



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Incidencia de la velocidad de rotación en la eficiencia de
molienda SAG”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO EN MINAS

Autores:

ÁLVAREZ AGUIRRE PEDRO JOSÉ
SÁNCHEZ DUTÁN ESTEBAN FRANCISCO

Director:

ING. FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA – ECUADOR

2021

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación está dedicado a mi familia que siempre me ha apoyado en todo momento, en especial a mi madre Elsita que me ilumina desde el cielo, de la misma manera, quiero agradecer a mi padre Pedro y mi hermana Estefanía por ser los pilares fundamentales en mi desarrollo personal y académico.

Pedro José Álvarez Aguirre

El presente trabajo simboliza el final de una larga y ardua etapa de mi vida, de la que me siento muy feliz y orgulloso, pero sin el apoyo incondicional de mi familia no hubiera sido posible ya que ellos forjaron mi desarrollo como persona, hombre e ingeniero.

Quiero dedicar esta tesis a mis padres Francisco y Carmita que con sus valores y consejos me han sabido guiar durante este viaje y son un pilar fundamental en mi vida.

A mis hermanos y confidentes Sebastián y Paula que han estado presentes siempre y me han ayudado a crecer como persona, adquiriendo valores de responsabilidad y fraternidad.

A mis tíos Freddy, Edwin, Miguel, Medardo y Salomé, mis abuelos Hilda y Miguel que con sus consejos, amor, paciencia y apoyo incondicional me han permitido superar muchos obstáculos desde que era un niño y me han brindado un lugar al que siempre puedo ir.

A mi abuela Estrella que me cuida desde el cielo.

A mi hijo Esteban Santiago que es el motor y motivo de mi vida, con perseverancia los sueños se hacen realidad.

Esteban Francisco Sánchez Dután

En memoria de nuestros queridos amigos y compañeros Erick Zhunio y Martí Quezada, siempre en nuestras memorias.

ADRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios y a mi familia por el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi desarrollo como futuro profesional.

A mis buenos amigos Ángel y Esteban, quienes fueron un gran apoyo durante toda mi vida universitaria.

A mi tutor Ing. Fernando Valencia y miembros del tribunal Ing. Leonardo Núñez e Ing. Eduardo Luna por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Pedro José Álvarez Aguirre

Mi gratitud imperecedera:

En primer lugar, a Dios y a María Santísima por iluminarme y brindarme la sabiduría necesaria para culminar de una buena manera mis estudios universitarios.

A mi tutor Ing. Fernando Valencia, miembros del jurado Ing. Leonardo Núñez e Ing. Eduardo Luna por transmitir sus conocimientos y brindarnos el apoyo necesario para realizar el presente trabajo de titulación.

A la Universidad del Azuay, a la Facultad de Ciencia y Tecnología y a los docentes en general.

Esteban Francisco Sánchez Dután

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
ADRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
MARCO TEÓRICO	3
1.1 La Molienda	3
1.2 Tipos de Molienda.....	3
1.2.1 Molienda Húmeda.....	3
1.2.2 Molienda Seca.....	4
1.2.3 Tipos de molinos.....	4
1.2.4 Molino de Barras.....	4
1.2.5 Molino de Bolas.....	5
1.2.6 Molino Autógeno (AG).....	6
1.2.7 Molino Semiautógeno (SAG).....	7
1.3 Operación y balance del molino SAG.....	8
1.3.1 Teoría de Bond y consumo específico de energía.....	9
1.3.2 Moliendabilidad.....	9
1.3.3 Mecanismos de fractura.....	10
1.3.4 Tipos de Fracturas.....	11
1.3.5 Zona de cascada.....	13
1.3.6 Zona de catarata.....	13
1.3.7 Zona de compresión.....	14
1.4 Parámetros importantes en la molienda.....	14
1.4.1 Velocidad de rotación.....	14
1.4.2 Velocidad crítica.....	16

1.4.3	Carga de bolas.....	19
1.4.4	Tamaño Máximo de los Elementos Moledores.....	19
1.4.5	Potencia.....	20
1.4.6	Grado de llenado.....	21
1.4.7	Ángulo de la carga.....	22
1.4.8	El tiempo de residencia del material.....	23
1.4.9	Granulometría.....	24
1.4.10	Molienda de primer orden.....	24
1.5	Elementos principales de molino SAG.....	26
1.5.1	Casco del molino SAG.....	26
1.5.2	Rejillas o parrillas en molinos SAG.....	27
1.5.3	Revestimientos para molinos.....	27
1.6	Análisis granulométrico.....	28
1.6.1	Granulometría.....	28
1.6.2	Métodos de análisis granulométricos.....	29
CAPÍTULO 2:		32
DISEÑO Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN		32
2.1	Obtención y Georreferenciación de las muestras.....	32
2.1.1	Andesita.....	32
2.1.2	Granodiorita.....	32
2.1.3	Caliza.....	33
2.2	Caracterización de las muestras.....	33
2.2.1	Cálculo de la densidad.....	34
2.2.2	Cálculo del factor de esponjamiento.....	35
2.3	Rediseño del molino SAG.....	37
2.3.1	Cálculo de la relación de transmisión entre engranajes y cadena.....	37
2.4	Variador de frecuencia.....	38
2.4.1	Funcionamiento de un variador de frecuencia.....	39
2.4.2	Implementación del variador de frecuencia al molino SAG.....	40
CAPÍTULO 3.....		42
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		42
3.1	Preparación de la muestra.....	42

3.1.1	Trituración.....	42
3.1.2	Tamización.....	43
3.2	Cálculo de los factores operacionales	43
3.2.1	Cálculo de la Velocidad Crítica.	43
3.2.2	Cálculo de la velocidad de rotación.	44
3.2.3	Volumen del molino SAG de laboratorio.	44
3.2.4	Cálculo del volumen y masa total de bolas.....	45
3.2.5	Tamaño máximo de los elementos moledores.	46
3.2.6	Distribución de Bolas.....	46
3.3	Dosificación de las muestras	47
3.4	Ensayos variando la velocidad de rotación y tiempo de molienda.....	48
3.5	Clasificación.....	49
CAPÍTULO 4.....		52
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		52
4.1	Resultados	52
4.2	Análisis.....	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		63
RECOMENDACIONES.....		65
BIBLIOGRAFÍA.....		67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Molino de barras.....	5
Figura 1.2 Molino de bolas.	6
Figura 1.3 Molino Autógeno.....	7
Figura 1.4 Esquema de un molino SAG.....	8
Figura 1.5 Identificación de los mecanismos de fractura.....	11
Figura 1.6 Mecánica de fracturas.....	12
Figura 1.7 Identificación de los mecanismos de conminución.	13
Figura 1.8 Característica del movimiento cascada y catarata de carga.....	14
Figura 1.9 Ilustración del movimiento en un molino de bolas a una velocidad normal de operación.....	15
Figura 1.10 Velocidad crítica del molino.....	17
Figura 1.11 Efecto de la velocidad en el movimiento de la carga, a distintos porcentajes de velocidad crítica.	18
Figura 1.12 Movimiento de la carga al interior del molino SAG para diferentes niveles de llenado.	19
Figura 1.13 Relación de la potencia con respecto al volumen de carga.	20
Figura 1.14 Aumento del grado de llenado.....	21
Figura 1.15 Ángulo de Carga en molino SAG.....	23
Figura 1.16 Velocidad específica de fractura.....	26
Figura 1.17 Serie de tamices.	29
Figura 2.1 Georreferenciación de la muestra de Andesita.....	32
Figura 2.2 Georreferenciación de la muestra de Granodiorita y Caliza.....	33
Figura 2.3 Cálculo del factor de esponjamiento.....	36
Figura 2.4 Relación de transmisión entre engranajes y cadena (sin modificar).....	37
Figura 2.5 Relación de transmisión entre engranajes y cadena (modificada).....	38
Figura 2.6 Esquema básico del variador de frecuencia.....	40
Figura 2.7 Pruebas del variador de frecuencia.....	41
Figura 2.8 Instalación del variador de frecuencia al molino SAG.....	41
Figura 3.1 Trituradora de mandíbulas.....	42

Figura 3.2 Tamizadora de laboratorio.....	43
Figura 3.3 Recolección de la muestra.	50
Figura 3.4 Recolección de la muestra.	50
Figura 3.5 Proceso de clasificación en la tamizadora eléctrica.....	51
Figura 4.1 Análisis granulométrico de la andesita a los 2,5 minutos con diferentes velocidades de rotación.	53
Figura 4.2 Análisis granulométrico de la andesita a los 5 minutos con diferentes velocidades de rotación.	54
Figura 4.3 Análisis granulométrico de la andesita a los 10 minutos con diferentes velocidades de rotación.	54
Figura 4.4 Análisis granulométrico de la andesita a los 15 minutos con diferentes velocidades de rotación.	55
Figura 4.5 Análisis granulométrico de la caliza a los 2,5 minutos con diferentes velocidades de rotación.	56
Figura 4.6 Análisis granulométrico de la caliza a los 5 minutos con diferentes velocidades de rotación.	56
Figura 4.7 Análisis granulométrico de la caliza a los 10 minutos con diferentes velocidades de rotación.	57
Figura 4.8 Análisis granulométrico de la caliza a los 15 minutos con diferentes velocidades de rotación.	57
Figura 4.9 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 2,5 minutos con diferentes velocidades de rotación.	58
Figura 4.10 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 5 minutos con diferentes velocidades de rotación.	59
Figura 4.11 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 10 minutos con diferentes velocidades de rotación.	59
Figura 4.12. Análisis granulométrico de la granodiorita a los 15 minutos con diferentes velocidades de rotación.	60
Figura 4.13 Ajuste polinomial de tercer orden de la Andesita.....	61
Figura 4.14 Ajuste polinomial de tercer orden de la Caliza.....	61
Figura 4.15 Ajuste polinomial de segundo orden de la Granodiorita.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características propias de cada muestra.....	35
Tabla 3.1 Relación de la velocidad de rotación con respecto a la velocidad crítica.	46
Tabla 3.2 Distribución de bolas.	49
Tabla 3.3 Dosificación de las muestras.....	49
Tabla 3.4 Ensayos de la variación la velocidad de rotación y tiempo de molienda (Andesita).....	50
Tabla 3.5 Ensayos de la variación la velocidad de rotación y tiempo de molienda (Granodiorita).....	51
Tabla 3.6 Ensayos de la variación la velocidad de rotación y tiempo de molienda (Caliza).....	51
Tabla 4.1 Velocidades específicas de fractura.	56

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.Velocidades específicas de fractura.....	70
Anexo 2.Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 40 RPM.	71
Anexo 3.Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 40 RPM.	71
Anexo 4.Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 40 RPM.	72
Anexo 5.Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 40 RPM.	72
Anexo 6.Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 43 RPM.	73
Anexo 7.Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 43 RPM.	73
Anexo 8.Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 43 RPM.	74
Anexo 9.Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 43 RPM.	74
Anexo 10.Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 46 RPM.	75
Anexo 11.Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 46 RPM.	76
Anexo 12.Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 46 RPM.	76
Anexo 13.Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 46 RPM.	77
Anexo 14.Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 49 RPM.	77
Anexo 15.Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 49 RPM.	78

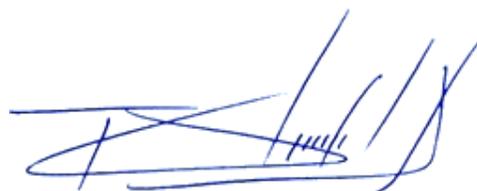
Anexo 16. Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 49 RPM.	78
Anexo 17. Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 49 RPM.	79

“INCIDENCIA DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN EN LA EFICIENCIA DE MOLIENDA SAG”

RESUMEN

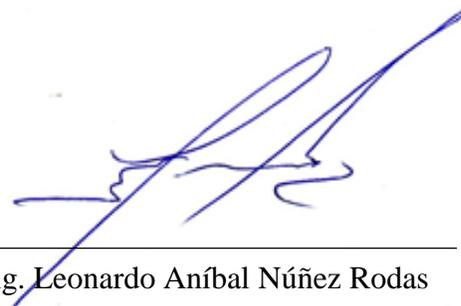
El trabajo de investigación tuvo como objetivo la experimentación y el análisis de la incidencia de la velocidad de rotación, dentro del proceso de molienda, en tres tipos de materiales: andesita, caliza y granodiorita. Para el desarrollo experimental se utilizó un molino SAG a escala de laboratorio, al que se le implementó un variador de frecuencia con la finalidad de manipular la velocidad. El estudio constó de un cronograma experimental de 48 ensayos, dentro de los cuales se utilizó un alimento con un mono-tamaño de ½ pulgada. La velocidad de rotación varió paulatinamente desde el 70 % hasta el 85% de la velocidad crítica en diferentes intervalos de tiempo. Los demás parámetros operacionales fueron constantes. Los resultados obtenidos indican que la velocidad óptima de rotación en relación con la velocidad crítica es del 79% en el caso de la andesita, del 85% para la caliza y del 76% para la granodiorita.

Palabras clave: Molino SAG, factores operacionales, velocidad de rotación, variador de frecuencia, tratamiento mineral.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Pedro José Álvarez Aguirre

Autor



Esteban Francisco Sánchez Dután

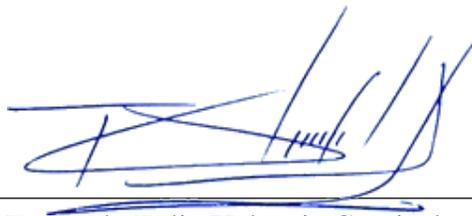
Autor

“INCIDENCE OF ROTATIONAL SPEED ON SAG MILLING EFFICIENCY”

ABSTRACT

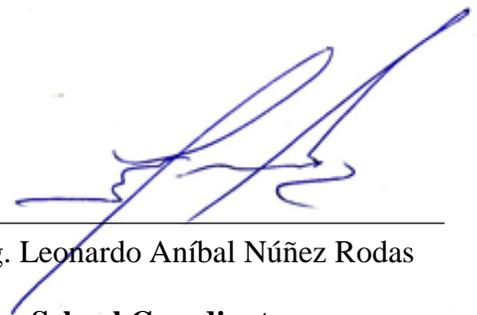
The objective of this research was the experimentation and analysis of the incidence of a rotational speed, within the grinding process, in three types of materials: andesite, limestone and granodiorite. For the experimental development, a laboratory scale SAG mill was used, to which a frequency variation drive was implemented in order to manipulate the speed. The study consisted of an experimental schedule of 48 trials, within which a feed with a mono-size of ½ inch was used. The rotational speed varied gradually from 70% to 85% of the critical speed at different time intervals. All other operational parameters were constant. The results obtained indicate that the optimum rotational speed in relation to the critical speed is 79% for andesite, 85% for limestone and 76% for granodiorite.

Key words: SAG mill, operational factors, rotational speed, frequency inverter, mineral treatment.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director of the Degree Project



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

School Coordinator



Pedro José Álvarez Aguirre

Author



Esteban Francisco Sánchez Dután

Author



Pedro José Álvarez Aguirre
Esteban Francisco Sánchez Dután
Trabajo de Titulación
Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela
Noviembre, 2021

“INCIDENCIA DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN EN LA EFICIENCIA DE MOLIENDA SAG”

INTRODUCCIÓN

La molienda es una operación unitaria que se define como la reducción de tamaño de partículas sólidas a partir de la aplicación de fuerzas mecánicas, las cuales provocan la fracturación de dichas partículas. Este procedimiento constituye el último escalón de la fragmentación mineral.

Actualmente en la industria minera ecuatoriana, especialmente en la pequeña y mediana minería, predomina el uso de molinos chilenos y de bolas en los procesos de conminución mineral, por lo que la molienda semiautógena es una opción viable en la actividad minera, debido a que la misma representa un proceso eficiente y lo más importante es que el mineral será sometido solamente a una etapa de trituración previo a la molienda y no a dos etapas que es lo que normalmente se hace en los procesos convencionales.

En la última década los proyectos mineros están utilizando en su gran mayoría la molienda semiautógena, ya que la misma ha alcanzado una gran importancia dentro del área de tratamiento, por lo que el presente proyecto tiene como finalidad estudiar a profundidad el factor operacional de la velocidad de rotación en el molino SAG a escala de laboratorio con diferentes materiales.

Para ello se implementó un variador de frecuencia en el molino SAG del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas, con el propósito de controlar la aceleración y la desaceleración del motor durante cada uno de los ensayos, logrando analizar detalladamente la velocidad de rotación y el comportamiento de la molienda semiautógena como procedimiento fundamental dentro del tratamiento mineral.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 La molienda

La molienda constituye el último escalón en lo que se refiere a la fragmentación industrial, es el procedimiento que tiene lugar luego de la trituración, su principal característica es que el tamaño de sus productos se encuentra a escala de milímetros (mm) y algunas de ellas a escala de micrones (μm). (Blanco, 2014, p.1).

Este proceso se realiza mediante equipos denominados molinos, los mismos que pueden trabajar en seco o en húmedo, dicha humedad marca un límite en la tendencia del comportamiento dentro de los equipos de molienda. (Blanco, 2014, p.1).

1.2 Tipos de molienda

Para (Blanco, 2014) existen dos tipos de molienda, la húmeda y la seca. Existen varios factores que determinan, cuál de las dos opciones será la indicada:

- La disponibilidad de agua.
- El consumo de energía, siendo la molienda húmeda la que consume menor cantidad de energía, debido a que la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos.
- La molienda por vía húmeda no necesita captadores de polvo y existe un menor calentamiento de los equipos.
- En la molienda húmeda existe un mayor desgaste de los cuerpos molidores y de los blindajes en comparación con la molienda seca, debido a la corrosión.

1.2.1 Molienda húmeda

Cuando se habla de molienda húmeda, se refiere a valores elevados de humedad, del 40% al 70% de agua en volumen, lo que para la mayoría de los minerales representa una relación de sólidos en peso entre el 55% y 80%. (Blanco, 2014).

1.2.2 Molienda seca

La molienda seca presenta una humedad que no rebasa el 3% o 4%, un punto a tomar en cuenta es que para una humedad entre el 5% y el 10% se produce una pasta pegajosa y el rendimiento del molino cae de una manera importante, de igual manera cuando se presenta una excesiva humedad se dificulta el choque de las bolas con los granos, dando como resultado un proceso ineficiente. (Coello & Tijonov, 2001).

1.2.3 Tipos de molinos

La fragmentación de las partículas en el proceso de molienda se va a conseguir por medio de una combinación de fuerzas de compresión, cizalladura y abrasión.

Los molinos en su interior disponen una mezcla de mineral a fragmentar junto con cuerpos moledores, los mismos que pueden ser barras, bolas o incluso fragmentos gruesos del propio mineral.

Tomando en cuenta el tipo de cuerpos moledores, los molinos más importantes se clasifican en:

- Molinos de Barras.
- Molinos de Bolas.
- Molinos Autógenos (AG).
- Molinos Semiautógenos (SAG). (Blanco, 2014)

1.2.4 Molino de barras

El molino de Barras está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal que en su interior cuenta con barras cilíndricas sueltas dispuestas a lo largo del eje, de longitud aproximadamente igual a la del cuerpo del molino. El molino gira gracias a que posee una corona, la cual está acoplada a un piñón que se acciona por un motor generalmente eléctrico. Las barras se elevan, rodando por las paredes del cilindro hasta una cierta altura, y luego caen efectuando un movimiento que se denomina “de cascada”. La ruptura del material que se encuentra en el interior del cuerpo del cilindro y en contacto con las barras se produce por fricción (entre barras y superficie del cilindro o entre barras) y por percusión (consecuencia de la caída de las barras desde cierta altura). El material ingresa por el eje en un extremo del cilindro y sale por el otro extremo o por el medio del cilindro,

según las distintas formas de descarga: por rebalse (se emplea en molienda húmeda), periférica central y periférica final (ambas se emplean tanto en molienda húmeda como en seca). (Ministerio de Energia y Minas, 2010).

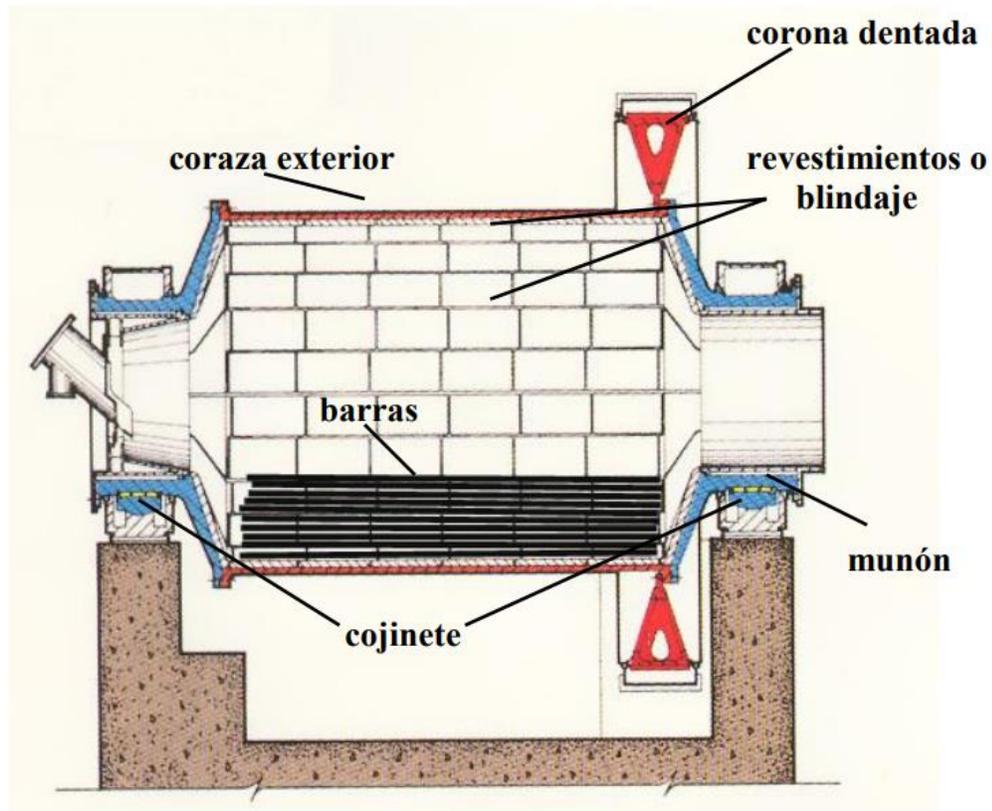


Figura 1.1 Molino de barras.

Fuente: (Hualan, Nuñez, & Rojas, 2013).

1.2.5 Molino de bolas

Los molinos de bolas están formados por un cuerpo cilíndrico con un eje horizontal y en cuyo interior se encuentran bolas libres. El cuerpo gira gracias a un motor, el cual acciona un piñón que engrana con una corona que tiene el cuerpo cilíndrico.

Las bolas giran haciendo el efecto de una cascada, rompiendo el material que se encuentra dentro de la cámara de molienda utilizando fuerzas de percusión y fricción.

El material para moler ingresa por un extremo y sale por el lado opuesto. Existen tres formas de descarga: por rebalse, por diafragma y por compartimiento. (Ministerio de Energia y Minas, 2010).

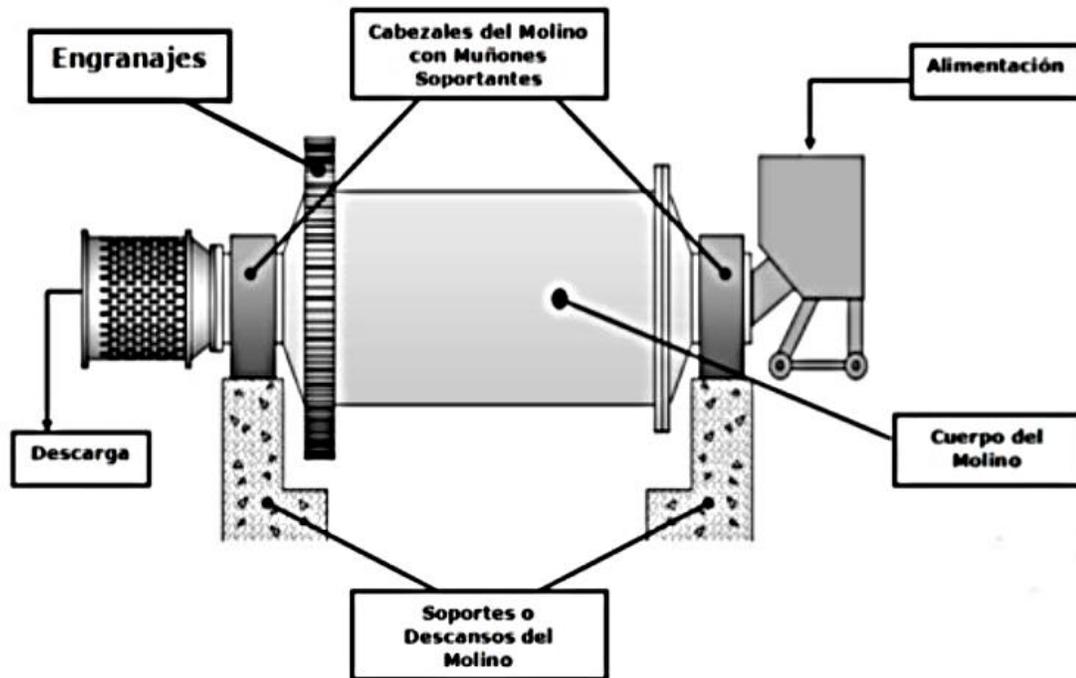


Figura 1.2 Molino de bolas.

Fuente: (Arriagada M. , 2013).

1.2.6 Molino autógeno (AG)

La molienda autógena tiene la principal característica de utilizar como medio de molienda el material grueso de la misma mena.

El desarrollo de la molienda autógena no ha sido tan impetuoso, ya que para llevar a cabo este procedimiento se requiere que los materiales a moler tengan características especiales, además deben ser previamente triturados en fragmentos gruesos.

Una de las grandes ventajas de los molinos autógenos es que producen partículas de mayor calidad, esto se debe a que el mineral no está en contacto con el acero de las bolas, barras o cualquier cuerpo usado en otros procesos de molienda, el mecanismo de reducción de tamaño que utiliza este molino es principalmente por abrasión e impacto. (Ministerio de Energía y Minas, 2010).

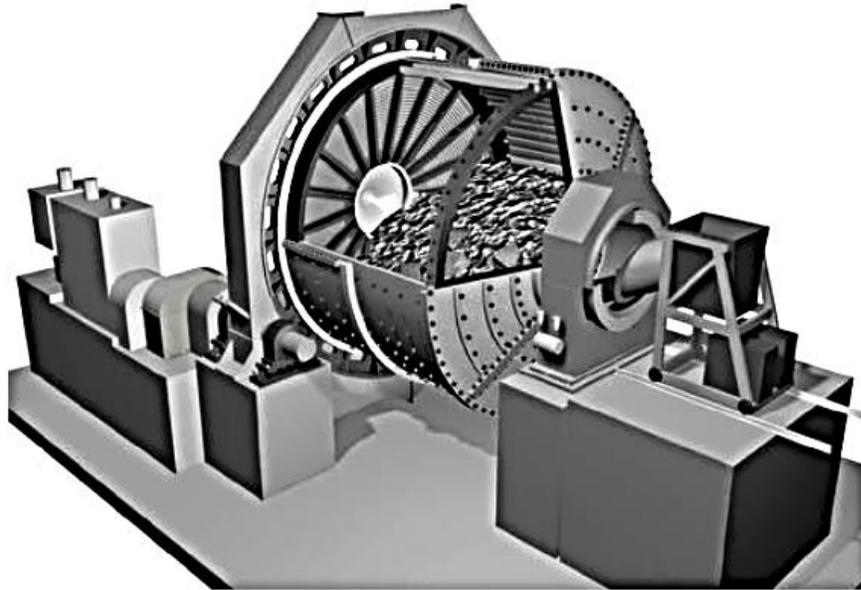


Figura 1.3 Molino Autógeno.

Fuente: (Blanco, Tecnología Mineralúrgica, 2014).

1.2.7 Molino semiautógeno (SAG)

Los molinos semiautógenos son muy similares a los molinos de bolas, con la característica particular que, el elemento moedor lo constituye una mezcla de bolas y elementos propios del mineral a moler, de tamaño grande o notablemente mayor que el correspondiente a un molino de bolas convencional.

Es muy frecuente encontrar un molino semiautógeno trabajando en serie con un molino de bolas, el sistema es más eficiente trabajando de esta manera.

La primera etapa fragmenta las unidades mayores de la alimentación y la segunda afina el proceso, previo a eliminar del sistema los finos ya molidos mediante clasificadores como espirales o hidrociclones¹. (Blanco, 2014, p.30).

¹ Hidrociclón. – Es un equipo destinado al tratamiento de pulpas sólido-líquido, consiste de una parte cónica seguida por una cámara cilíndrica, en la cual existe una entrada tangencial para la suspensión de la alimentación.

La molienda semiautógena se basa fundamentalmente en la fractura por impacto. (Magne, Valderrama, & Titichoca, 2003, p.2).

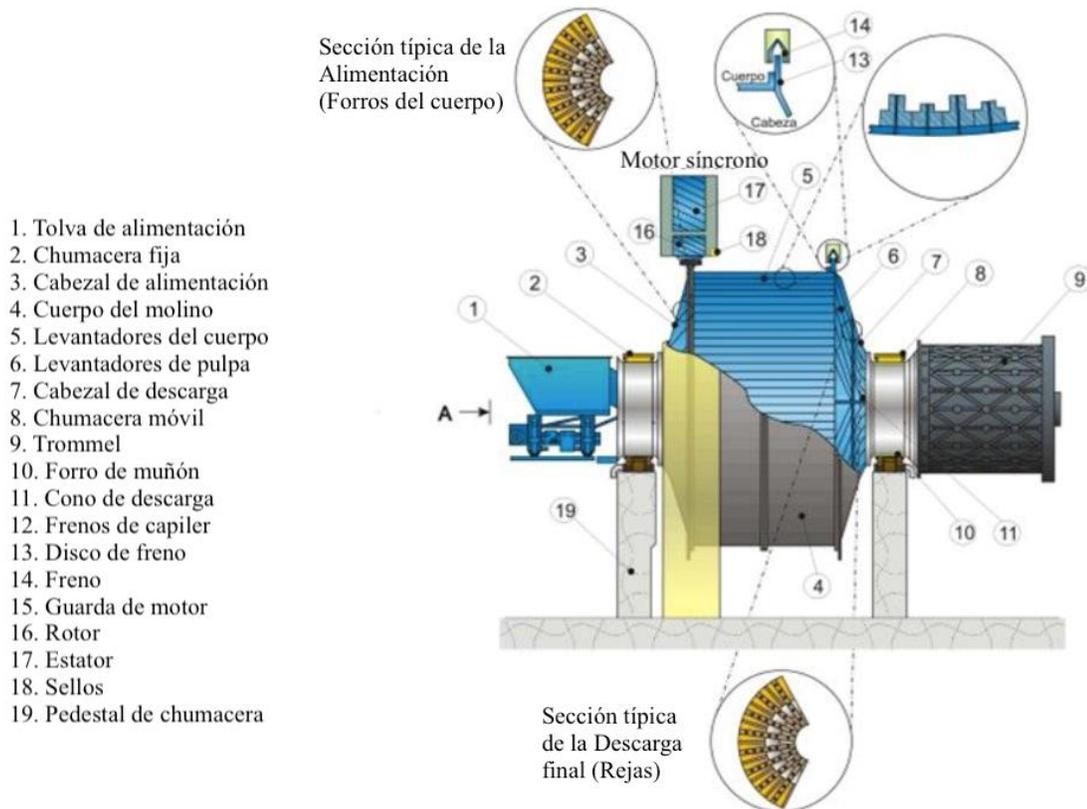


Figura 1.4 Esquema de un molino SAG.

Fuente: (Sanchez, 2019).

1.3 Operación y balance del molino SAG

De acuerdo con (Aguilar, 2017) la acción del molino está regulada principalmente por dos fenómenos:

- El proceso de molienda.
- El transporte del material a través del molino y de la parrilla.

Dentro de la operación de molienda, podemos decir que existen dos parámetros que la definen:

- La velocidad con que se muelen las partículas.
- La distribución de tamaño de los productos que se obtiene.

1.3.1 Teoría de Bond y consumo específico de energía

Esta teoría parte de la base, de que la energía consumida para la trituración es proporcional a la longitud de las grietas que se producen en la trituración; y en el supuesto de un material homogéneo, establece la siguiente relación empírica para el consumo energético W_B :

$$W_B = \frac{10W_{iB}}{\sqrt{P}} - \frac{10W_{iB}}{\sqrt{F}} \quad (kWh/t) \quad (1)$$

o introduciendo la relación de trituración $R = F/P$:

$$W_B = W_{iB} \left(1 - \frac{1}{R^{0.5}}\right) \left(\frac{100}{P}\right)^{0.5} \quad (kWh/t) \quad (2)$$

Para ello se define la constante del material W_i (índice de trabajo) como la demanda energética (en kWh/t) que es necesaria para la trituración de un material, hasta llegar a un 80 % menor a $100\mu m$; F y P son los valores del D_{80} de alimentación y producto molido.

En el supuesto de un material homogéneo, el índice de trabajo W_i representa una constante del material. Con materiales heterogéneos, es decir, en casi todos los minerales y rocas, los índices de trabajo dependen del tamaño final de la molienda y de otros factores, por lo tanto, otro autor (Holmes, 1957) propone considerar como variable el exponente de la trituración que Bond indica que es de 0,5, con el fin de que el Índice de trabajo W_i conserve el carácter de una constante real del material. La ecuación de Bond la transforma en:

$$W_H = W_{iH} \left(1 - \frac{1}{R^r}\right) \left(\frac{100}{P}\right)^r \quad (kWh/t) \quad (3)$$

En ensayos de laboratorio se determinaron valores de r que oscilan de 0,2 a 1,4. (Wasmuth, 1969, p. 20).

1.3.2 Moliendabilidad

Para la trituración de material proveniente de la veta hay que gastar grandes cantidades de energía, de las cuales solamente una parte muy pequeña, menos del 1 %, se consume como trabajo útil, lo que conduce a un aumento de la superficie del material, mientras que la mayor parte, más del 99 %, se pierde, sobre todo en forma de calor y de cambios en el régimen del trabajo mecánico. El consumo total de energía para la molienda de un material en un molino varia, por muchísimos parámetros, por una parte, vienen factores dados por

las propiedades específicas (físicoquímicas) del material a moler, la construcción del molino, así como también por el tamaño y el tipo de los cuerpos moledores. (Wasmuth, 1969).

1.3.3 Mecanismos de fractura

Cuando comienza un proceso de molienda, el movimiento de los materiales de carga (bolas y mena) dan lugar a muchas zonas que se rigen por diferentes mecanismos de fractura. El comportamiento típico de la carga del molino depende de la posición de la carga de los medios moledores como se muestra en la Figura 1.5. En el proceso de molienda se pueden distinguir dos mecanismos de fractura principales que son: colisión y fricción. Se entiende que la colisión da origen al impacto, generalmente este mecanismo de molienda es el resultado de la corriente de catarata, donde los medios moledores (bolas) tienen una trayectoria parabólica. Por otro lado, la fricción da origen a la abrasión. Este mecanismo de fractura generalmente genera un movimiento en cascada produciendo una buena cantidad de partículas finas, desafortunadamente, la ruptura de partículas finas requiere una gran cantidad de tiempo y energía. Esto se debe a que la acción de fricción crea abrasión generando calor en el sistema, esta es una de las principales pérdidas de energía en este mecanismo de molienda. (Rosales, Andrade, Alvarado, Espinosa, & Nava, 2020, p.2).

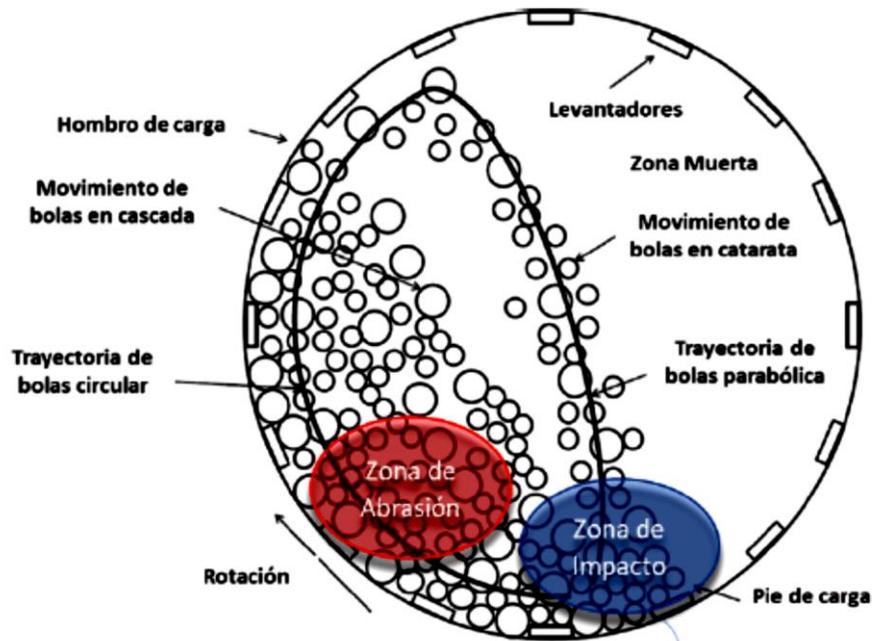


Figura 1.5 Identificación de los mecanismos de fractura.

Fuente: (Rosales, Andrade, Alvarado, Espinosa, & Nava, 2020).

Para (Gutierrez & Sepúlveda, 1989) los mecanismos de conminución son: abrasión, compresión e impacto, los mismos que actúan simultáneamente generando productos con granulometría homogénea.

1.3.4 Tipos de fracturas

Los mecanismos de conminución que actúan en la disminución del tamaño de partícula dentro del molino SAG son: impacto, compresión y abrasión; estas fracturas actúan simultáneamente.

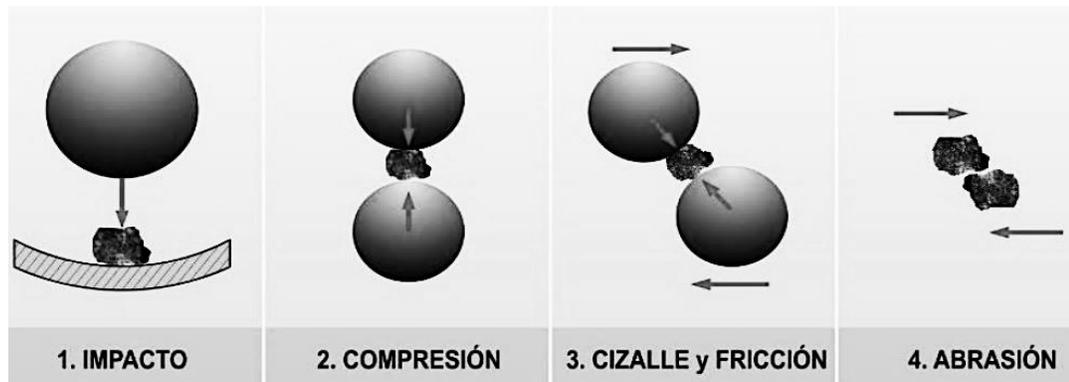


Figura 1.6 Mecánica de fracturas.

Fuente: Manuales de Tecsup.

1.3.4.1 Impacto

Esto ocurre cuando las bolas de gran tamaño y algunas partículas de material de tamaño grande son levantadas por los lifters² ganando energía potencial y posteriormente transformándola en energía cinética. Esto produce un impacto masivo que desintegra las partículas. Sucede cuando la energía se aplica directamente sobre la partícula y es mayor a la energía requerida para romper el material. (Austin & Concha, Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación, 1994).

1.3.4.2 Cizalle y fricción

Este mecanismo provoca que rocas irregulares tiendan a formar partículas aproximadamente esféricas en la molienda autógena. (Austin & Concha, Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación, 1994)

1.3.4.3 Abrasión

Se produce al girar el cilindro, donde la masa que está en su interior se desplaza sobre sí misma, produciendo un gran roce entre las partículas y los elementos molturadores. (Blanco, Universidad de Cantabria, 2014).

² Lifters. - Permite conducir la carga de mineral dentro del molino hacia la descarga del mismo y levantar el mineral junto a un porcentaje menor de bolas de acero, para producir la molienda del mineral.

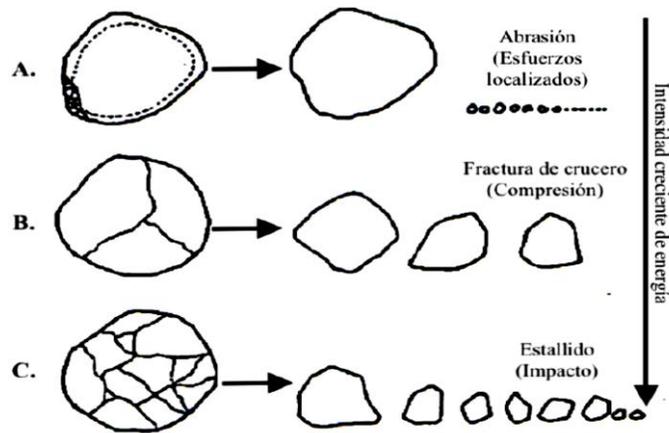


Figura 1.7 Identificación de los mecanismos de conminución.

Fuente: (Gutierrez & Sepúlveda, 1989).

1.3.5 Zona de cascada

Los medios molidores tienden a rodar suavemente produciendo un flujo tipo cascada. Esta cascada favorece la abrasión, generando gran cantidad de finos. Se produce también un mayor desgaste de la coraza. (Aguilar, 2017).

1.3.6 Zona de catarata

Los medios molidores se separan de la carga en el punto más alto y al caer desarrollan una trayectoria parabólica. Se produce la conminución por impacto con menor desgaste de las corazas. Debe notarse que en la zona de catarata los medios molidores caen libremente y no ocurre fractura sino hasta que ellos impactan contra la carga o contra el cilindro. Cuando el nivel de carga en el molino es bajo, el impacto de las bolas se puede producir directamente sobre el cilindro, generando ruptura de los medios molidores y dañando seriamente los revestimientos. (Aguilar, 2017).

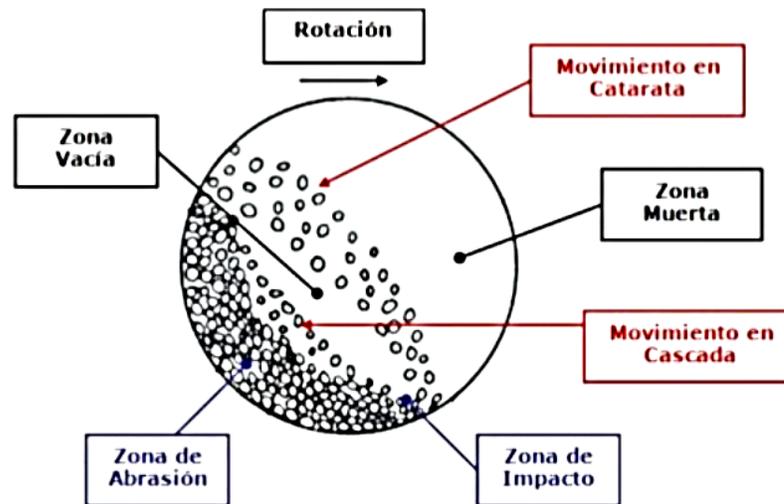


Figura 1.8 Característica del movimiento cascada y catarata de carga.

Fuente: (Arriagada M. A., 2013).

1.3.7 Zona de compresión

La carga tiende a pegarse a la coraza, en este caso se reduce drásticamente la ruptura por impacto y sólo actúan los mecanismos de abrasión y compresión por la fuerza centrífuga y la presión ejercida sobre la carga. Se dice que la carga en el molino sigue un movimiento de catarata, cuando los medios de molienda son arrojados desde la parte alta de la carga hasta el pie de ella. El movimiento de catarata generalmente produce fragmentación por impacto, lo que da lugar a un producto de molienda gruesa. En general el movimiento de la carga en el molino es una combinación de movimientos de cascada y catarata, en la Figura 1.8, se indica los movimientos indicados. (Aguilar, 2017).

1.4 Parámetros importantes en la molienda

1.4.1 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación del molino es un parámetro de importancia tanto en el consumo como en la operación de molienda que realiza. El giro del molino sobre su eje, produce el desplazamiento de la carga junto con los medios moledores, produciéndose la fricción, choque, etc., generando la molienda del mineral y el desgaste de los elementos moledores que deben ser repuestos periódicamente. (Blanco, 2014, p.6).

A una velocidad de rotación baja, las bolas presentan una acción de volteo relativamente suave y en efecto existe una tendencia de la masa de bolas a ser levantada por la acción de rotación de las paredes del molino y a deslizarse hacia atrás como una masa compacta.

A medida que se aumenta la velocidad, la acción de volteo aumenta y el lecho aparece como una superficie inclinada de la cual están emergiendo las bolas y entrando en contacto con la superficie del mineral. El lecho de bolas se expande permitiendo a las partículas o a la pulpa penetrar entre las bolas. El método principal para transferir esfuerzo a las partículas se produce al momento en que las bolas colisionan.

El lecho está en un estado de cascada. A una velocidad de rotación más alta una cantidad mayor de las bolas son lanzadas desde lo alto del molino formando una catarata de bolas. (Austin & Concha, 1994, p.85).

De acuerdo con (Magne, Améstica, Barría, & Menacho, 1995) “Al caracterizar el movimiento de la carga interna de un molino, la carga en movimiento de caída libre es identificada como en catarata y la que cae inmediatamente sobre el riñón de carga se conoce como cascada”.

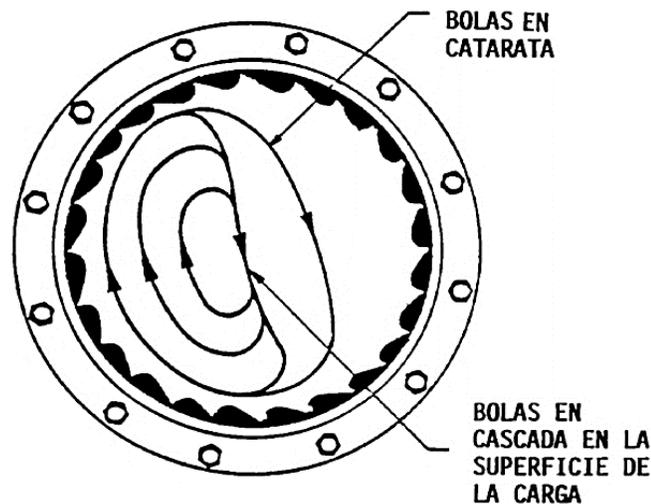


Figura 1.9 Ilustración del movimiento en un molino de bolas a una velocidad normal de operación.

Fuente: (Austin & Concha, Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación, 1994)

Las velocidades específicas de fractura normal, varían con la velocidad de rotación de la misma manera. Sin embargo, la velocidad máxima sucede a diferentes fracciones de la velocidad crítica para diversos molinos, dependiendo del diámetro del molino, del tipo de barras elevadoras, de la razón de diámetros de los medios moledores y de las condiciones de llenado de bolas y polvo. El máximo se encuentra usualmente en el rango del 70% al 85% de la velocidad crítica, siendo rangos del 70% al 75% los usuales para molinos de diámetros grandes superiores a 10 pies con una carga completa de bolas ($J = 0.4$). (Austin & Concha, 1994, p.93).

1.4.2 Velocidad crítica

Se define como velocidad crítica del molino a la velocidad de rotación a la cual las bolas empiezan a centrifugar en las paredes del molino y no son proyectadas en el interior del mismo. Haciendo un balance entre la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga sobre una bola en la pared del molino, la velocidad crítica resulta ser:

$$\text{Velocidad crítica} = \frac{76.6}{\sqrt{D-d}} \quad \text{RMP; D, d en pies} \quad (4)$$

$$\text{Velocidad crítica} = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad \text{RMP; D, d en metros} \quad (5)$$

Donde D es el diámetro interno del molino y d es el diámetro máximo de las bolas, es razonable esperar que el movimiento de volteo de la carga en un molino dependerá de la fracción de velocidad crítica a la cual el molino opera, la cual se denota a través de la siguiente expresión ϕ_c (la fracción de velocidad crítica). (Austin & Concha, Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación, 1994).

En otras palabras, la velocidad crítica es la velocidad del molino a la que la fuerza centrífuga mantiene todo el material en las paredes del molino y evita la acción de caída en catarata y cascada que se requiere para la molienda. El molino, entonces, deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica. (Arriagada M. A., 2013).

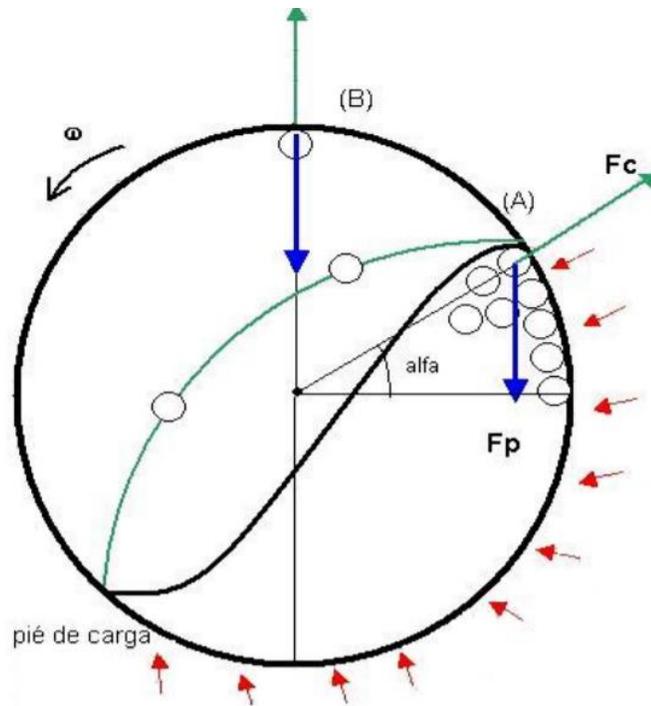


Figura 1.10 Velocidad crítica del molino.

Fuente: (Blanco, Tecnología Mineralúrgica, 2014).

En la figura anterior el equilibrio de fuerzas supone:

$$F_c = m \cdot V^2 / r \quad ; \quad r = D/2 \quad ; \quad m = P/g \quad ;$$

En donde:

P: peso de las bolas.

$F_p = P$; la ecuación del equilibrio en un punto es:

$F_c \cdot \text{Sen}(\alpha) = F_p$; para el punto B (Figura 1.10); más exigente, se tiene que:

$\text{Sen}(\alpha = 90) = 1$.

Sustituyendo: $(P/g) \cdot V^2/r = P$; y r por D/2 se obtiene la velocidad:

$$2 \cdot V^2/D = g \rightarrow V = \sqrt{(D \cdot g/2)} \quad ;$$

Como: $V(\text{lineal}) = \omega(\text{angular}) \cdot r \rightarrow$

Sustituyendo se obtiene, para $g = 9.81 \text{ m/s}^2$:

$$\omega(\text{rad/s}) = \sqrt{(2 \cdot g/D)} = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad ;$$

$$\omega(\text{rpm}) = (60/2 \cdot \pi) \cdot 4,43 \sqrt{1/D} = \frac{42,3}{\sqrt{D}}; \quad (6)$$

D: Diámetro interno del molino en metros.

Para obtener la expresión anterior, se considera el equilibrio entre la fuerza centrífuga que impulsa la bola contra la carcasa y la fuerza de gravedad que tiende a separarla y se comparan en la peor situación para asegurar la adherencia en los 360°, esta corresponde al punto (B) indicado en la Figura 1.10. Se observa que esta velocidad crítica depende del diámetro interno del molino y es independiente del tipo de material molido.

La velocidad real del molino se suele fijar en un porcentaje de esta velocidad crítica y varía entre el 60% y el 80% normalmente. El punto de máximo rendimiento, medido por la potencia necesaria para accionar el molino, está en el entorno del 75% y se suelen utilizar velocidades de rotación del 65% al 70% para los molinos de bolas y del 50% al 70% para los molinos de barras. (Blanco, Universidad de Cantabria, 2014).

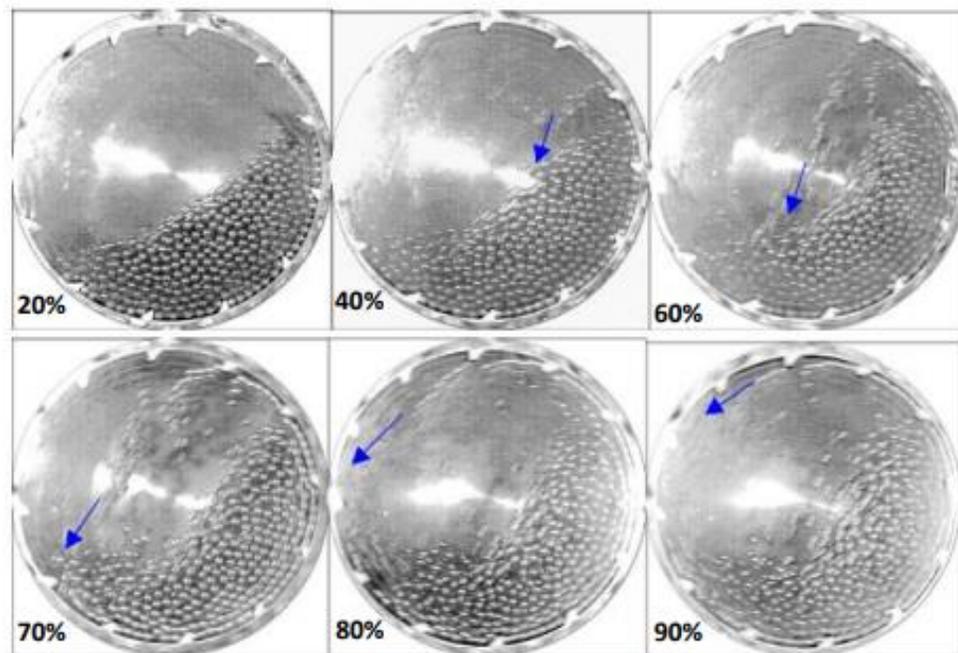


Figura 1.11 Efecto de la velocidad en el movimiento de la carga, a distintos porcentajes de velocidad crítica.

Fuente: (Silva, 2013).

1.4.3 Carga de bolas

Un factor que influye mucho en la operación de un molino SAG es el volumen de la carga de bolas. Este volumen se expresa como una fracción del volumen total del molino y puede variar entre el 12% y 18% siendo el valor más usado un 16%.

Existen dos casos generales en los cuales es deseable agrupar las bolas en un molino SAG:

- Cuando se tiene una excesiva acumulación de mineral fino e intermedio, debido a una falta de rocas grandes en la alimentación al molino, que permita formar una carga apta para moler esos tamaños.
- Cuando existe una acumulación de rocas grandes debido a la incapacidad de la carga para romper esos tamaños. (Aguilar, 2017, p. 25).

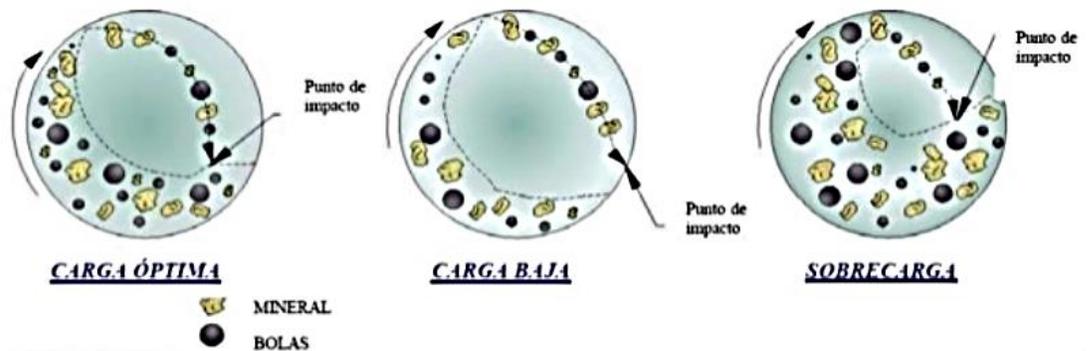


Figura 1.12 Movimiento de la carga al interior del molino SAG para diferentes niveles de llenado.

Fuente: (Arriagada M. A., 2013).

1.4.4 Tamaño máximo de los elementos moledores

Los elementos moledores no poseen los mismos tamaños, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores. Para determinar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula

$$M (") = \sqrt{\frac{F(\mu) \cdot W_i}{K \cdot C_s(\%)}} \cdot \sqrt{\frac{S(\text{ton}/\text{m}^3)}{\sqrt{D(ft)}}} ; \quad (7)$$

- **M:** diámetro máximo de elementos moledores.
- **F:** tamaño de alimentación del 80% de la carga.
- **Wi:** Work Index - constante adimensional en función de la naturaleza del material molido. Se obtiene por tablas.
- **K:** constante adimensional que vale: bolas→200 , barras→300 .
- **Cs:** porcentaje de la velocidad crítica.
- **S:** peso específico del material a moler.
- **D:** diámetro interno del molino. (Nicolini, 2015, p.6)

1.4.5 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%.

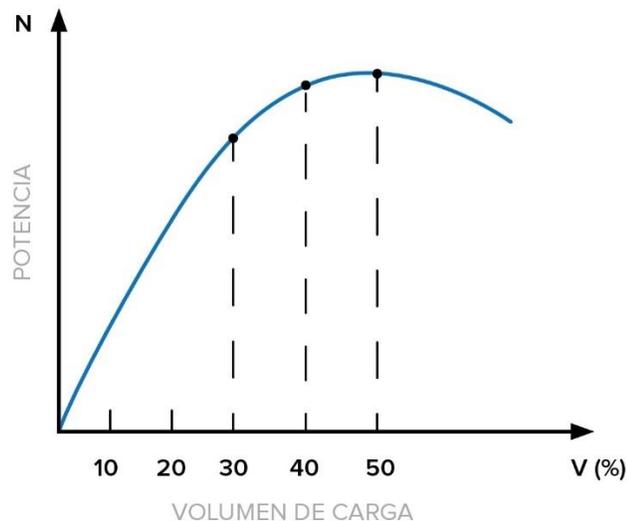


Figura 1.13 Relación de la potencia con respecto al volumen de carga.

Fuente: (Blanco, Tecnología Mineralúrgica, 2014).

El producto de giro en el molino, ocasiona un desplazamiento de las bolas y de la carga hasta alcanzar un equilibrio. El equilibrio se alcanza cuando las potencias resistentes se igualan con la potencia entregada del motor. Las potencias se dividen en 2 grupos:

- P1: Como la potencia requerida para mantener la carga, más los elementos molturadores en posición desequilibrada, incluyendo los desplazamientos internos dentro del molino entre el mineral y las bolas, los rozamientos y el propio efecto de molienda.
- P2: Como las pérdidas que hay en el sistema, que son iguales a las generadas para conservar una masa correspondiente a la suma de la carga de bolas y mineral más el peso del molino, operando a la misma velocidad que el sistema. (Blanco, 2014, p.35).

1.4.6 Grado de llenado

El grado de llenado, es decir la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga a moler, los medios moledores, es un factor que afecta directamente al rendimiento del molino. Representando la variación de la potencia consumida por el molino en función del grado de llenado, se observa que tiene un máximo en el entorno del 50% al 55% de utilización del volumen interno. A partir de este valor disminuye la potencia demandada por el molino hasta hacerse nula para un grado de llenado del 100%. (Blanco, 2014, p.5).

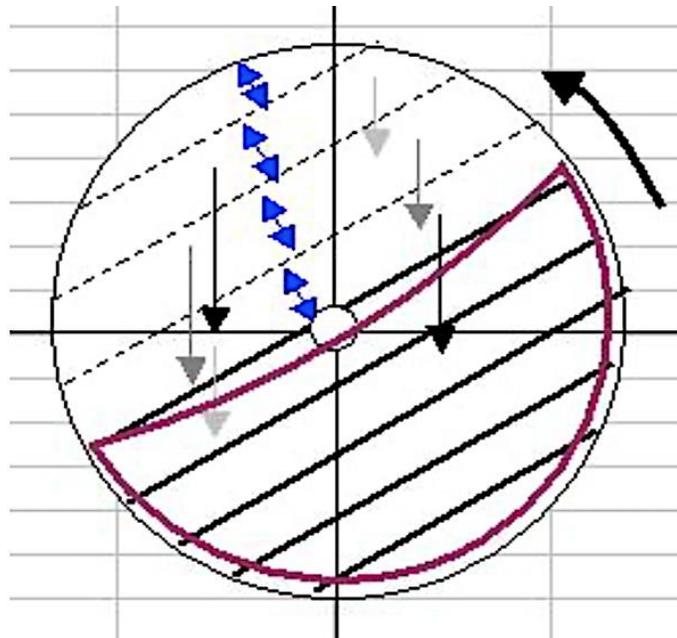


Figura 1.14 Aumento del grado de llenado.

Fuente: (Blanco, Tecnología Mineralúrgica, 2014).

Este grado de llenado, en la práctica está comprendido entre el 40% y el 55%, habitualmente el 45%, y lo forman bolas o barras (elementos molturadores) y el propio mineral a moler. El volumen ocupado, lo producen normalmente los elementos molturadores y entre estos se introduce el material a moler, siendo estos huecos entre las barras o las bolas el factor conocido como porosidad. Se considera por geometría que los huecos entre barras representan el 20% del volumen y entre las bolas el 40% del volumen. (Magne, 1997).

1.4.7 Ángulo de la carga

El ángulo de la carga es un factor determinante para saber la potencia del molino. Hasta la fecha no se ha desarrollado estudios que permitan establecer la forma en que, el ángulo de la carga se ve afectado por las condiciones de operación. Sin embargo, es posible establecer términos cualitativos, como:

- La densidad de la pulpa.
- El tamaño y la proporción de las rocas de mineral retenido.
- La velocidad de rotación del molino.
- El criterio de diseño.
- El estado de los lifters que tienden a aumentar el valor del ángulo de la carga.
- Valores típicos del ángulo de la carga son de 36° a 45° para molinos industriales y 30° a 35° para molinos de escala piloto.

Después de analizar las variables operativas del molino SAG, se concluye:

- Es una operación compleja con muchas interacciones entre sus variables.
- El operador no fija los medios moledores del molino.
- No es posible generalizar el comportamiento de los circuitos de molienda SAG.
- El número de variables que afectan la molienda SAG es elevado.
- Un mismo cambio en la conducta del molino puede ser explicado por más de una causa. (Aguilar, 2017, p.31).

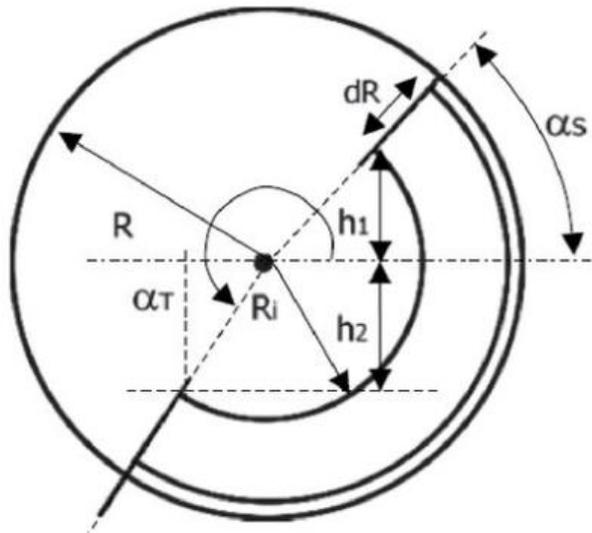


Figura 1.15 Ángulo de Carga en molino SAG.

Fuente: (Aguilar, 2017).

1.4.8 Tiempo de residencia del material

El tiempo de residencia del material dentro de un molino SAG, es un parámetro importante que se debe tener en cuenta, ya que dependiendo del material a moler y del tamaño de partículas que se requiere obtener, se trabajara a mayor o menor tiempo de molienda, el resultado a mayor tiempo serán partículas más finas y a menor tiempo no se molerán completamente, por lo que existirá material relativamente grueso. Sin embargo, se debe evitar tiempos prolongados ya que se generará sobre-molienda y por ende un elevado consumo energético.

El tiempo de residencia viene afectado por el tamaño del cilindro, volumen útil, y el caudal circulado, por lo que la variación del caudal es una forma de regulación granulométrica y de adaptación del molino a necesidades cambiantes. Dentro de un molino, tanto de barras como de bolas, se pueden definir diferentes zonas según el grado de llenado y la velocidad de rotación, que son dos elementos fundamentales en la operación de molienda.. (Blanco, 2014, p.4).

A mayor tiempo de molienda, más finas serán las partículas, y a menor tiempo no se fragmentaran completamente, por lo que existirá material relativamente grueso. Lo que se debe evitar es:

- **Submolienda:** Una submolienda de la mena resultará en un producto que es demasiado grueso el cual puede resultar poco útil para el proceso productivo.
- **Sobremolienda:** Reduce de tamaño innecesariamente de los finos que llegaron a una granulometría ya deseada. Además, se pierde mucha energía, que encarece el proceso.

1.4.9 Granulometría

La granulometría en el producto del molino SAG también es una variable que se debe tener en consideración. Se puede establecer una relación entre esta variable y el consumo específico de energía del molino SAG, con tal de determinar la cantidad de potencia requerida por unidad de flujo másico, para alcanzar un determinado perfil granulométrico en la salida del molino SAG. Al mismo tiempo es posible fijar la potencia del molino y determinar el tonelaje de alimentación fresca que se debe alimentar, para generar una disminución en la granulometría del producto, en el caso de evidenciar algún deterioro de su calidad. De esta manera es posible, teniendo como dato la granulometría de ingreso, relacionarla con la granulometría en el producto del molino SAG, para fijar tanto la capacidad de tratamiento del circuito, como la demanda de potencia requerida por parte del mismo, lográndose un alto grado de versatilidad y control para la operación.

Tamaños de alimento muy grandes en comparación con la carga de cuerpos moledores, producen fenómenos de abrasión y astillamiento antes de que ocurra fractura, lo que hace que se pierda energía generando un proceso ineficiente, y para tamaños de alimentación muy pequeña comparada con los cuerpos moledores generan pérdida de energía por la baja posibilidad de captura entre los medios moledores. (Austin & Concha, 1994).

1.4.10 Molienda de primer orden

Si la alimentación inicial de un molino está limitada a partículas dentro de un intervalo determinado, denominado como intervalo 1, entonces la condición inicial es $W_1(0) = 1$.

En el tiempo de molienda t_1 , el producto que se analiza por tamizaje es la fracción en peso tomada en el tiempo uno y después se devuelve la misma cantidad de material removido, para mantener la operación continua, posteriormente se toma el tiempo t_2 , repitiendo todo el procedimiento.

Como la masa retenida en el molino W es constante se tiene:

$$\frac{dW_1(t)}{dt} = S_1 W_1(t) \quad (8)$$

En donde S_1 es una constante de proporcionalidad denominada velocidad específica de fractura, que es un parámetro determinante para el comportamiento cinético de la molienda debido a la relación inversa que tiene con el consumo energético del proceso y presenta unidades t^{-1} (Colorado, Llano, & Osorio, 2020). Entonces S_1 no varía con el tiempo, integrando la ecuación 8, sujeta a la condición inicial $W_1(0)$ se obtiene:

$$\log [W_1(t)] = \log [W_1(0)] - S_1 t / 2.3 \quad (9)$$

Si un material se rompe y los fragmentos producidos se mezclan de nuevo con el material en el molino, y si esta distribución de fragmentos fuese medida antes que vuelvan a ser fracturados, el resultado obtenido sería la distribución de la fractura primaria. Estos fragmentos obtenidos no son necesariamente producidos por la propagación de fracturas, sino que también son producidos por acciones de ruptura que ocurren antes que los fragmentos sean mezclados de nuevo al seno del material. (Austin & Concha, *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*, 1994)

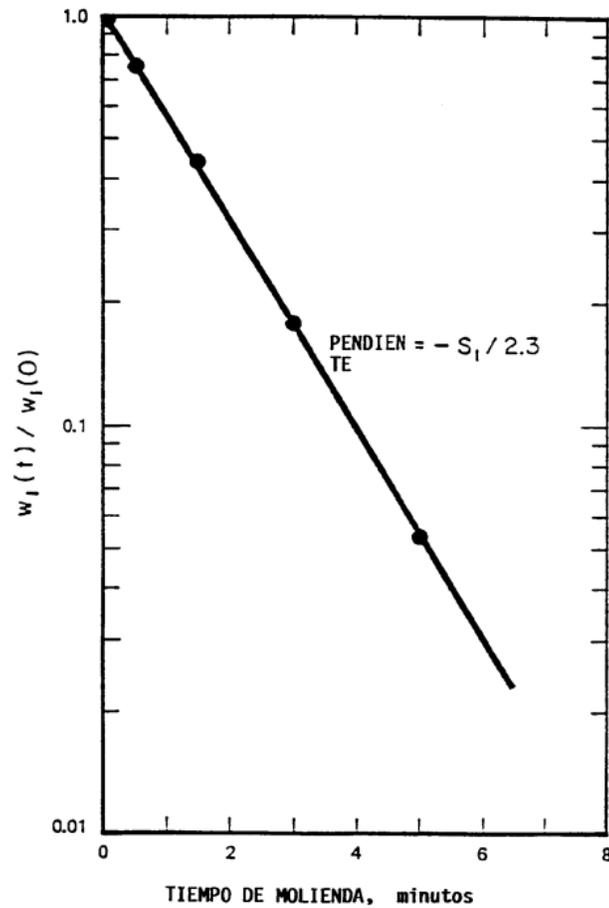


Figura 1.16 Velocidad específica de fractura.

Fuente: (Austin & Concha, Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación, 1994)

1.5 Elementos principales de molino SAG

Las piezas fundamentales de un molino son: casco, chaquetas o revestimientos, parrillas o rejillas de descarga, cuerpos trituradores, dispositivos de carga y de descarga y el accionamiento o mando del molino.

1.5.1 Casco del molino SAG

El casco del molino se construye con planchas de acero en maquinaria diseñada para la operación, luego se suelda o se remacha. El espesor depende de la carga de bolas y del mineral que se desea moler, y también del grado de debilitamiento del casco por los huecos que se perforan y que son producidos por el taladro para la fijación por medio de pernos de cabeza ovalada del revestimiento.

En los extremos del casco se sueldan anillos de hierro o de acero fundido para la fijación de las tapas del cilindro del molino mediante pernos.

En el casco se realizan aberturas con tapa llamadas “manhole” para poder realizar la carga y descarga de las bolas, inspección de las chaquetas o revestimientos y para el reemplazo de las chaquetas y de las parrillas del molino SAG.

Los molinos miden entre 1,2 a 4,14 metros de diámetros y hasta 16 metros de longitud. (Aguilar, 2017, p. 8).

1.5.2 Rejillas o parrillas en molinos SAG

En los molinos se instalan unas rejillas destinadas a retener los cuerpos moledores y los trozos gruesos de mineral, durante el traslado del mineral molido a los dispositivos de descarga. La rejilla de descarga se instala en los molinos SAG que operan y trabajan por vía húmeda.

Para dejar salir el mineral molido por el muñón de descarga, el material debe pasar por parrillas dispuestas radialmente con aberturas que se ensanchan hacia la salida. El mineral molido que pasa por las parrillas es recogido y se vierte fuera del molino por el muñón de descarga. Las parrillas se reemplazan fácilmente cuando se desgasta.

La elección correcta de la ubicación para la instalación de las rejillas y la sección útil de las mismas condicionan una gran capacidad de producción. (Aguilar, 2017, p.9).

El área de evacuación de las parrillas de los molinos semiautógenos se define en la etapa de diseño, en base a la capacidad necesaria de evaluación de flujo de procesamiento (mineral y agua) necesaria para las condiciones en que ha sido concebido el equipo. (Magne, Titichoca, & Baeza, 2003, pág.5).

1.5.3 Revestimientos para molinos

El uso industrial de revestimiento de caucho en los molinos se inició al principio de la década del 60 y desde entonces se ha difundido para todo el mundo. Elementos principales de un revestimiento de para molinos son:

- Barra elevadora.
- Mordaza.

- Revestimiento de las tapas de entrada y salida.
- Revestimiento del casco o Shell.

1.6 Análisis granulométrico

1.6.1 Granulometría

Se refiere a la composición, en porcentaje de los diversos tamaños de agregados en la muestra, es representada o indicada mediante una cifra que representa en peso el porcentaje parcial de cada tamaño que quedó retenido o que pasó en los diferentes tamices utilizados para la medición. (Toirac Corral, 2012).

Un análisis granulométrico puede ser representado mediante tablas o curvas que nos facilitan su comprensión y comportamiento, son de gran importancia para los procesos de tratamiento mineral, sea en fase experimental o en fase de operación.

El análisis granulométrico se lleva a cabo generalmente con métodos mecánicos (tamices), hidráulicos y neumáticos. En principio las cribas se utilizan para clasificar partículas con un tamaño de hasta 40 micrones, mientras que las clasificaciones hidráulicas y neumáticas se utilizan para clasificar tamaños menores.

Para separar las partículas de acuerdo con su tamaño se utilizan mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado de cada una de ellas, el peso de cada tamaño se expresa como un porcentaje retenido en cada malla con respecto al peso total de la muestra.

Los porcentajes retenidos en cada malla se calculan tanto de manera parcial como acumulados respecto al peso total de las muestras. (Marín López, 2017).



Figura 1.17 Serie de tamices.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas granulométricas son representadas mediante diagramas semilogarítmicos, el eje de las abscisas utiliza una escala logarítmica y representa el tamaño de mallas o de clasificación, mientras que el eje de las ordenadas se encuentra en escala lineal y representa el porcentaje de material pasante o retenido. La necesidad de usar la escala logarítmica en el tamaño de la clasificación será aplicada en el presente trabajo de titulación por tener muestras muy homogéneas granulométricamente hablando.

1.6.2 Métodos de análisis granulométricos

1.6.2.1 Modelo de distribución de Gates-Gaudin-Schumann

Este modelo de distribución es el más utilizado para la distribución granulométrica de las partículas, se puede obtener una representación lineal de la misma trazando el logaritmo del porcentaje pasante acumulado y el tamaño de la malla; se utiliza un plano cartesiano a escala logarítmica.

La ventaja de esta función es que con un número limitado de tamices se puede calcular el tamaño de las partículas (DTP) que se encuentran entre otros dos tamaños de tamices y obtener la distribución completa de la muestra (Álvarez, 2010).

$$y = 100 * \left(\frac{x}{k}\right)^m \quad (10)$$

Donde:

y = % de pasante acumulado para un tamaño x.

x = tamaño de la malla.

k = módulo de tamaño.

m = módulo de distribución.

1.6.2.2 Modelo de distribución de Rosin-Rammler

La función de Rosin-Rammler es la más utilizada en Europa para representar el tamaño de las partículas minerales. Se representa en un plano cartesiano logarítmico la función $\text{Log}(\text{Log}100/F(x))$ Vs. $\text{Log}(X)$. En donde F(x) es la fracción de pasante acumulado y X es el tamaño de las partículas.

Este diagrama se expande en las regiones por debajo del 25% y por encima del 75%; se contrae en la región comprendida entre 30 y 60% (Laércio, 2000).

La distribución de Rosin-Rammler se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R = 100 * e^{-\left(\frac{x}{k}\right)^m} \quad (11)$$

Donde:

R = % de retenido acumulado.

e = base natural de log.

x = tamaño de apertura de malla.

k = módulo de tamaño.

m = módulo de distribución.

Desarrollando la ecuación anterior mediante logaritmos y considerando a m y k que son constantes, obtenemos:

$$\text{LogLog}\left(\frac{100}{R}\right) = m * \text{Log}(x) + cte$$

Se facilitan los calculos al tomar logaritmos neperianos en vez de naturales y trabajar con fracciones de pasante acumulado, por lo tanto la ecuación es:

$$\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - \text{Fracción de Pasante Acumulado})) = m * \text{Ln } x + cte \quad (12)$$

Para el desarrollo de este modelo, los valores que se obtendrán en el eje de las abcisas = $\text{Ln}(x)$, en donde x es el tamaño de abertura de la malla; el eje de la ordenada = $\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - \text{Pasante Acumulado}))$.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

2.1 Obtención y georreferenciación de las muestras

Para el presente trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes muestras:

2.1.1 Andesita

Se obtuvieron 500 kilogramos de material procedentes de la mina “El Plateado”, ubicada en la parroquia Cañaribamba, cantón Santa Isabel, provincia del Azuay.

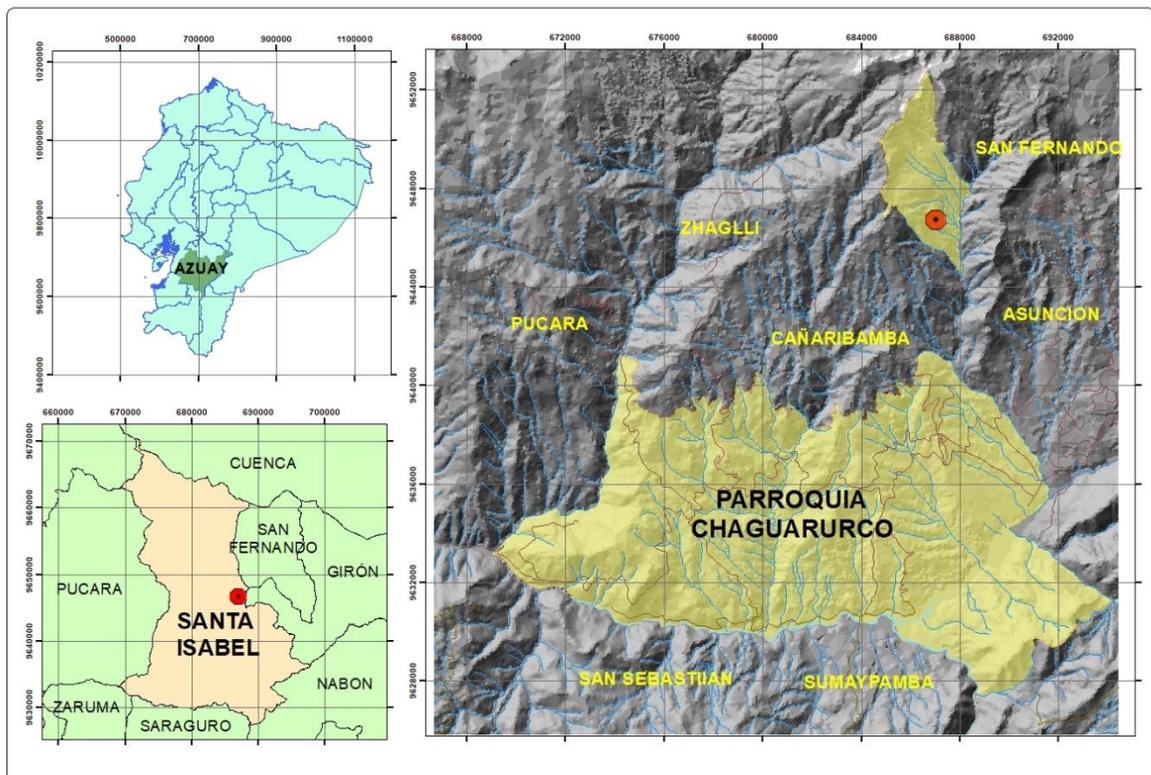


Figura 2.1 Georreferenciación de la muestra de Andesita.

Elaborado por: Elaboración propia.

2.1.2 Granodiorita

Se obtuvieron 500 kilogramos de material procedentes de la parroquia Cojitambo, cantón Azogues, provincia del Cañar.

2.1.3 Caliza

Se obtuvieron 500 kilogramos de material, el lugar de toma de muestras está ubicado en parroquia Guapán, cantón Azogues, provincia del Cañar.

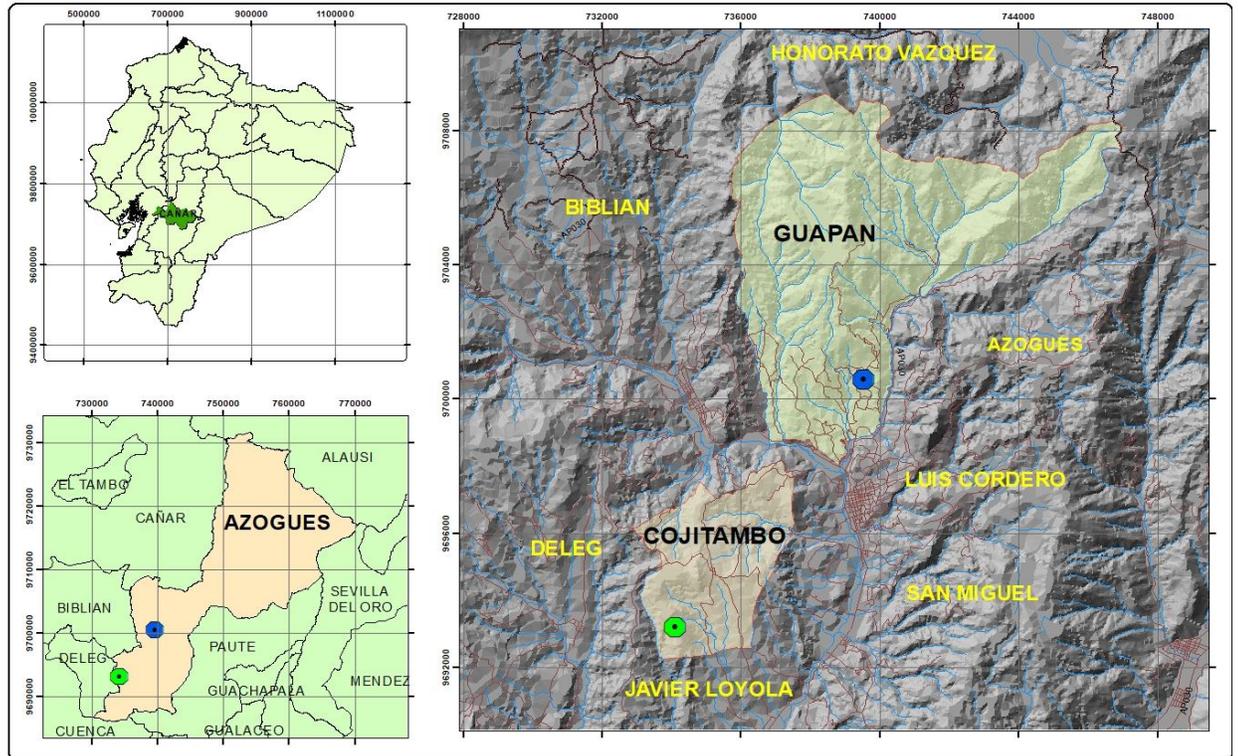


Figura 2.2 Georreferenciación de la muestra de Granodiorita y Caliza.

Elaborado por: Elaboración propia.

2.2 Caracterización de las muestras

Previo al análisis experimental en el molino es muy importante conocer las características propias de cada una de las muestras:

Tabla 2.2 Características propias de cada muestra

Material	Tipo de Roca	Textura	Dureza en Escala de Mohs	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	Cohesión (MPa)	Angulo de Fricción (grados)
Andesita	Ígnea	Fina	7	220 - 320	28	45
Granodiorita	Ígnea	Polleín	5.5 - 7	170 - 230	15	50 - 55
Caliza	Sedimentaria	Micrítica	3	80 - 140	5 - 40	35 - 50

Fuente: (Proyecto PRECUPA, 1998)

2.2.1 Cálculo de la densidad

2.2.1.1 Cálculo de la densidad mediante el método del picnómetro

Para realizar el cálculo de la densidad se utilizó el método del picnómetro y por medio de la balanza se realizó las siguientes mediciones:

- 1) Peso del sólido: M1
- 2) Peso del picnómetro lleno de agua destilada: M2
- 3) Peso del picnómetro con agua destilada y el sólido: M3

Para determinar los pesos con el picnómetro se llena de agua destilada hasta la señal de enrase, si ésta es sobrepasada se introduce un palillo hecho con papel de filtro para absorber el líquido sobrante. Hay que procurar secar el picnómetro por fuera, con un paño o papel de filtro.

$$Densidad (\delta) = \frac{M}{V} \quad (15); \quad V = \frac{M1 + M2 - M3}{\delta} \quad (13)$$

Siendo δ la densidad del agua = 1 g/cm³

$$\delta = \frac{M1}{M1+M2-M3} \quad (14)$$

Resultados:

- **Andesita**

$$\delta = \frac{10 \text{ g}}{3.8 \text{ cm}^3} \rightarrow \delta = 2.63 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- **Granodiorita**

$$\delta = \frac{10 \text{ g}}{4 \text{ cm}^3} \rightarrow \delta = 2.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- **Caliza**

$$\delta = \frac{10 \text{ g}}{4.3 \text{ cm}^3} \rightarrow \delta = 2.32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

2.2.2 Cálculo del factor de esponjamiento

Para calcular el esponjamiento se llenó una probeta de plástico de 1000 cm³ con cada una de las muestras, luego se añadió agua hasta saturar la muestra en su totalidad, el factor de esponjamiento será igual al volumen de vacío sobre el volumen total de la probeta multiplicado por 100, como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Cálculo del factor de esponjamiento.

Fuente: Elaboración propia.

- **Andesita**

$$Fe = \frac{500 \text{ cm}^3}{1000 \text{ cm}^3} * 100 \rightarrow Fe = 50\%$$

- **Granodiorita**

$$Fe = \frac{530 \text{ cm}^3}{1000 \text{ cm}^3} * 100 \rightarrow Fe = 53\%$$

- Caliza

$$Fe = \frac{484 \text{ cm}^3}{1000 \text{ cm}^3} * 100 \rightarrow Fe = 48.4\%$$

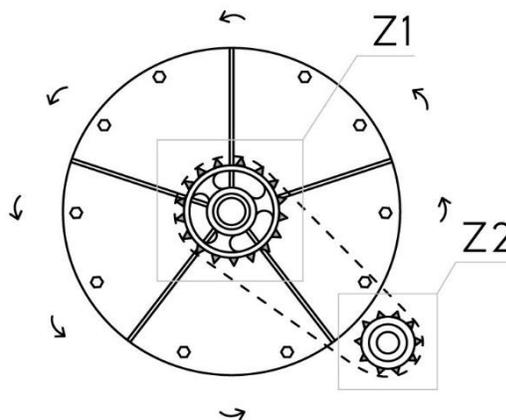
2.3 Rediseño del molino SAG

Para el diseño del molino SAG se realizó la modificación del engranaje o piñón inferior mediante la relación de transmisión (RT), que es la relación existente entre las velocidades de rotación de los dos engranajes que entran en contacto. (Compañía levantina de reductores S.L, 2019).

2.3.1 Cálculo de la relación de transmisión entre engranajes y cadena

Para calcular la relación de transmisión de este tipo que están formadas por dos ruedas dentadas y una cadena de eslabones articulados, se divide la velocidad de salida por la velocidad de entrada o dividiendo el número de dientes del engranaje motor entre el número de dientes del engranaje arrastrado, obteniendo como resultado la velocidad de rotación óptima del molino que está en el rango del 70% al 85% de la velocidad crítica.

$$RT = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (15)$$



Relación= 0,588	42 rpm
Z1 = Piñón Superior: (17 dientes)	
Z2 = Piñón Inferior: (10 dientes)	

Figura 2.4 Relación de transmisión entre engranajes y cadena (sin modificar).

Elaborado por: Elaboración propia.

$$RT = \frac{10}{17} \rightarrow RT = 0.588$$

Para el cálculo de la relación de transmisión como se muestra en la Figura 2.5, se aumentó dos dientes en el piñón inferior para de esta manera aumentar la velocidad de rotación requerida de 50 rpm para realizar las diferentes pruebas de laboratorio.

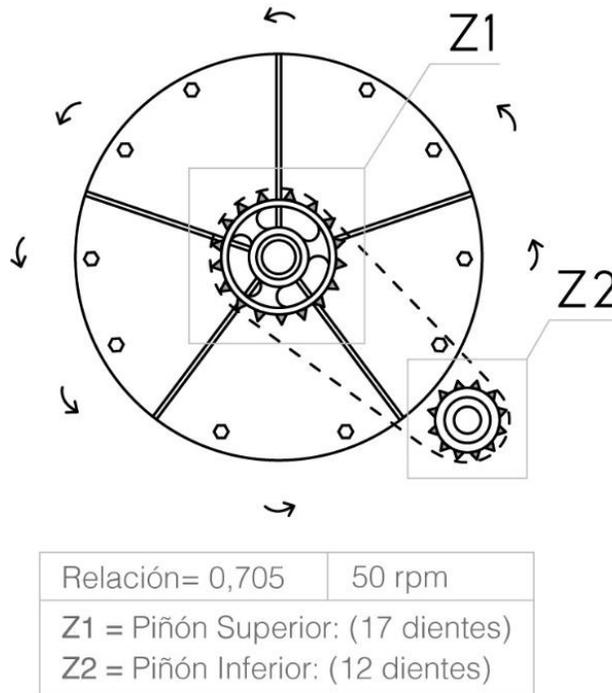


Figura 2.5 Relación de transmisión entre engranajes y cadena (modificada).

Elaborado por: Elaboración propia.

$$RT = \frac{12}{17} \rightarrow RT = 0,705$$

2.4 Variador de frecuencia

Para (Arana, 2017) “Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (AC) por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor”. (p. 17).

El variador de frecuencia también tiene la capacidad de controlar la aceleración y la desaceleración del motor durante el arranque o la parada, respectivamente.

La frecuencia o hertz está directamente relacionada con la velocidad del motor (RPM) en otras palabras, cuanto más rápida sea la frecuencia más rápido serán las RPM.

2.4.1 Funcionamiento de un variador de frecuencia

Los variadores de frecuencia monofásicos y trifásicos realizan tres fases principales en su interior con el objetivo de transformar la señal eléctrica:

Fase 1: Transformación de la señal de corriente alterna (CA) en corriente continua (DC)

El equipo se alimenta con un voltaje de corriente alterna (CA) que puede ser monofásico (fase y neutro) o trifásico (tres fases) en función del tipo de alimentación disponible. En esta primera fase, el convertidor de velocidad convierte esta CA en corriente continua (DC) gracias a un grupo de diodos. Este proceso es conocido como rectificado de una señal. Es mucho más sencillo trabajar con una tensión continua que con una alterna, por eso los variadores de frecuencia, ya sean monofásicos o trifásicos, realizan este paso. (Morison, 2020, p. 2).

Fase 2: Filtrado de la corriente continua (DC)

Una vez transformada la corriente alterna en corriente continua, un banco o conjunto de condensadores internos filtran (suavizan) la señal continua, reduciendo así las variaciones en la señal rectificada. De esta forma se obtiene una onda mucho más limpia para su posterior tratamiento. (Morison, 2020, p. 2).

Fase 3: Inversión de la tensión continua a corriente alterna

La última etapa de conversión dentro de un variador de velocidad transforma la tensión continua filtrada en una señal trifásica cuadrada a través de un grupo de transistores³ (IGBT). Esta tensión cuadrada simula una señal trifásica usual que permite excitar las bobinas de los motores de inducción. Esta generación electrónica de la señal trifásica hace

³Transistor. - Es un dispositivo electrónico semiconductor utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada.

posible controlar motores trifásicos con una señal monofásica de entrada (variadores monofásicos).

Modificando el tiempo en el que los IGBT están «encendidos» y transformando la señal, se modifica la frecuencia de salida y, por consiguiente, la velocidad del motor.

A mayor tiempo que se encuentre encendido habrá una mayor frecuencia y a menor tiempo encendido, menor será la frecuencia y la velocidad del motor. (Morison, 2020, p. 3).

Estas etapas se pueden observar en la Figura 2.6, siendo el esquema básico del funcionamiento del variador de frecuencia.

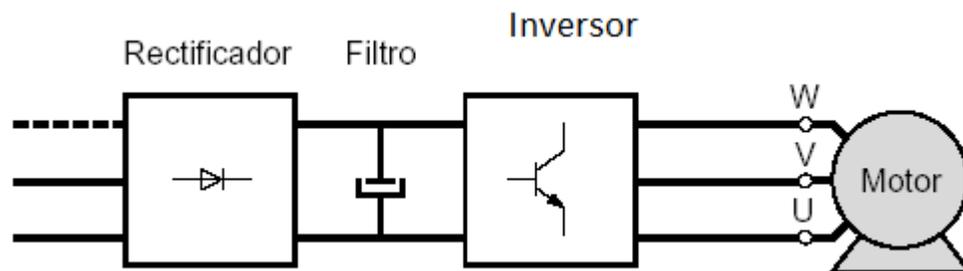


Figura 2.6 Esquema básico del variador de frecuencia.

Fuente: (López, 2016).

2.4.2 Implementación del variador de frecuencia al molino SAG

El molino SAG de laboratorio dispone de un motor eléctrico trifásico abierto de 2.5 HP (1.86 KW) por lo que la variación del par motor debe ser cuidadosa, para no exceder la capacidad de este ni sobrecargar el propio variador, teniendo en cuenta estos parámetros se implementó un variador de frecuencia POWTRAN, modelo P150 2R2G3, el mismo que es compatible con las características del motor.

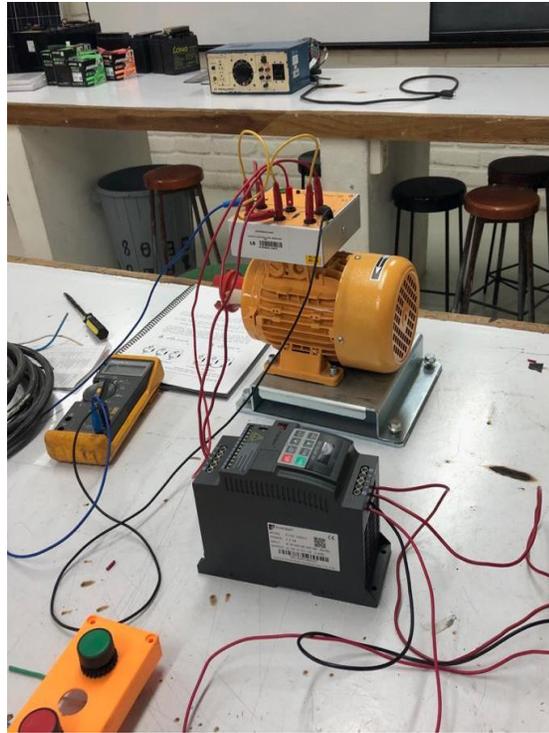


Figura 2.7 Pruebas del variador de frecuencia.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.8 Instalación del variador de frecuencia al molino SAG.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Preparación de la muestra

Para la preparación de las muestras se realizaron procesos de trituración y tamización.

3.1.1 Trituración

Las muestras obtenidas de andesita, caliza y granodiorita inicialmente presentaban tamaños grandes de entre 10 a 30 cm de diámetro aproximadamente, por lo que fue necesario un proceso de trituración, el mismo que se llevó a cabo mediante la trituradora de mandíbulas del laboratorio de minas de la Universidad del Azuay, como se puede apreciar en la Figura 3.1, esto con la finalidad de obtener un tamaño homogéneo de partículas previo al proceso de tamizado.



Figura 3.1 Trituradora de mandíbulas.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Tamización

Una vez terminado el proceso de trituración, el producto obtenido fue tamizado entre la malla de ½ pulgada y la malla # 4 de la escala de tamices estándar Tyler con la finalidad de obtener un material de tamaño homogéneo, para este procedimiento se utilizó la tamizadora del laboratorio de minas de la Universidad del Azuay, ver Figura 3.2.



Figura 3.2 Tamizadora de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Cálculo de los factores operacionales

3.2.1 Cálculo de la velocidad crítica

Según (Austin & Concha, 1994, p. 10), la velocidad crítica se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}}$$

Donde:

V_c: Velocidad crítica (rpm)

D: Diámetro interior del molino (metros)

d: Diámetro máximo de las bolas (metros)

Reemplazando los datos tenemos:

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{0.6 - 0.0508}}$$

$$V_c = 57 \text{ rpm}$$

3.2.2 Cálculo de la velocidad de rotación

La velocidad de rotación óptima del molino está entre el rango del 70% al 85% de la velocidad crítica, afirma (Blanco, 2014), y se la calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$V_r = V_c * F_o \quad (16)$$

Donde:

V_r : Velocidad de rotación (rpm).

V_c : Velocidad crítica (rpm).

F_o : Factor de operación (%).

Nuestro trabajo experimental se realizó conforme a los siguientes intervalos:

Tabla 3.21 Relación de la velocidad de rotación con respecto a la velocidad crítica

Factor de operación	Velocidad de rotación (RPM)
70%	40
75%	43
80%	46
85%	49

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Volumen del molino SAG de laboratorio

Para calcular el volumen del molino se aplica la siguiente fórmula tomando en cuenta las dimensiones respectivas del mismo:

$$V = r^{2*} * \pi * L \quad (17)$$

Donde:

V= Volumen del molino (cm^3)

L= Longitud del molino (cm)

r = Radio interior del molino (cm)

Reemplazando los datos tenemos:

$$V = \pi * 30cm^2 * 22 cm$$

$$V = 62\,203.53 cm^3$$

3.2.4 Cálculo del volumen y masa total de bolas

Para realizar el cálculo del volumen de bolas se tomó como referencia el 12% del volumen total basado en datos empíricos de diferentes autores. Sin embargo, este volumen presenta porosidad característica de las bolas metálicas que se considera de 0.48. (García & Muñoz, 2020, p. 38).

$$V_b = 0.12 * V_T * (1 - 0.48) \quad (18)$$

Cálculo:

$$V_b = 0.12 * 62\,203.68 cm^3 * 0.52$$

$$V_b = 3\,881.50 cm^3$$

Una vez calculado el volumen de bolas se determina la masa de las bolas tomando en cuenta la densidad del acero que es de $7.85 g/cm^3$:

$$m = \rho * V_b \quad (19)$$

Cálculo:

$$m = 7.85 * 3\ 881.50$$

$$m = 30\ 469\ g$$

3.2.5 Tamaño máximo de los elementos moledores

El tamaño máximo de las bolas está relacionado directamente con las dimensiones del molino y es un parámetro muy importante ya que su tamaño tiene que ser suficiente para que se produzca una molienda adecuada.

Para determinar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula

$$M = \sqrt{\frac{F(\mu).W_i}{K.C_s(\%)}} \cdot \sqrt{\frac{S(\text{ton}/\text{m}^3)}{\sqrt{D(\text{ft})}}} \quad (20)$$

M: diámetro máximo de elementos moledores.

F: tamaño de alimentación del 80% de la carga.

Wi: Work Index - constante adimensional en función de la naturaleza del material molido. Se obtiene por tablas.

K: constante adimensional que vale: bolas→200 , barras→300

Cs: porcentaje de la velocidad crítica.

S: peso específico del material a moler.

D: diámetro interno del molino. (Nicolini, 2015, p.6)

Reemplazando los datos tenemos:

$$M = \sqrt{\frac{7000.11}{200.85}} \cdot \sqrt{\frac{2.7}{\sqrt{1.9685}}}$$

$$M = 2.5''$$

3.2.6 Distribución de Bolas

Para distribuir correctamente la carga molidora se usa el criterio de Taggar, que se usa cuando existen 4 tamaños de bolas para elegir, las cuales se distribuyen en rangos de 40 %, 30%, 20% y 10%. (Jaico, 2009).

Se utilizó un tamaño máximo de bolas de 2” y no de 2.5” debido a su disponibilidad en el laboratorio de la Universidad del Azuay.

Tabla 3.2 Distribución de bolas.

Tamaño de bolas (Pulgadas)	Distribución de bolas (%)	Peso (kg)	Cantidad
2	40	12	23
1 ¾	30	6	25
1 ½	20	6	26
1	10	3	45
Total		30.46	119

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Dosificación de las muestras

Una vez que se dispone de las muestras con un tamaño homogéneo resultado de los procedimientos de trituración y tamización previamente descritos, se procede a la dosificación de estas, teniendo en cuenta los factores operacionales ya calculados, así como también el factor de esponjamiento y la densidad de cada mineral.

Tabla 3.3 Dosificación de las muestras.

Mineral	Alimento (kg)	Factor de esponjamiento (%)	Factor de llenado (%)	Tiempo de molienda (minutos)
Andesita	25	50	43	15
Granodiorita	25	53	42	15
Caliza	25	48,4	48	15

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Ensayos variando la velocidad de rotación y tiempo de molienda

Se realizaron 48 ensayos en el molino SAG del laboratorio, la velocidad de rotación fue regulada mediante el variador de frecuencia; para cada muestra, la molienda inició con una velocidad de rotación equivalente al 70% de la velocidad crítica, con un tiempo de molienda inicial de 2.5 minutos, al finalizar este procedimiento se recolectó una muestra, la misma que fue tamizada con la finalidad de graficar su curva granulométrica y devuelta al molino para continuar el proceso de molienda hasta completar 5 minutos, luego el proceso mencionado anteriormente se repitió para obtener resultados a los 10 minutos y 15 minutos respectivamente.

Luego de finalizar los ensayos con la velocidad de rotación del 70% de la velocidad crítica para las muestras de cada mineral, se realizaron los experimentos respectivos aumentando la velocidad al 75%, 80 y 85% con respecto a la velocidad crítica.

Tabla 3.4 Ensayos de la variación la velocidad de rotación y tiempo de molienda (Andesita).

% de la velocidad crítica	Tamaño del alimento (mm)	Carga del alimento (kg)	Carga de bolas (kg)	Tiempos de molienda (minutos)	Número de ensayos
70	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
75	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
80	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
85	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.45 Ensayos de la variación la velocidad de rotación y tiempo de molienda (Granodiorita).

% de la velocidad crítica	Tamaño del alimento (mm)	Carga del alimento (kg)	Carga de bolas (kg)	Tiempos de molienda (minutos)	Número de ensayos
70	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
75	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
80	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
85	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.46 Ensayos de la variación la velocidad de rotación y tiempo de molienda (Caliza).

% de la velocidad crítica	Tamaño del alimento (mm)	Carga del alimento (kg)	Carga de bolas (kg)	Tiempos de molienda (minutos)	Número de ensayos
70	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
75	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
80	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4
85	4,7	25	30,46	2,5; 5; 10; 15	4

Elaborado por: Elaboración propia.

3.5 Clasificación

Al finalizar cada ensayo en el molino SAG se recolectó una muestra de 1kg, la misma que fue llevada a la tamizadora eléctrica de la Universidad del Azuay, el tiempo de tamizado fue de 2 minutos empelando los tamices 3/8, #8, #10, #30, #50, #80, #100 y #200 de la serie estándar Tyler.



Figura 3.3 Recolección de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.4. Recolección de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminado el proceso de tamizado, el material retenido en cada tamiz incluido el fondo, es pesado en una balanza de alta sensibilidad para realizar el análisis granulométrico.



Figura 3.5 Proceso de clasificación en la tamizadora eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados

El objetivo del presente trabajo de investigación fue realizar un análisis de la eficiencia de la conminución mineral en molienda SAG, implementando un variador de frecuencia al molino y así poder estudiar a profundidad el factor de la velocidad de rotación.

La velocidad fue manipulada mediante el variador de frecuencia, con velocidades de rotación equivalentes al 70%, 75%, 80% y 85% de la velocidad crítica del molino y en intervalos de tiempo de 2.5, 5, 10 y 15 minutos como se describió previamente en el capítulo 3, siendo estos los factores operacionales que no fueron constantes durante los ensayos.

Las variables operacionales que fueron constantes fueron las siguientes:

- Tipo de molienda: Seca
- Carga de bolas: 30.496 kg
- Potencia de motor: 2.5 HP
- Distribución de medios moledores: Constante (distribución de Taggar).
- Alimento: 25 kg
- Tamaño del alimento: Entre la malla de ½ pulgada y la malla # 4 de la escala de tamices estándar Tyler.

Luego de concluir con todos los ensayos en el molino, recoger las muestras, tamizarlas y pesarlas se graficaron sus respectivas curvas granulométricas utilizando el modelo de distribución granulométrico de Gates-Gaudin-Schuhmann.

Al contar con un número limitado de tamices, este modelo permite reducir el margen de error en la distribución del tamaño de las partículas, lo que nos permitió realizar una interpretación más acertada de los resultados.

Adicional al estudio de la distribución de las partículas, acorde a lo descrito en el Capítulo 1 se calculó la velocidad específica de fractura que estudia el comportamiento cinético de las partículas durante el proceso de molienda.

Tabla 4.1 Velocidades específicas de fractura.

	Andesita	Caliza	Granodiorita
	min⁻¹		
40 RPM	0.06923	0.05773	0.11316
43 RPM	0.0874	0.00115	0.16192
46 RPM	0.1127	0.06417	0.15479
49 RPM	0.00207	0.11638	0.0161

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Análisis

Una vez obtenidos los resultados basados en el modelo de Gates-Gaudin-Shuchmann se grafican las curvas comparativas para cada uno de los ensayos a diferentes tiempos y velocidades de rotación.

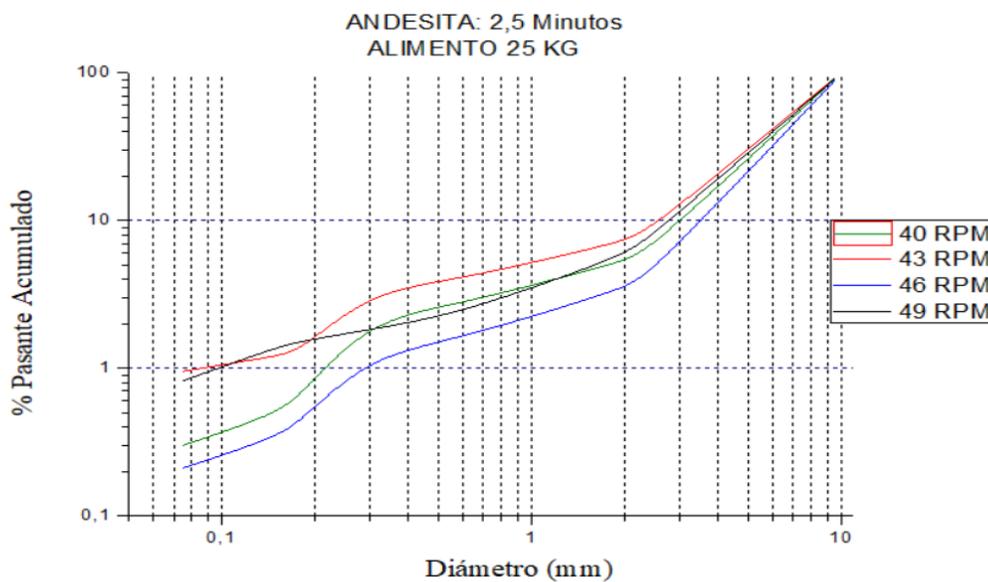


Figura 4.1 Análisis granulométrico de la andesita a los 2,5 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

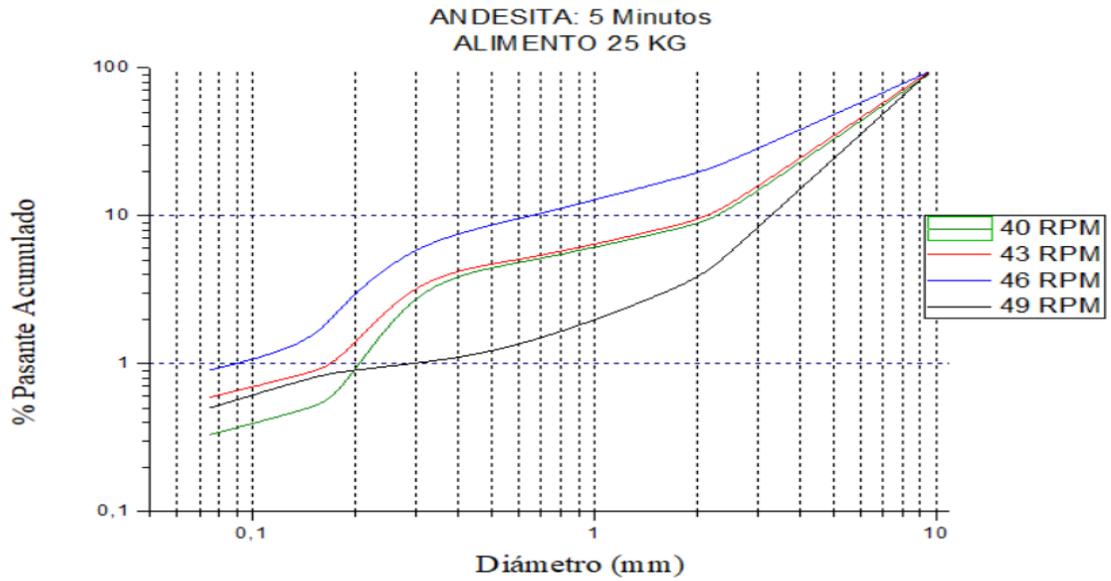


Figura 4.2 Análisis granulométrico de la andesita a los 5 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

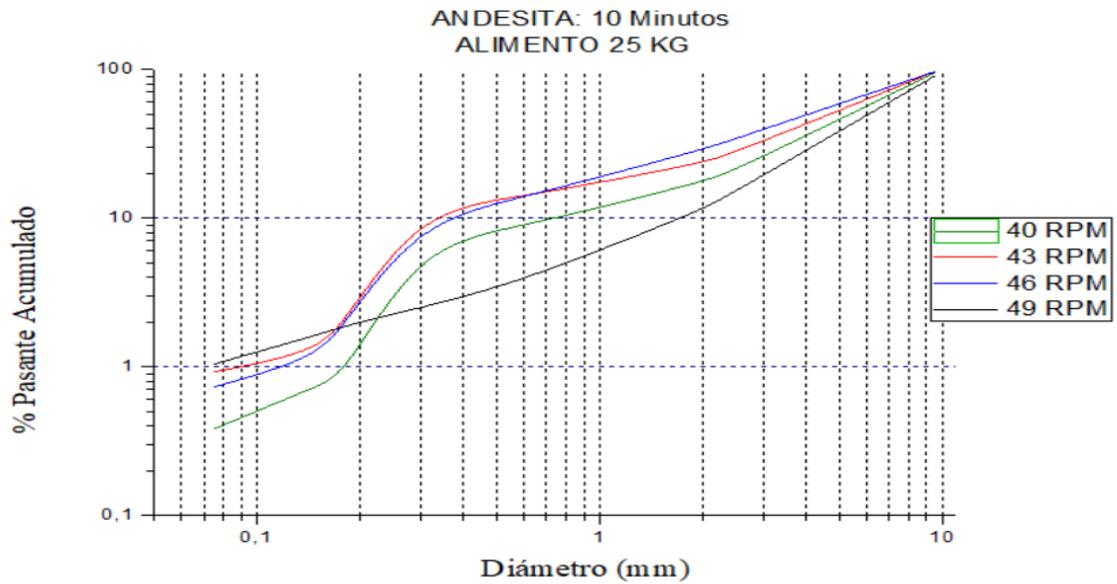


Figura 4.3 Análisis granulométrico de la andesita a los 10 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

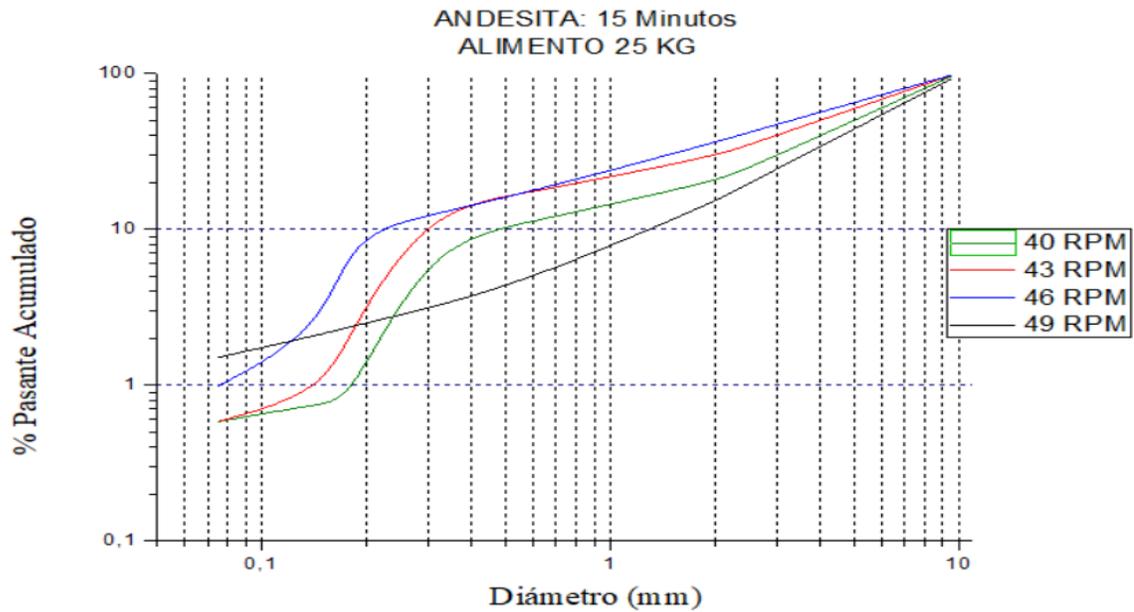


Figura 4.4 Análisis granulométrico de la andesita a los 15 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que para la andesita la conminución del mineral es mayor a 46 RPM, es decir una velocidad de rotación equivalente al 80% de la velocidad crítica. Este comportamiento que empieza a diferenciarse desde los 5 minutos de molienda y se extiende hasta los 15 minutos, lo que sugiere que a esta velocidad las partículas se fracturan por impacto, abrasión y astillamiento debido al efecto de cascada presente en el proceso.

También se puede observar una conminución mínima a la velocidad de 49 RPM debido a que no se produce el efecto de cascada y el mecanismo de fractura predominante es la abrasión.

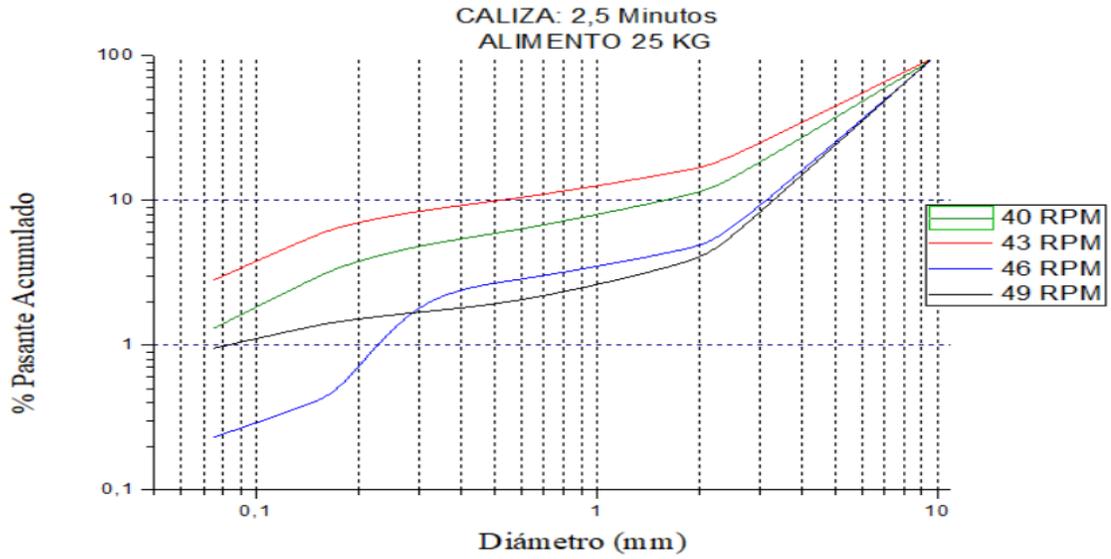


Figura 4.5 Análisis granulométrico de la caliza a los 2,5 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

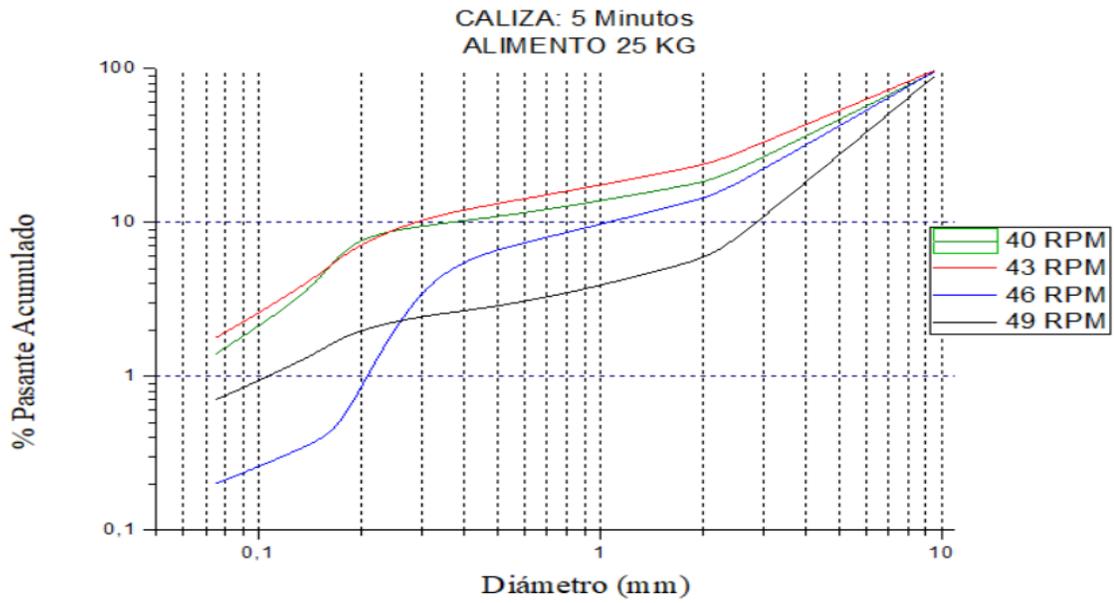


Figura 4.6 Análisis granulométrico de la caliza a los 5 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

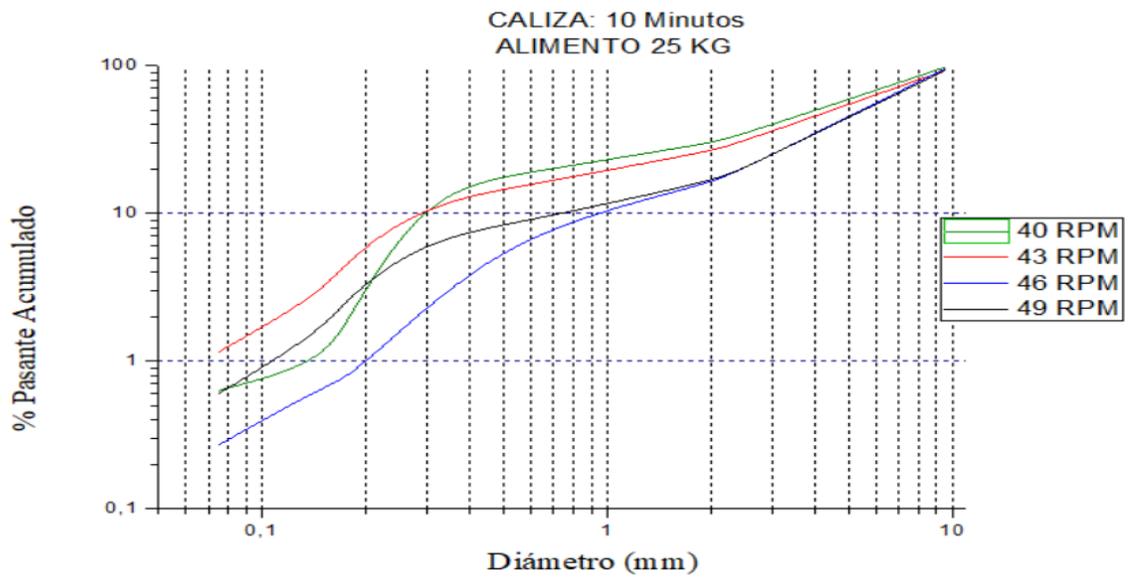


Figura 4.7 Análisis granulométrico de la caliza a los 10 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

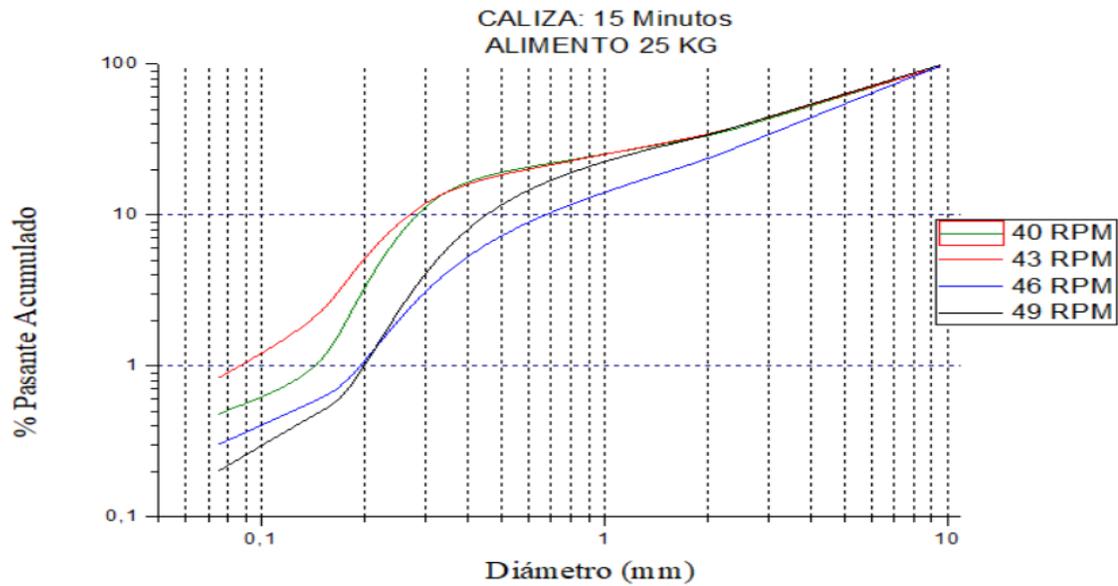


Figura 4.8 Análisis granulométrico de la caliza a los 15 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

Al observar el comportamiento de las curvas granulométricas de la caliza se puede denotar una mayor conminución de mineral a velocidades de 40 RPM y 43 RPM, equivalentes al 70% y 75% respectivamente de la velocidad crítica, esta tendencia se presenta desde los 2 minutos y 30 segundos de molienda.

En los ensayos realizados a 46 RPM y 49 RPM equivalentes al 80% y 85% de la velocidad crítica respectivamente, se observa que la conminución aumenta a partir del minuto 15 de molienda, esto quiere decir que luego de este tiempo se produce una distribución entre el mineral y los elementos moledores que permiten un efecto cascada.

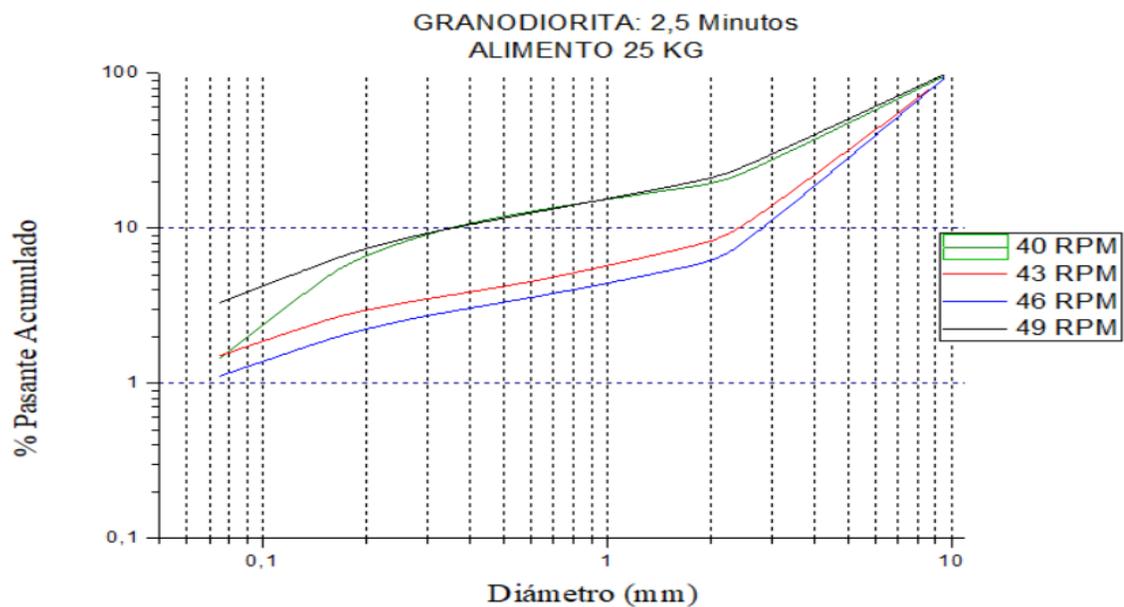


Figura 4.9 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 2,5 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

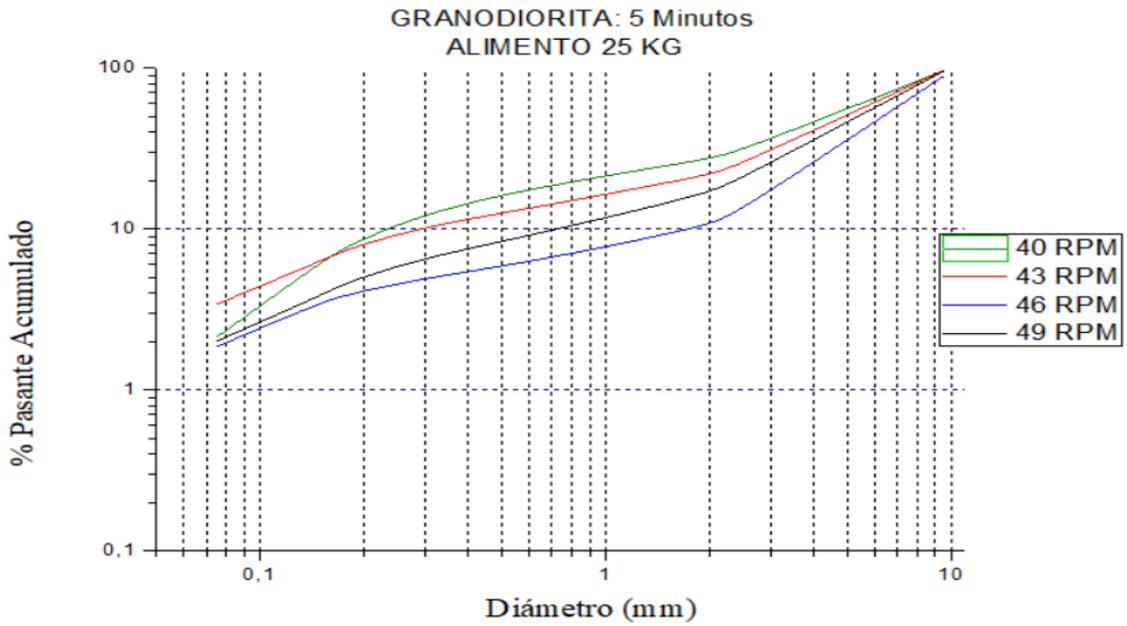


Figura 4.10 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 5 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

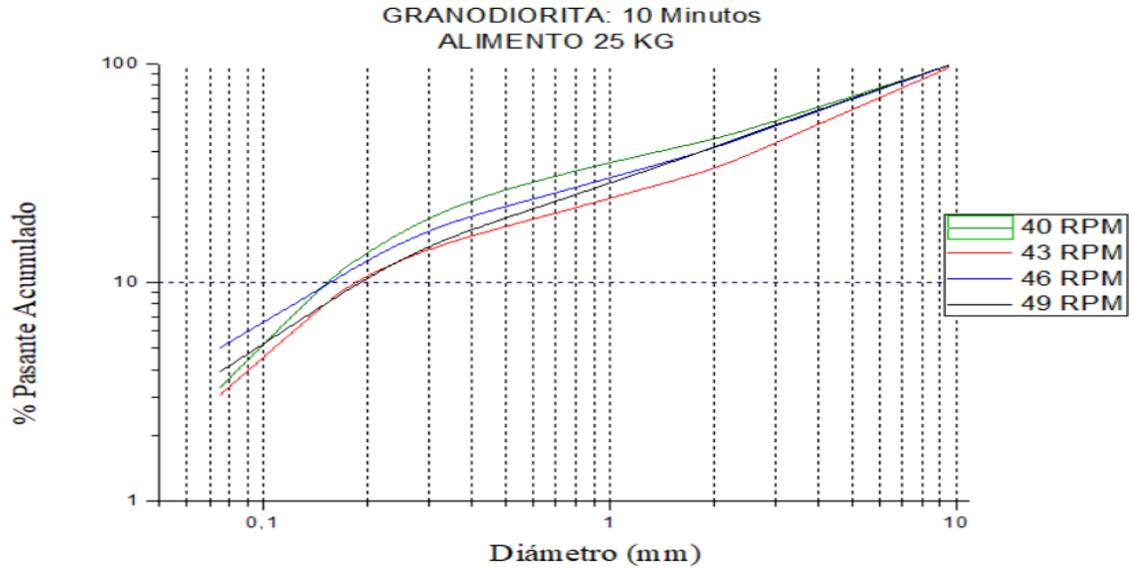


Figura 4.11 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 10 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

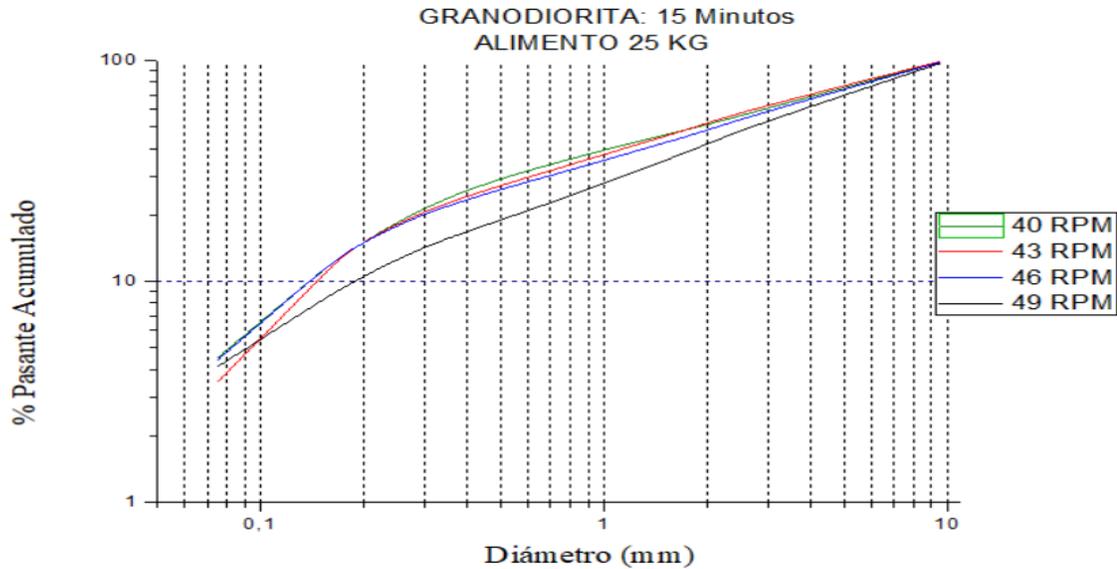


Figura 4.12 Análisis granulométrico de la granodiorita a los 15 minutos con diferentes velocidades de rotación.

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de las curvas granulométricas de la granodiorita en general presenta un alto grado de conminución a las velocidades de 40 RPM, 43 RPM, 46 RPM y un poco menor a los 49 RPM, esto quiere decir que los mecanismos de fractura presentes son: impacto, abrasión y astillamiento debido al efecto de cascada presente en cada uno de los procesos.

Una vez estudiado el comportamiento de las curvas granulométricas se obtuvieron los resultados de la velocidad específica de fractura para cada uno de los materiales y se realizaron graficas comparativas teniendo en cuenta un mono-tamaño de 9525 μm , como se muestra a continuación:

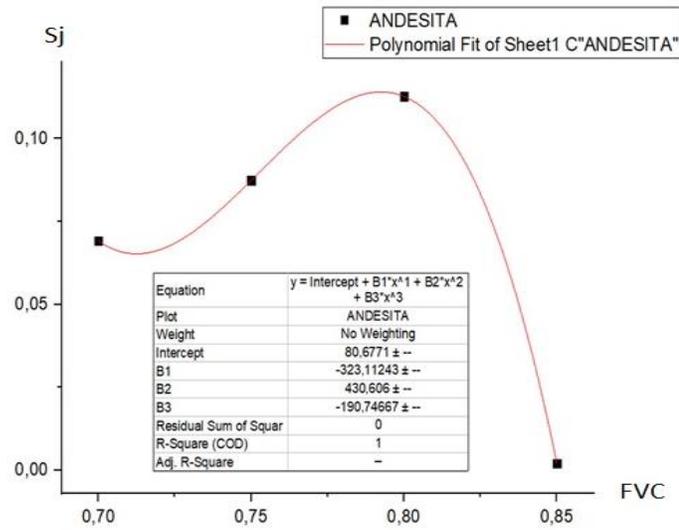


Figura 4.13 Ajuste polinomial de tercer orden de la Andesita.

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar el comportamiento de la velocidad específica de fractura, los datos obtenidos fueron ajustados mediante un modelo polinomial de tercer orden de la forma $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$, en el cual se pudo identificar que la velocidad de rotación óptima en relación con la fracción de velocidad crítica que es de 0.79 para el caso de la andesita.

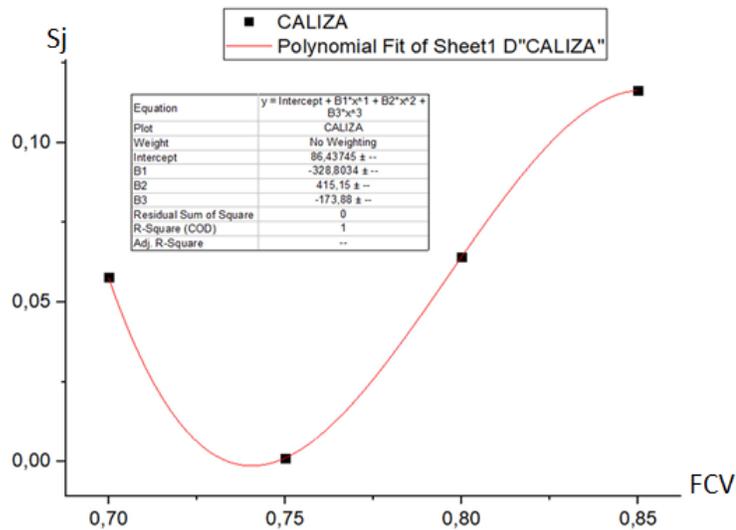


Figura 4.14. Ajuste polinomial de tercer orden de la Caliza.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior para analizar el comportamiento de la velocidad específica de fractura, los datos obtenidos fueron ajustados mediante un modelo polinomial de tercer orden, en el cual se pudo identificar que la velocidad de rotación óptima en relación con la fracción de velocidad crítica es de 0.85.

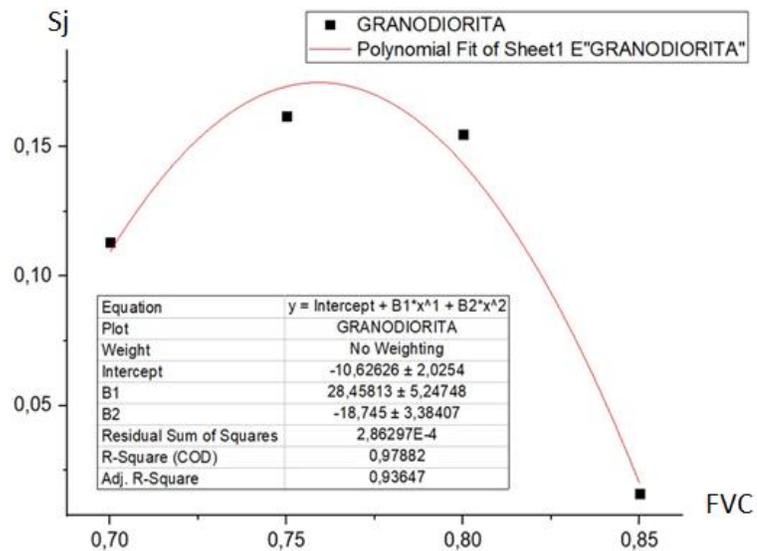


Figura 4.15 Ajuste polinomial de segundo orden de la Granodiorita.

Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de los casos anteriores para los ensayos de la granodiorita los datos obtenidos fueron ajustados mediante un modelo polinomial de segundo orden de la forma $f(x) = ax^2 + bx + c$, en el cual se pudo identificar que la velocidad de rotación óptima en relación con la fracción de velocidad crítica que es de 0.76.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El presente trabajo de titulación es un estudio experimental basado en la variación del parámetro operacional de velocidad de rotación en molienda SAG para diferentes minerales, con el objetivo de encontrar su valor óptimo con relación a la fracción de la velocidad crítica y en base a los ensayos realizados se puede concluir que:

- El estudio y análisis basado en la bibliografía permite entender e interpretar de manera correcta los fundamentos mecánicos y operacionales dentro de la molienda SAG, los mismos que pueden ser sometidos a discusión, orientando de esta manera a futuras investigaciones.
- La implementación del variador de frecuencia al molino SAG de laboratorio tiene como función controlar la velocidad de rotación del mismo, permitiendo de esta manera el estudio más detallado y conveniente de este parámetro. Durante la ejecución de los diferentes ensayos, la velocidad de rotación se modificó en diferentes intervalos de tiempo, mientras que los otros factores operacionales fueron constantes; la conminución mineral se realizó en seco y en circuito abierto.
- Mediante la comparación de las curvas granulométricas de los ensayos realizados, se puede estudiar el comportamiento de las partículas y su conminución durante la molienda, identificando los mecanismos de fractura presentes durante el proceso. Este estudio no proporciona los valores óptimos de la velocidad de rotación, pero se indica el porcentaje de partículas finas y gruesas resultantes de la molienda que son datos muy importantes dentro del estudio de tratamiento mineral.
- Considerando los datos obtenidos de la variación de las velocidades específicas de fractura en función de las fracciones de velocidades críticas utilizadas para los diferentes materiales, se aprecia una tendencia similar en el comportamiento de los datos.
- La bibliografía consultada establece que el comportamiento de la velocidad específica de fractura respecto la fracción de velocidad crítica tiene un

comportamiento de una curva parabólica, siendo cóncava hacia abajo en donde podríamos obtener un valor máximo de eficiencia.

- Mediante el análisis y comparación de las gráficas obtenidas de la velocidad específica de fractura y basándonos en un ajuste de función polinomial aplicado para los datos obtenidos en los diferentes ensayos, se puede concluir que la velocidad de rotación óptima de molienda varía para cada muestra, dependiendo de las características físicas y mecánicas de las mismas, siendo en el caso de la andesita una velocidad equivalente al 79% de su velocidad crítica, en el caso de la caliza un valor equivalente al 85% de su velocidad crítica y en el caso de la granodiorita una velocidad de rotación igual al 76% con respecto a la velocidad crítica.
- Finalmente, acorde con la hipótesis planteada y luego de profundizar el estudio de la velocidad de rotación como parámetro operacional en molienda SAG, mediante trabajo investigativo y experimental y además en concordancia con lo planteado según (Austin & Concha, 1994) se puede corroborar que la velocidad óptima de rotación varía entre el 70% y 85% con respecto a la velocidad crítica del molino. Los datos obtenidos se pueden tomar como base para convertirse en un fundamento importante para la toma de decisiones y optimización de procesos posteriores.

Recomendaciones

El presente trabajo se enfocó en el estudio de la velocidad de rotación, pero se debe tener en cuenta que en la molienda SAG existen muchos factores operacionales, por lo que para futuras investigaciones se presentan las siguientes recomendaciones:

- Continuar el presente trabajo aumentando el intervalo de la velocidad de rotación para cada ensayo, logrando de esta manera obtener una ecuación de ajuste más precisa, para marcar la tendencia del comportamiento de la velocidad en la molienda.
- Mejorar la trituradora disponible en el laboratorio con la finalidad de no estar limitados a trabajar solo con determinados tamaños de partículas, sino poder ampliar el rango de experimentos en cuanto a granulometría del alimento se refiere.
- Con la finalidad de optimizar los tiempos durante los experimentos, se recomienda implementar mecanismos más eficientes para la recolección de las muestras entre un ensayo y otro, como sugerencia a este requerimiento sería la adquisición de una criba móvil para el laboratorio.
- A partir de los datos obtenidos en el presente trabajo se busque la optimización general del proceso de molienda, estudiando los demás factores operacionales como la carga y distribución de medios moledores, tiempo de residencia, molienda húmeda o seca, ángulos de carga, entre otros, ya que un trabajo eficiente abarata costos y consumos energéticos que son factores importantes al momento de estudiar la rentabilidad y factibilidad de un proyecto dentro del campo de la minería.
- En lo que se refiere al molino SAG se recomienda implementar un mecanismo temporizador para los ensayos y la adaptación de los lifters a las paredes internas del molino con la finalidad de facilitar y optimizar los mecanismos de fractura propios del proceso; también se debe sugerir un mantenimiento continuo al equipo y aumentar la disponibilidad de medios moledores.
- Los experimentos realizados son a escala de laboratorio por lo que es muy importante adquirir criterios de interpretación basados en la bibliografía

consultada, se recomienda el uso de softwares estadísticos debido a que los mismos son una herramienta indispensable al momento de analizar e interpretar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, E. (2017). Optimización de Molinos Semi Autógenos. Arequipa, Perú.
Recuperado el 28 de Junio de 2020
- Álvarez, B. (2010). *Análisis de Influencia de los modelos de Distribución de Tamaño de Partículas en la distribución de consumos energéticos en molienda mediante el método de Bond*. Oviedo : Universidad de Oviedo .
- Arana, L. (3 de Agosto de 2017). “VARIADORES DE FRECUENCIA PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES ASINCRÓNICOS JAULA DE ARDILLA”. Quito, Pichincha, Ecuador. Obtenido de <http://www.dsace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12956/1/T-UCE-0010-002-2017.pdf>
- Arriagada, M. (6 de Agosto de 2013). Molienda en procesos de área seca.
- Arriagada, M. A. (6 de Agosto de 2013). *Molienda en procesos de área seca*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633>
- Austin, & Concha. (1994). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. Concepción, Chile: CYTED.
- Austin, & Concha. (1994). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. Concepción: CYTED.
- Austin, L., & Concha, F. (1994). *Diseño y simulacion de circuitos de molienda y clasificación* . Concepción : CYTED.
- Blanco, E. (2014). Tecnología Mineralúrgica. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/8._molienda.pdf
- Blanco, E. (2014). *Universidad de Cantabria*. Obtenido de <http://www.ocw.unicam.ec>
- Coello, A., & Tijonov, O. (2001). Molienda de Minerales Multicomponentes. Cuba: ISSN. Recuperado el 26 de Junio de 2020, de revista.ismm.edu.cu
- Colorado, L., Llano, S., & Osorio, A. (2020). Clasificación de la velocidad específica de fractura (Sj) mediante análisis discriminante para la molienda de cuarzo. *Revista UIS ingenierias*.
- Compañía levantina de reductores S.L. (2019). *Pasos para calcular la relación de transmisión de engranajes*. Obtenido de CLR: www.clr.es
- Gutierrez, L., & Sepúlveda, J. (1989). Dimensionamiento y Optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática. Verman, Santiago de Chile.
- Holmes, J. (1957). *A contribution to the study of comminution — A modified form of Kick's law*. Londres.

- Hualan, J., Nuñez, P., & Rojas, D. (Junio de 2013). Análisis de la etapa de molienda de minerales. Lima. Obtenido de <https://es.slideshare.net/hualanyupanqui1/monografia-43045588>
- J.L, S. (2007). *Granulometría Teórica*. Merida.
- Jaico, J. (2009). *Problemas de procesamiento de minerales*. Trujillo, Perú.
- Laércio, M. (2000). *Linearização do modelo log-normal para distribuição de tamanho de partículas*. *Acta Scientiarum* 22(5):1235-1239.
- López, R. (20 de Julio de 2016). Conversion Monofasica a Trifasica. Guatemala. Obtenido de <https://monofasico-a-trifasico.blogspot.com/2016/07/conversion-monofasica-trifasica-con.html>
- Magne, L. (1997). Visión Conceptual Estado de la Tecnología en Molienda Semiautógena. *Workshop*, 1-3.
- Magne, L., Améstica, R., Barría, J., & Menacho, J. (1995). Modelización dinámica de molienda semiautógena basado en un modelo fenomenológico simplificado. *Revista de metalúrgia de CSIC*, 9.
- Magne, L., Titichoca, G., & Baeza, D. (2003). Análisis de parrillas de descarga de molinos semiautógenos. Chile. Recuperado el 5 de 1 de 2021
- Magne, L., Valderrama, W., & Titichoca, G. (2003). La operación actual de molinos semiautógenos. Viña del mar, Chile. Recuperado el 2 de Enero de 2021
- Marín López, W. G. (2017). Evaluación de parámetros materiales de fractura en roca intacta. Medellin.
- Ministerio de Energia y Minas. (2010). Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas. Bogotá, Colombia. Recuperado el 27 de Junio de 2020, de <http://recordcenter.sgc.gov.co/>
- Morison, L. (8 de Octubre de 2020). Variador de velocidad por frecuencia. Obtenido de http://www.tecnicalata.com/AutoIndex/TrabajosEnCasa/01-COVID-19/07_Septimo_TME/Trabajo_06/Trabajo_06_Taller_SCYMII_TME701.pdf
- Basabe,P., Eduardo, A., & Byron, H. (1998). *Proyecto PRECA*.
- Rosales, G., Andrade, J., Alvarado, G., Espinosa, E., & Nava, D. (10 de Marzo de 2020). Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 21(2), 2-3. Obtenido de <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2020.21n2.020>
- Sanchez, J. (2019). *Slide Player*. Obtenido de Molino SAG: <https://slideplayer.es/slide/16337178/>

Silva, M. (2013). VARIABLES OPERACIONALES Y SU INFLUENCIA EN LA OPERACIÓN, PRO OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA MOLIENDA SAG. Santiago de Chile.

Toirac Corral, J. (2012). Caracterización granulométrica de las plantas productoras de arena en la República Dominicana . *Red de revistas científicas de Acceso Abierto no comercial propiedad de la academia.*

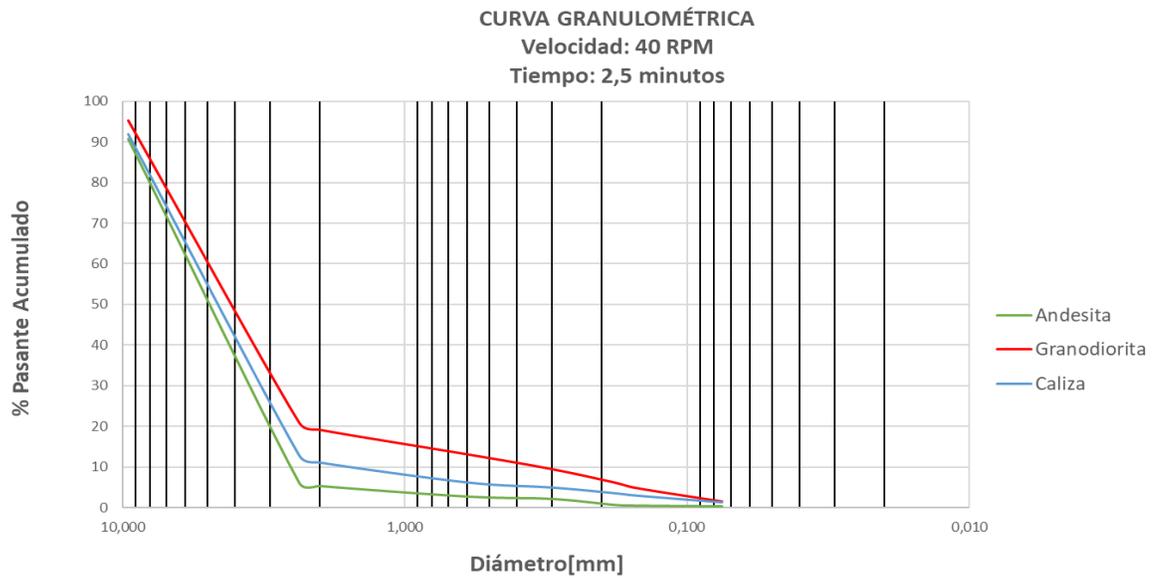
Wasmuth, H. (Junio de 1969). La determinación de la aptitud a la molienda y del consumo específico de energía según el ensayo de Bond para la molienda de minerales y rocas. *Materiales de Construcción*, 20(140). Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es>

ANEXOS

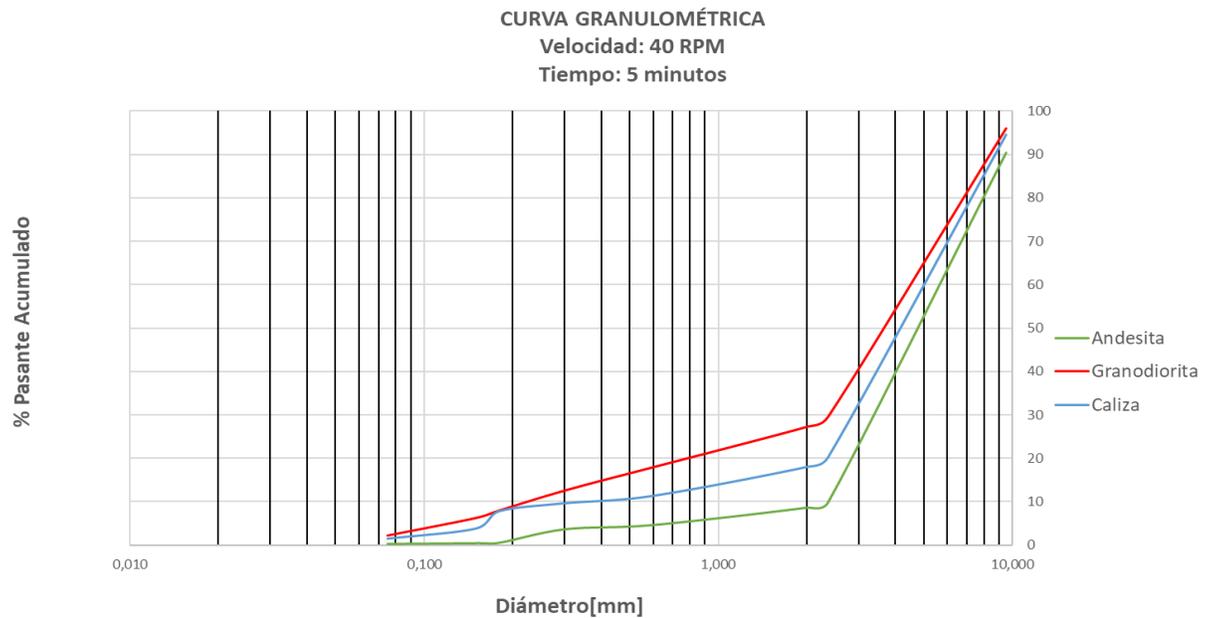
Anexo 1. Velocidades específicas de fractura.

Material	Velocidad (rpm)	Tamaño de partícula (μ)	Pendiente	Sij (min ⁻¹)
Andesita	40	9525	0,0301	0,06923
		2380	0,0053	0,01219
		2000	0,0453	0,10419
	43	9525	0,038	0,0874
		2380	0,0101	0,02323
		2000	0,0436	0,10028
	46	9525	0,049	0,1127
		2380	0,0125	0,02875
		2000	0,0592	0,13616
	49	9525	0,0009	0,00207
		2380	0,0054	0,01242
		2000	0,0328	0,07544
Caliza	40	9525	0,0251	0,05773
		2380	0,0107	0,02461
		2000	0,0274	0,06302
	43	9525	0,0005	0,00115
		2380	0,0097	0,02231
		2000	0,0169	0,03887
	46	9525	0,0279	0,06417
		2380	0,0068	0,01564
		2000	0,052	0,1196
	49	9525	0,0506	0,11638
		2380	0,013	0,0299
		2000	0,049	0,1127
Granodiorita	40	9525	0,0492	0,11316
		2380	0,018	0,0414
		2000	0,0271	0,06233
	43	9525	0,0704	0,16192
		2380	0,0224	0,05152
		2000	0,0539	0,12397
	46	9525	0,0673	0,15479
		2380	0,022	0,0506
		2000	0,0594	0,13662
	49	9525	0,007	0,0161
		2380	0,0158	0,03634
		2000	0,0314	0,07222

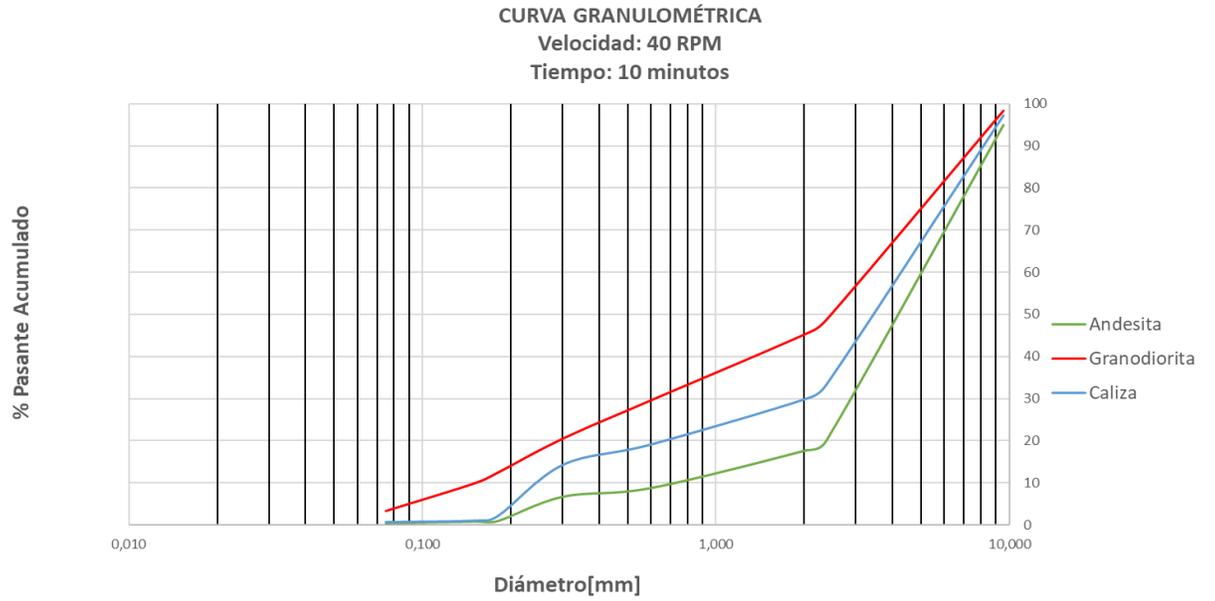
Anexo 2. Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 40 RPM.



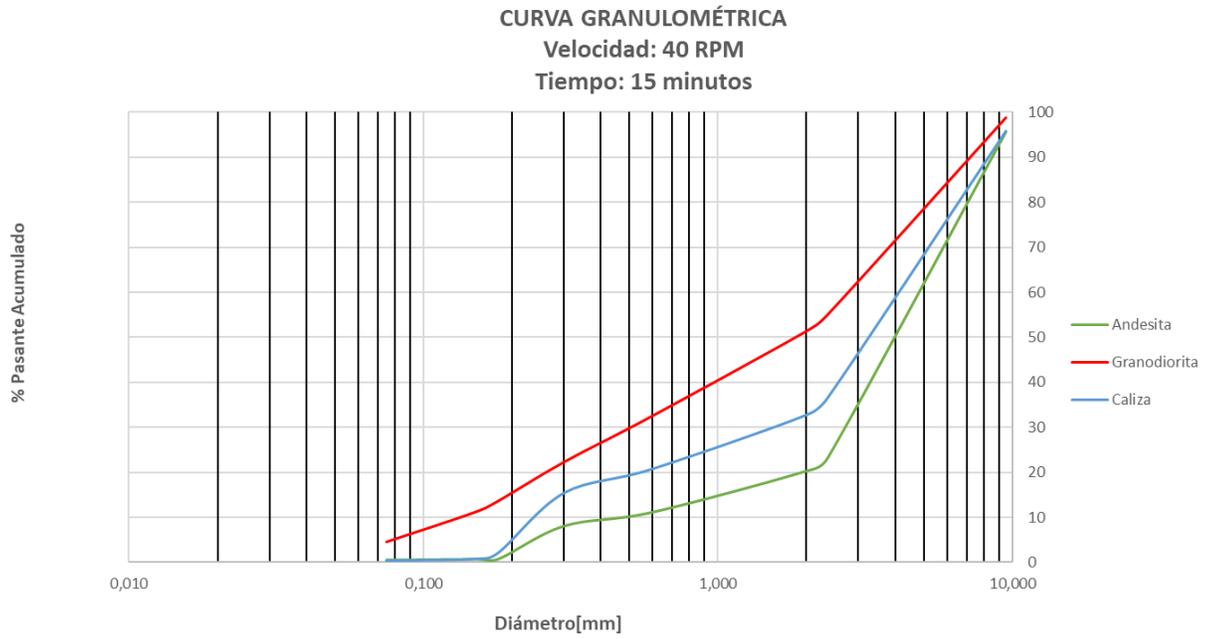
Anexo 3. Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 40 RPM.



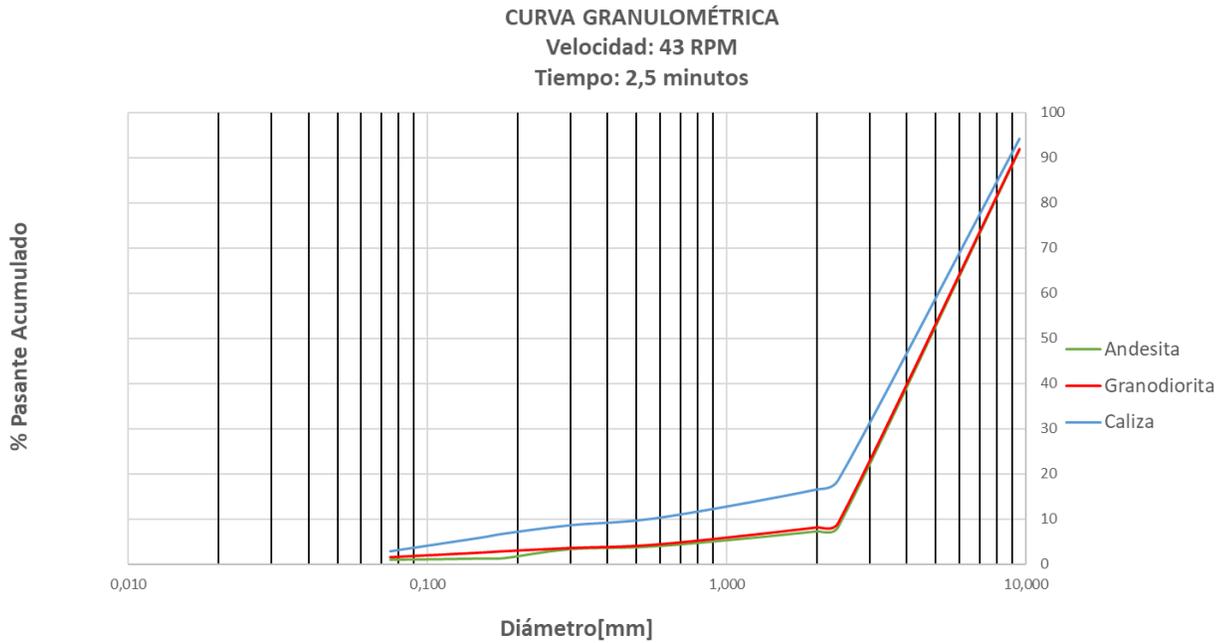
Anexo 4. Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 40 RPM.



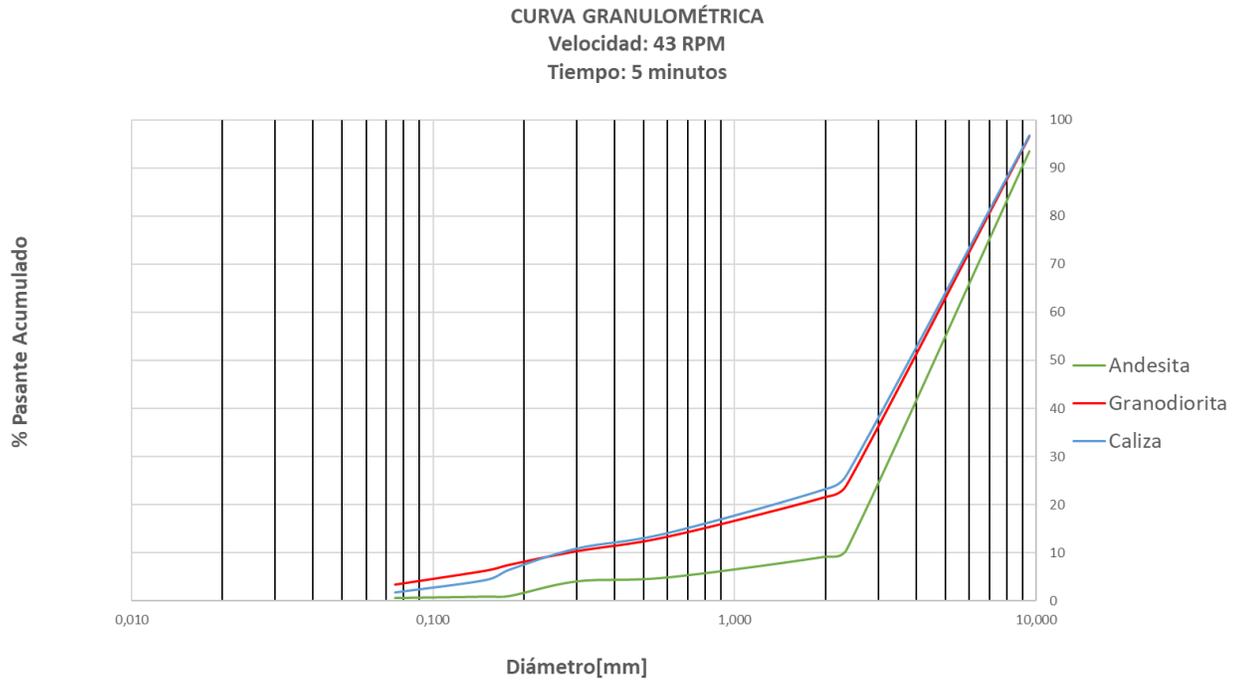
Anexo 5. Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 40 RPM.



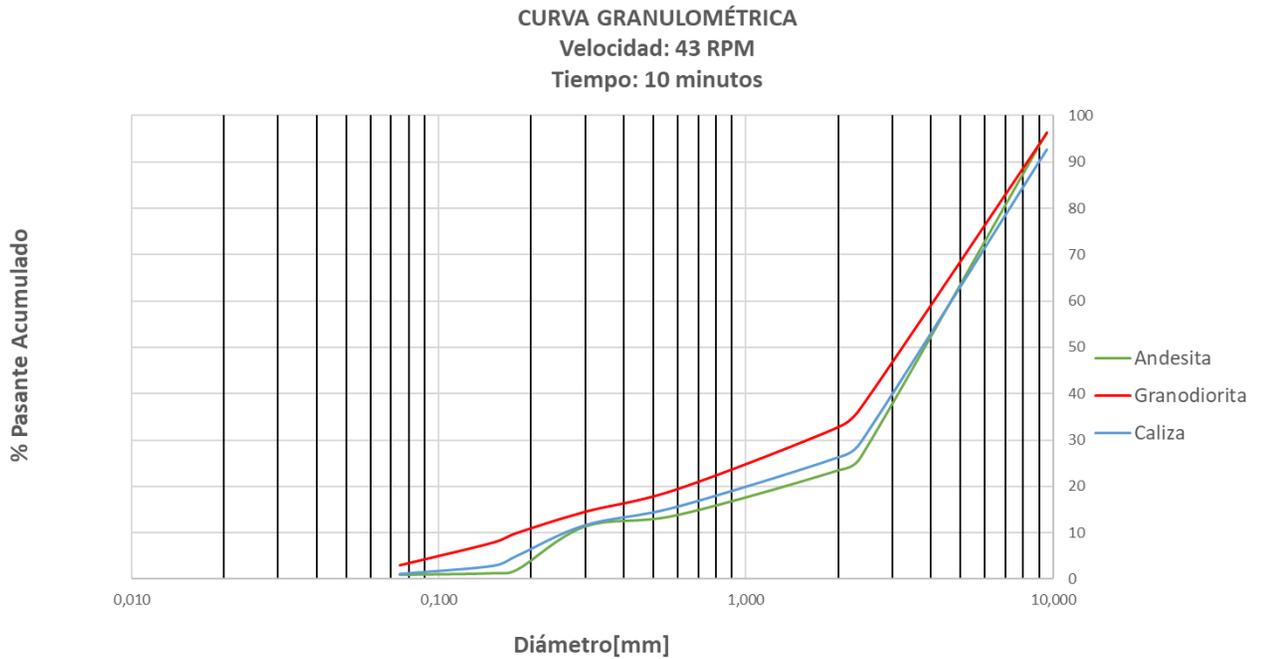
Anexo 6. Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 43 RPM.



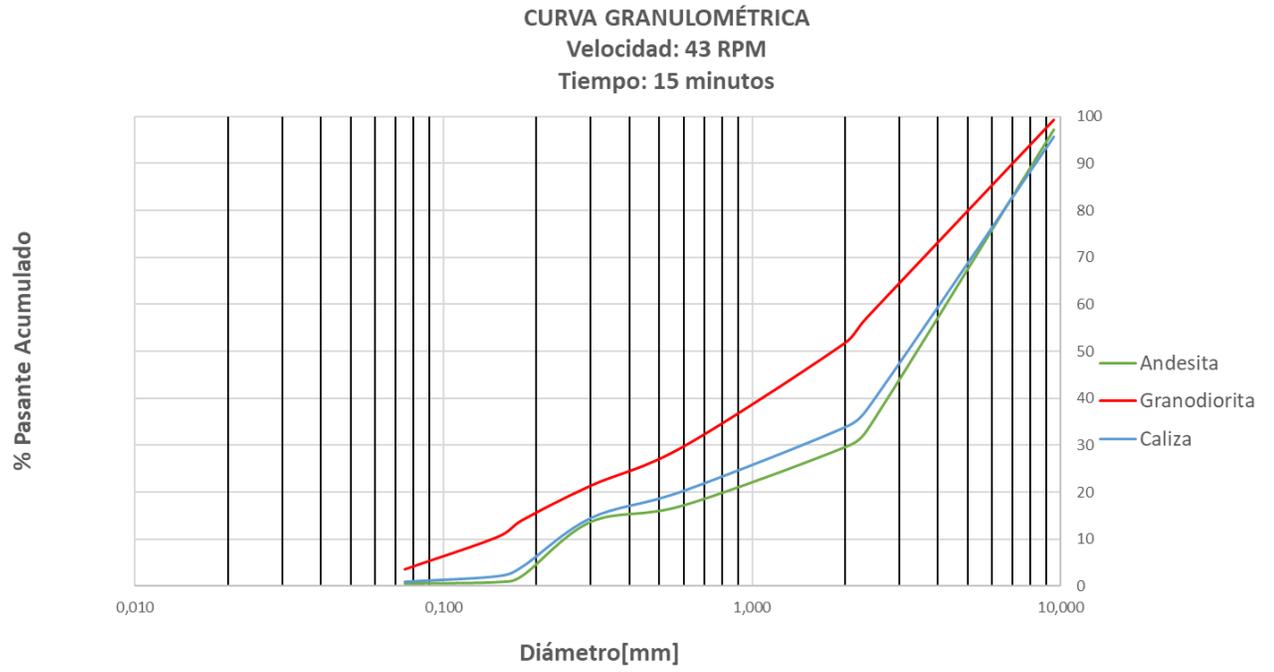
Anexo 7. Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 43 RPM.



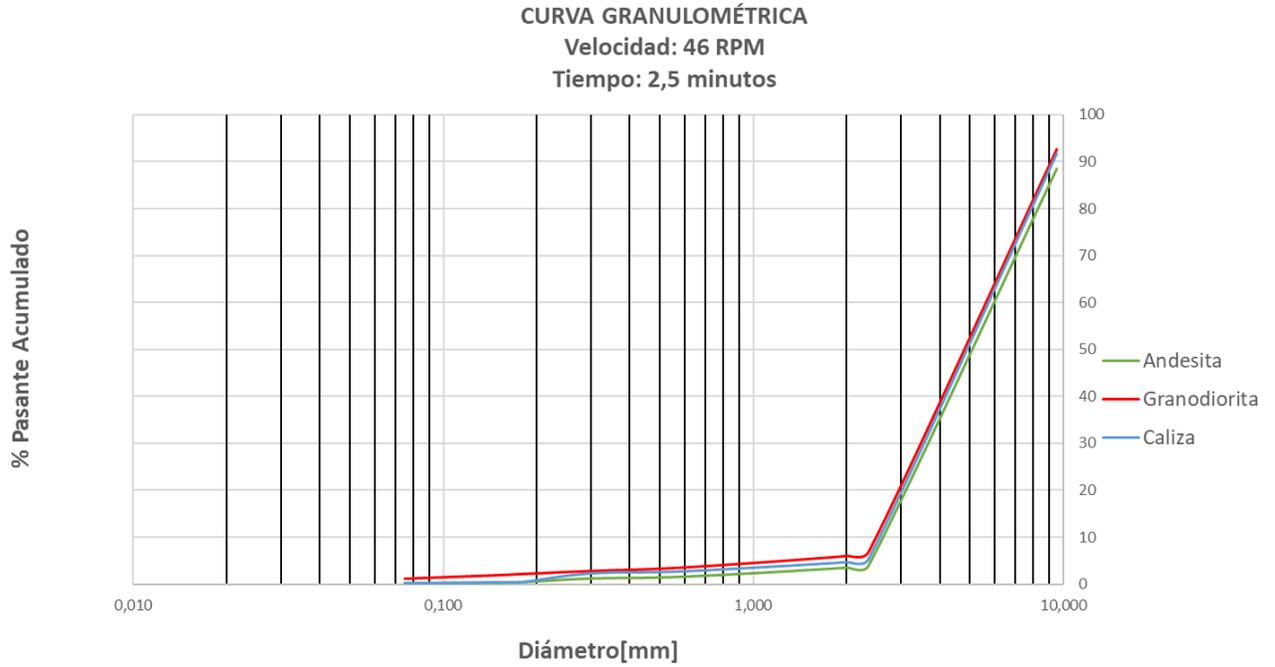
Anexo 8. Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 43 RPM.



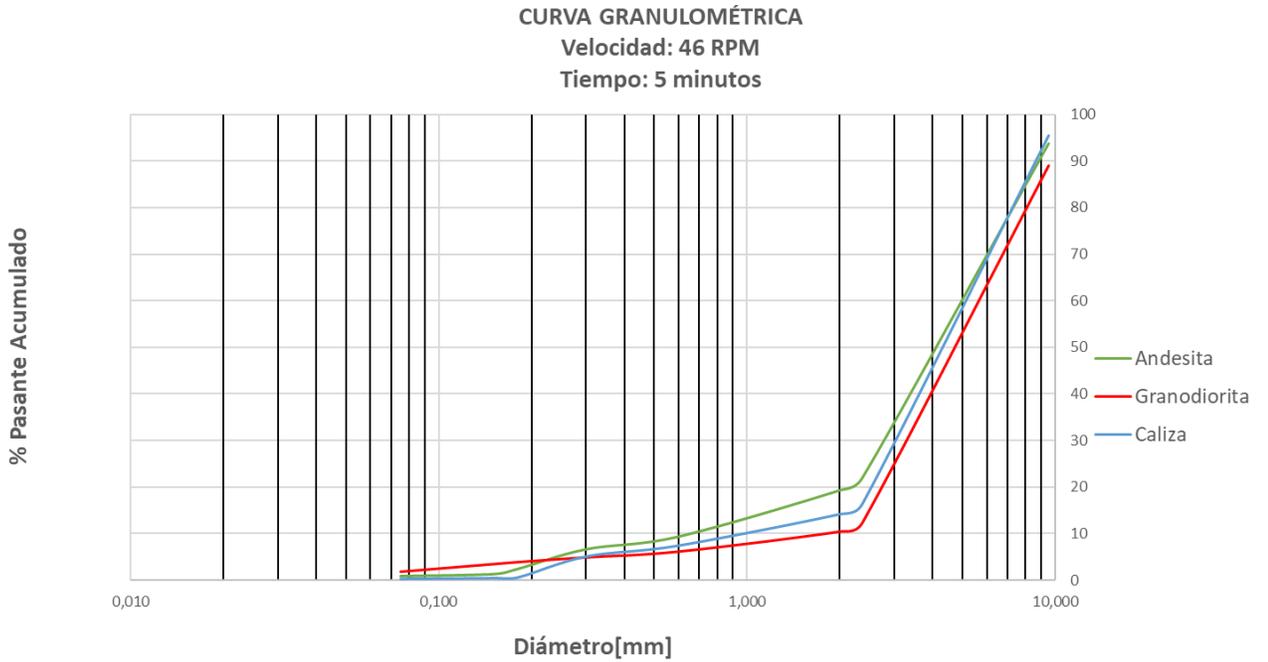
Anexo 9. Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 43 RPM.



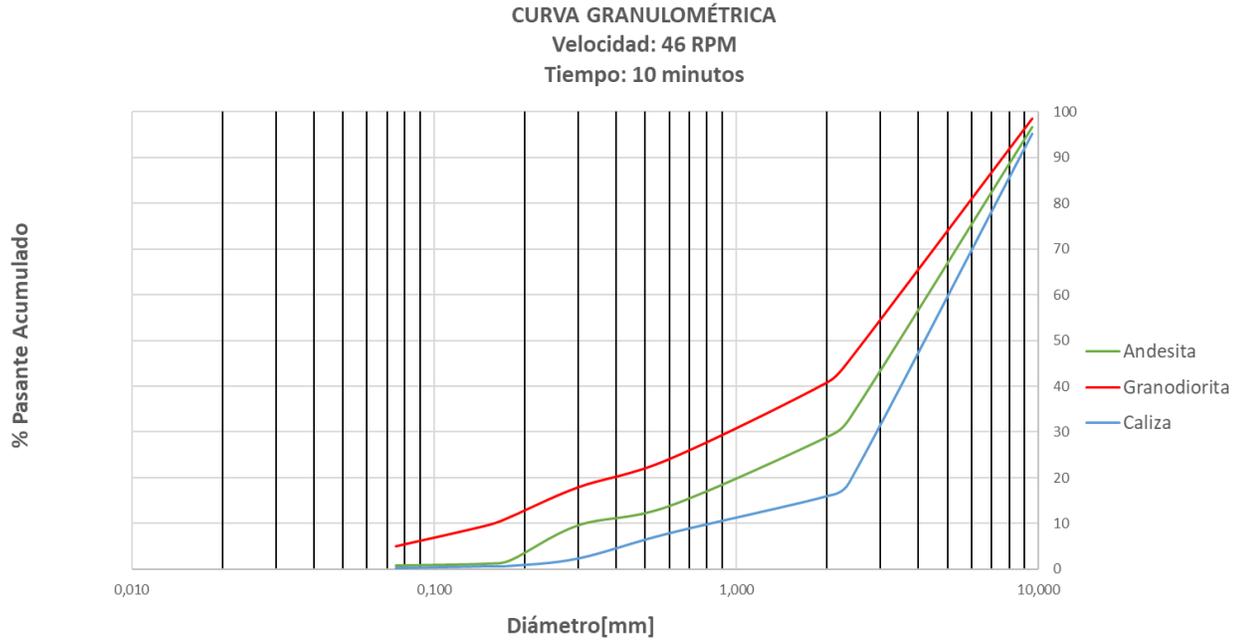
Anexo 10. Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 46 RPM.



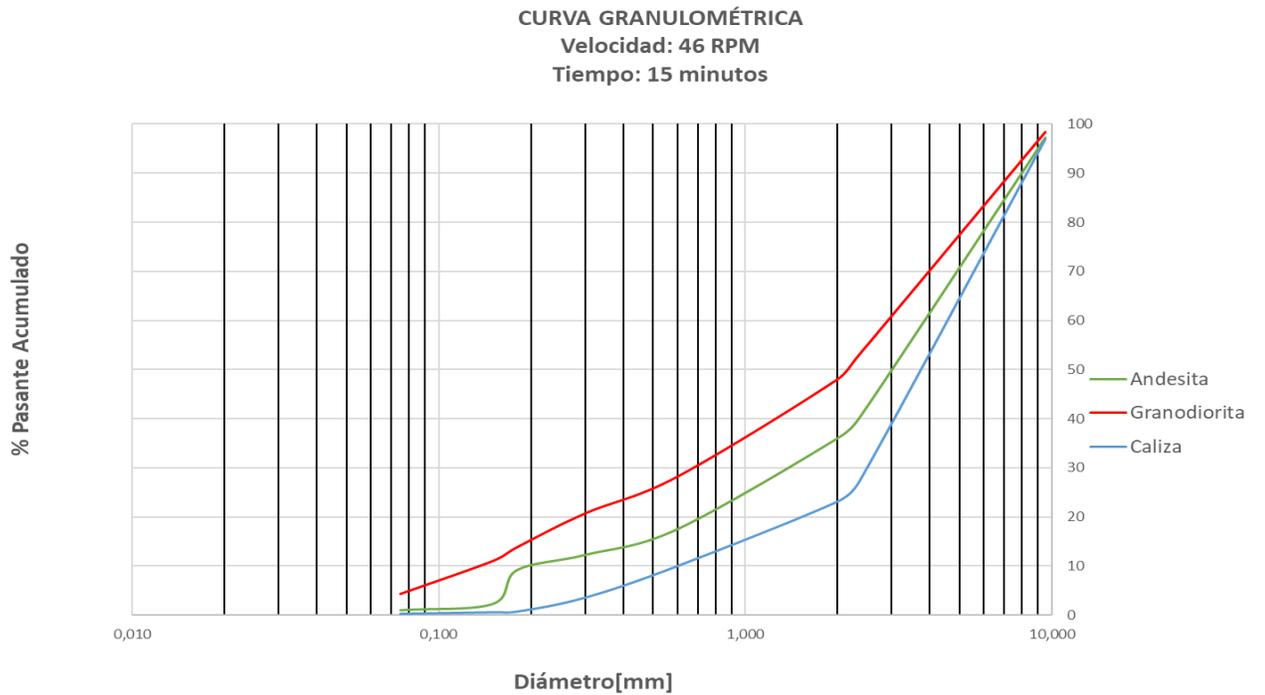
Anexo 11. Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 46 RPM.



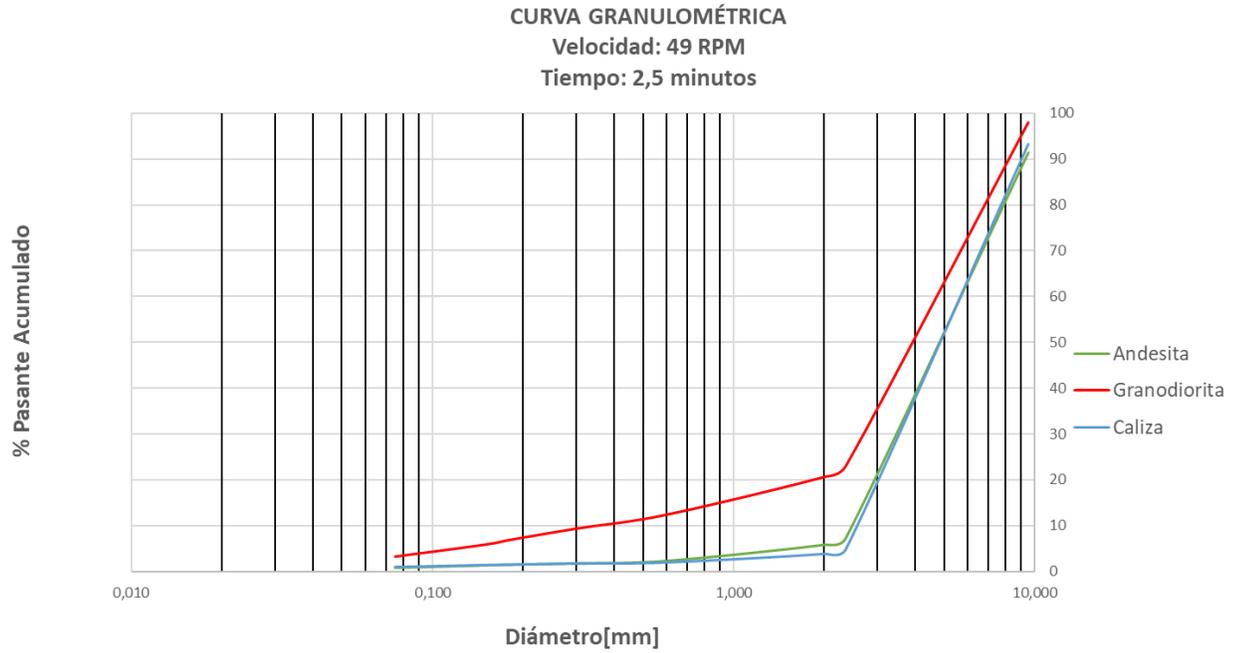
Anexo 12. Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 46 RPM.



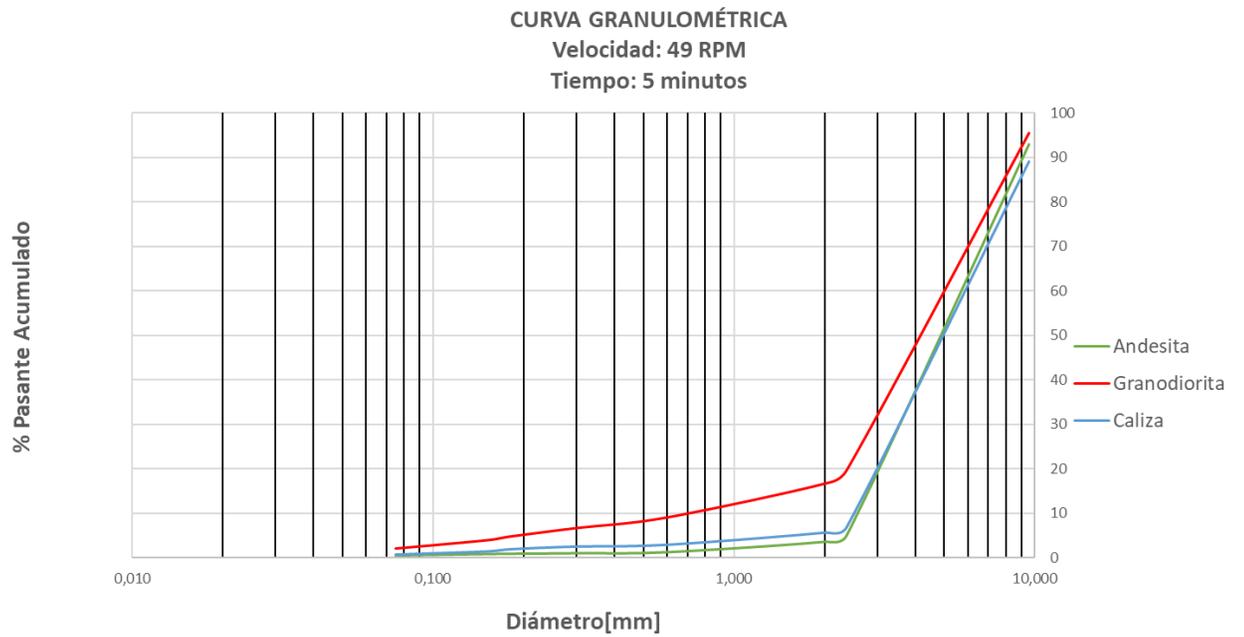
Anexo 13. Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 46 RPM.



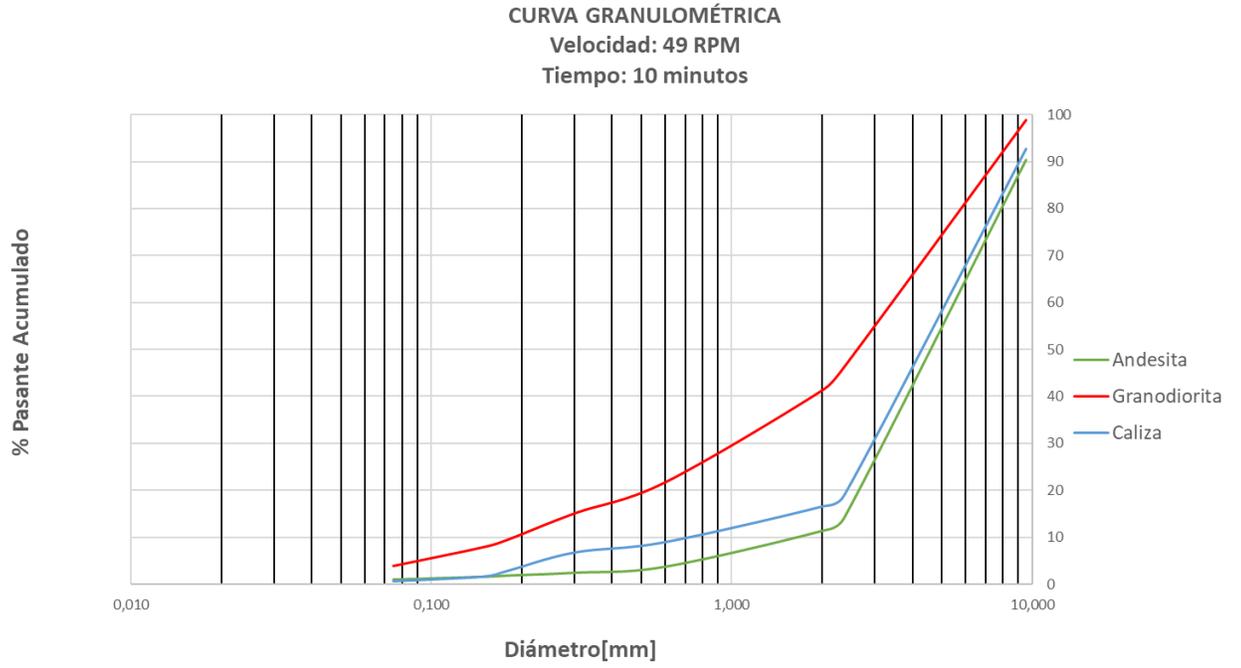
Anexo 14. Análisis granulométrico comparativo a los 2,5 minutos con una velocidad de 49 RPM.



Anexo 15. Análisis granulométrico comparativo a los 5 minutos con una velocidad de 49 RPM.



Anexo 16. Análisis granulométrico comparativo a los 10 minutos con una velocidad de 49 RPM.



Anexo 17. Análisis granulométrico comparativo a los 15 minutos con una velocidad de 49 RPM.

