento de los medios, mostrado en la Ecuación 3.5.2.2 y en consecuencia incrementa la potencia consumida. Para esto, una forma más realista de expresarlo es:

$$P \propto [L + (KD_M)] D_M^{2.5} \quad \text{Ec. 3.5.2.2}$$

En donde:

P= potencia que requiere el molino

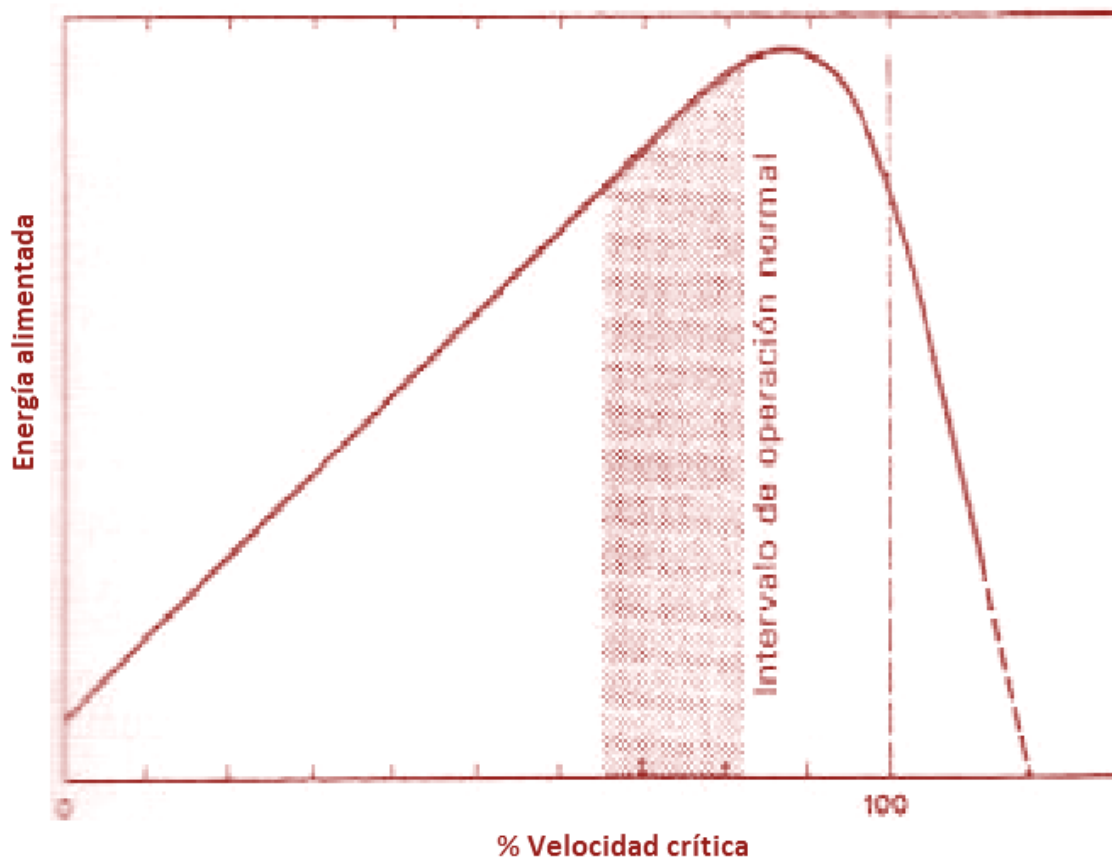
L= longitud del tambor del molino

$D_M^{2.5}$ = masa de la carga

K= factor de carga

$D_M$ = longitud del brazo de torsión

Como se muestra en la Figura 3.5.2.1 la potencia consumida aumenta inicialmente en forma lineal con la velocidad, pero a medida que aumenta el deslizamiento disminuye el régimen de incremento, y después de pasar por un máximo, disminuye hacia cero al centrifugarse la carga.



**Figura 3.5.2.1 Efecto de la velocidad del tambor en el consumo de potencia (Errol G. Kelly, 1990).**

Una ecuación típica para calcular la potencia es:

$$P = 8.44D_M^{2.5}LK_{Mt}K_LK_{Sp} \quad \text{Ec. 3.5.2.3}$$

Donde:

P= consumo de potencia [kW]

$D_M$ = diámetro interior del molino [m]

L= longitud del molino [m]

$K_{Mt}$ =factor del tipo de molino

- 1.0 para molinos de derrame en medio húmedo
- 1.13 para molinos de bolas con diafragma de medio húmedo y molinos periféricos de barras de medio húmedo
- 1.25 para molinos de bolas con diafragma de medio seco y molinos periféricos de barras de medio seco

$K_L$ =factor de carga

$K_{Sp}$ = factor de velocidad

Una vez que una partícula se ha quebrado una, dos o hasta tres veces, es demasiado pequeña para quebrarse eficientemente a menores tamaños en la misma cara (Errol G. Kelly, 1990).

### 3.6 RELACIÓN ENERGÍA-REDUCCIÓN

Es muy común que en la industria metalúrgica se diseñen parámetros que ayuden a definir ciertas situaciones para simplificar las tareas; aún así, estas relaciones numéricas se siguen actualizando constantemente y consideran nuevas variables que pueden influir. Una relación empírica entre la energía y la reducción de tamaño que se ha propuesto y en general se ha aceptado es:

$$dE_0 = -Kd \frac{d}{d^n} \quad \text{Ec. 3.6.1}$$

Donde:

$E_0$ = energía específica necesaria para suministrar la energía de superficie de la nueva superficie

$d$ = tamaño de partícula

$K$ = factor de carga

### 3.7 MÉTODO DE BOND

A pesar de su naturaleza empírica, este método es todavía utilizado para el diseño de circuitos de reducción de tamaño. Por otra parte, puede esperarse que permanezca en uso por algún tiempo siendo las razones esencialmente tres: existe una vasta cantidad de información publicada disponible para equipos industriales, y está en constante aumento; también, el método es bastante satisfactorio para cálculos iniciales: aún cuando se está diseñando un circuito de alimentación y producto en especial, raras veces pueden darse con suficiente confiabilidad para justificar métodos más elaborados; y por último, este método y sus adaptaciones son procedimientos simples para medir la eficiencia o el rendimiento del molino. Esto se hizo con base en trabajo experimental muy extenso; Bond determinó la energía que se requiere para lograr la fractura en una partícula:

$$W = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{d_0}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right) \quad \text{Ec. 3.7.1}$$

En donde:

$W$ = consumo específico de energía

$W_i$ = indicador de tenacidad del mineral. Índice de trabajo de Bond

$d_0$ = tamaño 80% que pasa en la alimentación

$d_1$ = tamaño 80% que pasa en el producto

El índice de trabajo es básicamente una medida de la dureza del material, pero incluye también la eficiencia mecánica del equipo. En la siguiente Tabla 3.7.1 se muestran algunos valores típicos de trabajo encontrados mediante las pruebas:

**Tabla 3.7.1 Índice de trabajo de distintos materiales hecha por Bond (Errol G. Kelly, 1990).**

MATERIAL	TRABAJO [kW/t]
Todos los materiales	15.19
Barita	6.86
Basalto	22.45
Clinker de cemento	14.84
Carbón mineral	12.51
Mineral de cobre	14.44
Galena	10.68
Mineral de oro	16.31
Mineral de hierro	16.98
Caliza	12.77
Cuarzo	14.05

La ley de Bond, es una relación puramente empírica obtenida por molienda de lotes de un gran número de minerales. La forma particular de la ecuación utilizada es:

$$E_0 = K \left( \frac{1}{d_{80,0}^{1/2}} - \frac{1}{d_{80,1}^{1/2}} \right) \quad \text{Ec. 3.7.2}$$

Donde:

$E_0$ = consumo específico de energía

$K$ = constante indicado en tablas dado al material

$d_{80,1}$ ,  $d_{80,0}$ =80% del tamaño que pasa antes y después del evento de fractura respectivamente.

Rittinger estableció que la energía de fractura es proporcional al área de la nueva superficie producida:

$$E_0 = K \left( \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_1} \right) \quad \text{Ec. 3.7.3}$$

En donde:

$E_0$ = consumo específico de energía

$K$ = constante indicado en tablas dado al material

$d_1, d_0$ =80% del tamaño que pasa antes y después del evento de fractura respectivamente.

Kick propuso la teoría de los cambios geométricos equivalentes en los tamaños iguales de las partículas que requieren igual cantidad de energía (Errol G. Kelly, 1990):

$$E_0 = K \ln \left( \frac{d_1}{d_0} \right) \quad \text{Ec. 3.7.4}$$

Donde:

$E_0$ = consumo específico de energía

$K \ln$ = logaritmo de constante del material

$d_1, d_0$ = 80% del tamaño que pasa antes y después del evento de fractura respectivamente.

### 3.7.1 ECUACIONES DE SIMILARIDAD

En un enfoque enteramente diferente al desarrollo de una relación de energía-reducción de tamaño, Rumpf y sus colaboradores aplicaron el análisis dimensional para desarrollar una serie de ecuaciones de similitud para la fractura bajo diversas condiciones. Demostraron que este enfoque es útil para describir la fractura que ocurre sobre la base de las propiedades del material y las condiciones de carga (Errol G. Kelly, 1990).

### 3.8 VOLUMEN DE CARGA

Es la relación que existe entre el volumen del molino, el volumen del material y el volumen de los elementos moledores (barras o bolas) indicado en la Ecuación 3.8.

$$V(\%) = \frac{(V_{material\ a\ moler} + V_{elementos\ moledores})}{V_{volumen\ interior\ del\ cilindro}} * 100$$

Ec. 3.8

Donde:

V(%)= porcentaje de carga

Habitualmente es del 30% al 40%, y de este volumen, el material a moler ocupa entre un 30 a un 40% (Molienda, 2015).

### **3.9 TIPOS DE MOLIENDA: HÚMEDA Y SECA**

La molienda se puede hacer en materiales secos o a suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda Húmeda. Es habitual que la molienda sea seca en la fabricación del cemento Portland y que sea húmeda en la preparación de minerales para concentración (Molienda, 2015). Todo depende del proceso consecuente que tendrá el material obtenido.

### **3.10 COSTO DE PRODUCCIÓN**

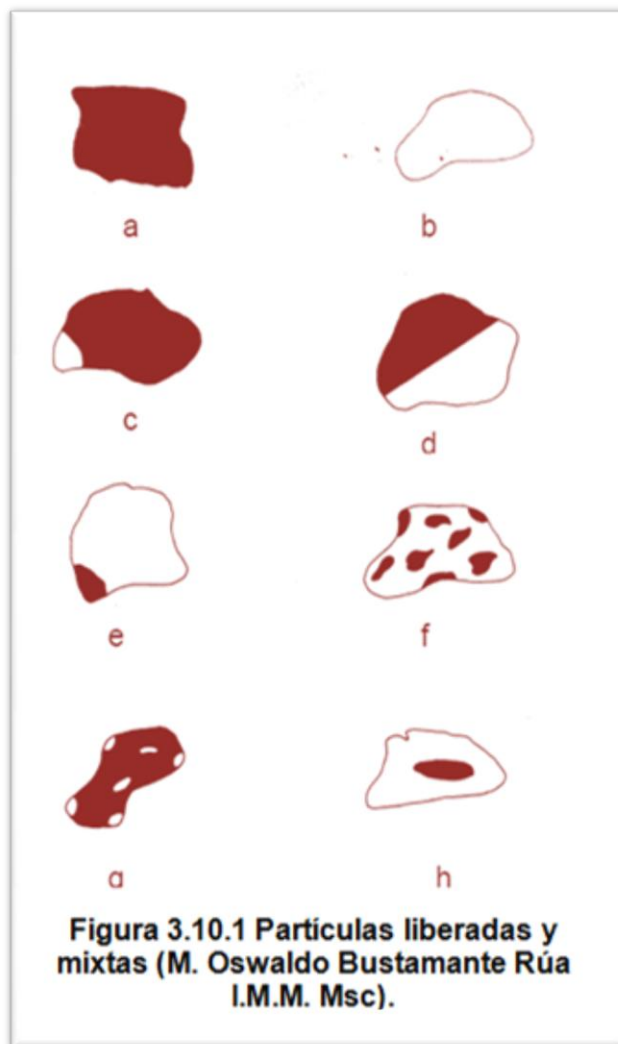
Estudios sobre el comportamiento de los molinos en trabajos de minería y la industria del cemento, han permitido determinar los desgastes de los revestimientos y los elementos molidores. Así, para el molino de barras, los desgastes de revestimiento oscilan entre 20 y 200 g/t tratada y para los molinos de bolas, entre 100 y 1000 g/tn tratada (Molienda, 2015). Las partículas mixtas juegan un papel importante en la concentración, debido a que ellas no se encuentran liberadas completamente. El objeto de la trituración y molienda es alcanzar un grado de liberación de partículas, ya que al estar liberadas responderán mejor a los diferentes métodos de concentración. El problema es que hay diferentes tipos de partículas mixtas y cada una de ellas tendrá un comportamiento particular (M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M. Msc).



En la Figura 3.10.1 se pueden apreciar los distintos tipos de partículas que se encuentran dentro del proceso de molienda. Es importante observar que algunos fragmentos pueden llegar casi por completo en estado puro; sin embargo, debido al proceso que siguen estas partículas podrían no ser clasificadas por un sobretamaño. Por ejemplo, si el proceso al que se dirigen es flotación, los reactivos involucrados simplemente no podrían hacer el efecto para el cual están diseñados debido a la densidad o condiciones mismas del mineral involucrado.

A medida que disminuye el tamaño de partícula la probabilidad de ocurrencia de defectos disminuye y por lo tanto se requerirá de mayor energía para producir su fractura. El tamaño de partícula al que ocurre este fenómeno es conocido como límite de molienda (M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M. Msc).

Rittinger, Kick y Bond se ocuparon de diseñar formulas empíricas por la preocupación de saber la cantidad de energía que se ocupa en relación a la reducción de partículas. El primero define que “la energía consumida en la reducción de tamaños es proporcional al área de la nueva superficie creada”. Por otro lado, Kick propone que “los cambios geométricos equivalentes en el tamaño



de las partículas requieren la misma cantidad de energía”, mientras que Bond plantea que:

$$\varepsilon = 21.5 H + 23 \quad \text{Ec. 3.10.1}$$

$\varepsilon$  = Energía consumida [J/cm<sup>2</sup>]

H = Dureza de escala de Mosh del mineral

Como la expresión empírica de Bond no describía el efecto del tamaño de las partículas antes y después de la fractura, planteó una expresión matemática, a partir de la integración de la expresión general de energía en función del tamaño de las partículas obteniendo el siguiente modelo:

$$\delta\varepsilon_0 \cong \delta \left( \frac{d}{d^n} \right) \quad \text{Ec. 3.10.2}$$

Donde:

n = 1.5

$$E_0 = KB \left( \frac{1}{\sqrt{d_{80} \text{ producido}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{80a} \text{ lim entro}}} \right) \quad \text{Ec. 3.10.3}$$

O también:

$$W = 10Wi \left( \frac{1}{\sqrt{d_{80} \text{ producido}}} - \frac{1}{\sqrt{d_{80a} \text{ lim entro}}} \right) \quad \text{Ec. 3.10.4}$$

Donde:

$W$ = consumo específico de energía

$W_i$ = indicador de tenacidad del mineral. Índice de trabajo de Bond

$d_0$ = tamaño 80% que pasa en la alimentación

$d_1$ = tamaño 80% que pasa en el producto

Para obtener un índice de trabajo en la molienda, se hace con la relación entre la energía aplicada para reducir una partícula y el tamaño obtenido; sumando también el desgaste que los equipos tienen por el trabajo realizado (M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M. Msc).

### **3.11 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN MOLINO CON EJE EXCÉNTRICO**

Los molinos planetarios se encuentran enfocados a la preparación de muestras a nivel de laboratorio. Dan un control de calidad y desarrollo de nuevos materiales. También pueden ser usados para la mezcla y homogeneización de sólidos y suspensiones. En diseños especiales son ideales para la aleación mecánica de materiales duros y frágiles. Dentro de las ventajas podemos encontrar extrema finesa justo en la gama de los micrómetros; rápido y sin pérdida en la pulverización y mezcla, ya sea en seco o en húmedo.

Los molinos planetarios tienden a ser utilizados exitosamente en casi todos los campos de la industria y la investigación; particularmente donde los requerimientos de pureza, rapidez y nivel de finura son extremos. Los resultados en este tipo de molienda es por la superposición de las fuerzas centrifugas ya que cambian constantemente (RETSCH, 1996).

La característica de este tipo de molinos planetarios es que actúan de forma vertical; esto es que la flecha principal se ubica al centro del sistema de molienda y está montado en un sistema completamente direccionado a noventa grados de la horizontal y los tambores giratorios tienen un sistema que hace girar el tambor donde se encuentra la carga. Sin embargo, el molino con eje excéntrico, tiene otra forma de funcionamiento; ya que el eje principal o flecha se encuentra en una posición completamente horizontal y el tambor se queda fijo respecto al eje, haciendo que en relación al centro del tambor aumente su volumen aparente conforme se aleja del centro y se puedan combinar varias condiciones de operación del molino.

Los índices de energía requeridos en la reducción de tamaño son muy altos; como ya se ha mencionado, y esto motiva al desarrollo de nuevos sistemas que funcionen de manera adecuada para la molienda. La industria minero-metalúrgica ha buscado: optimizar sus procesos adquiriendo nuevas tecnologías, diversos intentos están dirigidos al beneficio de minerales y en forma particular a las áreas de molienda y clasificación en donde, los objetivos que se persiguen son: Liberar partículas minerales valiosas (Mena) de material estéril (ganga), Evitar sobremolienda para reducir consumo de energía y eliminar problemas en operaciones posteriores y separar partículas sólidas dentro de un intervalo de tamaño específico que facilite su transporte, manejo y procesamiento posterior (O. J. A. Barragán).

## **4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El proceso que se siguió para realizar las pruebas de laboratorio es igual que con cualquier molino convencional, pues los pasos son los mismos. A continuación se muestra un listado en orden:

1. Triturar material (basalto) hasta obtener la granulometría a 10 mallas.
2. Pesar el basalto según sea el caso. Para este proyecto se trabajó con 45% del volumen requerido (324 g).
3. Obtener la carga de medios de molienda con la repartición de tamaños y determinar el porcentaje que corresponde.
4. Según sea el caso; suministrar la cantidad de agua respecto a la carga, que en esta fase fue de 1:1 con relación al material.
5. Sellar bien con la ayuda de los accesorios y poner el tambor del molino al eje con el que se quiera trabajar respecto al centro (20, 40, 80, 150 y 180%).
6. Hacer funcionar el molino conectándolo a la corriente durante el tiempo necesario, que en esta parte se decidió hacerlo en lapsos de 30 minutos.
7. Separar las bolas del basalto para obtener el peso más aproximado.
8. Tamizar la carga y obtener el peso en cada uno de los tamices para obtener la granulometría.

De esta manera fue que se hizo el procedimiento para la observación de resultados y de donde se obtuvieron las gráficas que se muestran más adelante a detalle.

### **4.1 PROCESO DE MOLIENDA**

Dentro de las características del proceso de molienda, el trabajo del molino se hace con un fluido no newtoniano, ya que el trabajo realizado influye en el

aumento de la temperatura y con la tensión cortante (actúa tangencialmente al plano) que se aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano carece de un valor de viscosidad definido y constante que ayude a determinar parámetros que ocurren dentro de un tambor de molino.

La reología de la suspensión permitirá estudiar la formación y el flujo de los materiales sometidos a fuerzas de contacto, y analizar la relación que existe entre las variables de esfuerzo ( $\sigma$ ), y la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), donde:

Dependiendo de cómo sean estas relaciones, las suspensiones presentan comportamientos reológicos diferentes y la caracterización reológica permite determinar cómo fluirá dentro de un molino rotatorio una suspensión mineral y los tiempos de residencia (Alzate, 2016). Esto cambia dependiendo de cada material con el que este sujeto el estudio, el comportamiento va a ser diferente al momento de la conminución.

La suspensión en un proceso de molienda es considerada un fluido no newtoniano, ya que está en función del gradiente de velocidad. Sin embargo, esta tarea es compleja debido a que el procesamiento de la suspensión depende de las condiciones del proceso (Alzate, 2016). Aunque, regularmente las condiciones se intentan mantener de manera constante, lo más cercano a los factores que influyen en el proceso.

La reología de una suspensión mineral es compleja; ya que depende de varios parámetros tales como: contenido de sólidos, tamaño de partícula, la distribución del tamaño de partícula, forma de la partícula, valor de pH, tasa de deformación, temperatura, tiene una influencia significativa sobre la reología de la suspensión en la molienda húmeda (Alzate, 2016). Debido a esto; el objetivo primordial es que el trabajo en la molienda, se caracterice por tener el control de todo el material que entra para poder obtener un mejor resultado en su descarga.

La tasa o velocidad de cizalladura en un molino depende de su velocidad de rotación, la identificación de dichas tasas de cizalladura propone todo un reto, debido a que son las que controlan fuertemente la magnitud de las viscosidades dentro del proceso, afectando la reducción de tamaño y por tanto la eficiencia de la molienda (Alzate, 2016). Dentro de todo esto; podemos atribuir la importancia que tiene la velocidad crítica; pero, el conocimiento adecuado del funcionamiento de un molino se encuentra en la experiencia, en la manera en que se han obtenido los resultados y de cómo es que se pueden mejorar con el menor número de pruebas, recurriendo al conocimiento amplio de la estructura del mineral y de las características técnicas que necesita el molino.

#### **4.2 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL UTILIZADO**

El efecto de la forma de la partícula en el comportamiento reológico de suspensión para la molienda húmeda no ha sido muy estudiado, pero en algunos estudios de molienda ultrafina se encontró que la esfericidad muestra menor viscosidad que una partícula laminar. Los resultados demuestran la importancia de la forma de la partícula que afectan a la reología de la suspensión (He, 2004). También por las condiciones mismas del efecto causado por la molienda, se determina generalmente una partícula esférica o próxima a la esfericidad para un desarrollo del estudio.

#### **4.3 MATERIAL USADO EN LAS PRUEBAS**

El basalto es una roca volcánica compuesta fundamentalmente por plagioclasas cálcicas y piroxenas (negro), con cuarzo y olivino (verde) o feldspatos (Departamento de Petrología y Geoquímica (Universidad Complutense de

Madrid)). Conforme a las pruebas anteriores se eligió continuar con el basalto, y solo se cambio la cantidad de carga a 45%. Y con un peso específico ya medido de  $2.85 \text{ ton/m}^3$  (Rendón, 2018).

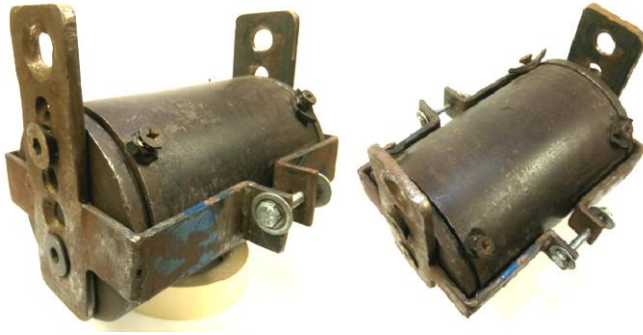
#### **4.4 EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO**

Durante las pruebas realizadas se utilizaron diversos equipos ubicados dentro del laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, como son: el molino trepidatorio, un motor de un caballo de fuerza, y otras herramientas que se van a detallar más adelante; y conforme a una lista realizada previamente usados en los trabajos anteriores de “Molienda Trepidatoria y Clasificación Simultanea de Wallastonita a Nivel Laboratorio” (O. J. A. Barragán) y “Molienda de bolas con eje excéntrico” (Rendón, 2018).

##### **4.4.1 TAMBOR**

Con las pruebas relacionadas a los trabajos anteriormente mencionados, se decidió implementar varias modificaciones del molino utilizado, pues en principio solo se usó en seco y con el eje excéntrico dentro del tambor. Por lo tanto, se hizo un ajuste de empaques en las tapas del tambor; estos empaques son de goma y evitan perfectamente la fuga de pulpa.





**Figura 4.4.1.1 Fotografía del molino.**

#### 4.4.2 BOLAS

Las bolas que se utilizaron son de acero, y se usaron una distribución distinta a las anteriores pruebas y se manejo la recomendación de Taggart para una distribución de bolas en un molino de laboratorio con la primera distribución mostrada en la Tabla 1.3.2.1 (Casillas, 1996):

**Tabla 1.4.2.1 Distribución de bolas para molino de laboratorio (Casillas, 1996).**

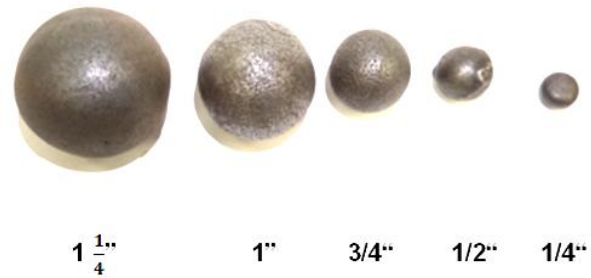
TAMAÑO	(% peso)	1 $\frac{1}{4}$ "	1"	3/4"	1/2"	1/4"	1/8"
1 $\frac{1}{4}$ "	100	54.5	26	13.5	5	1	
3/4"	100			79.5	18.5	2	
1/2"	100				78	19	3

La selección de la distribución que fue utilizada se encuentra resaltada en azul, con un porcentaje de 54.5% de bolas de uno un cuarto de pulgada de tamaño,

26% de una pulgada, 13.5 de tres cuartos de pulgada, 5% de media pulgada y 1% de un cuarto de pulgada.

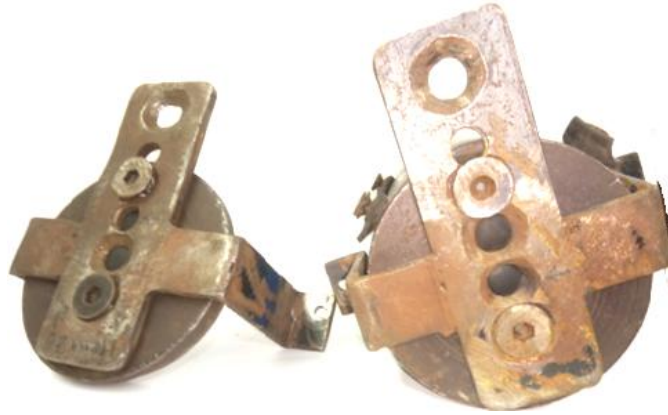
Se usó esta distribución para cubrir más los espacios intersticiales que son generados debido al diámetro de las bolas más grandes y el tamaño de alimentación.

**Figura 4.4.2.1**  
**Distribución de bolas**



#### 4.4.3 APRIOSIONADORES

Las tapas del molino son cerradas con dos aprisionadores diseñados especialmente con este fin y son ajustados con una ceja del mismo armazón en cada extremo y dos tornillos de  $1 \frac{1}{4}$ " con dos tuercas y cuatro rondanas.



**Figura 4.4.3.1 Imagen de los aprisionadores que sellan el tambor.**

La imagen anterior muestra los aprisionadores colocados en las tapas del tambor de molienda en la parte exterior.



**Figura 4.4.3.2 Vista trasera y frontal de los aprisionadores.**

La extensión para sacar el eje, se encuentra fija en el mismo aprisionador, uno de cada lado y tienen aberturas que corresponden a una mayor excentricidad que en este caso solo se pudo utilizar de 150 y 180% respecto al centro; y no se pudieron

ocupar las demás aberturas, ya que algunas no pudieron convivir debido al propio diseño del tambor.

#### **4.4.4 MOTOR**

El motor que se ocupó es de 1 HP de 15 A y 127/220 V de 1725 rpm con reductor de velocidad, modelo MOD 6C48GB de la marca EXCELL.



**Figura 4.4.4.1 Motor utilizado en pruebas.**

#### **4.4.5 REDUCTOR DE VELOCIDAD**

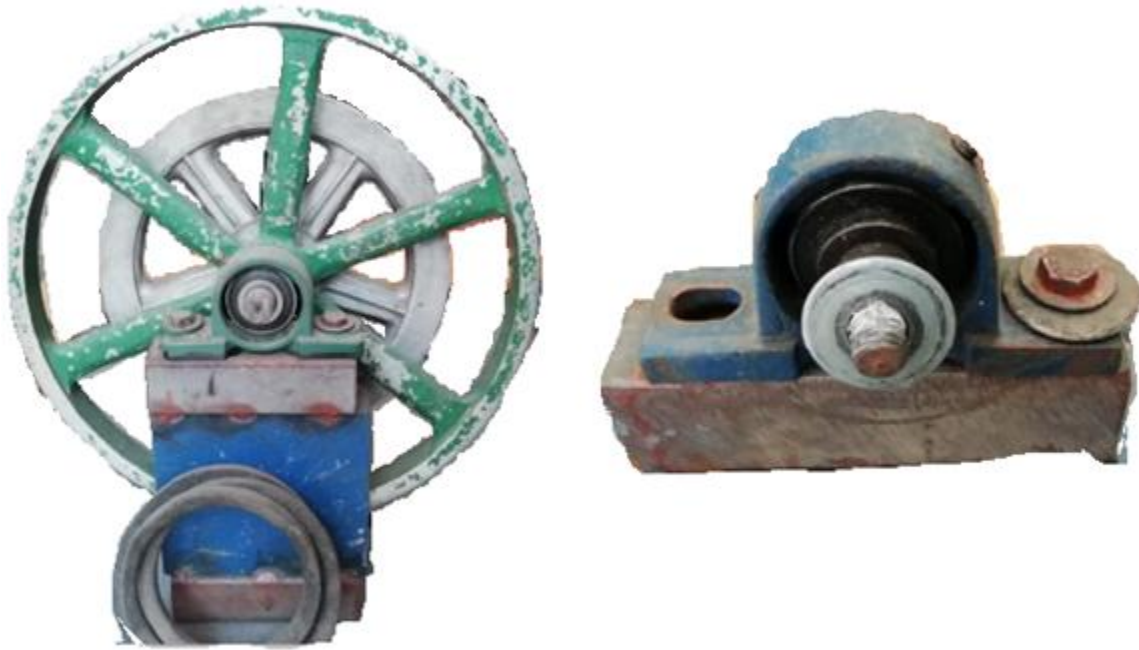
La velocidad del motor es muy alta como se especificó anteriormente. Para esto se hace el uso de un reductor de velocidad. Éste deja a un 10% de la frecuencia de fábrica del motor y se aproxima a la velocidad crítica requerida.



**Figura 4.4.5.1 Reductor de velocidad vista frontal y de planta respectivamente.**

#### **4.4.6 POLEAS Y CHUMACERAS**

La velocidad del motor con el reductor de velocidad sobrepasa la velocidad crítica, por eso se tiene la adaptación de dos poleas de 10 y 14" con sus respectivas bandas que ayudan a reducir las revoluciones por minuto. Para las chumaceras no se utilizó una flecha completa, respetando el mismo diseño del molino, los ejes son cortos de 3/4" y se les hizo una cuerda para adaptar dos tuercas de seguridad. Así mismo, las chumaceras están colocadas sobre una base fija a la mesa de trabajo con una altura de 23 cm para contener una flecha de 3/4".



**Figura 4.4.6.1 Poleas de 14 y 10" respectivamente y chumaceras.**

#### **4.4.7 HERRAMIENTAS**

Además del armado y para establecer la carga del molino se utilizaron otro tipo de herramientas las cuales son: microscopio Zess Stereo Discovering V8, báscula, tamizador, juego de tamices, Vernier, charolas, embudo, vaso de precipitado, brochas, cronómetro, cucharón, dados, llave perica, llave Stilson y matraca.

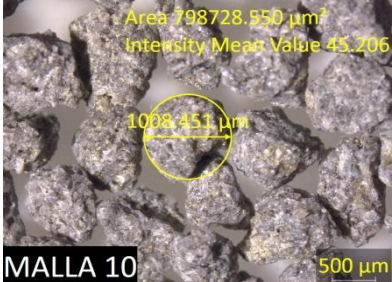
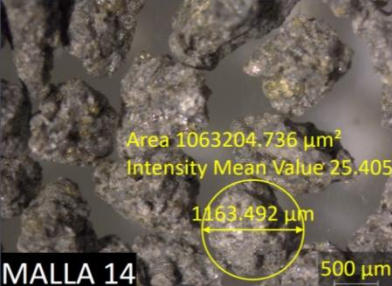
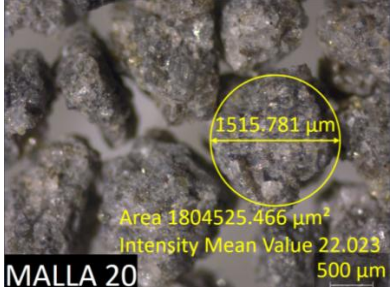



**Figura 4.3.8 Herramientas utilizadas en las pruebas en laboratorio.**

#### **4.5 SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS**

Durante el proceso de molienda se producen distintas granulometrías que buscan la separación de partículas. El basalto es una roca volcánica constituida por piroxenas, cuarzo, olivino. En la Tabla 4.5.1 se muestra la pérdida de cohesión de las distintas especies minerales a partir de la malla 100. Conforme a la distinta granulometría se aprecia de forma clara la separación. Al tamizar destaca de manera clara una coloración más oscura en las partículas grandes antes de llegar a la malla número 100 y a partir de ahí la coloración se vuelve a tonos más claros y brillantes, que es donde se encuentran las especies cristalinas como el cuarzo.

**Tabla 4.5.1 Imágenes de las pruebas granulométricas con microscopio.**

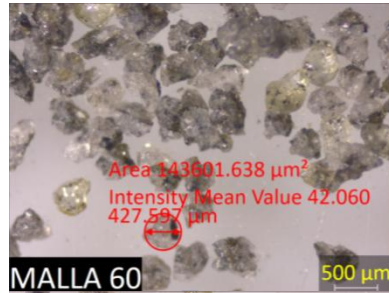
<p>NÚMERO DE TAMIZ</p> <p>μm</p> <p>mm</p>	<p>IMAGEN</p>
<p><b>MALLA 10</b></p> <p><b>1600</b></p> <p><b>1.6</b></p>	
<p><b>MALLA 14</b></p> <p><b>1190</b></p> <p><b>1.19</b></p>	
<p><b>MALLA 20</b></p> <p><b>800</b></p> <p><b>0.8</b></p>	
<p><b>MALLA 35</b></p> <p><b>500</b></p> <p><b>0.5</b></p>	



**MALLA 60**

**250**

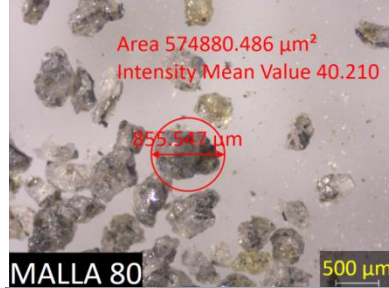
**0.25**



**MALLA 80**

**117**

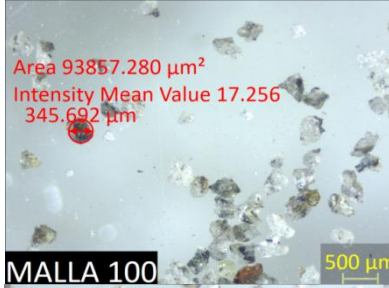
**0.117**



**MALLA 100**

**149**

**0.149**



**MALLA 200**

**73**

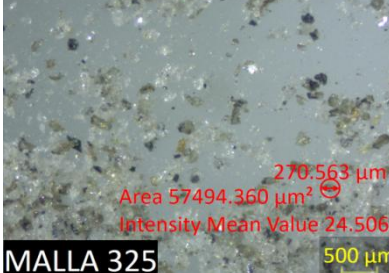
**0.073**



**MALLA 325**

**43**

**0.043**



Hasta la imagen titulada MALLA 80 se puede apreciar que las distintas especies minerales se encuentran aún unidas; para el caso de un procesamiento de minerales esto es una condición que se quiere evitar, ya que cuando se trata de valores o ley de un mineral lo que se busca es obtener un mejor beneficio de estos y la separación es mejor cuando se encuentran las partículas liberadas. A partir de la imagen titulada MALLA 100 se distingue de forma más clara la separación de los distintos cristales y es aquí la parte en que se puede recuperar los valores dentro de un mineral. A partir de esa imagen se aprecia en gran medida los distintos grupos de especies minerales a una escala muy pequeña a 500  $\mu\text{m}$  (0.05 cm); de hecho, el fotografiarlo es más complicado.

#### 4.6 ELEMENTOS TÉCNICOS

Las partes con las que se contó para la realización de la fase tres de este trabajo se muestran en la Tabla 4.6.1:

**Tabla 4.6.1 Elementos constantes en fase 3**

Volumen del molino	0.00113 m <sup>3</sup>
Peso específico de bolas	7.85 t/m <sup>3</sup>
Peso específico de basalto	2.85 t/m <sup>3</sup>
Diámetro interno de molino	0.1 m
Altura de tambor	0.15 m
Tiempo de molienda	30 min
Relación de humedad	1:1
Carga de bolas	1.65 kg
Carga de material	0.324 kg

Estas partes fueron constantes durante todo el periodo experimental de la fase tres, en donde también se podría incluir el Voltaje del motor y el lugar geográfico en donde se realizaron las pruebas.

#### **4.7 VELOCIDAD CRÍTICA DE MOLINO CON EJE EXCÉNTRICO**

Para las pruebas hechas en este estudio, se calculó una velocidad crítica de 133.7 rpm. Pero debido a la oportunidad de cambiar de velocidad también se realizaron pruebas a una velocidad más baja.

Las velocidades con las que se pudieron hacer pruebas son: 104 rpm y otra con 74 rpm que corresponde a 78% y a 55% respectivamente.

Para cada una de las pruebas presentadas se hicieron dos con los mismos parámetros y los resultados obtenidos se promediaron con el fin de detectar cualquier anomalía y descartarla.

#### **4.8 CARGA DE MOLINO**

La carga de molino se hizo con base en la prueba estándar de la fase dos de 285 g de basalto y 1.65 kg de carga de bolas (Rendón, 2018). Para el caso de ésta fase, la carga de material a moler se decidió a 35% (324 g) de esta, pero la carga de bolas se decidió reducir a un 30% (756 g). Al bajar la densidad de la carga de bola lo que se pretende es hacer un mejor aprovechamiento del motor reduciendo la cantidad de energía que está involucrada.

#### 4.9 CURVAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

De las curvas que se obtuvieron se hace la separación entre las pruebas en húmedo y seco. De esa manera se presentan con un mejor orden los gráficos de la distribución de la masa en porcentaje. La siguiente es una grafica de distribución granulométrica estándar. Se debe aclarar que para cada tipo de prueba se diseño una estándar que respeta a los parámetros en cuestión. En esta gráfica se presentan los resultados obtenidos en pruebas a 74 rpm en húmedo y seco; con una carga al 45% (0.324 kilogramos). Las pruebas hechas con pulpa se hicieron con una proporción de 1:1 asumiendo las recomendaciones para molinos de bolas a nivel de laboratorio hechas por Taggart. El tiempo fue el mismo que se manejo en la fase dos (Rendón, 2018) y una distribución de medios de molienda desde  $1 \frac{1}{4}$ " hasta  $\frac{1}{4}$ ".

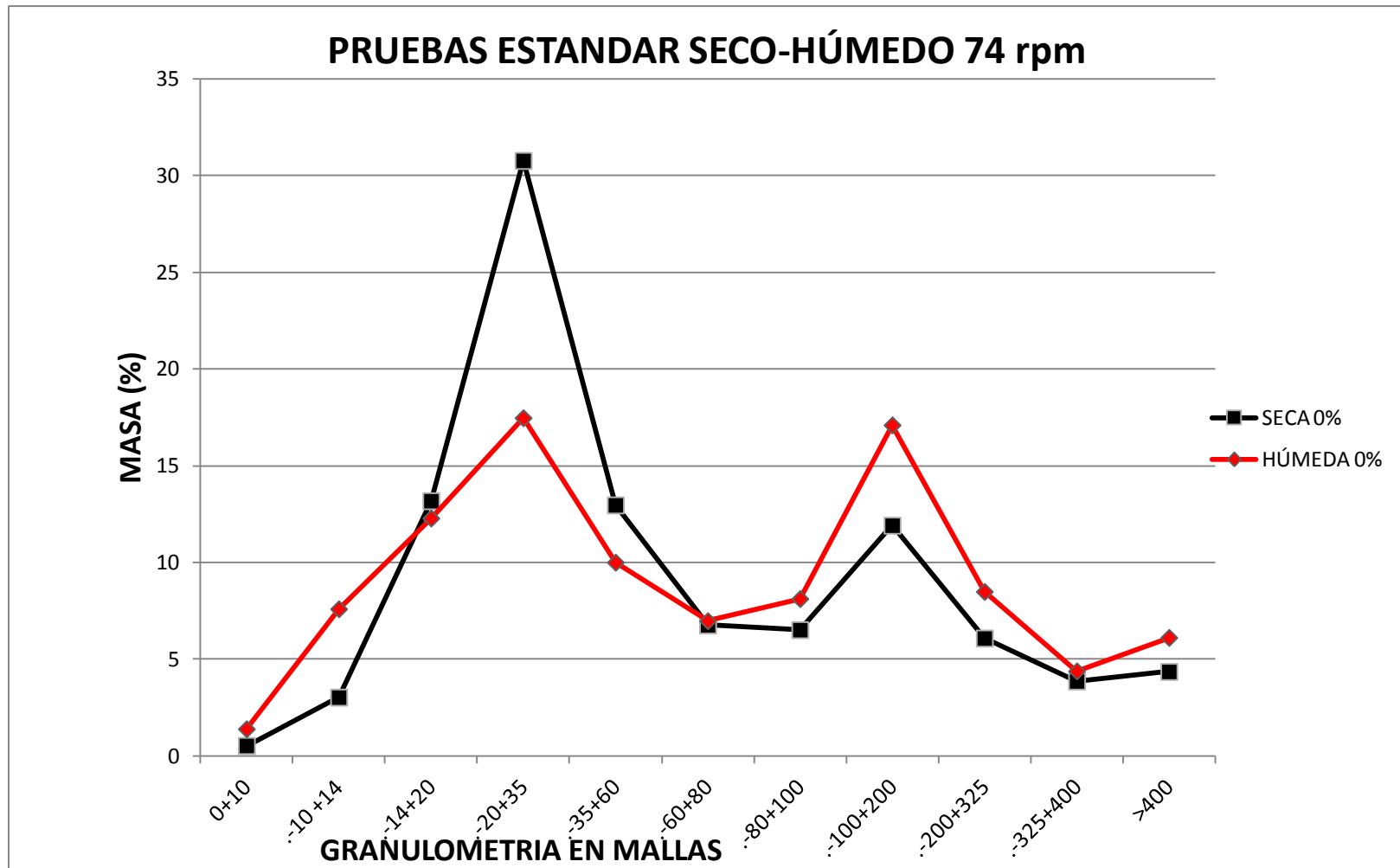


Figura 4.9.1 Gráfica de distribución granulométrica de pruebas estándar (74 rpm).

### PRUEBAS EN SECO 74 rpm

Estas son las pruebas en seco, con las mismas rpm de 74, la misma carga. Siendo la prueba de 0% de excentricidad la estándar presentada anteriormente.

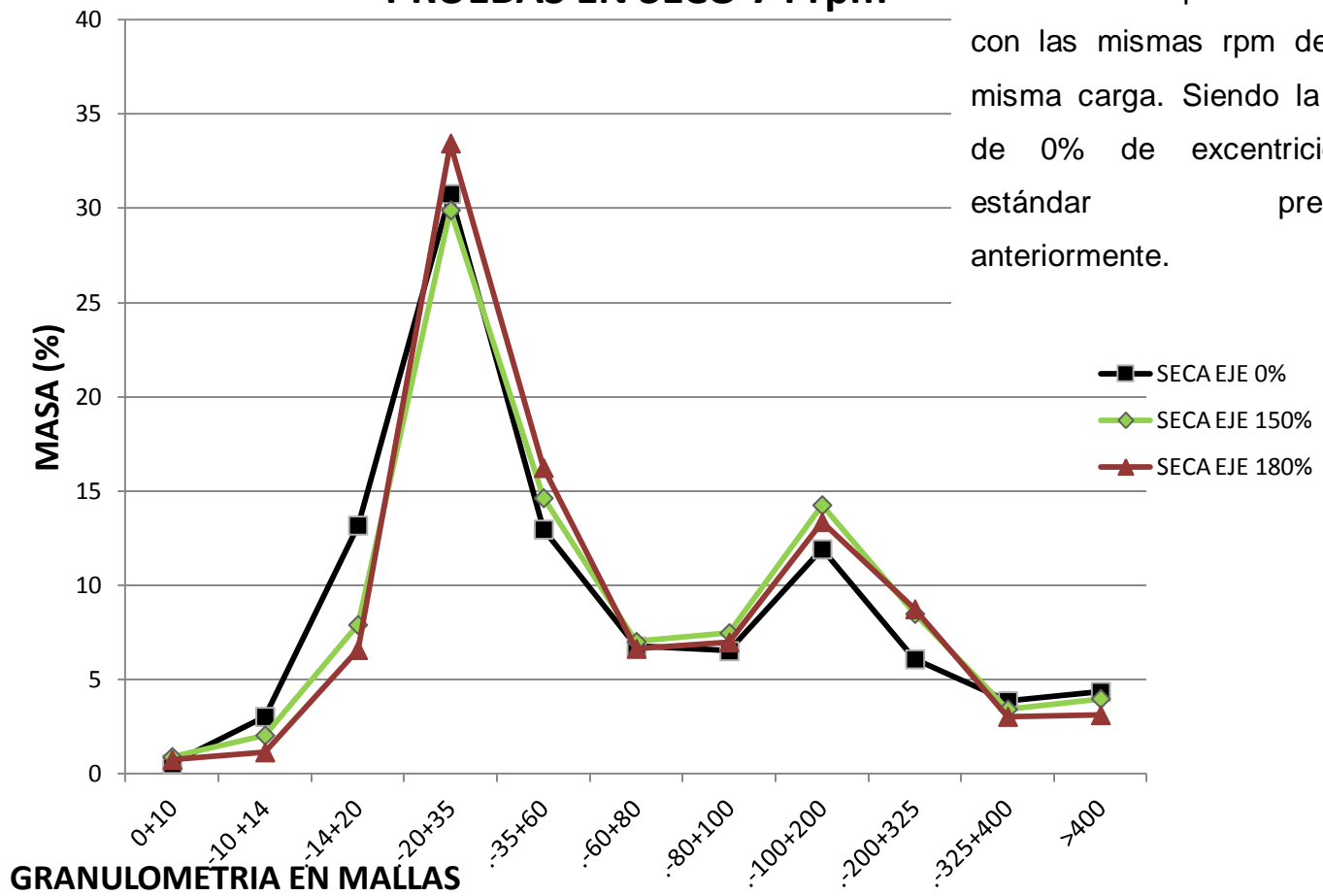


Figura 4.9.2 Gráfica de pruebas en seco (74 rpm).

### PRUEBAS EN HÚMEDO 74 rpm

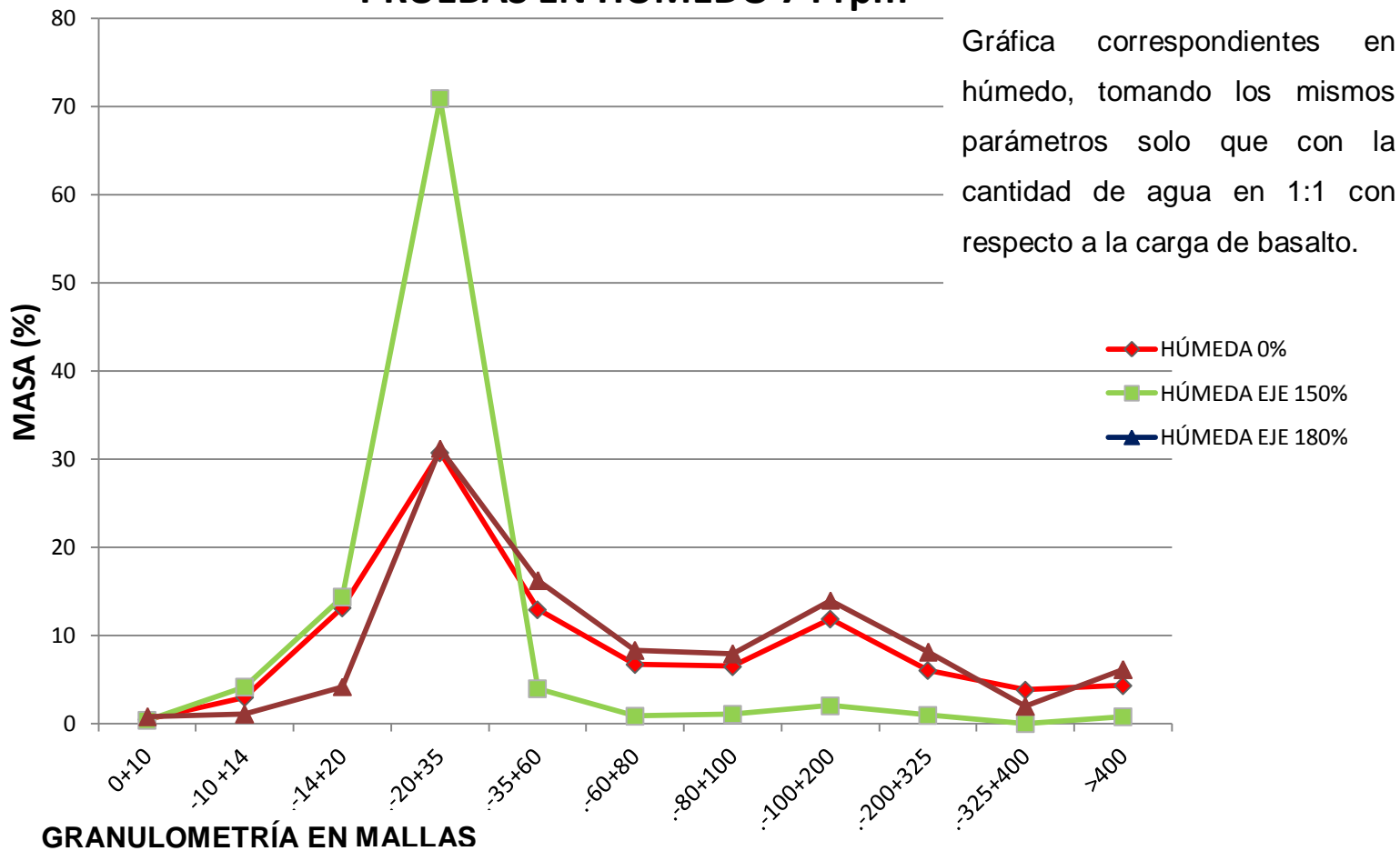


Figura 4.9.3 Gráfica de pruebas en húmedo (74 rpm)

## PRUEBAS ESTANDAR SECO-HÚMEDO 104 rpm

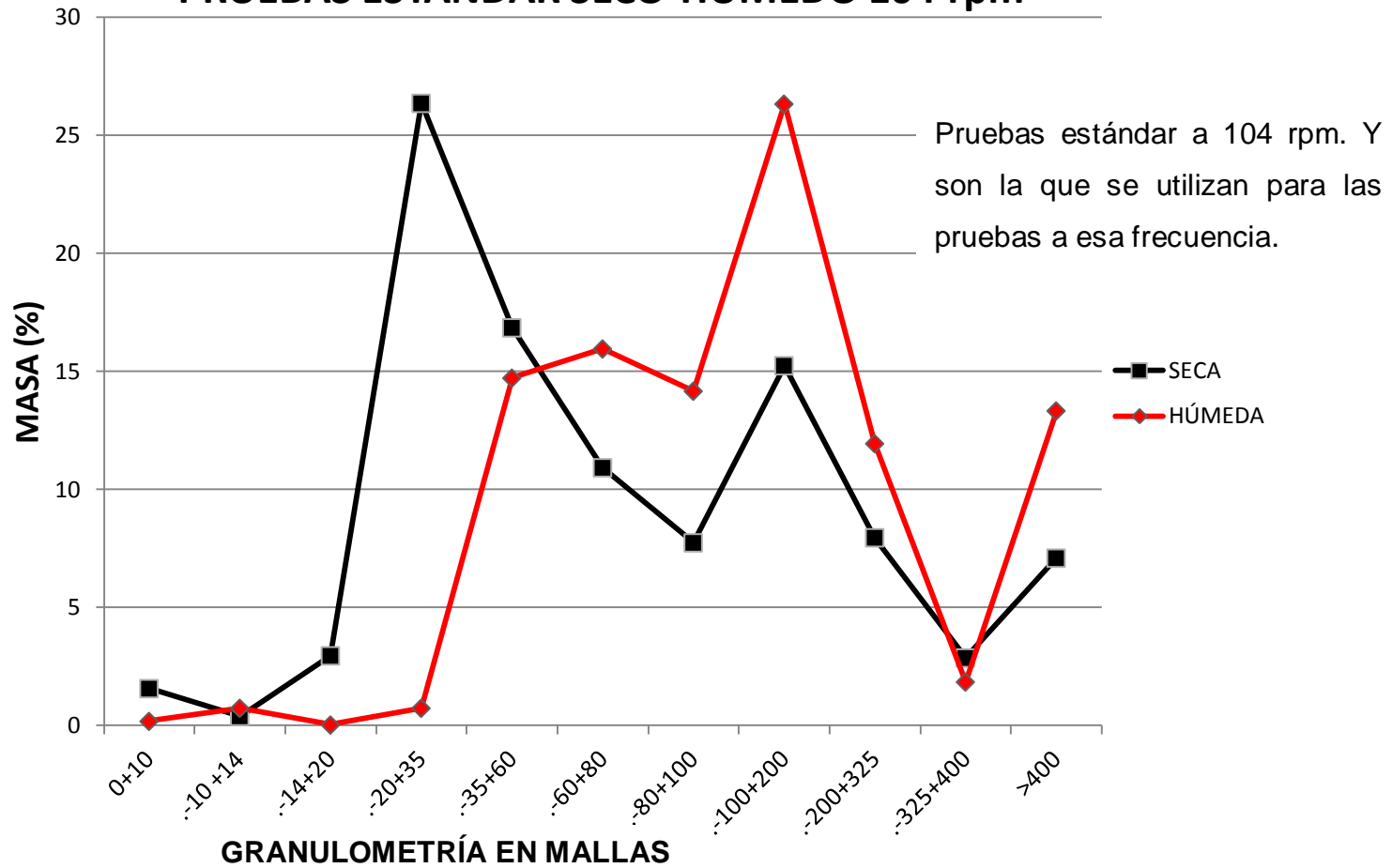


Figura 4.9.4 Gráfica de pruebas estándar (104 rpm).



### PRUEBAS SECA 104 rpm

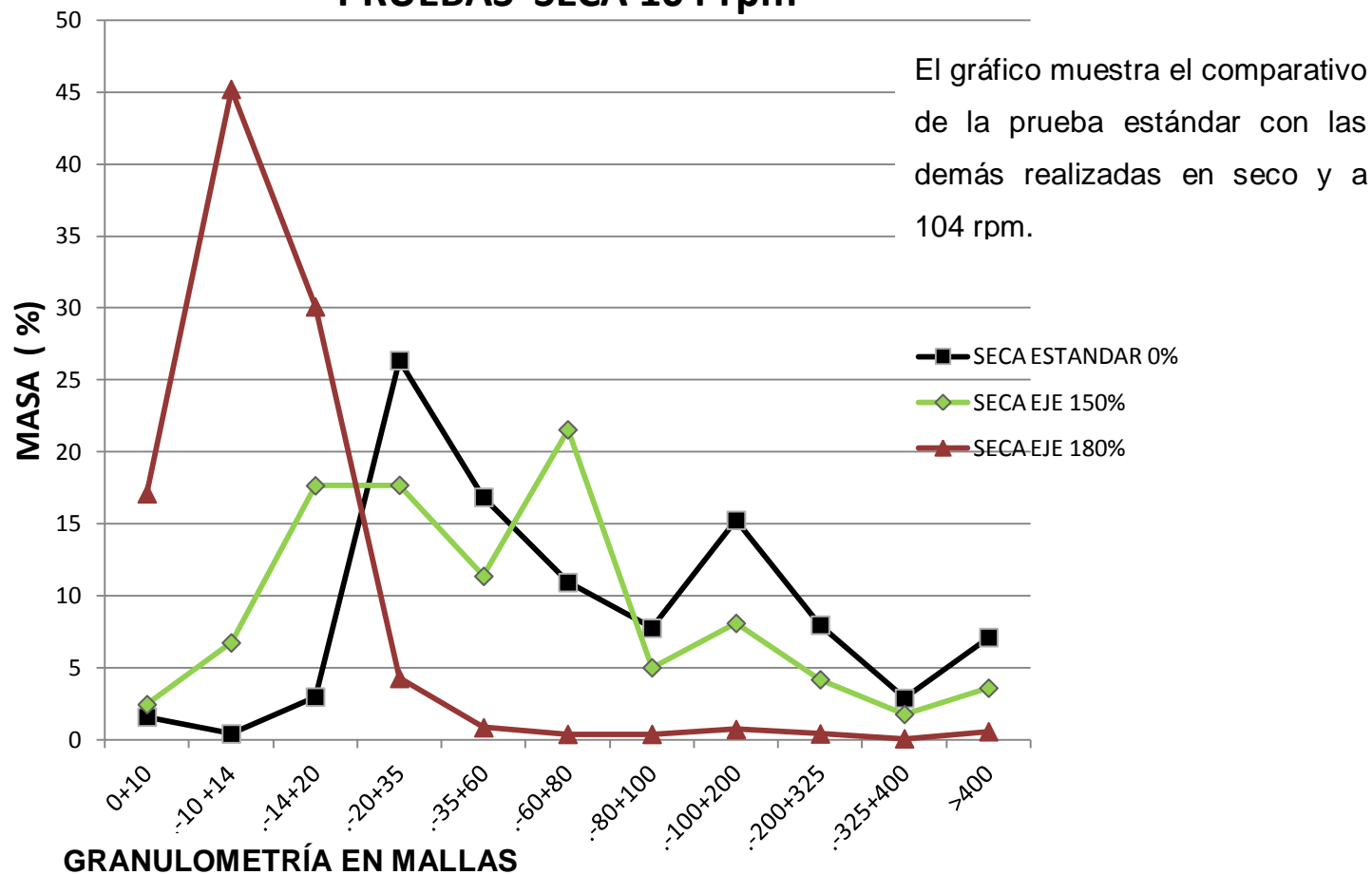


Figura 4.9.5 Gráfica de pruebas en seco (104 rpm).

### PRUEBAS HÚMEDOS 104 rpm

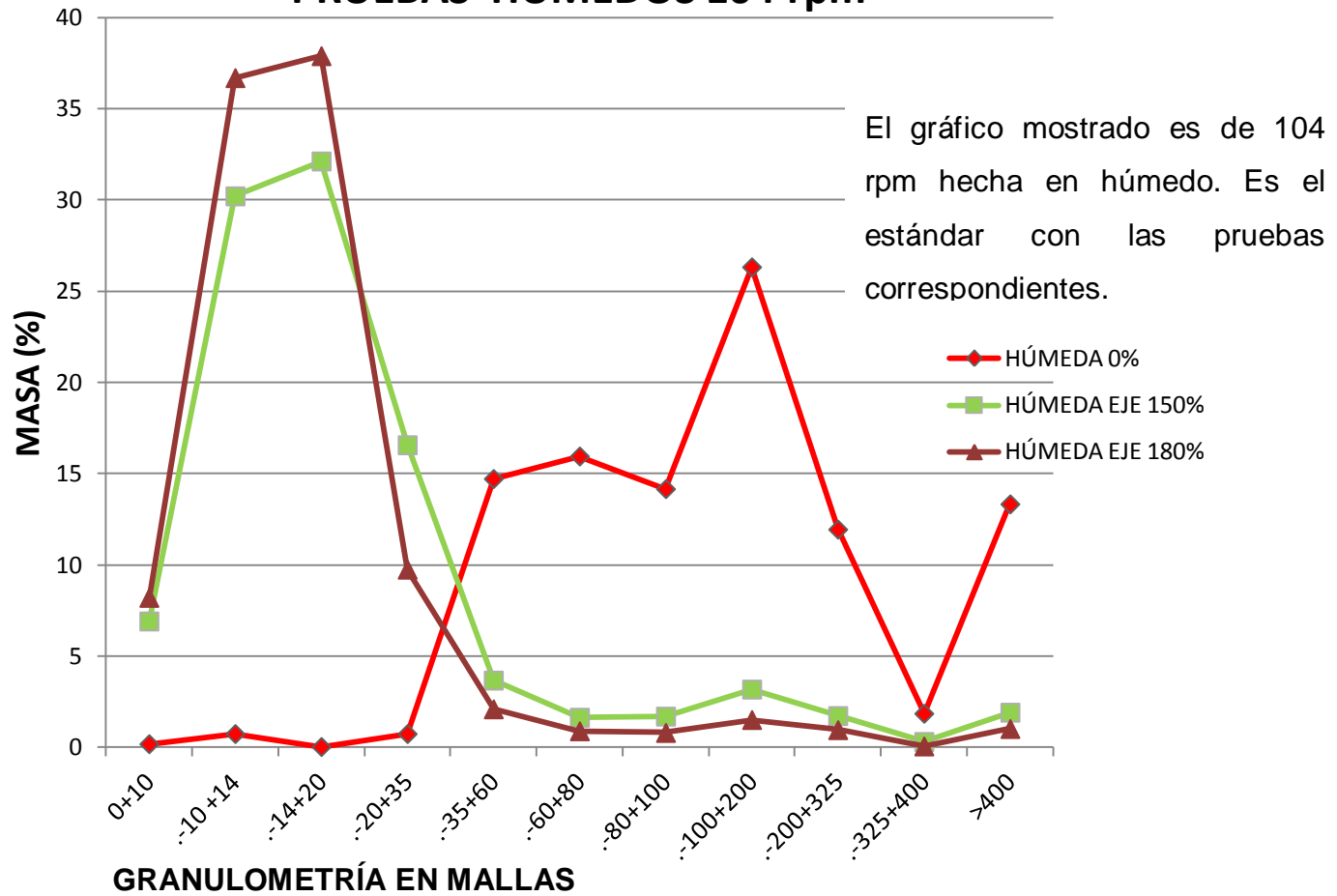


Figura 4.9.6 Gráfica de pruebas en seco (104 rpm).

#### 4.10 CURVAS DE INCREMENTO DE ÁREA

En las siguientes gráficas se muestra el incremento de superficie que se obtuvo por efecto de la molienda conforme al conteo teórico de partículas. Estos gráficos son con base a las pruebas anteriores solo que tomando en cuenta el aumento superficial y no la masa acumulada en los tamices.

El siguiente gráfico muestra el comparativo de superficie respecto a la prueba estándar en seco y a 74 rpm Figura 4.10.1:

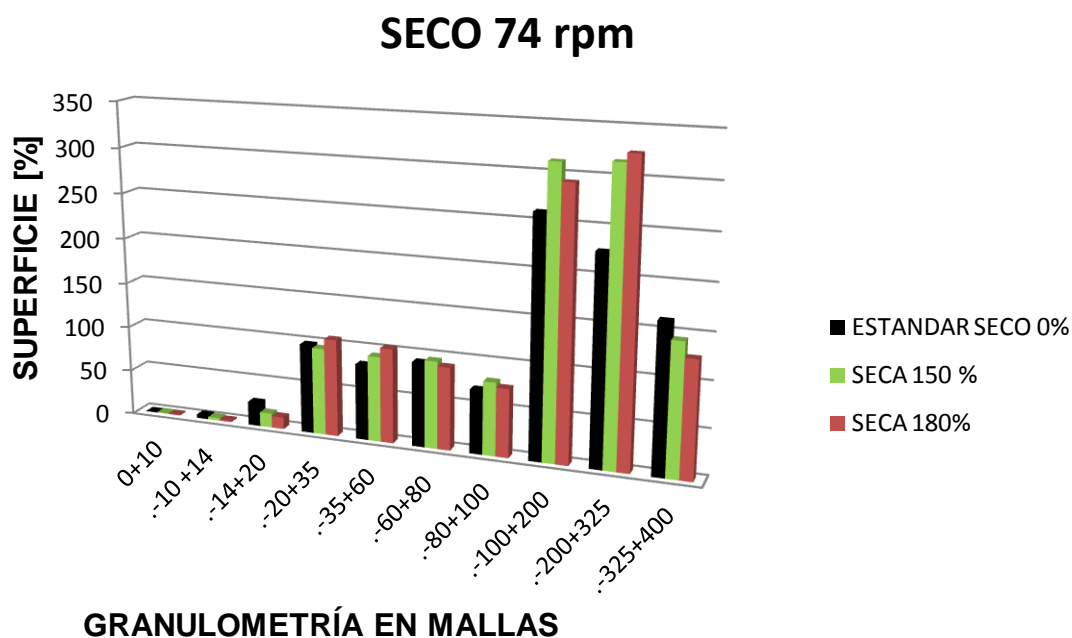


Figura 4.10.1 Gráfica de incremento de área de estándar (74 rpm).

También se muestra el gráfico que representa los mismos parámetros pero ahora en húmedo Figura 4.10.2:

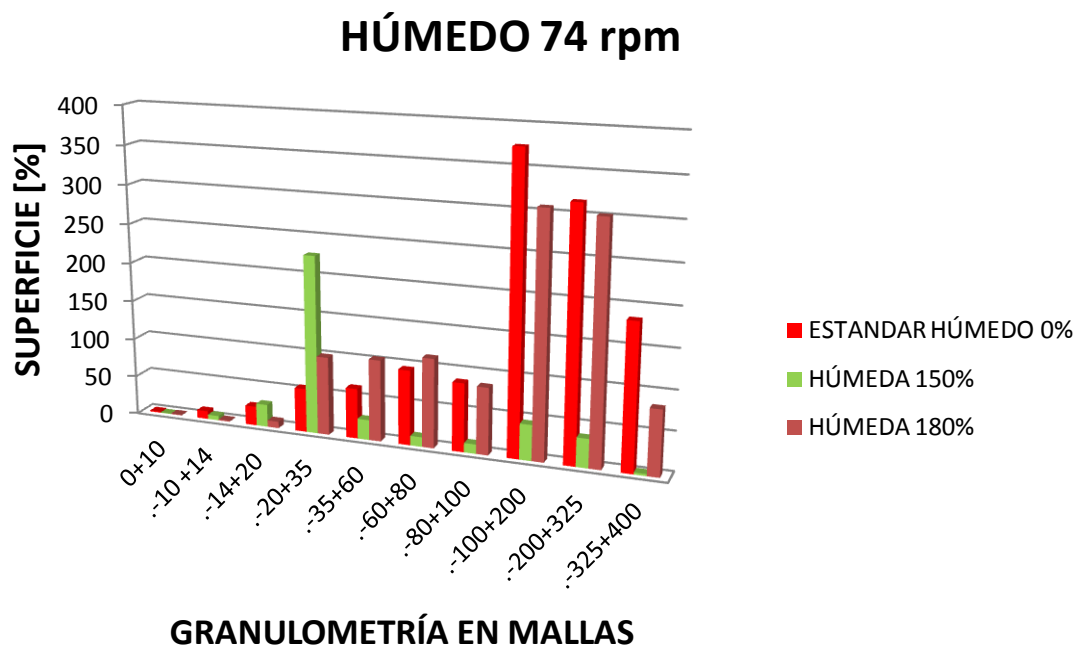


Figura 4.10.2 Gráfica de incremento de área en húmedo (74 rpm).

Pruebas con 104 rpm; manteniendo la misma cantidad de medios de molienda y carga en seco Figura 4.10.3:

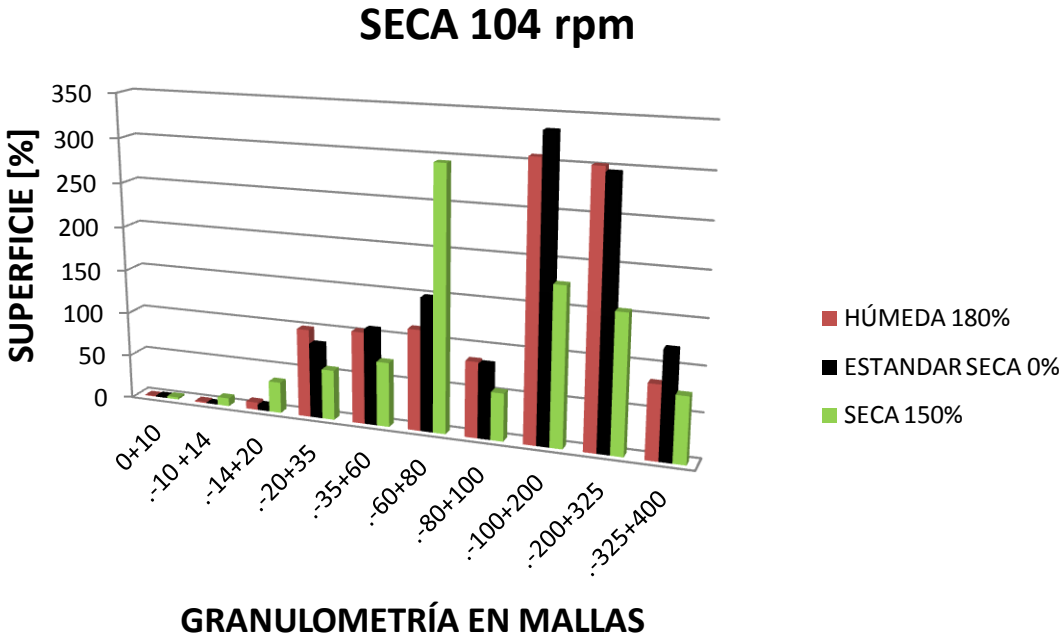


Figura 4.10.3 Gráfica de incremento de área en seco (104 rpm).

Y el siguiente gráfico es de 104 rpm pero en húmedo mostrando mayormente el incremento de superficie en la prueba estándar figura 4.10.4:

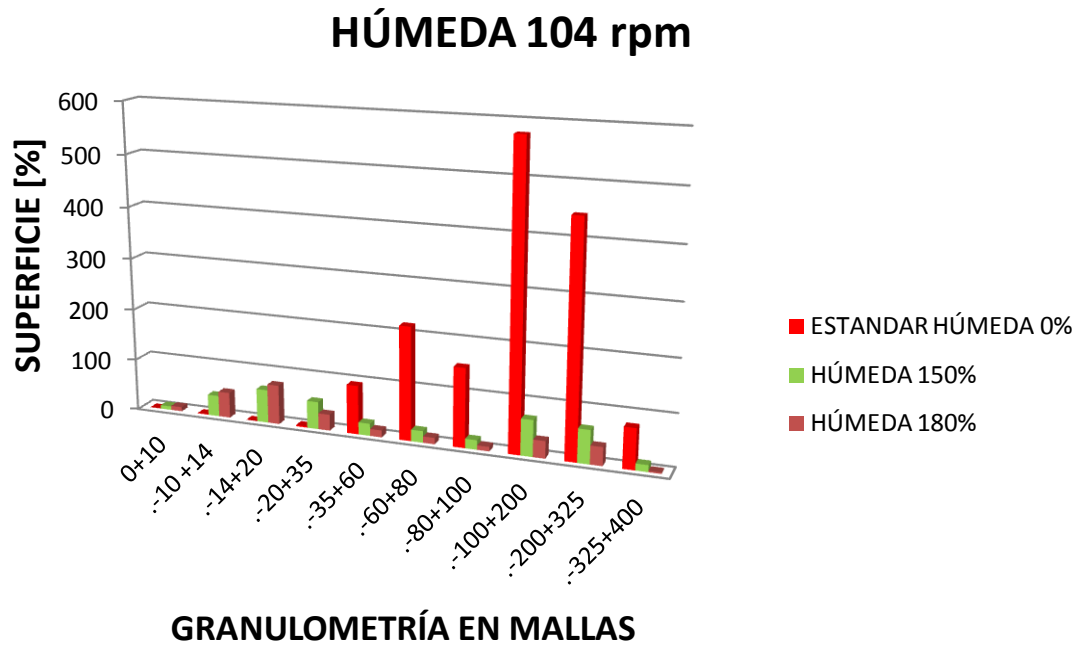
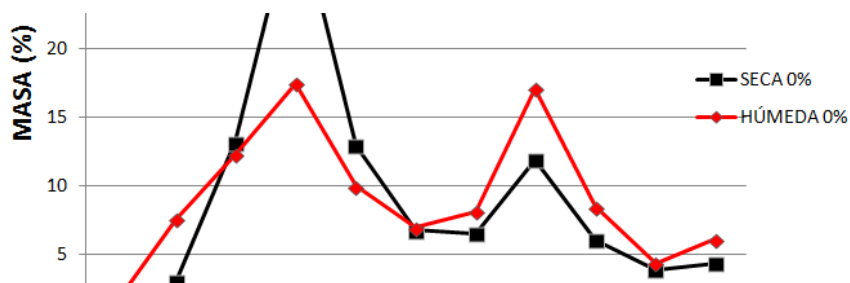


Figura 4.10.4 Gráfica de incremento de área en húmedo (104 rpm).

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La decisión de mejor resultado se hace con base a la superficie obtenida en la molienda y en granulometría. Se considera un buen resultado cuando el material pasa de la malla 100 (molienda fina) pues es donde se da más la separación de las especies minerales contenidas, pero no es suficiente, en el ramo de la industria de beneficio de minerales las ordenes de molienda van a partir de la malla cien pero en algunas ocasiones sin llegar a la molienda ultrafina pues también implica un problema para la planta de beneficio.

En cuanto a la granulometría, los resultados fueron muy dispersos; una muestra de ello es que en las pruebas estándar en 74 rpm (Figura 4.9.1) en donde el eje es axial en donde la capacidad de molienda se obtuvo mejor en húmedo, pues uno de los mayores índices de molienda y mayor al seco está entre la malla 200 y 350 que se considera molienda fina superior a la misma prueba pero estándar como se muestra en la Figura 5.1 en donde la prueba en húmedo (roja) muestra un mejor índice en el área de la granulometría en finos.



**Figura 5.1 Muestra de gráfica en pruebas estándar (Figura 4.9.1).**

En las pruebas en húmedo de 74 rpm, destaca mucho lo similar de resultados que se obtuvieron en las pruebas de 0% (estándar) y de 180% de excentricidad como

se puede observar en la Figura 5.2 en donde la prueba con el eje fuera se mantiene un poco por encima a la estándar.

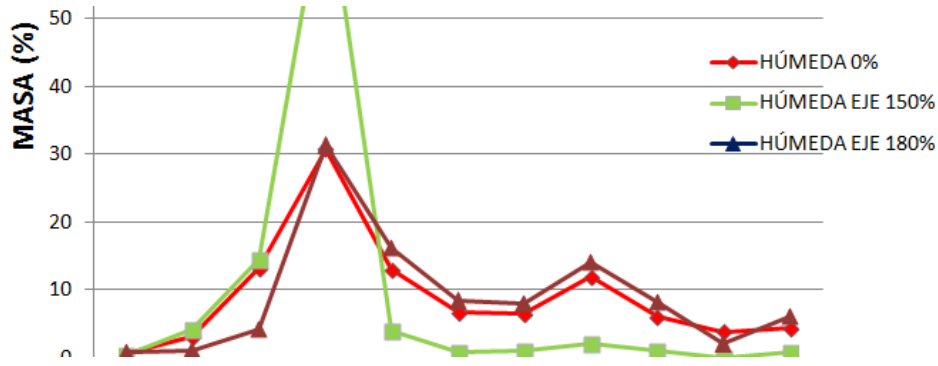


Figura 5.2 Muestra de gráfica en pruebas estándar (Figura 4.9.3).

Respecto a los resultados obtenidos en las pruebas estándar a 104 rpm también hay datos muy variados. La prueba estándar húmeda muestra de nuevo mejores índices granulométricos que la prueba en seco que molió más entre las mallas 20 a 34 como se aprecia en la Figura 5.3.

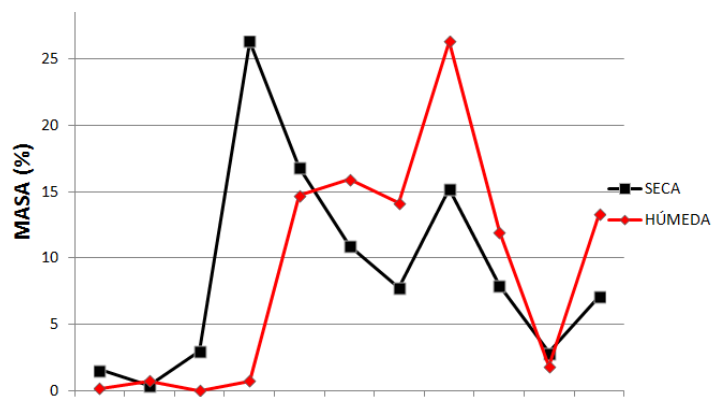


Figura 5.3 Muestra de gráfica en pruebas estándar (Figura 4.9.4).



En el caso de las pruebas en seco, la estándar se mantuvo con mejores resultados. La prueba con 180% de excentricidad prácticamente no hubo molienda y quedó la mayoría del material en los tamices de mayor apertura como se puede ver en la Figura 5.4. Mientras que la de 150% tuvo un mejor resultado que la anterior dentro de los rangos de 60 a 100 mallas; pero no fue suficiente para rebasar la prueba estándar.

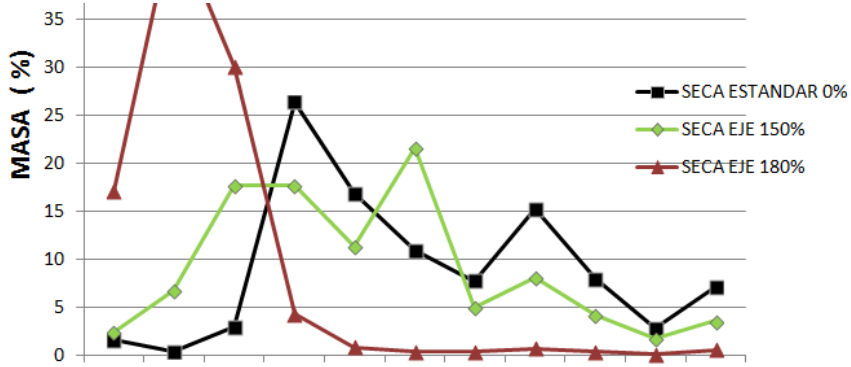
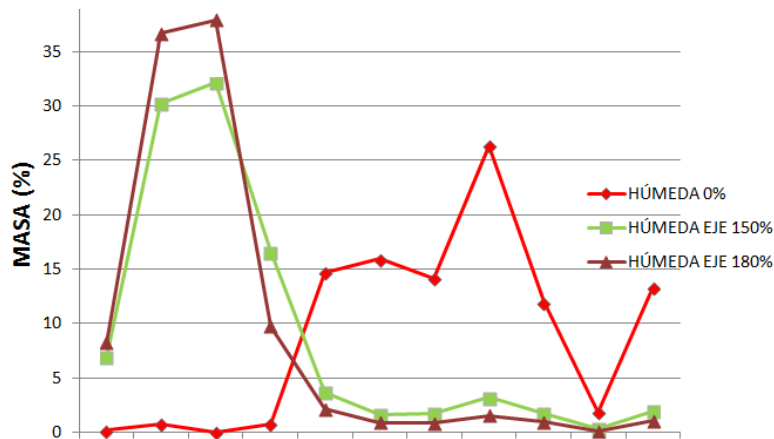


Figura 5.4 Muestra de gráfica en pruebas estándar (Figura 4.9.5).

En las pruebas en húmedo tuvo un efecto muy particular, pues el resultado en 150 y 180% es muy similar y desfavorable respecto a la estándar. En la Figura 5.5 se ve claramente que no hubo molienda en el área de los finos y todo quedó en los gruesos entre las mallas 10 y 60; dando como prueba favorable a la estándar que si logró sobrepasar hacia la granulometría de los finos.



**Figura 5.5 Muestra de gráfica en pruebas estándar (Figura 4.9.6).**

Para esta fase, una de las mejores pruebas que se encontraron fue la estándar en húmedo; obteniendo un incremento de superficie de 1567.62% más que el de entrada. Este resultado podría parecer negativo a la hipótesis prima del trabajo completo, pues la prueba estándar se fijó a una excentricidad del 0%, sin embargo, el resultado con eje excéntrico mejor posicionado no se encuentra muy lejano de la prueba mencionada; se encuentra a solo 410.2%. Es alto, pero no significativo, ya que perfeccionando la velocidad crítica que debería de ser de 67.91 rpm en promedio (contando entre 90 y 80% de la velocidad crítica) siendo que esta prueba se corrió un 5% más alto, el resultado se aproximará o superará el de la prueba estándar. Y no solo eso, el proyecto completo implica que se debe hacer la molienda fuera de un eje axial pero no un solo molino, lo que da oportunidad a poder operar varios molinos simultáneamente; lo que hace que multiplica el resultado obtenido de la prueba con eje excéntrico haciendo aún más eficiente el trabajo. Lo mismo ocurre con el eje excéntrico a 180%, ya que ninguna prueba salió favorable en esta fase pues la velocidad crítica estuvo rebasada de 60.7 rpm con un 18% más alto en las pruebas.

Los resultados obtenidos fueron muy diversos. Los datos se generaron mediante dos pruebas de cada uno de los parámetros analizados. Lo que significa que cada una de las pruebas es el resultado de promediar el valor de éstas. Esto para determinar si existía algún error durante el proceso. Para su análisis se encuentra dividida de dos formas y a su vez esta subdividido en otras dos. Las primeras son por la frecuencia y las otras dos por humedad.

## **5.1 PRUEBAS A 74 rpm**

En la Tabla 5.1.1 se observa que la prueba con 0% de excentricidad y con pulpa (prueba estándar) se encuentra como la mejor dentro de todas las pruebas sometidas a esa frecuencia. Mostrándose solo un 57.5 % más que la prueba en seco con 150% de excentricidad.

La prueba en seco de 180% no se encuentra muy alejada de las otras; se encuentra a tan solo 77.5% de la mejor prueba que fue la estándar. Mientras que la prueba en húmedo de 150% de excentricidad obtuvo menor incremento superficial.

Sin embargo, no porque la prueba estándar haya sido de mayor incremento superficial significa que las otras pruebas queden descartadas; todo lo contrario, estas no se encuentran muy alejadas de la estándar en húmedo. Como se mencionó, podrían colocarse más de un molino en un mismo sistema rotatorio incrementando varias veces la capacidad que tiene uno solo colocado al centro. Un propósito fundamental de este trabajo y los anteriores es demostrar que un

molino con eje excéntrico pueda considerarse como una herramienta útil y de grandes beneficios en la industria.

**Tabla 5.1.1 Tabla comparativa de incremento superficial (74 rpm).**

74 rpm		
SECO		HÚMEDO
1025.18%	ESTANDAR 0%	1214.86%
1157.38%	150%	396.61%
1137.31%	180%	1105.51%
1157.38%	MAYOR SUPREFICIE	1214.86%

## 5.2 PRUEBAS A 104 rpm

Para las pruebas realizadas con una frecuencia de 104 rpm se muestran los resultados en la siguiente Tabla 5.2.1 en donde está claramente marcada la prueba que tuvo un mejor desempeño que fue la prueba estándar en húmedo y se coloca con un 383.45% por encima de la siguiente. Estos resultados fueron los mejores, pues en lo que respecta a las otras pruebas, los resultados no fueron nada favorecedores mostrándose hasta un 1368.3% alejado del más alto. Al parecer el factor más importante en estas pruebas fue la abrasión al cual estuvo sometido el material.

**Tabla 5.2.1 Tabla comparativa de incremento superficial (104 rpm).**

104 rpm		
SECO		HÚMEDO
1184.17%	ESTANDAR 0%	1567.62%
930.73%	150%	376.04%
199.23%	180%	270.45%
1184.17%	MAYOR SUPREFICIE	1567.62%

La prueba con mayor incremento de superficie se encuentra en la prueba estándar en húmedo de 104 rpm colocándose con un 352.7% arriba de de la prueba estándar en 74 rpm y 410.2% de la prueba en seco desplazado 150% del centro en 74 rpm del molino. Con base a la fase anterior de este trabajo también se obtuvo un resultado a favor de solo 72.3% en donde se había obtenido 1495.32% de incremento de superficie (Rendón, 2018) hecha con una excentricidad de 40% y en seco.

## CONCLUSIONES

Dentro de los logros obtenidos es fácil resaltar la importancia de dedicar más tiempo a la investigación de éste prototipo, pues destaca su fácil manejo y ahorro de energía. Probablemente algunos resultados no se vean favorecedores debido a que no obtuvieron valores a considerarse al momento de revisar la granulometría que muestra índices similares a las pruebas estándar. Algunos otros si los tienen; como en la prueba de 74 rpm en seco que muestra solo un 57.5% debajo de la prueba estándar en el análisis superficial. Y en húmedo que fue el resultado más alto obtenido hasta ahora con 1567.6% de aumento en la superficie molida en las pruebas de 104 rpm y esta misma prueba en la granulometría muestra un índice favorable dentro de la malla 100-200 el índice superior. Al implementar agua en la

molienda dio un giro importante, ya que pudo determinar que puede ser efectivo y que también se puede adicionar reactivos preparando la muestra para el siguiente proceso dándole uso como reactor.

Hacer el eje excéntrico mostró que el proceso de molienda puede ser más efectivo cuidando ciertas condiciones, como la frecuencia de giro que debe ser controlada. La velocidad estuvo a cargo de dos poleas: una de 10" y la otra de 14" y fueron los únicos dispositivos que ayudaron en la velocidad junto con el reductor.

En esta parte del estudio la efectividad se encuentra en el control de las revoluciones por minuto ya que como se ha venido demostrando la frecuencia es parte esencial. También las características de los medios moledores son importantes, pues el tamaño si define la capacidad de molienda y es más efectiva como se observa en la segunda etapa (Rendón, 2018).

En los próximos trabajos se debe ampliar más sobre el control de la velocidad pues es aquí en donde se pudo confirmar la importancia de esta para un prototipo de estas características y desarrollar modelos para colocar el molino de eje excéntrico a la siguiente fase que es la fase piloto.

## **RECOMENDACIONES**

Reducir la frecuencia de las revoluciones por minuto es fundamental para obtener los resultados deseados; pues como ya se mencionó la velocidad del motor está superando respecto a la velocidad que se requiere y es de suma importancia pues esta altera considerablemente las pruebas.

Es importante recalcar que conforme aumenta la excentricidad también aumenta el diámetro de giro, lo que teóricamente hace que aumente la capacidad dentro del molino, pero es obvio que esto último no puede ser pues la capacidad se

encuentra dada y es un parámetro inamovible, sin embargo si es posible aumentar un poco el volumen de carga, claro que esto aumentaría su densidad y por consecuencia el consumo de energía, pero si el aumento de carga logra una mejora dentro de los tamaños de molienda es posible que el consumo de energía que aumento sea aprovechado.

Al considerar el aumento de la densidad dentro del molino debido a un aumento de volumen es preciso considerar disminuir el aumento del peso al usar guijarros (cerámicos) como medios de molienda, disminuyendo el consumo de energía requerido.

También se recomienda modificar el tiempo de incidencia de las pruebas incrementándolo para poder observar el comportamiento de la molienda tratando de obtener una mejora que equilibre el tiempo con el consumo de energía (solo para pruebas con resultados positivos) y conocer también el límite de éste para evitar una sobre molienda.

El aumento del diámetro de giro hace que el molino obtenga características peculiares, pues mientras en un tambor convencional la relación de dimensiones es mayor la longitud de este respecto al diámetro; para el caso del excéntrico se hace inverso, mayor el diámetro que la longitud, y se podría dar un uso similar al del proceso de molienda Autógena o Semiautogena haciendo los respectivos ajustes en cuanto a tamaños de alimentación y medios de molienda.

## REFERENCIAS

- Alejandro Font F., O. G. (2010). *Informe Final* . Santiago.
- Alzate, L. M. (2016). *Estudios del Consumo de Energía en Molienda húmeda de un Mineral Considerando Reología de Suspensiones*. Medellín.
- Antioquia, U. d. (s.f.). *Conminución*. Facultad de ingeniería.
- Calviño, C. (30 de Abril de 2011). *InSuTec*. Obtenido de Intituto Suoerior Tecnológico : <http://insutecmza.blogspot.com/2011/04/objetivo-reducir-el-tamano-de-los.html?m=1>
- Casillas, J. d. (1996). *Prácticas de Laboratorio de la Asignatura Preparación Mecánica de Minerales*. Ciudad de México.
- Castillo, H. C. (s.f.). *Procesos Mineralúrgicos* . Obtenido de SladeShare: <https://www.slideshare.net/pampinochile/proceso-mineralurgico-unidad-iii-molienda-clasificacion>
- Compañía Fresnillo S.A. de C.V. (2018). *Manual de Molienda- Clasificación Nivel Medio*.
- Conceptos Básicos de Preparación Mecánica de Minerales*. (s.f.). Obtenido de Educar Chile.
- Departamento de Petrología y Geoquímica (Universidad Complutense de Madrid). (s.f.). *Atlas de Rocas Ígneas*. Obtenido de <https://petroigne.wordpress.com/rocas-volcanicas/basalto/>
- EcuRed contributors*. (Mayo de 2012). Obtenido de ecured.cu: <https://www.ecured.cu/Molienda>



Errol G. Kelly, D. J. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. Limusa S.A. de C.V.

(s.f.). Estructura y Propiedades de los Minerales.

*Etapas en el Beneficio de los Minerales: Trituración, Molienda, Decantación y Flotación*. (s.f.). Obtenido de SlidePlayer:  
<https://slideplayer.es/amp/1612350/>

He, M. W. (2004). *Slurry Rheology in Wet Ultrafine Grind of Industrial Minerals: a Review*.

Leonard G. Austin, F. C. (s.f.). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. CYTED.

M. Oswaldo Bustamante Rúa I.M.M. Msc, P. A. (s.f.). concentración de minerales. *notas de clase de la asignatura: concentración de minerales*. Instituto de Minerales Cimex, Facultad de Minas.

Martínez, R. R. (2006). *Efecto de la Distribución de Tamaño de Bola en la molienda de Cu, CuO y el Aleado Mecánico de Cu-15% Atómico de Al en un Molino Horizontal de Bolas*. Pachuca.

Molienda. (2015). *Industria I*.

O. J. A. Barragán, M. M. (s.f.). *Molienda Trepidatoria y Clasificación Simultánea de Wallastonita a Nivel de Laboratorio*. Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Exploración de Minas y Metalurgia, Facultad de ingeniería.

Preparación, B. I. (s.f.). *Tema 4: Reducción de tamaño Molienda I*.

Ramos, W. (26 de junio de 2010). *Procesamiento de Minerales* . Obtenido de  
Conminución de Minerales:  
<http://wramos18.blogspot.com/2010/06/conminucion-de-minerales.html?m=1>

Refulio Rodriguez James George, R. C. (2009). Evaluación del chancado, molienda y foltación para la apmpliación de plata de 3600 a 4200 TMSD en la unidad minera Yauliyacu-Empresa Minera los Quenuales S.A. Huancayo Perú.

Rendón, H. F. (2018). *Molienda de Bolas con Eje Excéntrico*. Ciudad Universitaria Ciudad de México.

Robert Resnick, D. H. (2001). *Física Vol. 1*. Compañoa Editorial Continental.