



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

**ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE MOLIENDA SECA
SAG PARA UNA MENA DE SULFUROS**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
Ingeniero en Minas

Autores:
José Luis García Campoverde
Josue Sebastián Muñoz Díaz

Director:
Fernando Tulio Valencia Guaricela

Cuenca-Ecuador
2020

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	ii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
DEDICATORIA	ix
AGRADECIMIENTO	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
 INTRODUCCIÓN	 1
 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	 3
1.1 Molienda en minería	3
Clasificación de la molienda	4
Comparación	4
1.2 Tipos de molienda	5
1.2.1 Molienda convencional	5
1.2.2 Molienda no convencional	6
1.3 Molienda SAG	6
Características generales de la molienda SAG	6
Molino SAG	7
1.4 Parámetros operacionales del molino SAG	9
Velocidad crítica	9
Velocidad de rotación	9
Grado de llenado	12
Fracción de llenado con bolas	13
El nivel de llenado de carga total	15
1.5 Diseño de laboratorio de molino SAG	16

Diseño Geométrico	17
Potencia de accionamiento del molino	17
Velocidad de accionamiento	18
Velocidad crítica	19
Velocidad de rotación	19
1.6 Mecánica de fractura de partículas minerales	20
Teoría de grietas de Griffith	20
Teoría de Kick	22
Teoría de Rittinger	22
Teoría de Bond	22
Relación entre energía y reducción de tamaño	23
1.7 Tipos de Fracturas	24
Impacto	24
Astillamiento	24
Abrasión	24
1.8 Clasificación Granulométrica	25
1.9 Análisis Granulométrico	27
Método de Análisis Granulométricos	27
1.10 Representación de la distribución de tamaño de partícula	29
D80	29
Modelo de distribución de Gates-Gaudin-Shuchmann	30
Modelo de distribución de Rosin-Rammler	31
1.11 Minerales sulfurados	33
Clasificación	34
CAPÍTULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	36
2.1 Diseño	36
Work Index de trabajo	37
Cálculo de la capacidad del molino	37
Cálculo del volumen de bolas	38

Cálculo de la masa de bolas	38
Cálculo del tamaño máximo de bolas a cargarse en el molino	39
Cálculo de distribución de bolas en el molino SAG	40
Cálculo de la velocidad crítica	40
Cálculo de la velocidad de rotación	41
Cálculo de la potencia del motor	41
2.2 Construcción del molino SAG de laboratorio	43
Selección de materiales	43
Geometría del molino SAG de laboratorio	44
CAPÍTULO III: EXPERIMENTACIÓN	47
3. 1 Descripción de la muestra	47
Lugar de obtención de la muestra	47
Método de obtención de la muestra	47
Cantidad de muestra obtenida	47
3.2 Caracterización de la muestra	47
Calculo de la densidad	48
3.3 Preparación de la muestra	48
Trituración	48
Tamización	49
Factor de esponjamiento	49
3.4 Dosificación de la muestra	50
3.5 Ejecución experimental de la molienda	50
Descripción general del factor de llenado	50
Cronograma de actividades	51
Recopilación de información	51

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
4.1 Resultados	54
4.2 Análisis	59
Conclusiones y Recomendaciones	64
Conclusiones	64
Recomendaciones	66
Bibliografía	68
Anexos	70

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Grado de liberación, roca con 4 tipos de minerales	3
Gráfico 2. Tipos de molienda	5
Gráfico 3. Esquema de un molino SAG	7
Gráfico 4. Características de los movimientos del riñón de carga	8
Gráfico 5. Características del movimiento de carga en molinos rotatorios	10
Gráfico 6. Variación típica de la potencia neta con la velocidad de rotación, para un molino de laboratorio provisto de barras levantadoras ($D=0.6$ m, $L=0.3$ m, $J=0.35$, $d=25.4$ mm) y un molino piloto ($D=0.82$ m, $L=1.5$ m, $J=0.35$ y mezcla de bolas)	11
Gráfico 7. Aumento del grado de llenado	12
Gráfico 8. Geometría de la carga de bolas en un molino	14
Gráfico 9. Movimiento de la carga al interior del molino SAG para diferentes niveles de llenado de carga	16
Gráfico 10. Distintas formas de la cáscara del molino	17
Gráfico 11. Esquema de funcionamiento de un molino SAG	18
Gráfico 12. Velocidad de rotación	19
Gráfico 13. Fractura desde un monotamaño que queda en un intervalo de tamaño determinado	20
Gráfico 14. Propagación de una grieta en un sólido bidimensional según la teoría de Griffith	21
Gráfico 15. Comparación gráfica de las leyes de fragmentación	23
Gráfico 16. Mecánica de fracturas	24
Gráfico 17. Tipos de fracturas	25
Gráfico 18. Serie de tamices	26
Gráfico 19. Método de tamizado, serie de tamices	28
Gráfico 20. Método de sedimentación, Hidrómetro	29
Gráfico 21. Gráfico Granulométrico.	30
Gráfico 22. Diagrama Rosim-Rammmler	32
Gráfico 23. Sulfuros	33
Gráfico 24. Cinabrio HgS	34
Gráfico 25. Sulfasales	35
Gráfico 26. Esquema molino SAG de laboratorio	36

Gráfico 27. Índices de Trabajo de Bond Típicos _____	37
Gráfico 28. Carga de bolas molino SAG de laboratorio _____	40
Gráfico 29. Dimensiones del molino SAG de laboratorio _____	44
Gráfico 30. Dimensiones del molino SAG de laboratorio _____	45
Gráfico 31. Engranajes Reductor eje del molino _____	46
Gráfico 32. Molino SAG de laboratorio _____	46
Gráfico 33. Recolección de muestras _____	53
Gráfico 34. Ensayo 1 _____	55
Gráfico 35. Ensayo 2 _____	56
Gráfico 36. Ensayo 3 _____	57
Gráfico 37. Ensayo 4 _____	58
Gráfico 38. Análisis granulométrico a los 2,5 minutos con diferentes cargas de alimento ____	59
Gráfico 39. Análisis granulométrico a los 5 minutos con diferentes cargas de alimento ____	60
Gráfico 40. Análisis granulométrico a los 10 minutos con diferentes cargas de alimento ____	61
Gráfico 41. Análisis granulométrico a los 15 minutos con diferentes cargas de alimento ____	62
Gráfico 42. Parámetro Ksch _____	63
Gráfico 43. Distribución del tamaño de bolas _____	71
Gráfico 44. Material fracturado _____	71
Gráfico 45. Material sulfurado de mena, muestras llevadas al laboratorio de IEM _____	72
Gráfico 46. Roca característica _____	72
Gráfico 47. Balanza analítica (calculo de la densidad de la muestra mediante el método de picnómetro) _____	73
Gráfico 48. Trituración de la muestra mediante el uso de la trituradora de mandíbulas. ____	73
Gráfico 49. Clasificación de la muestra, monotamaño de ½ pulgada _____	74
Gráfico 50. Factor de esponjamiento _____	74
Gráfico 51. Distribución granulométrica de Shuchmann _____	76
Gráfico 52. Tapa de muestreo para molino SAG de laboratorio. _____	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tamaño de tamices	26
Tabla 2. Distribución de bolas	40
Tabla 3. Dosificación de la muestra	50
Tabla 4. Cronograma de actividades	51
Tabla 5. Ensayo 1	51
Tabla 6. Ensayo 2	52
Tabla 7. Ensayo 3	52
Tabla 8. Ensayo 4	52
Tabla 9. Modelo de distribución de Shuchmann	75

DEDICATORIA

A Dios quien guía mi camino con fortaleza y sabiduría. A toda mi familia por su absoluto apoyo, esfuerzo y confianza. De manera especial a mi mamá y a mi hijo por ser los pilares fundamentales en mi superación personal.

José Luis García Campoverde

Esta tesis se la dedico a mi madre quien supo guiarme para la toma de buenas decisiones, compartirme su sabiduría y conocimientos, por su apoyo y amor incondicional.

A mi familia que a pesar de la distancia supo transmitir su motivación para culminar mis estudios profesionales, en especial a mis abuelos que son un pilar fundamental en el desarrollo de mi vida.

A mi pareja Rebeca que supo ser paciente en esta etapa de mi vida y siempre estaré agradecido por su confianza en mí.

Josue Sebastián Muñoz Díaz

AGRADECIMIENTO

Agradezco de la manera más comedida a mis padres: Mario García y Enma Campoverde, de igual manera, a mis hermanos: Juan, Wilson, Walter, Andrés y a mi hijo José David por el apoyo incondicional brindado a lo largo de mi desarrollo personal y académico.

A mi novia por su apoyo incondicional.

A la Universidad del Azuay, a la Facultad de Ciencia y Tecnología y a la Carrera de Ingeniería en Minas. Así también a los docentes que transmitieron su conocimiento he inspiraron el amor por la carrera.

A mi tutor Ing. Fernando Valencia y miembros del tribunal Dr. Juan Calderón e Ing. Leonardo Núñez quienes han facilitado el desarrollo del proyecto a través de su conocimiento, experiencia y recomendaciones.

José Luis García Campoverde

Agradezco a la vida por haberme otorgado a la mejor familia. A mi madre, abuelos, tías, tío, primos y pareja por haber aportado cada uno con un grano de arena para formar el ser humano que ahora soy.

A mi tutor Ing. Fernando Valencia y docentes de la carrera que fueron apasionados al transmitir sus conocimientos. Por inculcarme el amor a la minería y motivar a la culminación de este proyecto.

Josue Sebastián Muñoz Díaz

ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE MOLIENDA SECA SAG PARA UNA MENA DE SULFUROS

RESUMEN

La molienda semiautógena es una variación del proceso de molienda autógena y es la más frecuente en la práctica. El objetivo de este estudio corresponde a la experimentación, comportamiento y análisis del factor de llenado de alimento de una mena sulfurada en un molino SAG a escala de laboratorio. Para este estudio se procedió al diseño y construcción del molino, el cual se basó en la recopilación de información y antecedentes teóricos de diversas fuentes. Se realizó un programa experimental de conminución seca, mediante la evaluación de 4 ensayos con diferentes cargas de llenado de alimento (mono tamaño de ½ pulgada), dando como resultado 16 muestras en intervalos predeterminados de tiempo. Los parámetros operacionales fueron constantes durante todos los ensayos. El factor de llenado de alimento, para esta mena sulfurada, que maximizó la fragmentación del material fue 25 Kg o 71,42% de la capacidad máxima del molino.

Palabras Clave: Conminución mineral, mena sulfurada, molino SAG, parámetros operacionales de molienda SAG.

Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director del Trabajo de Titulación

Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela

José Luis García Campoverde

Josue Sebastián Muñoz Díaz

Autores

SAG DRY GRINDING EFFICIENCY ANALYSIS FOR SULPHURIZED ORE

ABSTRACT

Semi-autogenous grinding is a variation of the autogenous grinding process and is the most common in practice. The objective of this study was the experimentation, behavior and analysis of the sulphurized ore fill factor in a SAG mill at a laboratory-scale. The mill was designed and built based on the information collected and the theoretical background found on different sources. An experimental dry comminution program was carried out by evaluating four tests with different filling loads (mono size 1/2 inch). This resulted in 16 samples at predetermined time intervals. Operational parameters were constant during all tests. The filling factor, for this sulphurized ore, which maximized the fragmentation of the material, was 25 Kg or 71.42% of the mill's maximum capacity.

Keywords: Mineral comminution, sulphurized ore, SAG mill, SAG grinding operational parameters.

Fernando Tulio Valencia Guaricela
Thesis Director

Leonardo Aníbal Núñez Rodas
School Coordinator

José Luis García Campoverde.

Josue Sebastián Muñoz Díaz

Authors

Translated by



José Luis García and Josue Sebastián Muñoz

ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE MOLIENDA SECA SAG PARA UNA MENA DE SULFUROS

INTRODUCCIÓN

La molienda es el último escalón de la fragmentación mineral, se caracteriza por la conminución mineral a milímetros o incluso a micras; proceso de suma importancia previo a la etapa de beneficio. En el Ecuador este proceso unitario minero se ha focalizado en el empleo de molinos chilenos y de bolas en su mayoría.

La industria minera ecuatoriana se ha mantenido entre pequeña y mediana escala, no obstante, en los últimos años se han incorporado empresas multinacionales que han proyectado al país a una producción a gran escala, han permitido adquirir nueva experiencia e innovación en los procesos mineros, entre los cuales se destaca la utilización de los molinos semiautógenos, que dominan ampliamente el mercado de la reducción mineral.

El molino SAG se caracteriza por ser de mayor potencia y tamaño que los molinos de bolas y por permitir una mayor razón de reducción del tamaño de las rocas, tienen la capacidad de simplificar el proceso de chancado primario a la flotación, sin emplear etapas intermedias (Garrido, 2004). La implementación de molinos SAG en las líneas de proceso mineral lideran sobre los molinos convencionales, sin embargo, la escasez de este tipo de molinos a nivel nacional ha limitado el uso, experimentación y conocimiento, bajo las distintas condiciones de trabajo en el país.

A nivel nacional no se presentan antecedentes experimentales que enfaticen en el tema, debido al gran auge antes mencionado es de suma importancia ampliar el conocimiento práctico y experimental de este tipo de fragmentación mineral. Para el desarrollo experimental se procedió al diseño y construcción de un molino SAG a escala de laboratorio. Considerando que existen varios parámetros operacionales entre ellos: velocidad de rotación, tiempo de residencia, factor de llenado de bolas, granulometría del alimento, distribución de las bolas de acero y factor de llenado de alimento, que inciden en la eficiencia de la molienda (Austin & Concha, 1994); para el desarrollo experimental de esta tesis, se tomó exclusivamente el factor de llenado de alimento.

Esta investigación y experimentación se basó en la recopilación de información y antecedentes de diversas fuentes, que permitieron adquirir conocimientos para realizar los ensayos de conminución de una mena sulfurada, posterior a los ensayos se realizó el análisis de los datos obtenidos con el fin de optimizar la molienda seca SAG de la mena.

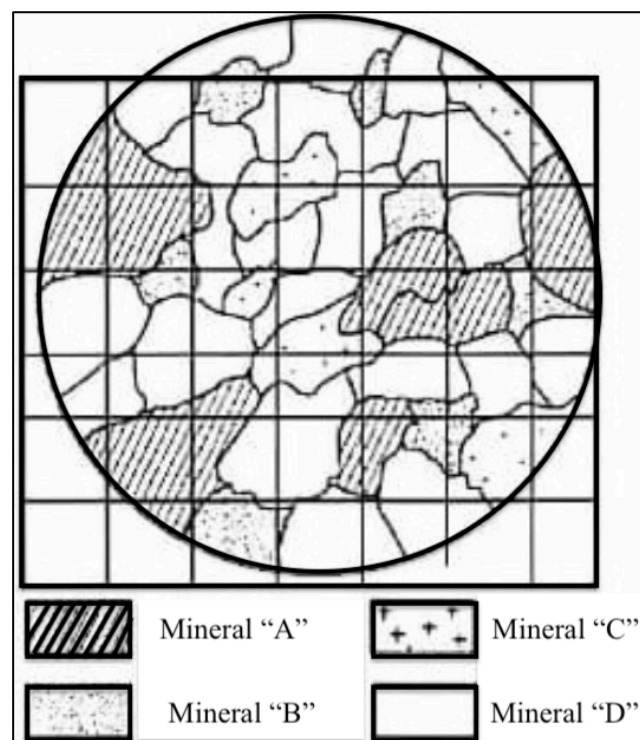
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Molienda en minería

La etapa de beneficio del mineral se da a partir de la preparación mecánica de la mena, la cual inicia con la trituración del material y posteriormente la molienda, este último proceso se lleva a cabo fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta un tamaño deseado y se caracteriza por el producto de salida que oscila entre algunos milímetros y micras. Esta operación unitaria tiene como objetivo principal disociar los minerales de interés de la ganga; se reduce el volumen de las partículas a un grado de desintegración óptimo para posteriores procesos de beneficio.

Las rocas tienen composición variable, es decir, el mineral de interés se encuentra mezclado con la ganga. Un buen grado de liberación de partículas se logra transformando la energía cinética del molino al mineral, donde partículas se someten a esfuerzos por contacto que forman grietas microscópicas y macroscópicas, las cuales presentarán diversos comportamientos al momento de ser conminuidas (Armas Calixto & Poma Blanco, 2013).

Gráfico 1. *Grado de liberación, roca con 4 tipos de minerales*



Fuente: (Metallurgist, 2012)

El grado de liberación es una expresión cuantitativa de la magnitud en que la conminución es capaz de separar partículas variables y obtener partículas minerales “libres”; su intrepidez solo se puede realizar mediante estudios microscópicos en laboratorio (Valeriano, 2018).

Clasificación de la molienda

El proceso de molienda se realiza mediante equipos denominados molinos y estos pueden trabajar en seco o en húmedo. El trabajo de los equipos en seco es cuando la humedad de la mena no rebasa el 3% y 4% . El trabajo en húmedo se caracteriza por unos rangos de humedad elevados del 40% al 70% de agua en volumen, lo que representa para la mayoría de los minerales unos valores de Sp (relación de sólidos en peso) entre 55% y 80% (Blanco, 2014).

Comparación

Molienda Seca:

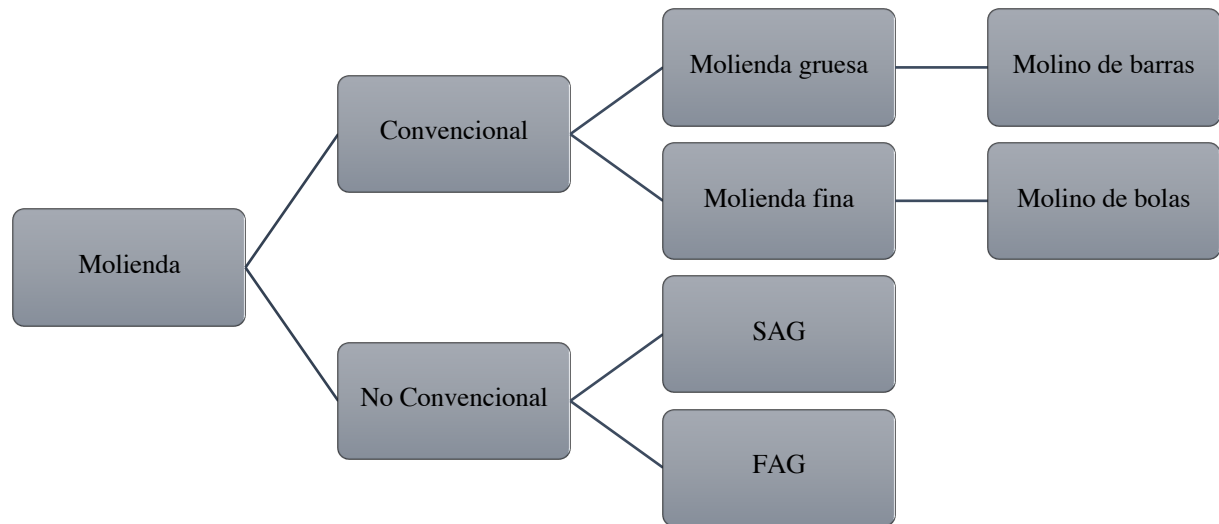
- Demanda más potencia por tonelada tratada.
- Requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos.
- Consume menos revestimiento.

Molienda húmeda

- Necesita menos potencia por tonelada tratada.
- No requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos.
- Consume más revestimiento debido a la corrosión.

1.2 Tipos de molienda

Gráfico 2. *Tipos de molienda*



Elaborado por: Josue Muñoz & José García

Fuente: (Blanco, 2014)

1.2.1 Molienda convencional

Molino de barras

El molino de barras es muy similar al molino de bolas, este tipo de molino utiliza como objetos moturantes, barras largas para la fragmentación. Se utiliza en molienda primaria con alimento hasta de 50 mm o 2 pulgadas y el tamaño del producto varía entre 270 y 3000 μm . Las barras trituran el mineral a través del volteo dentro del molino. La longitud de diámetro se mantiene entre 1.4 a 1.6 metros. Se aplica ampliamente en minas de metal, industria del vidrio y materiales de construcción (Zenith, 2000).

Molino de bolas

El molino de bolas funciona por el principio de impacto y fricción, la fragmentación de material se da por el impacto que produce al caer las bolas desde la parte superior del cilindro. Su estructura consiste de un cilindro vacío que gira sobre su eje, el cual puede ser tanto horizontal como tener un pequeño ángulo con la horizontal. Está parcialmente llenado con bolas las cuales pueden ser de acero inoxidable, acero cromado, cerámica o goma dependiendo

de las necesidades de conminución. La longitud del molino es parcialmente superior al diámetro (Zenith, 2000).

1.2.2 Molienda no convencional

Molienda Autógena (FAG)

En la molienda autógena la fragmentación se realizará por medio del propio mineral. Una de sus desventajas es que en molinos de grandes diámetros, el material realiza un gran recorrido circular, lo que hace que el consumo específico de energía sea mayor que en la molienda semiautógena (Metallurgist, 2012).

Molienda Semiautógena (SAG)

La molienda semiautógena es una variación del proceso de molienda autógena, es la más frecuente en la práctica y en ella se adicionan medios de molienda metálicos al molino. El nivel volumétrico de llenado de bolas varía normalmente de 12 a 18 % con respecto al volumen interno del molino (Metallurgist, 2012).

1.3 Molienda SAG

El proceso de la molienda SAG tiene como principio la conminución del material a través del impacto, astillamiento y abrasión entre el mismo material y bolas de acero denominadas medios moledores.

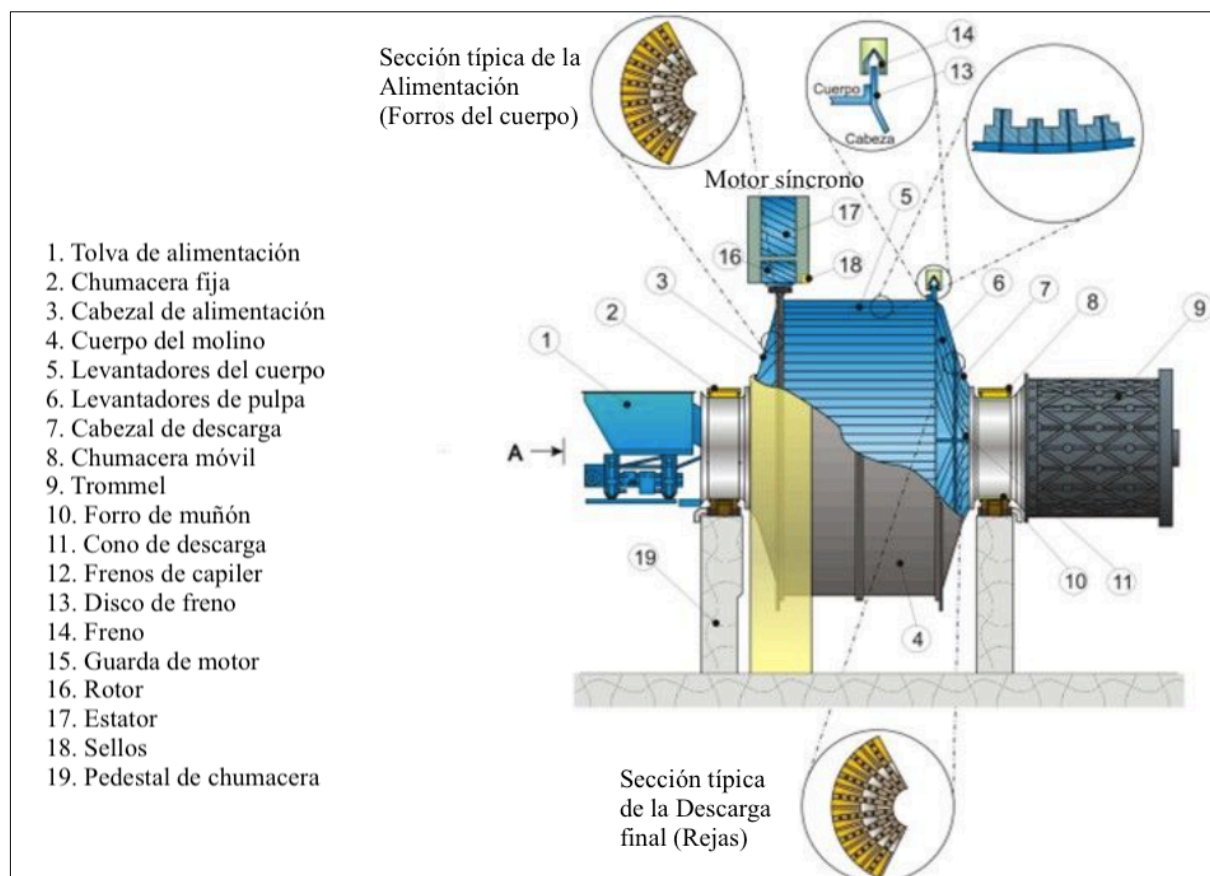
Características generales de la molienda SAG

Los molinos SAG son equipos fundamentales en la preparación mecánica de la mena, se caracterizan por sus bajos costos operacionales y por su alta eficiencia en fragmentación. En la industria minera a gran escala se implementa en las plantas concentradoras los molinos SAG debido a sus bajos costos de inversión, costos operacionales y mantenimiento; se identifican por tener un diámetro mayor que su longitud, tienen capacidad de carga y tratamiento de minerales mayor que los circuitos convencionales compuestos por los molinos de bolas y barras. Debido a su gran capacidad y eficiencia presenta una mayor productividad que suprime en muchas ocasiones a la trituración secundaria, lo que permite ahorros significativos respecto a los molinos convencionales en operaciones a gran escala.

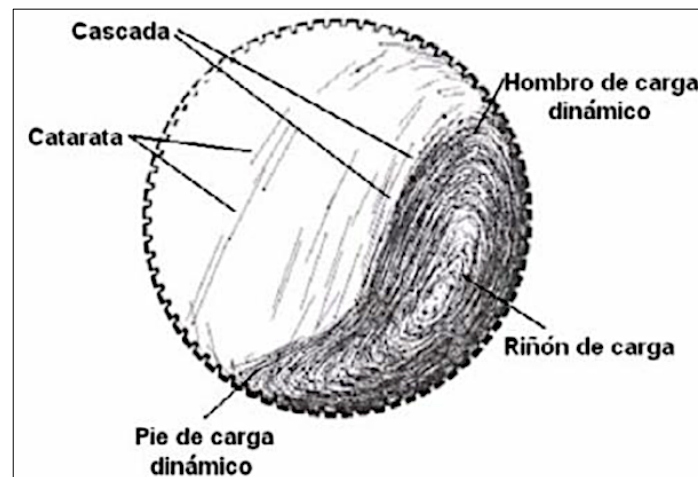
Molino SAG

En este tipo de molino el mineral es reducido por la acción del mismo material, presenta partículas de varios tamaños y por el trabajo de numerosas bolas de acero forjado conocidos como medios de molienda, ocupan entre el 12% y 18% de su capacidad (volumen). Cuando el molino gira los medios moledores y el mineral se elevan por el revestimiento y la acción de los lifters, posteriormente cae en forma de cascada y en catarata provocando impactos sobre las caras superficiales de los otros cuerpos, logrando así un efecto de chancado y molienda más efectivo y con menor consumo de energía, este proceso fractura y astilla las partículas de gran tamaño, mientras tanto, para las partículas de menor tamaño se produce un efecto de abrasión en el riñón de carga entre el mismo material y los medios moledores de menor tamaño, reduciendo el material de milímetros a micras (Gutierrez & Sepulveda, 1986).

Gráfico 3. *Esquema de un molino SAG*



Fuente: (Sanchez, 2019)

Gráfico 4. *Características de los movimientos del riñón de carga*

Fuente: Compendio de Conminución CONCYTEC

Características de operación de un molino SAG

Después de años de interpretaciones erradas de la operación y resultados de proceso de un molino SAG, se puede refutar con suficiente certeza que las características del proceso quedan definidas a partir del análisis del movimiento de la carga interna de estos equipos. Esta variable, difícil de observar en forma directa, depende de otras, que se describen a continuación, y que la afectan en forma independiente o combinada. (Magne, Titichoca, Velásquez, & Valderrama, 2000)

- Composición de la carga interna, definida por la presencia, de partículas de mineral de tamaño mayor, partículas de mineral de tamaño intermedio y difícil de reducir, partículas finas de mineral, medios de molienda metálicos y agua.
- Flujo de alimentación de mineral y de agua al molino, definidas por su granulometría y moliendabilidad.
- Diseño de los lifters y etapa de su vida útil en que se encuentran, caracterizado por la altura del levántador y el ángulo de la cara de ataque a la carga.
- Diseño de la parrilla interna y etapa de su vida útil en que se encuentran.
- Velocidad de operación del molino.
- Parámetros de diseño del molino (largo y diámetro)

1.4 Parámetros operacionales del molino SAG

Velocidad crítica

La velocidad crítica del molino se define como 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 centrífuga sobre una bola en la pared del molino, la velocidad crítica del molino resulta ser (Austin & Concha, 1994):

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

Donde:

D: diámetro interno del molino en (m)

d: es el diámetro máximo de bolas (m)

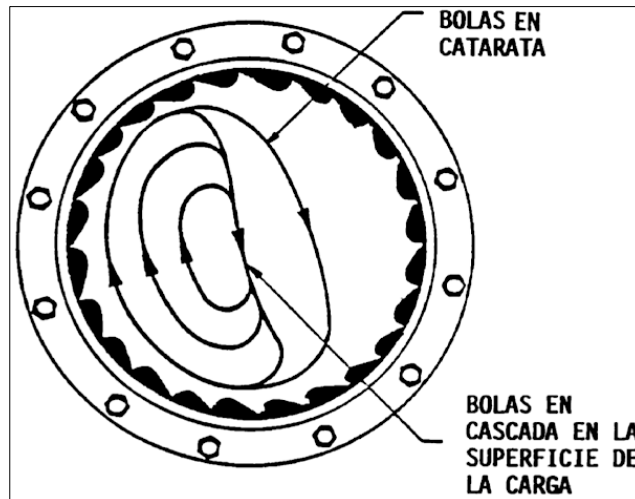
La velocidad crítica depende del diámetro interno del molino y es independiente del tipo de material a moler. El punto de máximo rendimiento, medido por la potencia necesaria para accionar el molino, está en el entorno del 75% y se suelen utilizar velocidades de rotación de 65-70% para los molinos de bolas y de 50-70% para los molinos de barras. (Gutierrez & Sepulveda, 1986)

Velocidad de rotación

La velocidad de rotación es de gran importancia sobre los resultados operacionales de una planta, se considerada una variable de operación manipulable para lograr la optimización del proceso, maximizando la capacidad de procesamiento. Sin embargo, al no existir certeza sobre el nivel de llenado de carga total del molino, el operador limita la velocidad de operación buscando proteger los revestimientos del cilindro al impacto directo causados por los medios de molienda; en la práctica los molinos son operados a velocidad constante a pesar de contar con velocidad variable, por lo general se utiliza las variaciones de velocidad en situaciones de emergencia operacional como son disminuciones o aumentos drásticos del factor de llenado J. 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. (Magne, Améstica, Barría, & Menacho, 1995)

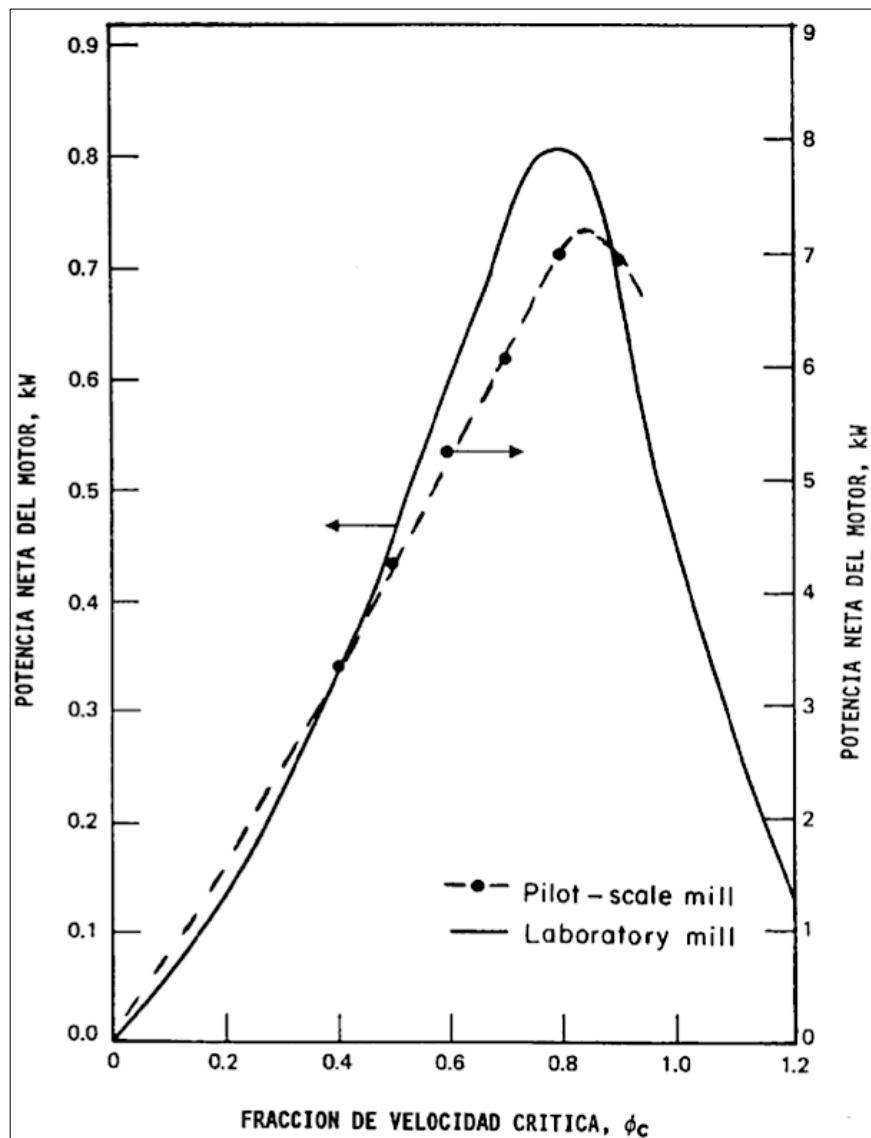
Gráfico 5. *Características del movimiento de carga en molinos rotatorios*



Fuente: (Austin & Concha, 1994)

Las velocidad de rotación varia con las velocidades específicas de fractura normal; el máximo de potencia sucede a diferentes fracciones de velocidad crítica para diversos molinos, dependiendo del diámetro del molino, del tipo de lifter, de la razón del diámetro de bolas al molino y de las condiciones de llenado de polvo y bolas. El máximo se encuentra generalmente en el rango de 70% y 85% de la velocidad crítica, siendo el rango usual para molinos de diámetro grande una carga completa de bolas ($J=0.4$) (Austin & Concha, 1994).

Gráfico 6. Variación típica de la potencia neta con la velocidad de rotación, para un molino de laboratorio provisto de barras levantadoras ($D=0.6$ m, $L=0.3$ m, $J=0.35$, $d=25.4$ mm) y un molino piloto ($D=0.82$ m, $L=1.5$ m, $J=0.35$ y mezcla de bolas)



Fuente: (Austin & Concha, 1994)

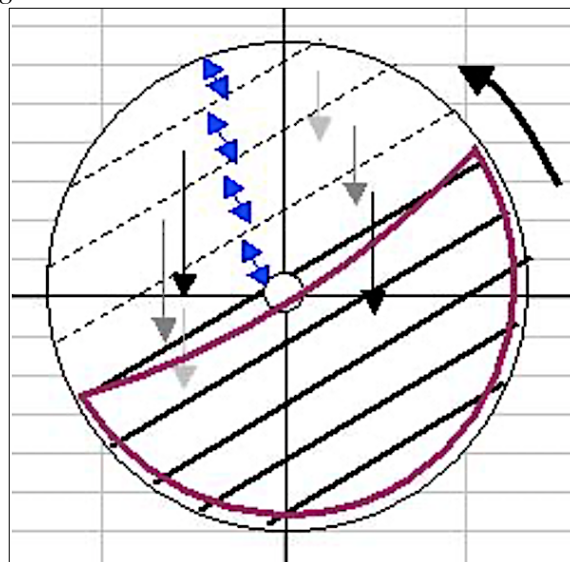
Para los operadores de molinos semiautógenos, resulta evidente la importancia del efecto de la velocidad de rotación sobre el consumo de potencia del molino: “Mayor velocidad, genera un mayor consumo de potencia”. Si se tiene presente la regla válida para molienda convencional: “Mayor potencia, implica una mayor eficiencia de molienda”, se tiende a pensar que en un molino semiautógeno se puede tener que: “Mayor velocidad, mayor potencia consumida y por lo tanto mayor eficiencia de molienda”, lo que no necesariamente resulta cierto. Desde este punto de vista, la operación óptima del molino no se consigue necesariamente a la máxima velocidad de operación (máximo consumo de potencia), sino en aquella condición

en que se logre un sistema balanceado de diseño del revestimiento – velocidad -nivel de llenado de bolas – nivel de llenado de carga total.

Grado de llenado

El grado de llenado, es la proporción del volumen interno del molino que ocupa la carga (mena y medios moledores), es un factor que afecta directamente al rendimiento del molino. Este grado de llenado en la práctica esta comprendido entre el 40% y 55% del volumen total del molino. 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 concepto utilizado para obtener el peso del material molturador. Se considera por geometría que los huecos entre barras representan el 20% del volumen y entre las bolas el 40% del volumen.

Gráfico 7. *Aumento del grado de llenado*



Fuente: (Blanco, 2014)

A partir del 50% o 55% de la carga del molino, los sucesivos incrementos de llenado aportan una masa que se opone al movimiento, cuadrante 0 a 90°, y una cantidad de masa mayor, en el lado opuesto del eje de simetría vertical, que favorece el movimiento, cuadrante 90° a 180°, y esta diferencia aumenta hasta el llenado total del molino en el que la molienda se hace nula. Estos valores coinciden con la experiencia de Joisel y Birebent en su libro *Mechanics of ball milling* (Blanco, 2014).

Fracción de llenado con bolas

Este volumen se define como una fracción del volumen total del molino y puede variar entre 12% y 18% , el valor más en la industria es un 16%, sin embargo, existen dos casos puntuales en los cuales es necesario agrupar bolas en un molino SAG:

- Cuando exista una acumulación excesiva de mineral fino e intermedio, es aconsejable utilizar diámetros inferiores con una distribución de bolas relativamente, que no supere las 5 pulgadas (127 mm).
- Cuando existe una acumulación de rocas grandes es aconsejable una distribución de medios moledores gruesa, no mínimas a 127 mm.

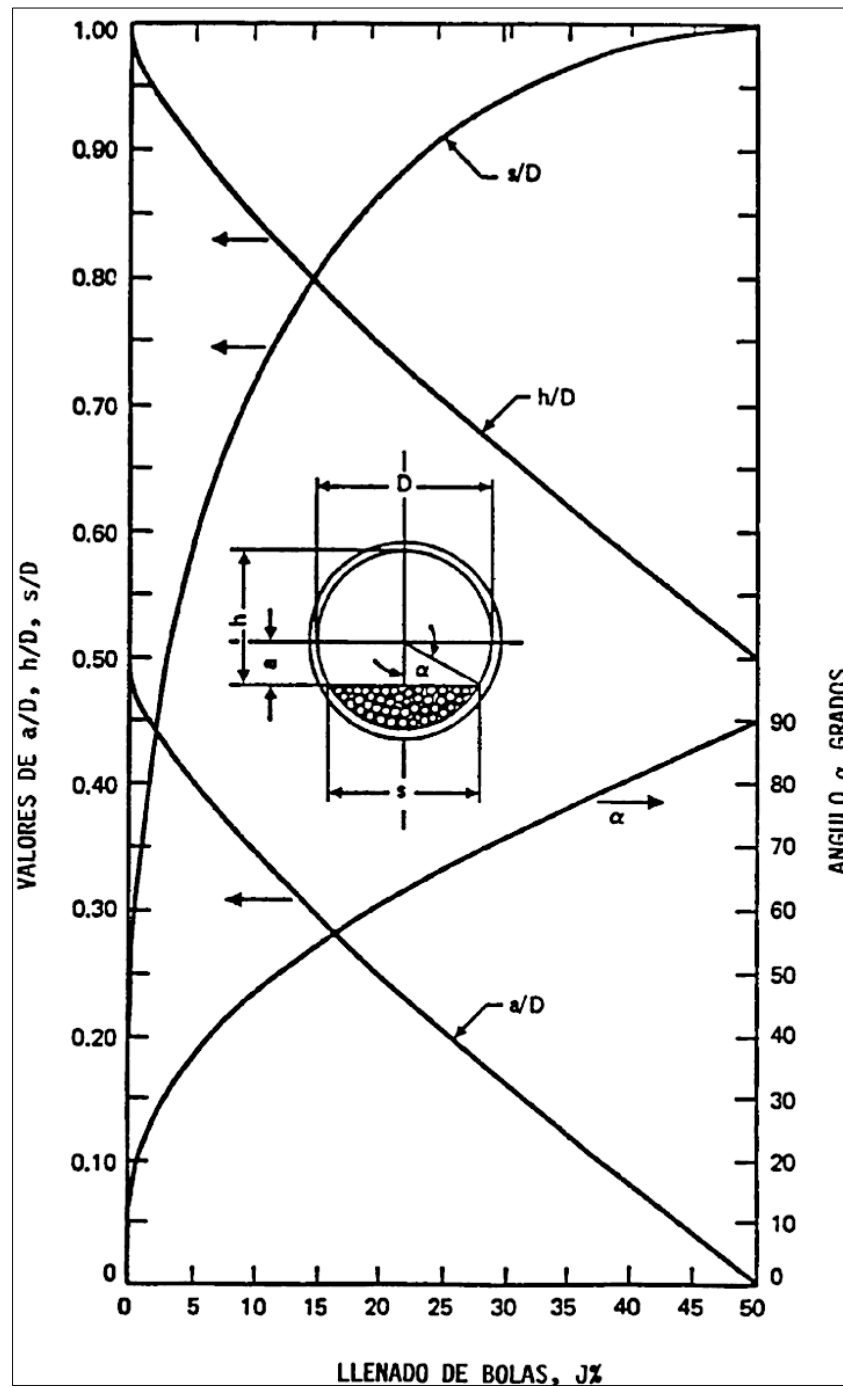
Se expresa como la fracción del molino lleno por el lecho de bolas en el reposo. Para convertir el volumen del lecho en la masa total de bolas presentes, es necesario conocer: la densidad aparente, porosidad del lecho, relleno de polvo, etc. Sin embargo, se define una porosidad constante para todo los cálculos, la porosidad nominal del lecho es de 0.40 que da un valor de (Austin & Concha, 1994):

$$J = \frac{\text{Volumen real de bolas} / \text{Fracción en volumen de acero en el lecho}}{\text{Volumen del molino}}$$

$$J = \left(\frac{\text{masa de bolas} / \text{densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} \right) \times \left(\frac{1}{1 - \text{porosidad del lecho}} \right)$$

$$J = \left(\frac{\text{masa de bolas} / \text{densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} \right) \times \left(\frac{1}{0.6} \right)$$

Gráfico 8. Geometría de la carga de bolas en un molino



Fuente: (Austin & Concha, 1994)

El nivel de llenado de carga total

La forma más utilizada para estimar el nivel de llenado de carga total de un molino semiautógenos, es haciendo una relación entre mediciones puntuales del nivel de llenado volumétrico con el molino detenido y la presión de inyección de lubricante en los descansos del molino al momento de detenerlo.

Así, al variar la presión en los descansos, se considera que han ocurrido variaciones en el peso de la carga interna y ello debe reflejar variaciones en el nivel de llenado volumétrico del molino. Esta forma de estimar el nivel de llenado de carga total, deja fuera diferentes aspectos, como:

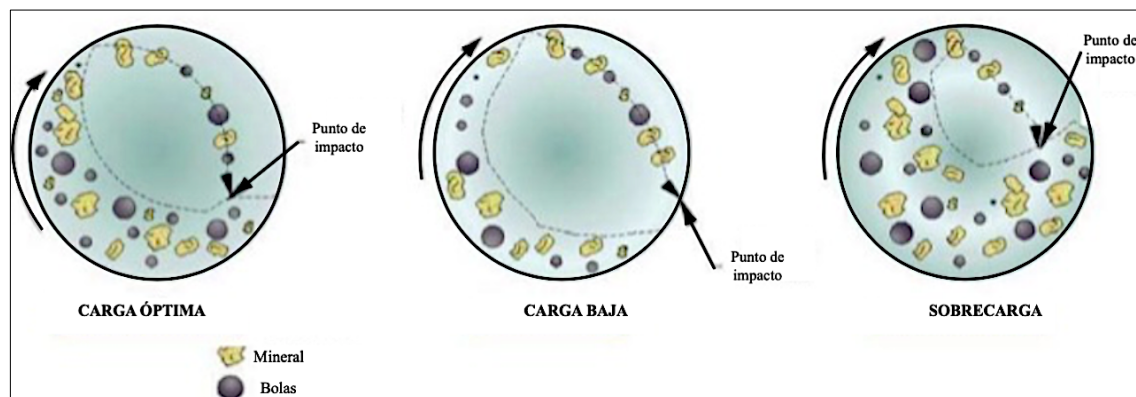
- Importantes variaciones en las características físicas del volumen efectivo del molino durante el tiempo que transcurre la operación. Estas variaciones son la pérdida de peso y cambios en la forma de los revestimientos, variaciones en el nivel de llenado de bolas, variaciones en el sistema de lubricación y del lubricante mismo.
- Variaciones de la densidad aparente de la carga interna, por la modificación de la relación entre las masas de medias de molienda, mineral y agua.

La definición del punto de referencia de operación para el nivel de llenado volumétrico de carga total de un molino semiautógeno se define normalmente entre 28 a 32%. Sin embargo, es muy difícil asegurar que durante la operación del molino, el nivel de llenado se pueda mantener en el entorno del valor definido. La incerteza práctica que existe sobre el nivel de llenado con que opera un molino, se puede traducir en la ocurrencia de dos situaciones extremas:

- Sobrellenado típico del molino: que consiste en la acumulación excesiva de carga interna del molino, producto de la disminución de la capacidad de molienda y evacuación, y que en la operación se observa como un brusco aumento de la presión en los descansos y disminución del consumo de potencia del molino. Si no se logra controlar a tiempo, el resultado es la detención del molino por alarma en el sistema de lubricación y/o accionamientos, por un tiempo prolongado.
- Operación con bajos niveles de carga: lo que implica que el molino trabaja con un llenado volumétrico definido por los medios de molienda metálicos exclusivamente. El

resultado de esta situación, bastante común a lo largo de la operación del molino, se refleja en una alta tasa de fractura de bolas (que genera consumos de acero mayor a lo normal) y daños severos en los revestimientos internos (placas y levantadores) (Magne, Titichoca, Velásquez, & Valderrama, 2000).

Gráfico 9. *Movimiento de la carga al interior del molino SAG para diferentes niveles de llenado de carga*



Fuente: Revista metalúrgica.

1.5 Diseño de laboratorio de molino SAG

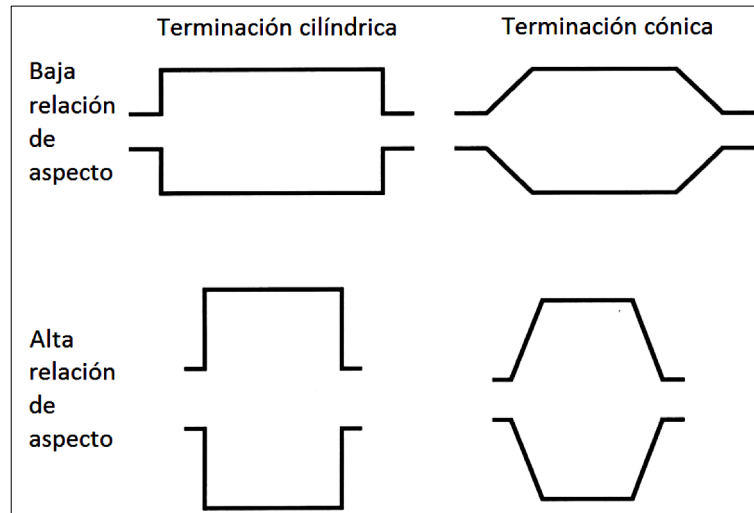
El molino SAG es un cilindro rotatorio sobre un eje longitudinal cuyo diámetro es mayor al largo, generalmente la razón D/L de este tipo de molinos tipo cascada es mayor a 1.5. En su interior el molino posee una parrilla en la zona de descarga, la cual retiene las partículas de gran tamaño y permite la evacuación de las partículas finas (Garrido, 2004).

Con el objetivo de investigar estos procesos, especialmente el proceso de autofractura, es conveniente realizar una serie de ensayos en un molino SAG de laboratorio, (nosotros hemos usado un molino de diámetro de 0.6 metros por 0.3 metros de largo). Los resultados no tendrán porque corresponder cuantitativamente con respecto a molinos industriales, pero estos ensayos en pequeña escala pueden ser utilizados para explorar patrones básicos de fractura que servirán como guía cuantitativa en los ensayos que sea necesario realizar en molinos piloto (Austin & Concha, 1994).

Diseño Geométrico

Las principales características geométricas en el diseño de molino SAG son: Relación de aspecto: El ratio entre el L/D varía entre 0.5 y 3 aproximadamente. Terminación cónica o cilíndrica (Morrell, 1993).

Gráfico 10. *Distintas formas de la cáscara del molino*

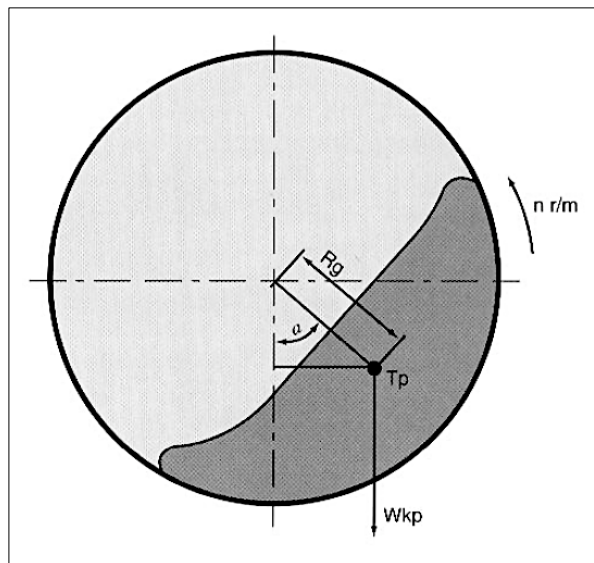


Fuente: Adaptado de (Morrell, 1993)

Potencia de accionamiento del molino

Para referenciar las dimensiones de un molino que pueda realizar una determinada operación de fragmentación, se debe relacionar la potencia necesaria para la molienda obtenida a través de la fórmula de Bond, que considera ya las necesidades del molino con las correcciones y aproximaciones necesarias.

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas para evaluar las necesidades y dimensiones pero todas parten de un principio básico correspondiente al sistema dinámico del molino y luego ajustan el funcionamiento a la realidad de la molienda mediante las correcciones oportunas (Blanco, 2014).

Gráfico 11. *Esquema de funcionamiento de un molino SAG*

Fuente: Cortesía de Nordberg

Para molienda con molinos SAG, AG o molinos de pebbles, la potencia se calcula:

$$N = c * W * R_g * n$$

Donde:

N = Potencia bruta del molino, en kW

c = Constante cuyo valor es de 1/1200 para SAG, AG y molinos de pebbles.

W = Peso de la carga, en kg.

R_g = Distancia del centro de gravedad al eje del molino, en m.

n = Velocidad del molino, en r.p.m.

Velocidad de accionamiento

Para calcular la velocidad de funcionamiento de un molino que pueda realizar la fragmentación mineral, se debe relacionar la velocidad crítica y velocidad de rotación. En la práctica se toma como referencia los cálculos teóricos, sin embargo, pueden existir correcciones necesarias.

Velocidad crítica

La velocidad crítica del molino se define como la velocidad de rotación a la cual las bolas empiezan a centrífugar en las paredes del molino y no son proyectadas en el interior del mismo, haciendo un balance entre la fuerza de gravedad y la centrífuga sobre una bola en la pared del molino, la velocidad crítica del molino resulta ser (Austin & Concha, 1994):

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

Donde:

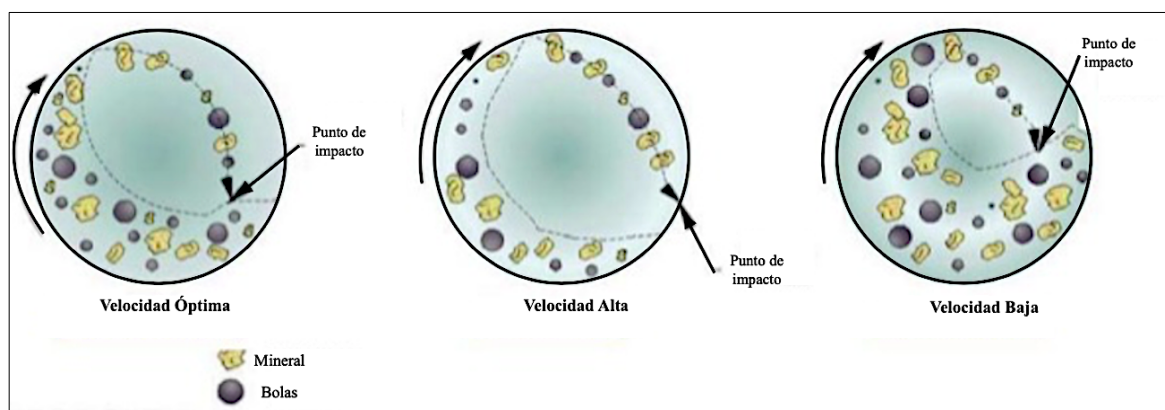
D : diámetro interno del molino en (m)

d : es el diámetro máximo de bolas (m)

Velocidad de rotación

La velocidad de rotación se encuentra generalmente en el rango de 70% y 85% de la velocidad crítica, siendo el rango usual para molinos de diámetro grande una carga completa de bolas ($J=0.4$) (Austin & Concha, 1994).

Gráfico 12. *Velocidad de rotación*



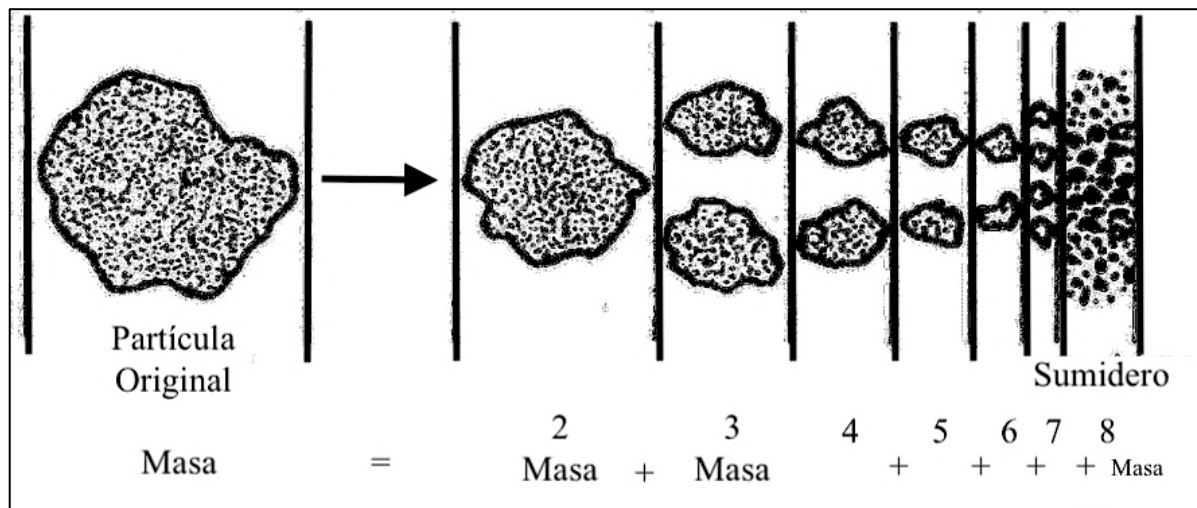
Fuente: Revista metalúrgica.

1.6 Mecánica de fractura de partículas minerales

La reducción de tamaño de mineral es de suma importancia en los procesos metalúrgicos, la mena tiene que ser reducida hasta que los minerales de valor sean liberados de la roca encajante.

A lo largo de los años investigadores como Kick, Griffith, Bond, Rittinger, y otros han intentado explicar las leyes de fracturas en partículas minerales. Se puede definir que las partículas de un mineral son heterogéneas y que normalmente presentan fallas tanto micro como a macro escala y no siempre se comportan como materiales frágiles. Excepto en tamaños muy pequeños, una partícula mineral puede considerarse como un material frágil, es decir que, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado hasta el momento en que ocurre la fractura (Escobar, 2016).

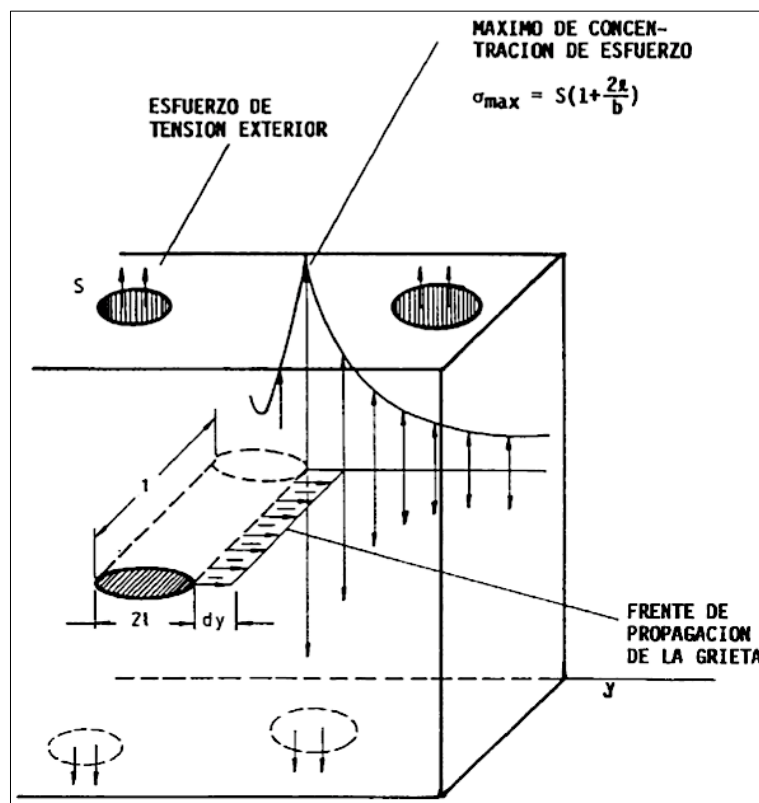
Gráfico 13. *Fractura desde un monotamaño que queda en un intervalo de tamaño determinado*



Fuente: (Austin & Concha, 1994).

Teoría de grietas de Griffith

La teoría de las fracturas estudia la iniciación de grietas a partir de fallas y su propagación en el material. La fractura puede ser frágil o dúctil. La fractura frágil se generaliza por una deformación elástica antes de la ruptura y por una rápida velocidad de propagación de la grieta. La fractura dúctil se caracteriza por presentar una deformación plástica alrededor de las grietas antes y durante de su propagación (Austin & Concha, 1994).

Gráfico 14. *Propagación de una grieta en un sólido bidimensional según la teoría de Griffith*

Fuente: (Austin & Concha, 1994).

Utiliza métodos analíticos derivados de otras ramas de la mecánica y la ciencia que estudian los mecanismos de deformación y propagación de grietas, pueden ser experimentales que sirven para determinar la resistencia relativa del material a la fractura. Al someter a tal material a una tensión, los esfuerzos se concentran en las puntas de las fallas estableciéndose un frente de ruptura por donde se propaga la grieta (Austin & Concha, 1994).

Como una fisura se abra bajo tensión, es razonable esperar que el sólido se fragmente por fisuras que comienzan en la parte alta y baja del agujero y que progresa en la dirección de la vertical.

Austin & Concha, (1994)(Como se citó en Griffith [2.1][2.3]) argumentó:

Que los sólidos reales contienen muchas pequeñas fallas que corresponden al equivalente tridimensional de los agujeros elípticos y que estos puntos de debilidad inician las grietas a niveles de esfuerzo mucho menores que los ideales. Griffith hizo cuatro suposiciones básicas:

- I. La concentración de esfuerzos ocurre en la punta de la falla;
- II. El sólido es deformado al punto en que los lazos intermoleculares en la punta de la falla son estirados hasta el límite de ruptura;
- III. El estado de esfuerzo es reproducido en la punta para una expansión infinitesimal de la falla, y
- IV. La energía necesaria para expandir la falla, como una grieta que se propaga, está disponible ya que el sólido no puede relajarse inmediatamente del esfuerzo exterior aplicado.

Teoría de Kick

En 1885 Kick afirmó que para cualquier unidad de masa de material, la energía necesaria para producir una relación de reducción dada es constante, sin importar el tamaño que posea la partícula. Esto significará que iguales cantidades de energía producirán iguales cambios geométricos en el tamaño de la partícula.

Teoría de Rittinger

Rittinger manifestó en 1867, que el área de la nueva superficie producida es proporcional a la energía consumida en la reducción de tamaño. Este postulado considera solamente la energía necesaria para producir la ruptura de aquellos cuerpos sólidos ideales (homogéneos, isotrópicos y sin fallas), una vez que el material ha alcanzado su deformación crítica o límite de ruptura.

Teoría de Bond

En 1952 Bond concluyó, que el trabajo necesario para romper un cubo de lado d es proporcional al volumen d^3 de dicho cubo; pero al formarse la primera grieta, la energía fluye a las nuevas superficies resultantes que serán proporcionales a d^2 . Cuando se produce la fractura de una partícula irregular la energía de deformación se distribuye irregularmente y por tanto la energía requerida para la fractura está entre d^3 y d^2 , siendo la media geométrica $d^{2.5}$ (en compromiso con Kick y Rittinger) (Bond, 1952).

Relación entre energía y reducción de tamaño

Una relación empírica entre la energía y reducción de tamaño que se ha propuesto y generalizado de las ecuaciones teóricas de energía-reducción de Kick, Griffith, Bond, Rittinger y otros; es (Bond, 1952):

$$dE_o = -Kd \left(\frac{d}{d^n} \right)$$

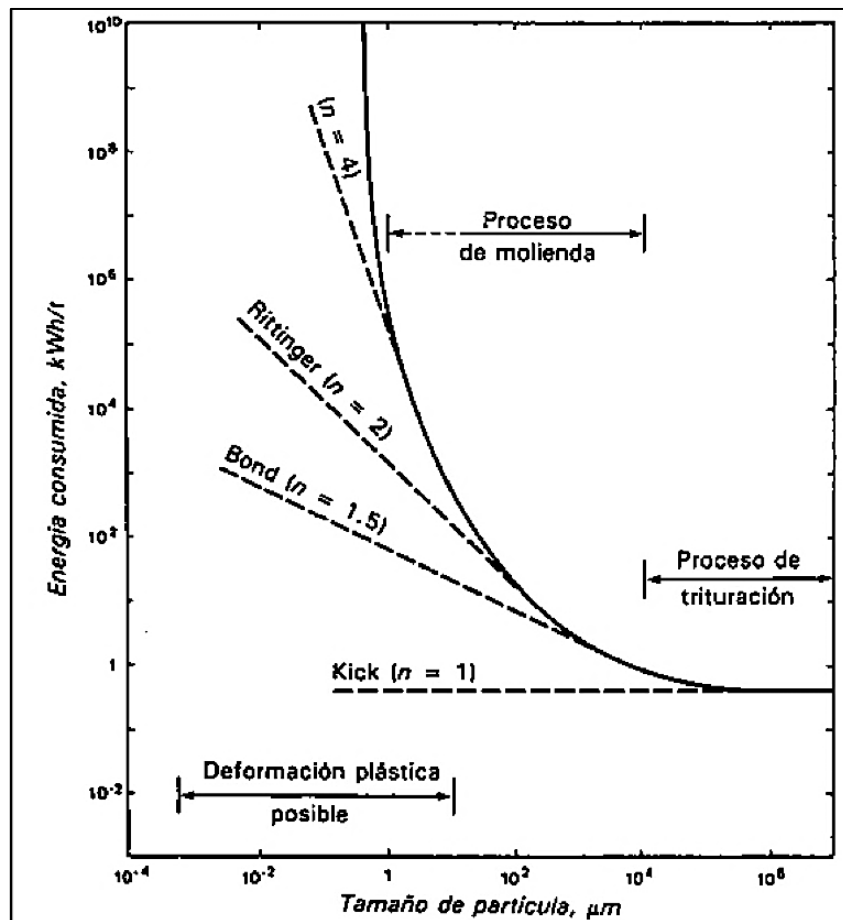
Donde

E_o = Energía específica para suministrar la energía de la nueva superficie

d = Tamaño de la partícula

n = constante (n no es constante en toda la gama de tamaños de la partícula)

Gráfico 15. Comparación gráfica de las leyes de fragmentación

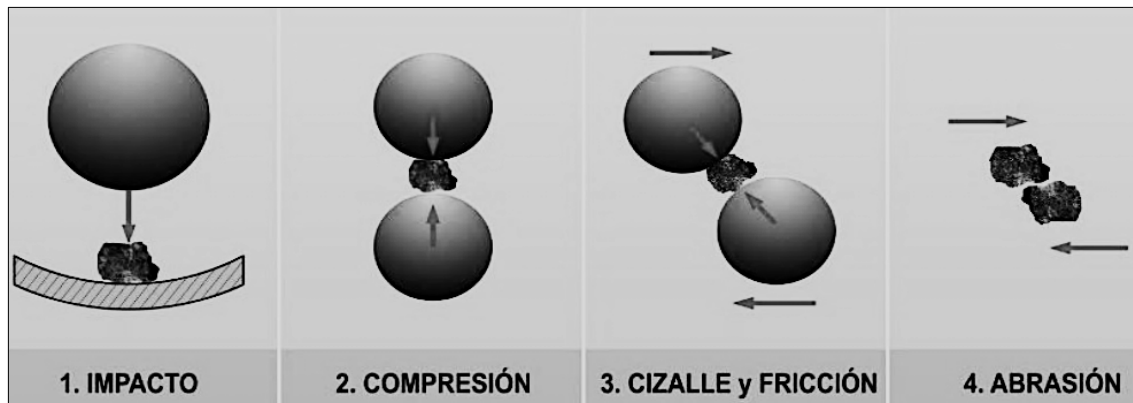


Fuente: (Gutierrez & Sepulveda, 1986)

1.7 Tipos de Fracturas

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

Gráfico 16. *Mecánica de fracturas*



Fuente: Manuales de Tecsup.

Impacto

Esto ocurre cuando las bolas de gran tamaño y algunas partículas grandes de material son levantadas por los lifters ganando energía potencial y posteriormente transformándola en energía cinética, produce un impacto masivo que desintegra las partícula. Sucede cuando la energía se aplica directamente sobre la partícula y es mayor a la que requiere para romper el material.

Astillamiento

Un golpe de refilón puede astillar una esquina, este mecanismo redondea rocas irregulares a piedras aproximadamente esféricas en la molienda autógena.

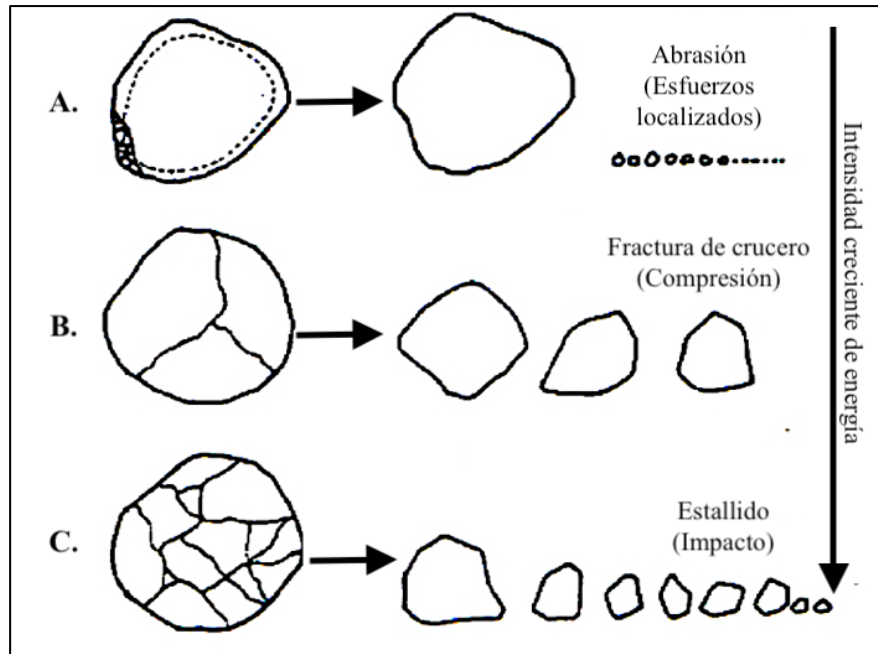
Abrasión

La fricción produce desgaste de las superficies.

Nuevamente en molienda las piedras más o menos esféricas, formadas por astillamiento, se desgastan hasta formar piedras suaves como las piedras de ríos. El

astillamiento y la abrasión conducirán a la producción de material fino. Su efecto combinado se denomina atrición. (Austin & Concha, 1994)

Gráfico 17. *Tipos de fracturas*



Fuente: (Gutierrez & Sepulveda, 1986)

1.8 Clasificación Granulométrica

La clasificación granulométrica se lo puede realizar por diversas formas, una de ellas es por medio de una serie de tamices en orden descendente, en donde las partículas de diversos tamaños son separadas. La cantidad que se retiene entre los dos tamices indica el tamaño que posee la partícula, este ensayo es aplicable a partículas con tamaño igual o superior a 0.075 milímetros. (Casanova, 2004)

Gráfico 18. *Serie de tamices*

Fuente: interquimica.cl

Un tamiz esta constituido por un recipiente cilíndrico, abierto por arriba y cerrado por la tela del tamiz, que generalmente esta formada por hilos de bronce cruzados ortogonalmente; estas aberturas de diferentes tamaños son diseñadas según las normas ASTM, por medio de pulgadas y números que indican el grado de abertura de la malla del tamiz (Casanova, 2004). Las mallas de clasificación de material más comunes se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. *Tamaño de tamices*

Tamiz (ASTM)	Abertura real (mm)
3''	76,12
1''	25,4
3/8 ''	9,52
Nº4	4,76
Nº10	2
Nº20	0,84
Nº40	0,42
Nº60	0,25
Nº140	0,105
Nº200	0,074

Fuente: Sistema de Clasificación Internacional de Suelos, 2011.

1.9 Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico es la medición de los granos y el cálculo de sus diferentes tamaños por medio de una escala granulométrica, su objetivo es analizar el origen y sus propiedades mecánicas.

Por lo general, los suelos están constituidos por material disperso, pues, los granos son de diferente tamaño y forma estos sistemas se encuentran finamente divididos aunque actúan de manera distinta de forma colectiva que unitaria. Estos sistemas se pueden presentar de las siguientes maneras (Casanova, 2004):

- Sistemas granulares: Se caracterizan por presentar distribuciones de tamaño de partícula entre 2 milímetros y 0.44 milímetros.
- Sistema en polvo: Presentan finas partículas que se encuentran entre los 44 micrómetros y 0.24 micrómetros.
- Sistemas coloidales: Su tamaño de partícula se encuentra entre centenas y decenas de nanómetros, se los puede apreciar con el uso de un microscopio.

“El análisis granulométrico es un proceso de laboratorio que permite determinar la proporción en que participan los granos del suelo en función de sus tamaños. Esta proporción se denomina gradación del suelo” (Escobar, 2016, p. 57).

La finalidad de este análisis es obtener la distribución y clasificación del suelo según el tamaño de partícula, para este proceso generalmente se utilizan tamices de separación estandarizados de orden decreciente. Los resultados se pueden interpretar de forma analítica mediante tablas, porcentajes, gráficas con respecto al peso total (Casanova, 2004).

Método de Análisis Granulométricos

Es la separación del suelo en diferentes fracciones en función de los tamaños que presenta la muestra, esta acción se realiza mediante dos ensayos (Escobar, 2016):

- Tamizado: para las partículas gruesas (gravas y arenas).
- Sedimentación: Para la fracción fina del suelo (limos y arcillas); por su comportamiento plástico no son identificables por tamizado.

Método de tamizado: Una vez seco el material, se pasa la muestra por una serie de tamices que se encuentran en un orden descendente. Con sacudidas horizontales y golpes verticales mecánicos o manuales, se hace pasar el suelo a lo largo de los tamices para luego pesar por separado el material retenido en cada malla.

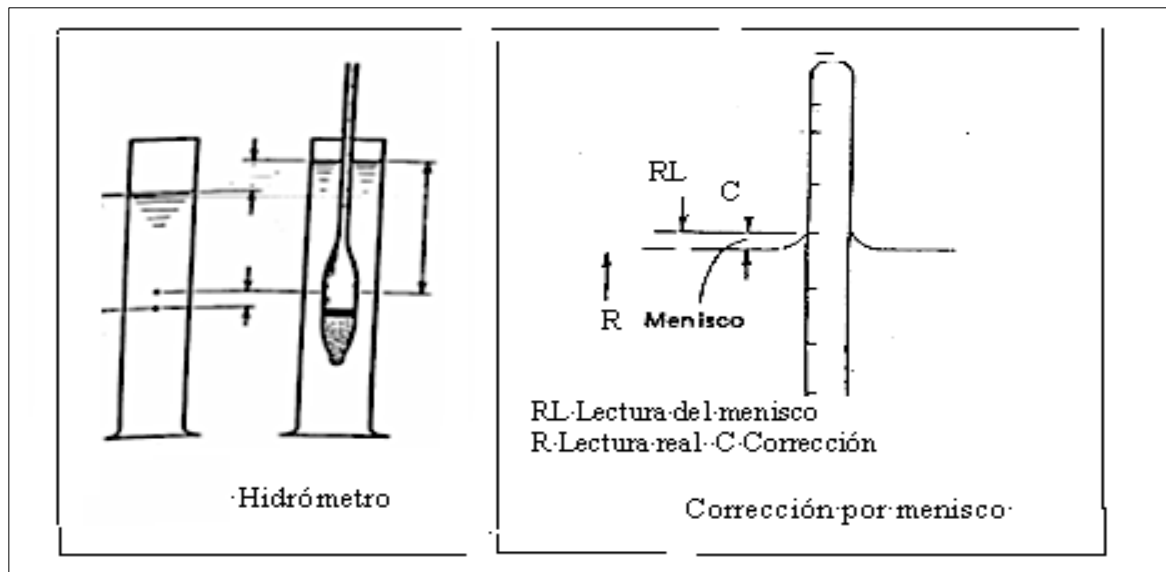
Método de Sedimentación: Se puede realizar por dos procedimientos, el método del hidrómetro y pipeta. Se aplican al suelo fino, es decir, el que queda en el fondo de los tamices y se denomina pasante 200; material constituido por limos y arcillas.

Gráfico 19. *Método de tamizado, serie de tamices*



Fuente: (Santana, 2007)

Gráfico 20. Método de sedimentación, Hidrómetro



Fuente: (Escobar, 2016)

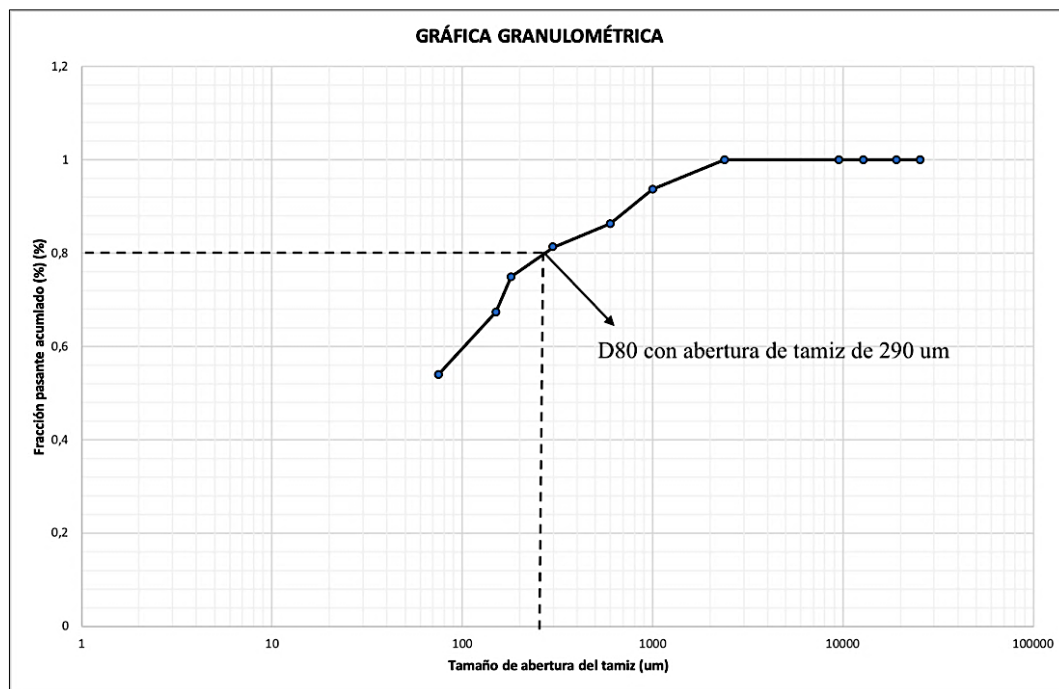
1.10 Representación de la distribución de tamaño de partícula

D80

Es el tamaño de la abertura que forman los hilos ortogonales del tamiz por donde pasa el 80% del material que se está tamizando.

Los análisis de distribución por tamaños, son comúnmente representados en una gráfica logarítmica, donde: en el eje de la ordenada va el % pasante y en el eje de las abscisas el tamaño de partícula (μm). En el caso que se presentan partículas finas usualmente se gráfica una línea bastante recta; En partículas más gruesas se presenta una línea curva y a menudo aproximándose tangencialmente a la línea de pasante 100% en la parte superior del gráfico (Bond, 1952).

Nota: Para el cálculo del D80, se debe graficar en un plano cartesiano el tamaño de abertura del tamiz Vs. la fracción de pasante acumulado. Se identifica el 80% en el eje de las ordenadas, se prolonga una línea perpendicular hasta interceptar con la línea granulométrica; posteriormente se gráfica una línea perpendicular al eje X desde la línea granulométrica hasta interceptar con el eje de las abscisas. La intersección que se produce entre estas líneas nos permite identificar el tamaño del tamiz.

Gráfico 21. *Gráfico Granulométrico.*

Elaborado por: José García & Josue Muñoz

Módulo de distribución de Gates-Gaudin-Shuchmann

La función de Shuchmann es la más utilizada en América para la obtención de la ecuación de distribución de tamaños acumulados se utiliza la ecuación de Shuchmann para materiales sólidos de la cominución:

$$W = C * x^m$$

Siendo, W el % de peso retenido en el tamiz de abertura x y pasante en el tamaño mayor de abertura P_x , en una serie geométrica de tamices. C y m son constantes.

Una de las desventajas de la ecuación original de Shuchmann es que la constante C no tiene una interpretación física simple. El valor varía con el ratio del tamiz p, así como con el material cuya distribución de tamaños se está expresando. Es decir, cuando se usa esta ecuación hay que adoptar y especificar un sistema particular para la serie geométrica de tamaños (Álvarez, 2010).

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 de

% 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).

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

Donde:

y = % de pasante acumulado para un tamaño x .

x = tamaño de la malla.

k = módulo de tamaño.

m = módulo de distribución.

La ecuación que se utiliza en estos casos:

$$\log y = m \log x + cte$$

Como m y k son constantes, es obvio que la gráfica de $\log y$ (logaritmo % pasante acumulado) versus $\log x$ (logaritmo tamaño) da una línea recta de pendiente m . Además, cuando $y = 100\%$, $x = k$.

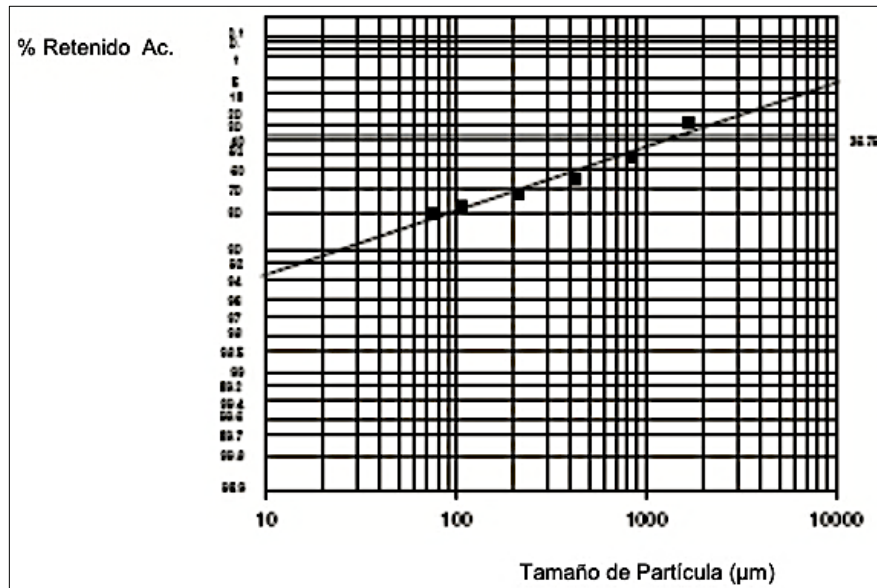
Nota: Para el desarrollo de este modelo, los valores que se obtendrán en el eje de las abscisas = $\text{Log}(x)$, en donde x es el tamaño de abertura de la malla; el eje de la ordenada = $\text{Log}(F(x))$, en donde $F(x)$ es el % pasante acumulado.

Módulo 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.

Gráfico 22. *Diagrama Rosin-Rammler*



Fuente: (Laércio, 2000).

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:

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

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:

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

Nota: 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 = $\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\text{Pasante Acumulado}))$.

1.11 Minerales sulfurados

Los sulfuros son minerales que se caracterizan por presentar una composición oxigenada de metales y de no metales con el azufre. Estos minerales se caracterizan por presentar: aspecto y brillo metálico, son opacos, altas densidades, índices de refracción muy grandes y su gran conductividad tanto eléctrica como calorífica. Son de interés económico ya que la mayoría de ellos presentan en sus menas metales de beneficio comercial. Los tipos de enlaces de estos minerales son covalentes y metálicos en su mayoría, llegando a acercarse al nivel de aleación, sin embargo, algunos sulfuros tienen carácter iónico.

Gráfico 23. *Sulfuros*



Fuente: Museo del Servicio Geológico Mexicano.

Con mayor frecuencia los minerales de sulfuro se encuentran en las zonas hidrotermales, tanto hipotermas¹, mesotermas² y epitermas³. En los yacimientos hidrotermales es normal que existan varios sulfuros entre ellos: la galena, la pirita, la calcopirita o la blenda (Marcos, 2010).

Clasificación

Los minerales se clasifican en función de su composición química y su estructura interna, la cual, determina sus propiedades físicas. Conforme con la composición química los minerales se clasifican según el anión o grupo aniónico dominante. (SGM, 2017)

Existen dos divisiones generalizadas para los sulfuros:

- Sulfuros metálicos: son aquellos que los metales de transición que se combinan con el azufre. Ejemplos: Acanita Algodonita Altaíta Arsenopirita Bismutina Bravoíta Breithauptita Calcopirita Calcosina Cinabrio Cobaltina Colusita Covellina Cubanita Digenita Discrasita Esfalerita.

Gráfico 24. *Cinabrio HgS*



Fuente: Mineralesyrocas.com

¹ Las aguas termales son aguas con una elevada cantidad de minerales que brotan del suelo de manera natural y a una temperatura que supera en 5°C la temperatura registrada en la superficie.

² Las aguas cuya temperatura al surgir >30° y < 50°C.

³ Define la parte superior de los sistemas hidrotermales naturales.

- Sulfosales: minerales formados por combinaciones no oxigenadas de metales o metaloides con azufre, entre los mas comunes arsénico y antimonio. Ejemplos: la *pirita* (bisulfito de hierro); *calcopirita* (sulfuro de hierro y cobre); *galena* (sulfuro de plomo); *blenda* (sulfuro de cinc); *cinabrio* (sulfuro de mercurio); *antimonita* (sulfuro de antimonio) y *rejalgar* (sulfuro de arsénico).

Gráfico 25. *Sulfasales*



Fuente: Mineralesyrocas.com

Sin embargo, esta división es algo artificial y una alternativa es distinguir entre sulfuros simples y complejos. En general las estructuras de los sulfuros simples tienen el azufre y otros elementos no metálicos formando un empaquetado compacto y el metal ocupando los huecos, se distinguen entre ellos cuando los espacios tetraédricos, octaédricos o ambos están ocupados. Mientras tanto, la mayoría de los sulfuros complejos consiste de bandas, grupos y capas de unidades de sulfuros simples formando un empaquetado compacto y unidas por enlaces tipo molecular fuertemente direccionales.

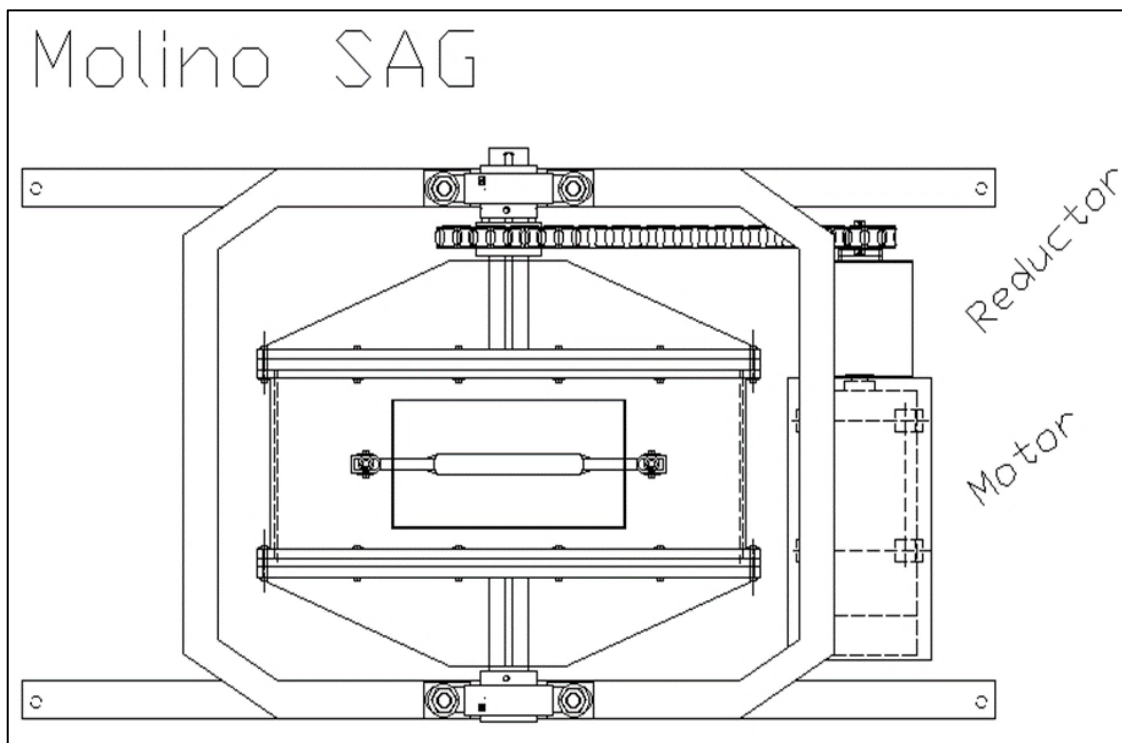
CAPÍTULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.1 Diseño

Para el diseño del molino SAG de laboratorio y las condiciones de operación para su funcionamiento óptimo, se realizará los cálculos mediante ecuaciones de molienda, de acuerdo a postulados empíricos antes descritos.

La construcción de este molino toma como base una alimentación mono tamaño de 1 pulgada. La conminución será en seco con material de una mena sulfurada.

Gráfico 26. *Esquema molino SAG de laboratorio*



Fuente: José García

Elaborado por: José García & Josue Muñoz

Work Index de trabajo

En este trabajo se realizara los ensayos con material sulfurado, por tanto se toma un valor de 11, tomando como referencia a (Austin & Concha, 1994).

Gráfico 27. *Índices de Trabajo de Bond Típicos*

Material	Indice de Trabajo W_{iT} , kWh/ton métrica *
Arena de Zirconio	28
Bauxita	11
Carburo de Silicio	32
Clinker de cemento	16
Cuarzo	16
Corundo	33
Dolomita	14
Feldespatos	13
Ferrosilicio	12
Pedernal	32
Fluorespatos	11
Granito	12
Roca de yeso	8
Hematita	15
Caliza	15
Magnetita	12
Mineral de Cobre	13
Roca de fosfato	12
Pirita	11

Fuente: (Austin & Concha, 1994).

Cálculo de la capacidad del molino

Para realizar el cálculo de la capacidad del molino se toma en cuenta las dimensiones del mismo y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V_T = \pi * r^2 * L$$

Donde:

V_T = Volumen total del molino, cm^3

r = Radio interno del molino, cm

L = Longitud interna del molino, cm

Cálculo

$$V_T = \pi * 30^2 * 22$$

$$V_T = 62\,203.68\text{ cm}^3$$

Cálculo del volumen de bolas

Para realizar el cálculo del volumen de bolas se tomó como referencia 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

$$V_b = 0.12 * V_T * (1 - 0.48)$$

Cálculo

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

$$V_b = 3\,881.50\text{ cm}^3$$

Cálculo de la masa de bolas

La densidad de las bolas metálicas concierne a 7.85 gr/cm³

$$\rho = \frac{m}{V_b}$$

Cálculo

$$m = 7.85 * 3\,881.50$$

$$m = 30\,469\text{ gr}$$

Cálculo del tamaño máximo de bolas a cargarse en el molino

El cálculo del tamaño de máximo de bolas para un molino SAG es fundamental para la resolución de parámetros consiguientes y para la distribución de bolas.

$$B = \sqrt{\frac{F80 * Wi_T}{k * V_c}} * \sqrt{\frac{S}{D}}$$

Donde:

B = Diámetro de bola, pulg

$F80$ = Tamaño en micrones que pasa el 80% de la alimentación

Wi_T = Índice Work Index de trabajo, KWh/Ton métrica

k = Constante para molinos SAG que es 210

V_c = % Velocidad crítica

S = Gravedad específica del mineral, lbm/in^3

D = Diámetro interno del molino, pulg

Cálculo

$$B = \sqrt{\frac{25400 * 11}{210 * 75}} * \sqrt{\frac{0.0975}{1.9685}}$$

$$B = 2 \text{ pulgadas}$$

Cálculo de distribución de bolas en el molino SAG

Según la propuesta por Taggart (como se citó en Jaico, 2009) se considera una distribución de 40, 30, 20, 10 % (Anexo 1).

Tabla 2. *Distribución de bolas*

Distribución de bolas (Pulgadas.)	% de Distribución	Peso (Kg)	Nº de Bolas
2	40	12	23
1 ¾	30	9	25
1 ½	20	6	26
1	10	3	45
Total		30.46	119

Realizado por: José García & Josue Muñoz

Gráfico 28. *Carga de bolas molino SAG de laboratorio*



Fuente: Josue Muñoz

Cálculo de la velocidad crítica

En el cálculo de la velocidad crítica nos basaremos en la formula dispuesta por (Austin & Concha, 1994).

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

Donde:

V_c = Velocidad crítica, RPM

D = Diametro interior del molino, m

d = Diametro máximo de bolas, m

Cálculo

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

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

Cálculo de la velocidad de rotación

Para un molino de bolas la Velocidad de operación está dada entre el 70% – 85% de la velocidad Critica.

Hallamos la velocidad de operación, considerando el 75% de la Velocidad Critica.

$$V_r = V_c * 0.75$$

Cálculo

$$V_r = 43 \text{ RPM}$$

Cálculo de la potencia del motor

Para el cálculo de la potencia del motor se toma los parámetros antes mencionados, según (Blanco, 2014) la fórmula es:

$$N = c * W * Rg * n$$

Donde:

N = Potencia bruta del molino, en kW

c = Constante cuyo valor es de $\frac{1}{1200}$ para SAG, AG y molinos de pebbles

W = Peso de la carga, en kg

Rg = Distancia del centro de gravedad al eje del molino, en m

n = Velocidad de rotación del molino, en RPM

Peso de la carga

$$W = W_b + W_c + W_m$$

Donde:

W = *Peso de la carga, kg*

W_b = *Peso de bolas, kg*

W_c = *Peso de la carga a moler, kg*

W_m = *Peso del molino, kg*

Cálculo

$$W = 30.4 + 70 + 150$$

$$W = 250.4 \text{ kg}$$

Distancia del centro de gravedad al eje del molino

$$Rg = \frac{4 * r}{3 * \pi}$$

Donde:

Rg = Distancia del centro de gravedad al eje del molino, m

r = Radio del cilindro, m

Cálculo

$$Rg = \frac{4 * 0.3}{3 * \pi}$$

$$Rg = 0.1273 \text{ m}$$

Potencia del motor

Cálculo

$$N = \frac{1}{1200} * 250.4 * 0.1273 * 43$$

$$N = 1.14 \text{ kW} = 1.5 \text{ HP}$$

2.2 Construcción del molino SAG de laboratorio**Selección de materiales**

La construcción del molino SAG será metálica, para satisfacer las condiciones de trabajo a las cuales será sometido el equipo. Considerando que este medio moledor estará sujeto a un gran esfuerzo mecánico.

Material para el cilindro del molino

El cilindro está dispuesto con una armadura de acero de 8 mm de espesor, la cual fue rolada por medio de ingeniería mecánica, hasta lograr un diámetro interno de 60 cm. Este molino cuenta con un revestimiento cilíndrico interno de 5 mm, que puede ser reemplazado conforme al desgaste que sufra por impacto y fricción.

Material para las paredes laterales del molino

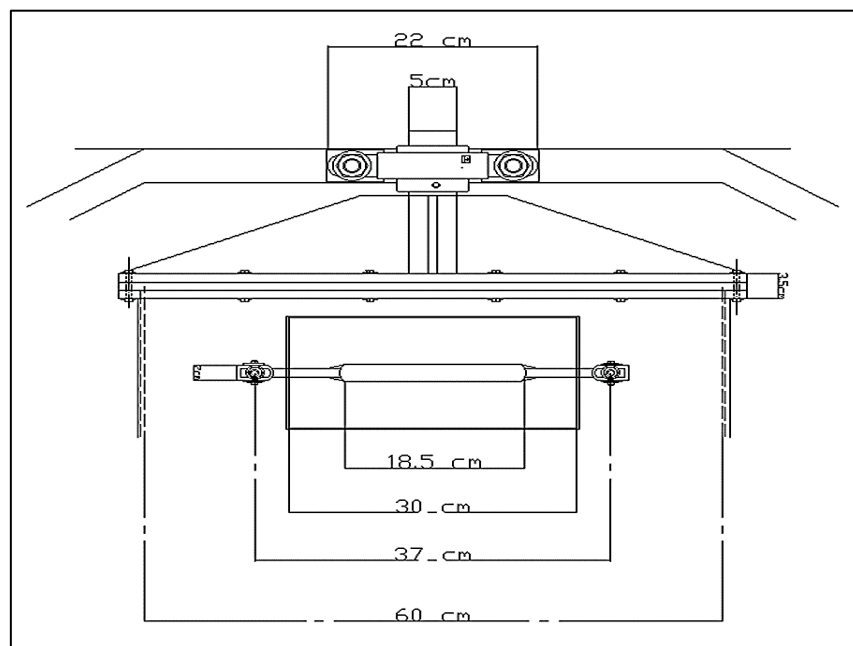
Para las paredes laterales del cilindro se utilizó planchas de acero ultrarresistente de 8 mm de espesor, ya que sobre estas se acopla el eje de rotación del molino, soportando cargas y esfuerzos mecánicos considerables de hasta 400 kg en su punto máximo.

Geometría del molino SAG de laboratorio

Para el dimensionamiento del molino SAG son necesarios datos tales como: diámetro del molino, longitud, Work Index de trabajo, diámetro de las bolas, densidad de las bolas, centro de gravedad del medio de molienda al eje del molino y la gravedad específica del material.

Este molino cuenta con diámetro interno de 60 cm y longitud de 22 cm. La relación que existe entre D/L es de 2.72 que se encuentra dentro de los parámetros según (Garrido, 2004).

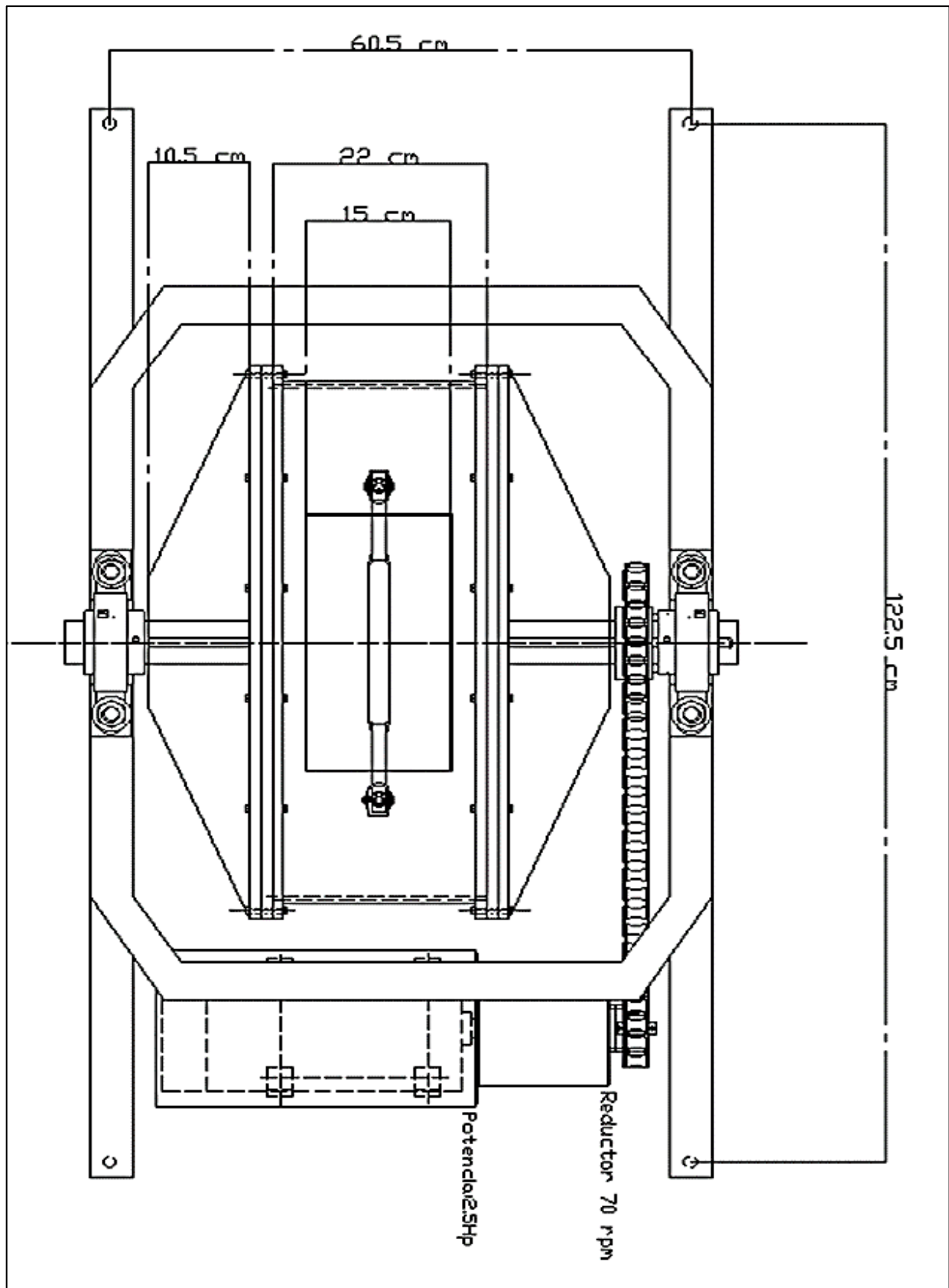
Gráfico 29. Dimensiones del molino SAG de laboratorio



Fuente: José García

Elaborado por: José García & Josue Muñoz

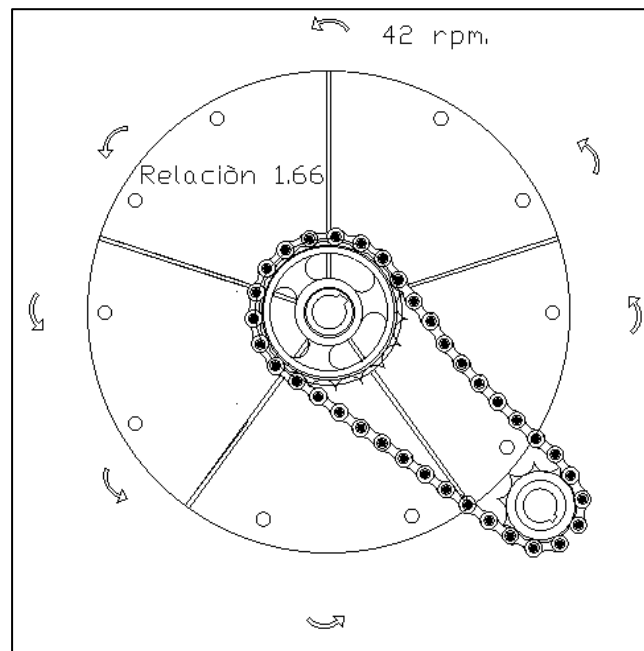
Gráfico 30. Dimensiones del molino SAG de laboratorio



Fuente: José García

Elaborado por: José García & Josue Muñoz

Gráfico 31. *Engranajes Reductor eje del molino*



Fuente: José García

Elaborado por: José García & Josue Muñoz

Para lograr la velocidad de rotación requerida se colocó al molino una relación de engranajes de 1.66 (engranaje de molino/engranaje de reductor), como se muestra en el Gráfico 31.

Gráfico 32. *Molino SAG de laboratorio*



Fuente: José García

CAPÍTULO III: EXPERIMENTACIÓN

3.1 Descripción de la muestra

Lugar de obtención de la muestra

La muestra será tomada de la concesión minera Quebrada Fría, mina Jesús del Gran Poder, que está ubicada en la provincia del Azuay, cantón Camilo Ponce Enríquez, comunidad La Fortuna (Anexo 2).

Método de obtención de la muestra

La muestra es recolectada de un bloque de explotación del túnel 5, aleatoriamente de la roca extraída (Anexo 3).

Cantidad de muestra obtenida

Para los ensayos que se realizarán posteriormente, se tomó una muestra total de 850 Kg en un área de 10 m² (Anexo 4).

3.2 Caracterización de la muestra

La muestra con la que se trabajará presenta las siguientes características (Anexo 5):

- Color: Gris oscuro.
- Tamaño: Heterogéneo, en su mayor parte entre 1 pulgada y 3 pulgada.
- Dureza: 7 en la escala de Mohs.
- Tenacidad o cohesión: Frágil.
- Fractura: Ganchuda (fractura tosca e irregular con bordes agudos y dentados).
- Morfología: presenta bordes irregulares.
- Densidad: 2.7 gr/cm³.

Calculo de la densidad

Para el cálculo de la densidad utilizaremos el método del picnómetro.

Instrucciones:

Paso 1: Pesar el picnómetro vacío (M_1).

Paso 2: Pesar el picnómetro con la muestra (M_2).

Paso 3: Calcular el peso de la muestra (M_A).

$$M_A = M_2 - M_1$$

Paso 4: Pesar el picnómetro lleno de agua (P_A).

Paso 5: Pesar el picnómetro con la muestra y lleno de agua (P_T).

Paso 6: Calcular el volumen de agua desalojada (volumen de muestra).

$$V_A = M_A + P_A - P_T$$

Paso 7: Calcular la densidad.

$$\rho = \frac{M_A}{V_A}$$

Resultado

Se realizó tres cálculos de densidad: 2.72; 2.74; 2.68 gr/cm³ respectivamente, posteriormente determinamos 2.7 gr/cm³ producto del promedio de los ensayos realizados. El cual coincide con el informe de caracterización por la mina (Anexo 6).

3.3 Preparación de la muestra

Para la preparación de la muestra es necesario realizar trabajos previos a la dosificación, entre ellos la trituration mineral y tamización.

Trituración

Para la fragmentación mineral se utiliza la trituradora de mandíbulas del laboratorio de minas de la Universidad del Azuay (Anexo 7).

Tamización

Todo el mineral previamente triturado se tamiza entre la malla de $\frac{3}{4}$ pulgada. y $\frac{1}{2}$ pulgada. Con el fin de obtener una muestra homogénea de $\frac{1}{2}$ pulgada (Anexo 8).

Factor de esponjamiento

$$F_e = V_c / V_t * 100$$

Volumen de vacío

$$V_c = V_t - V_w$$

Donde:

$V_c = \text{Volumen de vacío, Lt}$

$V_t = \text{Volumen total, Lt}$

$V_w = \text{Volumen de agua, Lt}$

Cálculo

Se tomó un recipiente de 9 litros en el cual se añadió material completando el volumen del mismo; para el cálculo de vacíos se añade agua hasta saturar la muestra completamente (5 Litros) (Anexo 9).

$$V_c = 9 - 5$$

$$V_c = 4 \text{ Lt}$$

$$F_e = 4/9 * 100$$

$$F_e = 44 \%$$

3.4 Dosificación de la muestra

Posteriormente a la tamización se obtuvo un total de 180 kg de muestra homogénea de $\frac{1}{2}$ pulgadas. La cual se distribuirá en función de su peso y volumen para los ensayos pertinentes; un factor a considerar es el esponjamiento, el cual fue previamente calculado.

Tabla 3. *Dosificación de la muestra*

Ensayo	% capacidad de carga mineral	Volumen del molino que ocupa la carga mineral (%)	Alimento de la carga mineral (Kg)	Fe (%)	Tiempo de residencia (min)
1	100	70	35	44	15
2	70	49	30	44	15
3	60	42	25	44	15
4	50	35	20	44	15

Realizado por: José García & Josue Muñoz

3.5 Ejecución experimental de la molienda

Descripción general del factor de llenado

En los siguientes ensayos se determinará el comportamiento de la conminución mineral de una mena sulfurada, este factor afecta directamente al rendimiento del molino; en la práctica está comprendido entre el 40% y 55% del volumen total del molino (mena y medios molidores). El molino presenta carga máxima de 70 Kg, utilizando el 55% de factor de llenado, sin embargo, para una molienda eficiente el factor de llenado debe estar comprendido entre el 50% y 70% de esta carga máxima, es decir, entre 30 Kg y 35 Kg respectivamente (según Arriaga como se citó en Reyes, 2008).

Cronograma de actividades

Se realizó 4 ensayos de 15 minutos cada uno con alimento mono tamaño de $\frac{1}{2}$ " ., con diferentes cargas de alimento.

Tabla 4. *Cronograma de actividades*

Ensayo	Tamaño (")	Carga (kg)	% capacidad de carga mineral	Tiempo de residencia (min)
1	1/2	35	100	2,5 ; 5 ; 10 ; 15
2	1/2	30	70	2,5 ; 5 ; 10 ; 15
3	1/2	25	60	2,5 ; 5 ; 10 ; 15
4	1/2	20	50	2,5 ; 5 ; 10 ; 15

Realizado por: José García & Josue Muñoz

Recopilación de información

Se realizó 4 ensayos con el mismo intervalo de tiempo y diferentes cargas de alimento. La muestra se recolectó por medio de un recipiente de muestreo⁴.

Tabla 5. *Ensayo 1*

Tamaño de alimento (")	Alimento (kg)	Tiempo de residencia (min)	Carga de bolas (kg)	Muestra Recolectada (gramos)
0.5	20	2,5	30.46	1726
0.5	20	5	30.46	1558
0.5	20	10	30.46	1626
0.5	20	15	30.46	1821

Realizado por: José García & Josue Muñoz

⁴ Recipiente de estructura metálica diseñado exclusivamente para la recolección de muestra del molino SAG de laboratorio.

Tabla 6. *Ensayo 2*

Tamaño de alimento (")	Alimento (kg)	Tiempo de residencia (min)	Carga de bolas (kg)	Muestra Recolectada (gramos)
0.5	35	2,5	30.46	1954
0.5	35	5	30.46	1943
0.5	35	10	30.46	1942
0.5	35	15	30.46	1935

Realizado por: José García & Josue Muñoz

Tabla 7. *Ensayo 3*

Tamaño de alimento (")	Alimento (kg)	Tiempo de residencia (min)	Carga de bolas (kg)	Muestra Recolectada (gramos)
0.5	30	2,5	30.46	1819
0.5	30	5	30.46	2087
0.5	30	10	30.46	2020
0.5	30	15	30.46	2119

Realizado por: José García & Josue Muñoz

Tabla 8. *Ensayo 4*

Tamaño de alimento (")	Alimento (kg)	Tiempo de residencia (min)	Carga de bolas (kg)	Muestra Recolectada (gramos)
0.5	25	2,5	30.46	1886
0.5	25	5	30.46	2035
0.5	25	10	30.46	2081
0.5	25	15	30.46	2036

Realizado por: José García & Josue Muñoz

Gráfico 33. *Recolección de muestras*



Fuente: José García

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados

La operación del molino SAG de laboratorio funciona a circuito abierto y sus variables operacionales fueron constantes en todos los ensayos. A excepción del factor de llenado.

Las características de los ensayos son los siguientes:

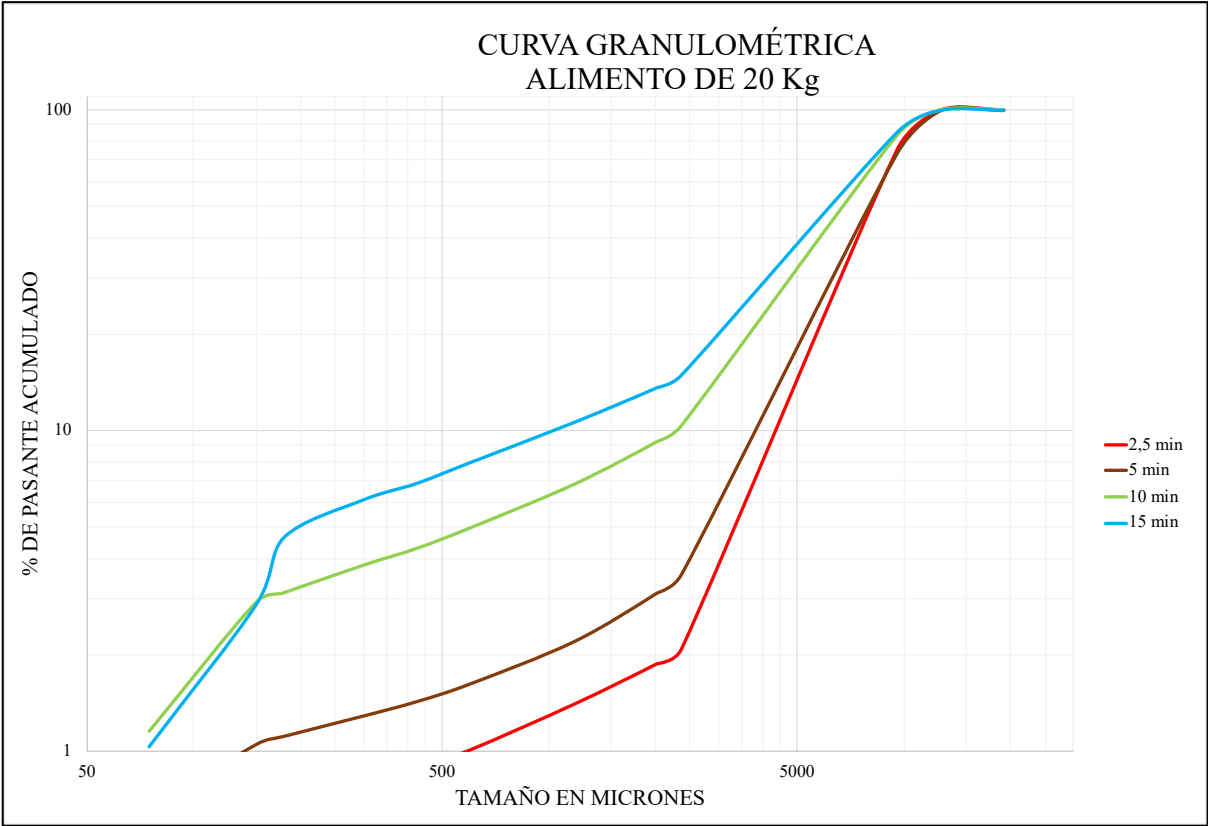
- Molienda seca
- Velocidad de rotación: 43 RPM
- Potencia de motor: 2,5 HP
- Carga de medios moledores: 30, 46 Kg
- Distribución de medios moledores constante
- Muestreo en períodos de tiempo constantes

Posterior a los ensayos pertinentes se utilizó el modelo de distribución granulométrico de Gates-Gaudin-Shuchmann, ya que mediante este modelo se puede obtener la ecuación de distribución de tamaño para materiales sólidos de la molienda. El valor varía con la ratio de tamiz, así como con el mineral cuya distribución se está expresando; es decir, cuando se usa esta ecuación se adapta y se especifica a un sistema particular para la serie geométrica de tamices.

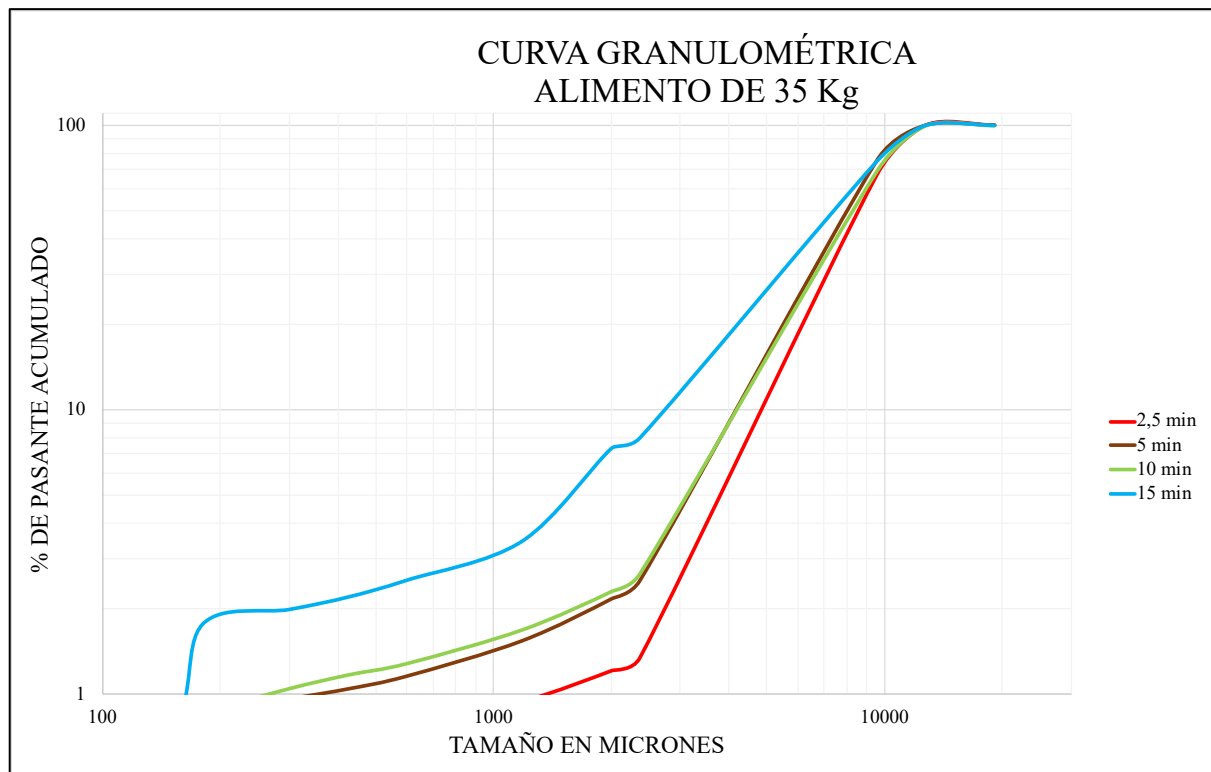
La ventaja de utilizar este modelo con respecto a otros, es que se puede calcular con un menor margen de error la distribución del tamaño de las partículas al trabajar con un número limitado de tamices.

Los resultados experimentales son mostrados mediante gráficas en los cuales se representa las curvas granulométricas de los ensayos con diferentes factores de llenado en intervalos constantes de tiempo.

Gráfico 34. *Ensayo 1*

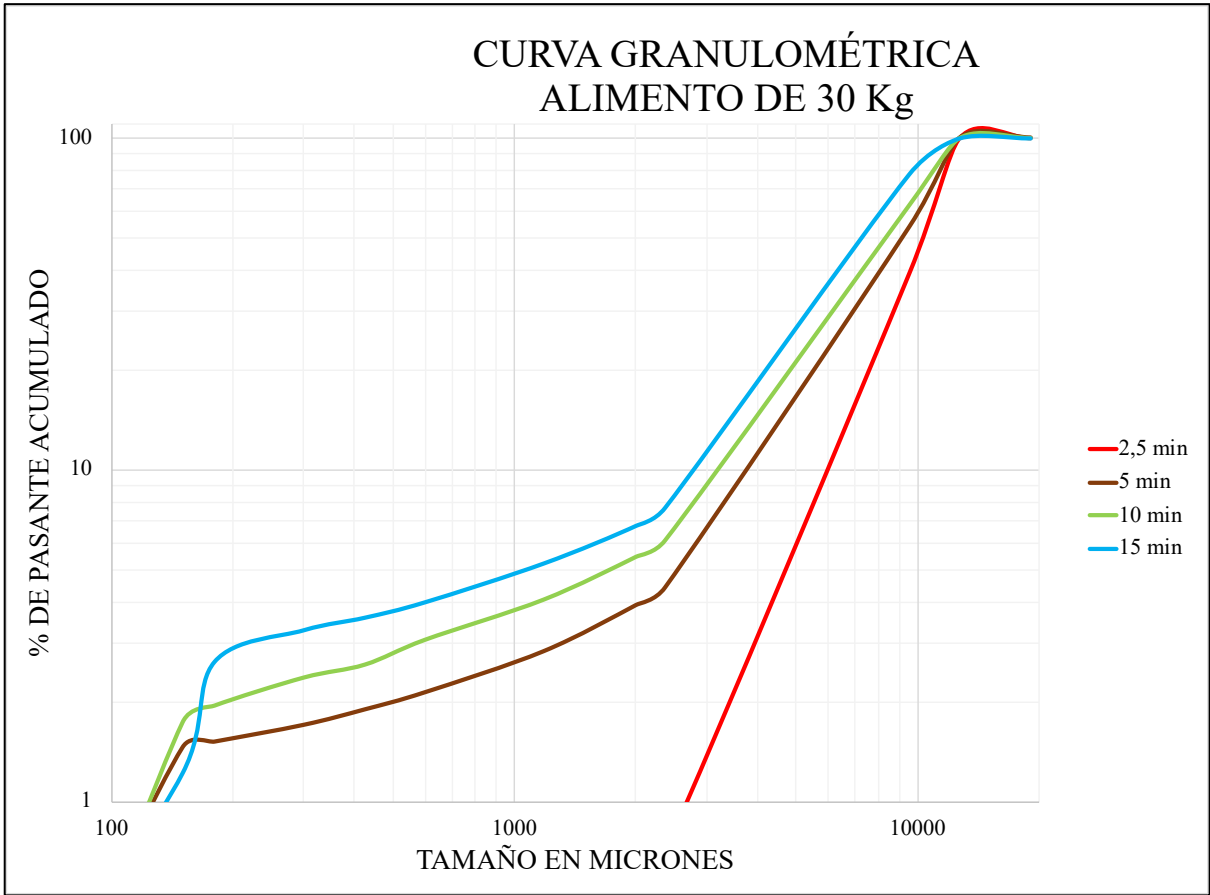


Realizado por: José García & Josue Muñoz

Gráfico 35. *Ensayo 2*

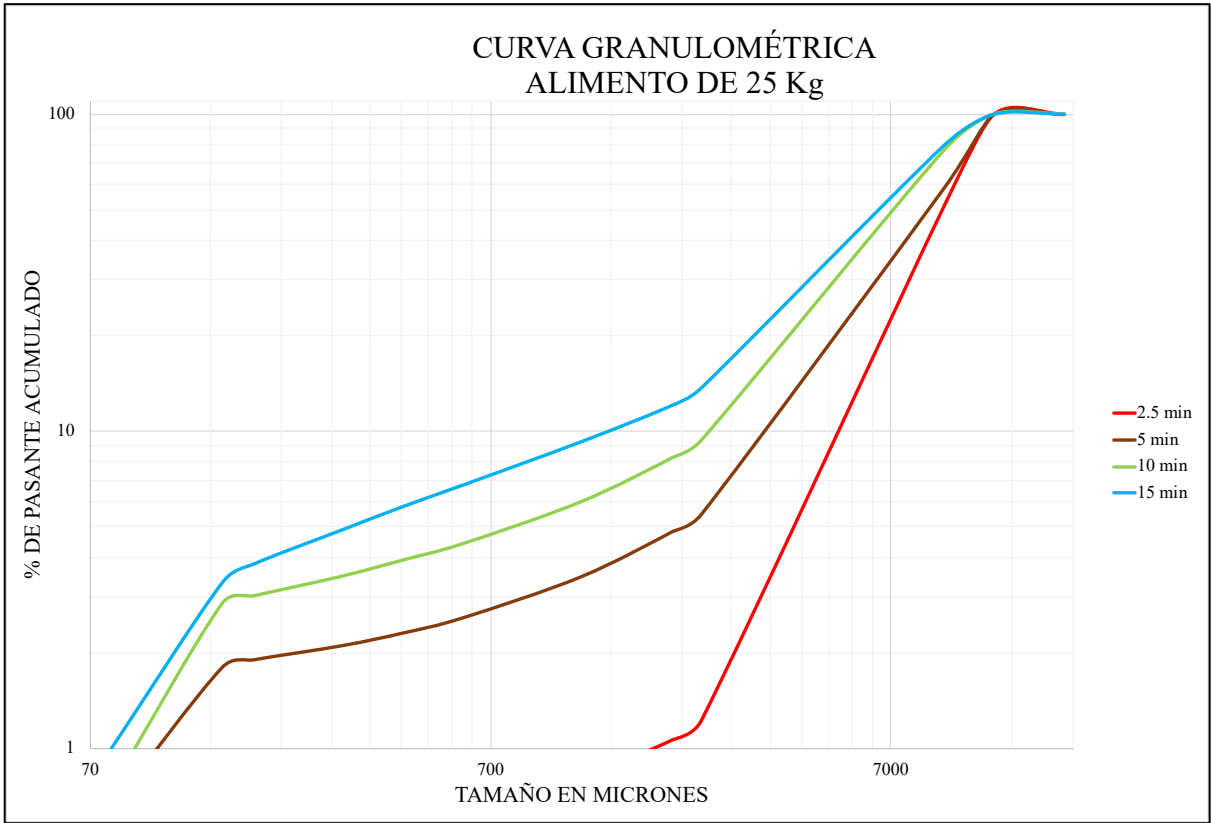
Realizado por: José García & Josue Muñoz

Gráfico 36. *Ensayo 3*



Realizado por: José García & Josue Muñoz

Gráfico 37. *Ensayo 4*

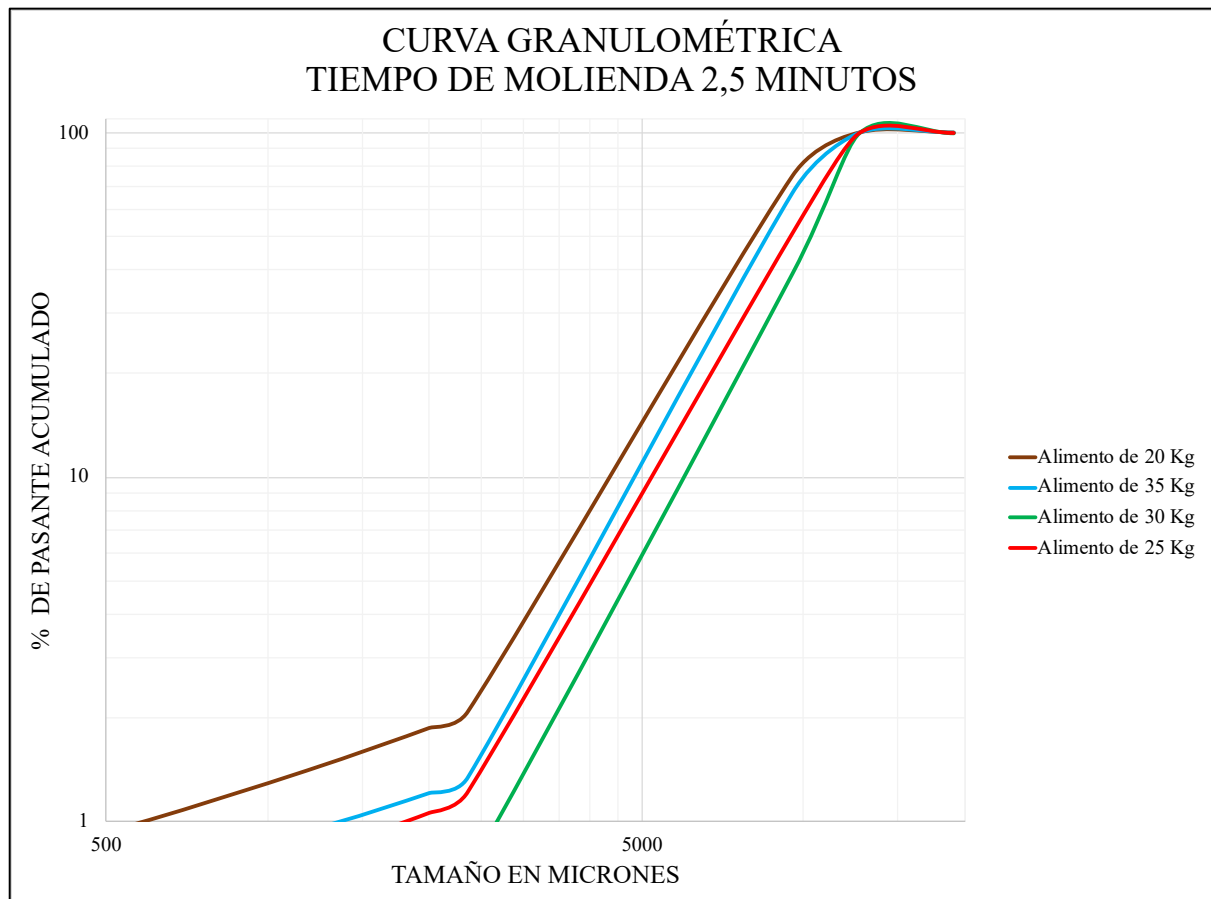


Realizado por: José García & Josue Muñoz

4.2 Análisis

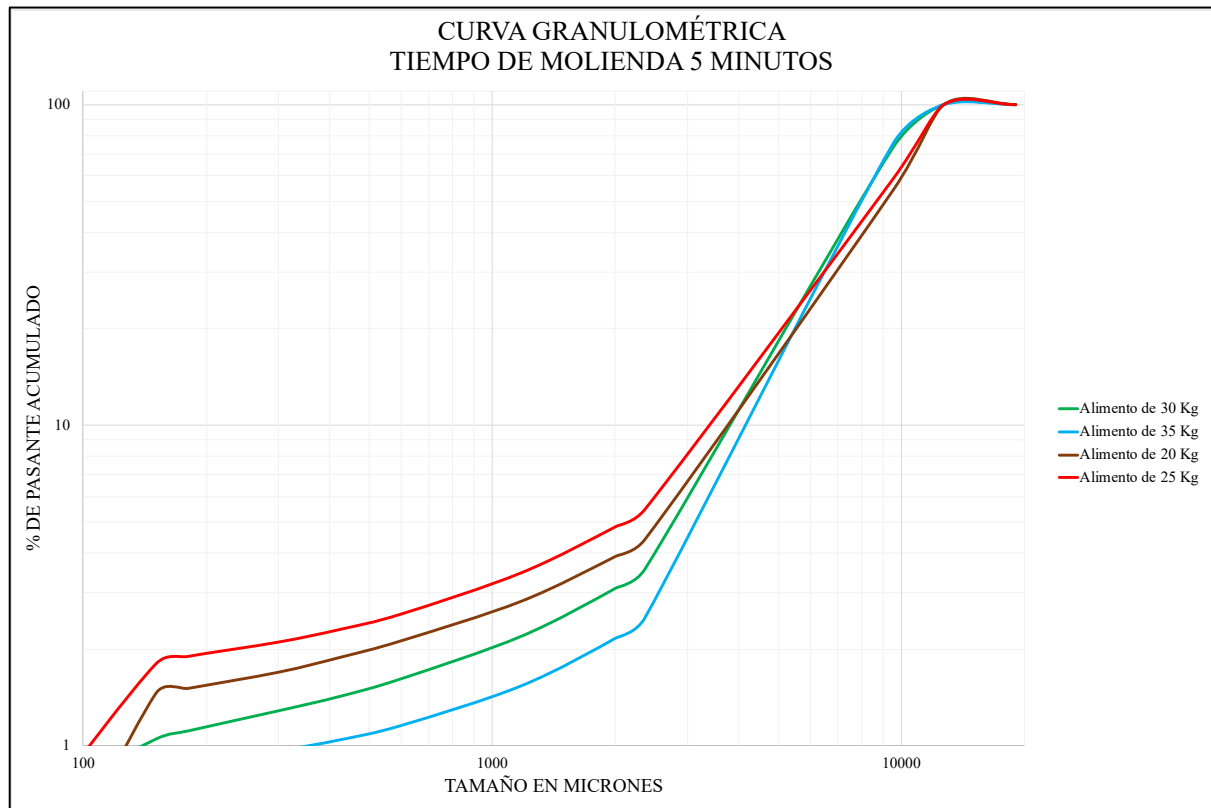
Basándonos en el modelo de Gates-Gaudin-Shuchmann y los resultados de las curvas granulométricas se realizaron gráficas comparativas de los ensayos realizados en función del tiempo. Como se presenta a continuación:

Gráfico 38. *Análisis granulométrico a los 2,5 minutos con diferentes cargas de alimento*



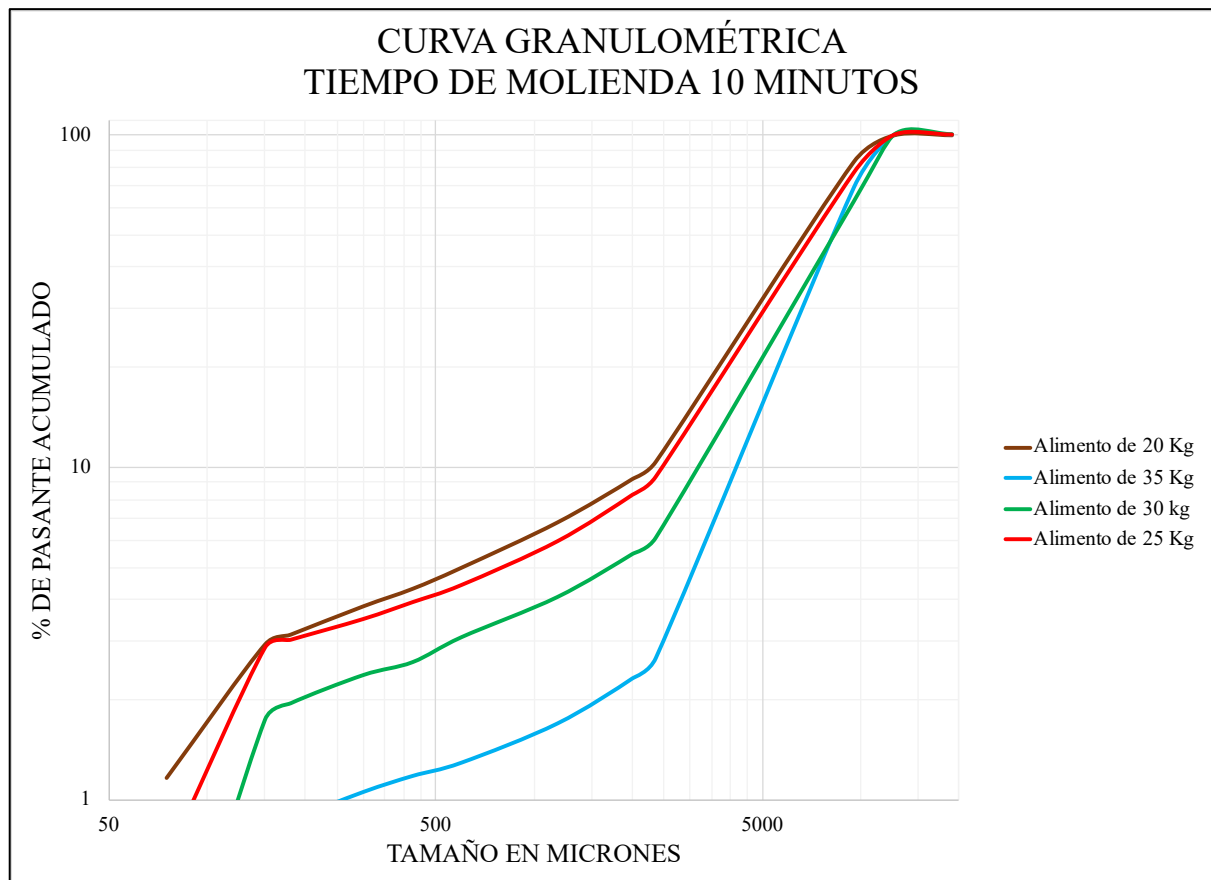
Realizado por: José García & Josue Muñoz

En el gráfico 25, se observa que la distribución granulométrica se enfatiza en materiales gruesos, entre las 8 000 micras y 12 000 micras. En este caso particular las tendencias en las curvas son semejantes para todos los ensayos; no presenta relevancia la fracturación mineral. Es perceptible que en los primeros minutos de molienda los medios moledores y el material a moler tienden a distribuirse de tal manera que las partículas gruesas y medios moledores se ubican por encima de las partículas finas.

Gráfico 39. *Análisis granulométrico a los 5 minutos con diferentes cargas de alimento*

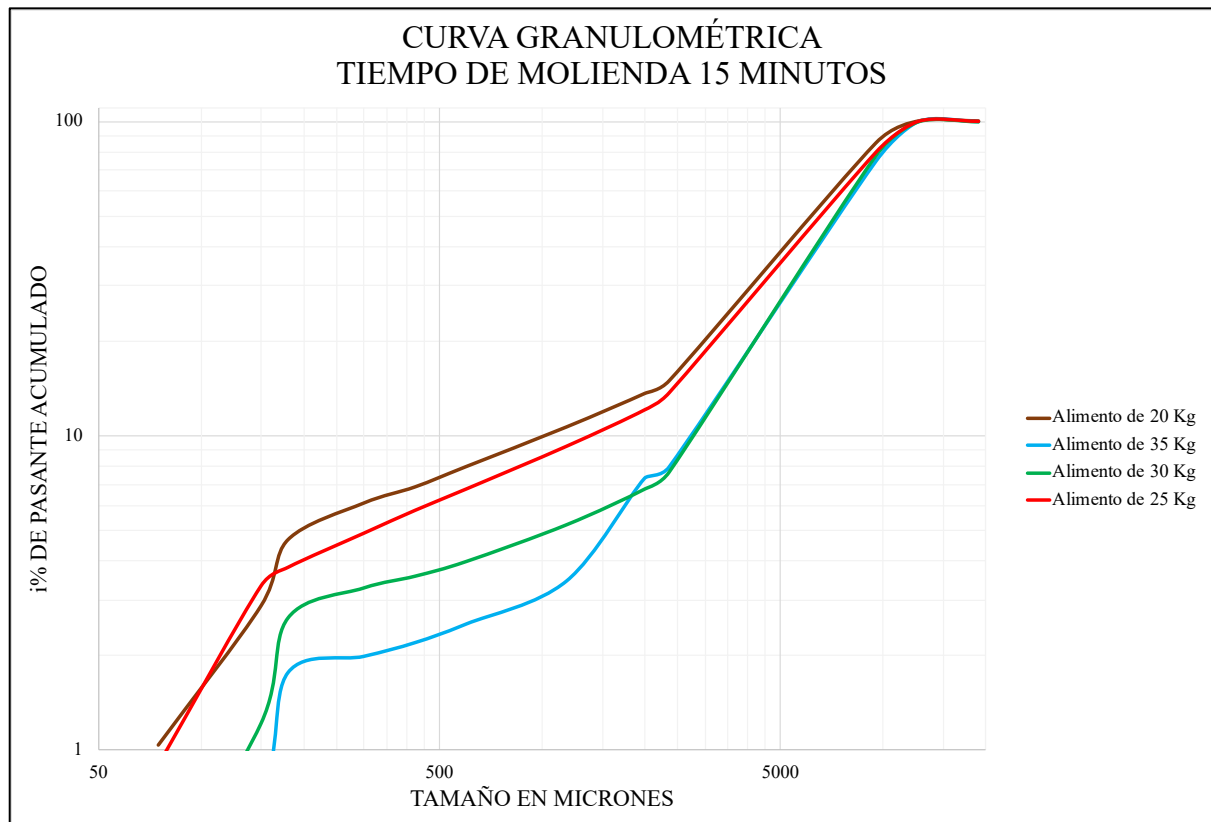
Realizado por: José García & Josue Muñoz

En el gráfico 26, la curva granulométrica de 25 Kg y 20 Kg evidencian el incremento de disgregados minerales, esto se debe a que en este intervalo de tiempo se manifiestan los mecanismos de fractura: impacto, abrasión y astillamiento. La curva granulométrica de 30 Kg y 35 Kg la disgregación mineral es mínima, es decir, que entre los mecanismos de fractura solo se presenta la abrasión, debido a que la distribución entre los medios molidores y la carga mineral aún no se produce.

Gráfico 40. *Análisis granulométrico a los 10 minutos con diferentes cargas de alimento*

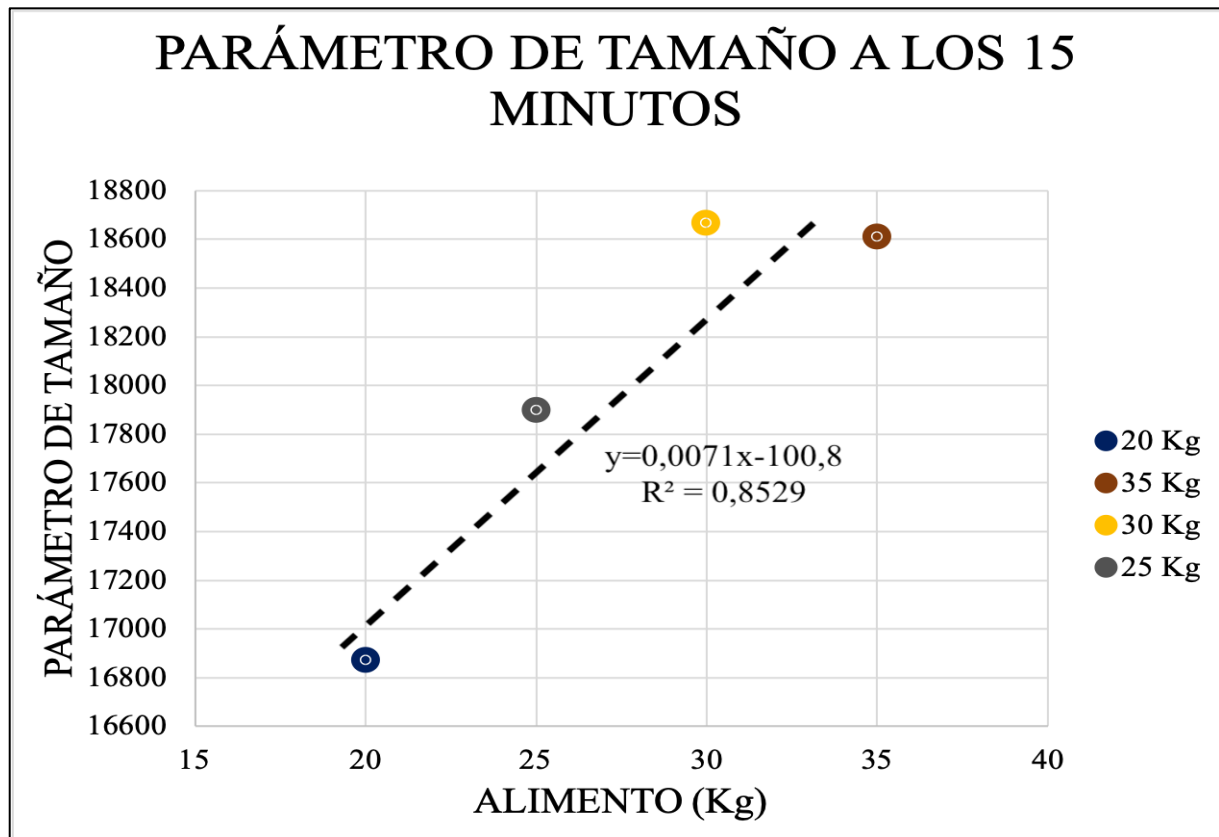
Realizado por: José García & Josue Muñoz

En el gráfico 27, al igual que en el anterior el alimento de 20 Kg y de 25 Kg presentan una misma tendencia en sus curvas granulométricas, así también el aumento de las partículas finas y gruesas. La conminución mineral en los ensayos de 30 Kg y 35 Kg aún no se presenta el efecto cascada ya que se requiere mayor tiempo para la distribución entre los medios moledores y la carga mineral.

Gráfico 41. *Análisis granulométrico a los 15 minutos con diferentes cargas de alimento*

Realizado por: José García & Josue Muñoz

En el gráfico 28, las curvas granulométricas presentan una misma tendencia semejante para la distribución de partículas entre 20 Kg y 25 Kg, sin embargo, para los ensayos con mayor carga se observa un aumento de disgregación mineral tanto en partículas finas y gruesas, esto quiere decir que después de 10 minutos se ha logrado la distribución entre los medios molidores y la carga mineral. Posterior a esto se produce el efecto catarata, mecanismo de fractura que provoca el impacto entre medios molidores y partículas gruesas.

Gráfico 42. *Parámetro Ksch*

Realizado por: José García & Josue Muñoz

En el gráfico 29, se evidencia que la disminución de partículas minerales a los 15 minutos de molienda es más óptima con un factor de llenado de alimento de 20 Kg. La distribución de su tamaño es de 16 900 micrones, mientras que su antecesor es de 17 900 micrones (25 Kg de alimento). Si se tomará como factor predominante la distribución de los tamaños, la carga óptima sería de 20 Kg, sin embargo, al tomar en cuenta los demás parámetros, las curvas granulométricas y el constante consumo energético no sería aprovechado como es en el caso de 25 Kg.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La presente tesis se enfocó en la experimentación mediante la variación del parámetro operacional del factor de llenado de alimentación; con el objetivo de encontrar la óptima conminución mineral y en base a los ensayos realizados se puede concluir que:

- La investigación y análisis bibliográfico realizado ofrece información crucial para la identificación y entendimiento de los parámetros operaciones más relevantes en la molienda SAG, constituye una guía esencial para la orientación y consolidación de futuras investigaciones experimentales análogas.
- El diseño y construcción del molino SAG de laboratorio cumple con todos los estándares establecidos en este proyecto y en concordancia con lo expuesto por (Austin & Concha, 1994) que para un método de operación del molino rotatorio la fracción de velocidad crítica a la cual se somete el molino depende de las condiciones de llenado y los medios moledores. Los parámetros operacionales fueron constantes; la conminución mineral se realizó en seco y en circuito abierto.
- Variables tales como la dureza del material, el tamaño de alimento los intervalos de tiempo en que se muestreo la fragmentación mineral y la velocidad de rotación, se mantuvieron constantes en los ensayos realizados en la molienda SAG de laboratorio, razón por la cual se asume con completa seguridad que los cuatro ensayos realizados y las dieciséis muestras tomadas se efectuó bajo las mismas condiciones.
- Se evidencia que los comportamientos de los mecanismos de fractura son irrelevantes durante los primeros minutos de molienda, en todos los ensayos. Esto se debe a que en este intervalo de tiempo las partículas gruesas y los medios moledores de mayor tamaño se acomodan sobre las partículas finas y medios moledores de menor tamaño. El proceso anteriormente mencionado es normal al iniciar este tipo de fragmentación mineral previo al accionamiento de los mecanismos de fractura, cabe recalcar que la

distribución de partículas finas y gruesas es perceptiblemente proporcional al tiempo y carga de alimento.

- Se logra identificar con éxito la activación del mecanismo de fractura, mediante el sonido característico que se produce entre el impacto de las bolas y el material dentro del molino. En los ensayos realizados al utilizar una carga de 20 Kg y 25 Kg de alimento, el intervalo de tiempo transcurrido para la activar los mecanismos de fractura fueron de: 2 minutos 30 segundos y 5 minutos respectivamente; mientras tanto, en los ensayos de mayor carga de alimento 30 Kg y 35 Kg no fue perceptible el accionamiento de los mecanismos de fractura hasta después de los 10 minutos.
- Durante los ensayos realizados con carga de alimento de 20 Kg y 25 Kg, se logró determinar en función del IIBM⁵ & IIBB⁶ el accionamiento óptimo de los mecanismo de factura: con una carga de alimento de 25 Kg después de los tres primeros minutos de molienda se distingue el IIBM que se extendió hasta finalizar el ensayo, mientras tanto, en el experimento realizado con una carga de 20 Kg se produce un IIBM casi inmediatamente al arrancar con la molienda siendo optimo aparentemente en primera instancia, sin embargo, se presenta un IIBB después de los diez minutos de molienda y se intensifica después de los doce minutos. Tanto el IIBM & IIBB están relacionados con la eficiencia de conminución mineral, por lo que se puede concluir que; una carga igual o inferior a 20Kg no es óptima su conminución debido al incremento del desgaste de los medios moledores y las paredes de la cámara interna del molino.
- Mediante los análisis investigativos, experimentales y la comparación de las curvas granulométricas de los ensayos realizados se determinó que las partículas que están expuestas a mayor cambio de su tamaño son las partículas gruesas, con más del 80 % del mineral sobre los 2 000 micrones, esto se debe a que las partículas finas debido a la gran densidad del material con el que se trabajó son más difíciles de conminuir. Esta conclusión está basada en la teoría de Griffith en la cual menciona que las partículas finas son más difíciles de fracturar, ya que son más fuertes al poseer menos fallas de Griffith.

⁵ IIBM. - Sonido producido por el impacto entre medios moledores y el material que se muele dentro de la cámara del molino SAG de laboratorio.

⁶ IIBB. - Sonido producido por el impacto de los medios moledores entre sí.

- Finalmente, en concordancia con la hipótesis establecida después de un arduo trabajo teórico y práctico se corrobora que el factor de carga de llenado para optimizar este proceso unitario minero de la molienda seca SAG de laboratorio, bajo condiciones limitadas en circuito abierto y variables constantes es del 71,42 %; en similitud con lo antes descrito según (según Arriaga como se citó en Reyes, 2008). que para una molienda óptima se encuentra entre 50% y 70% de la carga de alimento.

Recomendaciones

Dado a lo extenso del estudio no se pudo estimular las diversas variables operacionales del molino, en cuanto para futuras investigaciones análogas se recomienda tomar en cuenta los siguientes ítems:

- En los ensayos de conminución mineral que presenten una alta densidad se recomienda utilizar el modelo de distribución de partículas de Gates-Gaudin-Shuchmann, ya que mediante este modelo se puede obtener la ecuación de distribución de tamaño para materiales sólidos de la molienda, además de que ésta se adapta y se especifica a un sistema particular para la serie geométrica de tamices (Shuchmann, 1960).
- Se recomienda seguir perfeccionando el actual trabajo, considerando las mismas variables operativas y utilizando diferentes tipos de materiales para la alimentación del molino.
- Se recomienda realizar un amplio estudio teórico-experimental con las variables operacionales del molino SAG de laboratorio, entre estas: la velocidad rotacional del molino, la carga de medios moledores, la distribución de la misma, el tiempo de residencia y el tipo de molienda sea seca o húmeda; para definir cuál de estos parámetros sería representativo para un trabajo óptimo.

- Entre las operaciones unitarias mineras la conminución mineral se destaca por su alto consumo energético, actualmente la optimización energética se ha transformado en un aspecto fundamental consecuencia de los altos costos de las fuentes de energía. Se recomienda un estudio exhaustivo del consumo energético del molino SAG de laboratorio y su comparación con otros medios de molienda.
- La viabilidad y desarrollo de todo proyecto está limitado a su rentabilidad económica. Se recomienda investigar y experimentar los parámetros que influyen en la optimización energética del molino SAG, con la ayuda de herramientas que permitan identificar la tendencia del perfil energético y pruebas pilotos en molino de laboratorio.
- Se recomienda investigar, experimentar y analizar el rendimiento productivo del molino con diferentes cargas de alimento. Fijar circuitos de molienda que cumplan con una demanda granulométrica preseleccionada.
- El análisis de distribución de partículas está representado por modelos establecidos en un plano bidimensional, las curvas granulométricas graficadas en este plano representan el comportamiento entre medios moledores y la carga mineral. Este análisis es de gran importancia para determinar el funcionamiento óptimo del molino. Para futuras investigaciones se recomienda utilizar una serie con mayor clasificación de tamices, esto permitirá un análisis minucioso de la distribución del tamaño de las partículas para tomar decisiones más efectivas.
- Durante los primeros minutos de molienda la dinámica de los medios moledores y la carga mineral buscan distribuirse de tal manera que las partículas más grandes y medios moledores de mayor tamaño se ubican sobre las partículas finas y medios moledores de menor tamaño. Después de esta distribución se manifiesta con mayor énfasis los mecanismos de fractura, sin embargo, al presentar un cilindro con sus paredes lisas dificulta el ascenso y el impacto entre las bolas de acero y el material. Se recomienda la implementación de los lifters en la cámara interna del molino SAG de laboratorio, para facilitar los mecanismos de fractura como: catarata y cascada.

Bibliografía

- 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.
- Armas Calixto, H., & Poma Blanco, J. (2013). *Evaluación del consumo de energía eléctrica en la operación de conminución de la planta concentradora de Huari - UNCP*. Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú .
- Austin, L., & Concha, F. (1994). *Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación*. Concepción, Chile: CYTED.
- Blanco, E. (2014). *Universidad de Cantabria*. Obtenido de Tecnología Mineralúrgica : <https://ocw.unicam.ec>
- Bond, F. (1952). *Third Teory of Comminution*. AIME.
- Casanova, M. (2004). *Guía de Edafología*. Santiago de Chile: Universidad de Chile .
- Escobar, D. (2016). *Geomecánica* . Medellín : Universidad Nacional de Colombia.
- Garrido, C. (2004). *Control Predictivo con Restricciones para una Planta de Molienda SAG*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Gutierrez, L., & Sepulveda, J. (1986). *Dimensionamiento y Optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática*. Santiago de Chile: Verman.
- Hukki, R., & Reddy, I. (1975). *The Principles Of Comminution; an Analytical Summary* . Eng. Min. J: Dechema Monograph .
- Jaico, J. (2009). *Problemas de procesamiento de minerales* . Trujillo.
- Laércio, M. (2000). *Linearizaçao do modelo log-normal para distribuiçao de tamanho de partículas*. Acta Scientiarum 22(5):1235-1239.

- 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., Velásquez, C., & Valderrama, W. (2000). Operación de plantas de molienda SAG: una dura realidad. *III Simposium Internacional de Mineralurgia*.
- Marcos, C. (2010). *Cristalografía y Mineralogía*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Metallurgist, 9. (2012). *Molinos SAG o AG*. Obtenido de 911 Metallurgist : 911metallurist.com
- Morrell, S. (1993). *The prediction of power draw in wet tumbling mills*. Queensland: University of Queensland.
- Reyes, D. (2008). *Modelación de tarificación de electricidad en sistemas de distribución de faenas mineras en base a indicadores de eficiencia*. Santiago De Chile: Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Sanchez, J. (2019). *Slide Player*. Obtenido de Molino SAG:
<https://slideplayer.es/slide/16337178/>
- Santana, C. (9 de Diciembre de 2007). *Wikipedia* . Obtenido de Clasificación granulométrica :
https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificación_granulométrica
- SGM. (22 de Marzo de 2017). *Clasificación de los Minerales* . Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.sgm.gob.mx>
- Shuchmann, R. (1960). *Energy input and size distribution in comminution* . Mining Engineering.
- Valeriano, M. (2018). *Estudio Mineragráfico y Determinación Microscópica del Grado de Liberación de los Minerales Sulfurados de Cobre*. Arequipa .
- Zenith, M. (2000). *Molino de Barras*. Obtenido de Sitemap: es.zenithcrusher.com

Anexos

Anexo 1

Gráfico 43. *Distribución del tamaño de bolas*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 2

Gráfico 44. *Material fracturado*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 3

Gráfico 45. *Material sulfurado de mena, muestras llevadas al laboratorio de IEM*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 5

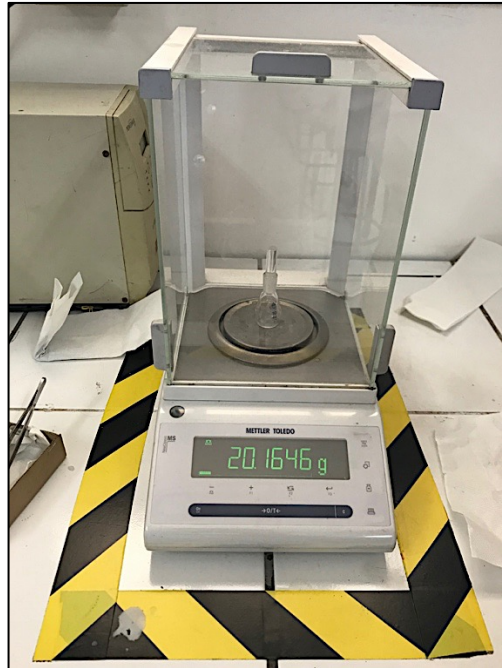
Gráfico 46. *Roca característica*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 6

Gráfico 47. *Balanza analítica (calculo de la densidad de la muestra mediante el método de picnómetro)*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 7

Gráfico 48. *Trituración de la muestra mediante el uso de la trituradora de mandíbulas.*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 8

Gráfico 49. *Clasificación de la muestra, monotamaño de ½ pulgada*



Fuente: Josue Muñoz

Anexo 9

Gráfico 50. *Factor de esponjamiento*

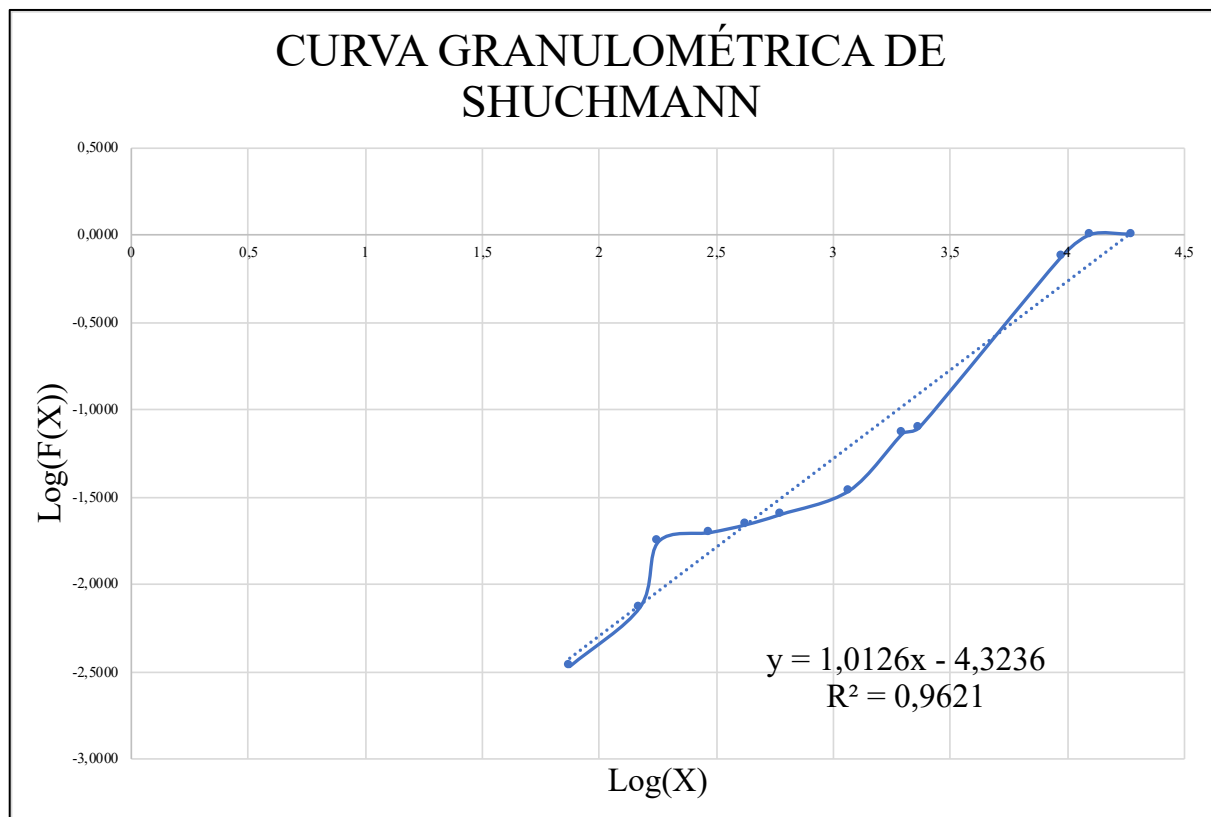


Fuente: Josue Muñoz

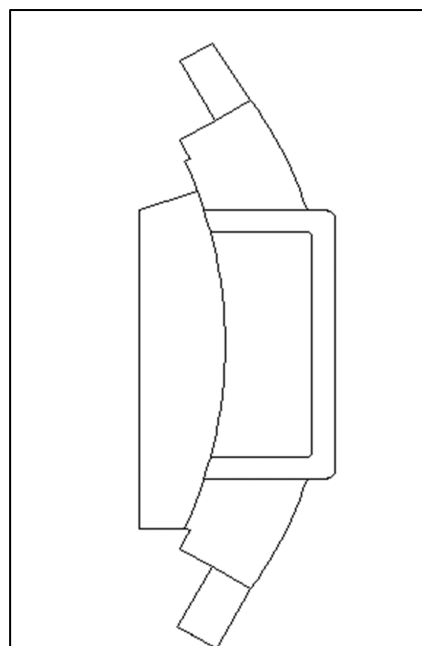
Anexo 10Tabla 9. *Modelo de distribución de Shuchmann*

tamaño (micrones X)	retenido: f(x)	fracción retenida	% pasante acumulado F(x)	Shuchmann	
				Y log(F(x))	x log(x)
19050	0	0	100	0	4,2799
12700	434,8	0,2519	100	0	4,1038
9525	1255,6	0,7273	74,8132	-0,1260	3,9789
2360	3,7	0,0021	2,0796	-1,6820	3,3729
2000	8	0,0046	1,8653	-1,7293	3,3010
1180	6,8	0,0039	1,4018	-1,8533	3,0719
600	2,2	0,0013	1,0079	-1,9966	2,7782
425	3	0,0017	0,8805	-2,0553	2,6284
300	2	0,0012	0,7067	-2,1508	2,4771
180	1	0,0006	0,5909	-2,2285	2,2553
150	4,8	0,0028	0,5329	-2,2733	2,1761
75	4,4	0,0025	0,2549	-2,5937	1,8751
	1726,3				

Realizado por: Jose García & Josue Muñoz

Anexo 10Gráfico 51. *Distribución granulométrica de Shuchmann*

Realizado por: Jose García & Josue Muñoz

Anexo 11Gráfico 52. *Tapa de muestreo para molino SAG de laboratorio.*

Realizado por: Jose García & Josue Muñoz