



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Análisis de la variación de eficiencia de molienda húmeda
SAG para material silíceo”**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MINAS**

Autores:

CARLOS JOSÉ AMÓN TOGRA

ADRIÁN MATEO CARPIO ARÉVALO

Director:

ING. FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA – ECUADOR

2021

DEDICATORIA

A Dios quien me ha cuidado y he sentido en cada paso dado.

A mis padres Giovanni Carpio y Virna Arévalo, son ellos quienes forjaron, con todo su apoyo incondicional, educación, valores, enseñanzas y consejos, el hombre que soy ahora.

A mi familia y en especial a mis abuelos Jorge Arévalo y Luisa Morales, quienes me han servido como inspiración de vida para poder culminar con éxito este trabajo.

Adrián Mateo Carpio Arévalo.

A mi familia que ha sido el pilar fundamental durante mi formación como persona y han estado presente, durante todas las adversidades presentadas a lo largo de mi formación académica.

Carlos José Amón Togra.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por darme la salud y fuerza necesarias para continuar cada día con más ganas.

A mi padre Giovanni Carpio y abuelo Jorge Arévalo, que me lo dieron todo y mucho más, hombres que los caracteriza su esfuerzo y sacrificio, enseñándome así el valor de la vida, enseñanza que me sirvió de motivación para dar lo mejor de mí en cada día de estudio.

A mi madre Virna Arévalo y abuela Luisa Morales, quienes noche y día me hicieron sentir su amor incondicional. Palabras como “da lo que sabes” o “cuídese mijito” son las que, desde la escuela hasta hoy, culminando mi carrera profesional me sirvieron para salir adelante.

A mis hermanos, por servirme de ejemplo de superación y darme palabras de aliento en momentos decisivos de mi vida.

A mi tutor Ing. Fernando Valencia a quien admiro por su habilidad de inculcar en nosotros la curiosidad de la investigación, al Ing. Leonardo Núñez a quien agradezco por la empatía que tiene con nosotros sus estudiantes.

Finalmente agradecer a mis amigos de Las Pencas FC y mi compañero tesista que hicieron de mis días más llevaderos aconsejándome y apoyándome hasta el fin.

Adrián Mateo Carpio Arévalo

Mi agradecimiento va dirigido a todas las personas que estuvieron presente durante todo este proceso e hicieron esto posible. Empezando por mi familia por apoyarme en todo momento, a todos mis profesores ya que cada uno aparte de transmitir su conocimiento supo aconsejarme, y por último a todos mis amigos que hicieron que la universidad sea más agradable.

Carlos José Amón Togra

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	14
1.1. Génesis y propiedades de la roca de ensayo.....	14
1.2. Geología general y georreferenciación.....	14
1.3. Procesamiento de minerales	16
1.3.1. Trituración o Chancado	16
1.3.2. Molienda.....	16
1.3.3. Energía de la reducción de tamaño.....	17
1.3.4. Tipos de mecanismos de fractura	18
1.3.4.1. Fractura por abrasión	18
1.3.4.2. Fractura por clivaje	18
1.3.4.3. Fractura por impacto.....	19
1.3.5. Tipos de Molienda	20
1.4. Molienda SAG	21
1.4.1. Parámetros operacionales	21
1.4.1.1. Velocidad crítica.....	22
1.4.1.2. Velocidad de rotación	22
1.4.1.3. Grado de llenado.....	23

1.5. Molino SAG de laboratorio.....	23
1.6. Análisis granulométrico.....	25
1.7. Velocidad de fractura.....	27
CAPÍTULO II: EXPERIMENTACIÓN	29
2.1. Selección y caracterización del material silíceo	29
2.2. Preparación de las muestras.....	29
2.3. Equipo a utilizar.....	30
2.4. Condiciones generales de operación.....	31
2.4.1. Capacidad del molino	31
2.4.2. Carga de bolas	31
2.4.3. Velocidad del molino	32
2.5. Condiciones experimentales de operación	32
2.6. Diseño de experimentos a desarrollar.....	33
2.7. Análisis Granulométrico.....	34
2.7.1. Granulometría.....	35
2.7.2. Distribución de Gates Gaudin Schuhmann.....	35
2.8. Curvas granulométricas	37
2.9. Velocidad de fractura.....	37
2.10. Potencia	38
2.11. Cálculo de energía según las distintas condiciones de molienda	39
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
3.1. Gráficas y análisis de los resultados	41
3.1.1. Resultados de la Granulometría.....	41
3.1.2. Resultados de la Velocidad de Fractura	42
3.1.3. Resultados de Potencia	44
3.1.4. Resultados de Energía Específica de Molienda.....	45

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
Conclusiones.....	48
Recomendaciones	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS	53
Anexo 1. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo seco.....	53
Anexo 2. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo húmedo.	54
Anexo 3. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 20 %.....	55
Anexo 4. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 40 %.....	56
Anexo 5. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 50 %.....	57
Anexo 6. Curva granulométrica Ensayo Seco.	58
Anexo 7. Curva granulométrica Ensayo Húmedo.	58
Anexo 8. Curva granulométrica Ensayo Finos 20%.....	58
Anexo 9. Curva granulométrica Ensayo Finos 40 %.....	59
Anexo 10. Curva granulométrica Ensayo Fino 50%.	59
Anexo 11. Gráficas de primer orden ensayo húmedo.	60
Anexo 12. Gráficas de primer orden ensayo con Finos 20%.	61
Anexo 13. Gráficas de primer orden ensayo con Finos 50%.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cantos Rodados Silíceos.	14
Figura 1.2. Mapa de georreferenciación de la zona de recolección.	15
Figura 1.3. Tipos de mecanismos de Fractura.	18
Figura 1.4. Tipo de Fractura,	19
Figura 1.5. Comportamiento de la carga en el interior de un molino.	20
Figura 1.6. Tipos de molienda.	21
Figura 1.7. Molino SAG de Laboratorio.	24
Figura 1.8. Tamaño de mallas.	26
Figura 1.9. Tamices de laboratorio.	26
Figura 2.1. Material a moler.	29
Figura 2.2. Vibro Tamiz de Laboratorio.	29
Figura 2.3. Material Fino.	30
Figura 2.4. Respuesta Reología de material silíceo.	33
Figura 2.5. Lector de Potencia.	38
Figura 3.1. Resultados de Granulometría.	42
Figura 3.2. Resultados Velocidad de fractura.	43
Figura 3.3. Velocidad de fractura según las diferentes configuraciones de molienda. ..	44
Figura 3.4. Resultados de Potencia.	45
Figura 3.5. Energía específica 9500 μm	46
Figura 3.6. Energía específica 2360 μm	46
Figura 3.7. Energía específica 2000 μm	46
Figura 3.8. Energía específica 600 μm	46
Figura 3.9. Energía específica 300 μm	46
Figura 3.10. Energía específica 180 μm	46
Figura 3.11. Energía específica 150 μm	47
Figura 3.12. Energía específica 75 μm	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Detalle de experimento.....	34
Tabla 2.2. Equivalencia de tamices.	34
Tabla 2.3. Distribución de Schuhmann ensayo seco.	35
Tabla 2.4. Distribución de Schuhmann ensayo húmedo.	35
Tabla 2.5. Distribución de Schuhmann ensayo con fracción 20% de finos.	36
Tabla 2.6. Distribución de Schuhmann ensayo con fracción 40% de finos.	36
Tabla 2.7. Distribución de Schuhmann ensayo con fracción 50% de finos.	36
Tabla 2.8. Constante Cinética de Fractura (Sj).....	37
Tabla 2.9. Potencia obtenida por ensayos.....	39
Tabla 2.10. Energía Específica, Ensayo Húmedo.	40
Tabla 2.11. Energía Específica, Ensayo Fracción de Finos 20%.	40
Tabla 2.12. Energía Específica, Ensayo Fracción de Finos 50%.	40
Tabla 3.1. Resultados de potencia.	44

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo seco.....	53
Anexo 2. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo húmedo.	54
Anexo 3. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 20 %.....	55
Anexo 4. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 40 %.....	56
Anexo 5. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 50 %.....	57
Anexo 6. Curva granulométrica Ensayo Seco.	58
Anexo 7. Curva granulométrica Ensayo Húmedo.	58
Anexo 8. Curva granulométrica Ensayo Finos 20%.....	58
Anexo 9. Curva granulométrica Ensayo Finos 40 %.....	59
Anexo 10. Curva granulométrica Ensayo Fino 50%.	59
Anexo 11. Gráficas de primer orden ensayo húmedo.	60
Anexo 12. Gráficas de primer orden ensayo con Finos 20%.	61
Anexo 13. Gráficas de primer orden ensayo con Finos 50%.	62

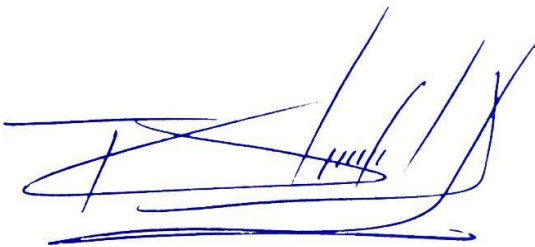
ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE EFICIENCIA DE MOLIENDA HÚMEDA SAG PARA MATERIAL SILÍCEO

RESUMEN

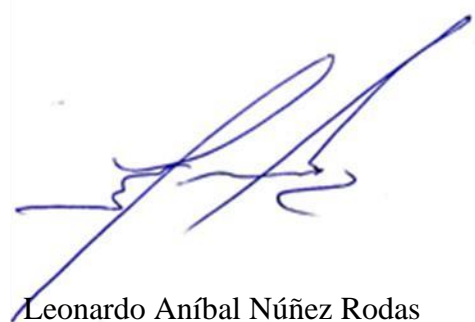
La molienda SAG durante los últimos años ha tenido un gran impacto en la industria minera, especialmente en las grandes plantas de beneficio. La investigación fue desarrollada en un molino SAG a escala de laboratorio, donde se analizó la variación del consumo energético, generado por la variación de la humedad y la presencia de finos en el alimento (ensayo con monotamaño). Se realizó también una comparación entre una molienda seca, una molienda húmeda sin finos y una molienda húmeda (pulpa) con diferentes fracciones de finos en porcentajes del 20%, 40% y 50%. En todas las pruebas los parámetros operacionales se mantuvieron constantes.

De acuerdo a la cantidad de finos, la pulpa varía su consistencia, haciendo que su respuesta reológica genere comportamientos mecánicos, característicos de los fluidos no newtonianos. Además, los resultados obtenidos influyeron en la cinética de fractura y en el consumo energético.

Palabras clave: Conminución mineral, molienda SAG, cinética de fractura, energía específica de molienda.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director de Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Carlos José Amón Togra
Autor



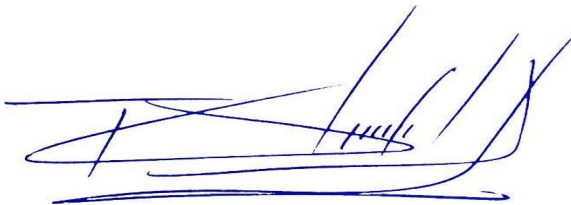
Adrián Mateo Carpio Arévalo
Autor

ANALYSIS OF SAG WET MILLING EFFICIENCY VARIATION FOR SILICEOUS MATERIAL

ABSTRACT

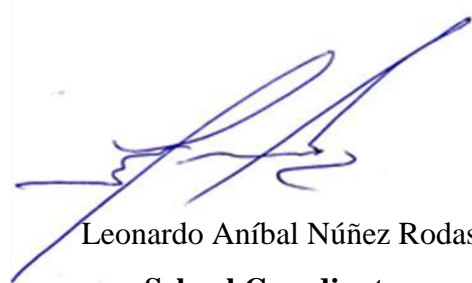
SAG milling has had a great impact in the mining industry during the last years, especially in large beneficiation plants. The research was developed in a laboratory scale SAG mill, where the variation of energy consumption was analyzed, generated by the variation of moisture and the presence of fines in the feed (one-size-fits-all test). A comparison was also made between a dry milling, a wet milling without fines and a wet milling (pulp) with different fractions of fines in percentages of 20%, 40% and 50%. In all tests the operational parameters were kept constant. According to the amount of fines, the pulp varied its consistency, causing its rheological response to generate mechanical behaviors, characteristic of non-Newtonian fluids. In addition, the results obtained influenced the fracture kinetics and energy consumption.

Key words: Mineral comminution, SAG milling, fracture kinetics, specific grinding energy.



Fernando Tulio Valencia Guaricela

Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

School Coordinator



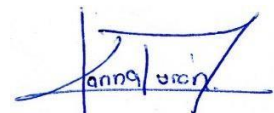
Carlos José Amón Togra

Author



Adrián Mateo Carpio Arévalo

Author



Carlos José Amón Togra & Adrián Mateo Carpio Arévalo.

Trabajo de Titulación.

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela.

Junio, 2021.

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE EFICIENCIA DE MOLIENDA HÚMEDA SAG PARA MATERIAL SILÍCEO

INTRODUCCIÓN

Dentro de las operaciones en el campo minero, el tratamiento del mineral, es una etapa fundamental para poder llegar a obtener un mineral que represente un valor económico. Uno de los procesos más importantes que existen en el tratamiento mineral es la conminución, ya que representa los costos operacionales más altos en la operación, cerca del 60-70% (Sbarbaro, 2005).

Pasada la etapa de trituración empieza la etapa de molienda, donde una especie de reactor conocido como molino, desintegra partículas de gran tamaño en partículas más pequeñas (Austin y Concha A, 1994).

Varias son las formas de molienda aplicadas en el tratamiento de minerales, una de ellas es la molienda SAG, como es de conocimiento, esta molienda se caracteriza por su eficiencia y bajos costos, en comparación a otros métodos, además brinda amplios e interesantes casos de estudio, debido a su extensa gama de parámetros operacionales como: humedad, porcentaje de finos, número de revoluciones, entre otros.

En los últimos años Ecuador ha iniciado su rol en la minería a gran escala con la presencia de grandes empresas que incluyen dentro de sus procesos de conminución la molienda SAG. Es importante señalar que en el ámbito local y nacional no hay mayores aportes sobre este tema durante los últimos años; es por eso la importancia de fomentar los análisis experimentales a escala de laboratorio por la variabilidad de parámetros dentro de la molienda, ya que un estudio a profundidad podría representar a futuro una gran ventaja en ahorro económico y optimización de los procesos de conminución.

En el presente trabajo se analizará cómo influyen la humedad y el porcentaje de finos sobre el consumo de energía en el molino SAG a escala de laboratorio para un material silíceo.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Génesis y propiedades de la roca de ensayo

El material usado en esta investigación corresponde a cantos aluviales de superficie lisa con alto contenido de sílice, siendo este de alrededor del 95%, su dureza se encuentra entre 7.5 y 8 de acuerdo a la escala de Mohs. Se encuentra en estado natural, por lo general acumulado en las orillas de los ríos por el arrastre de sus aguas. El material se recolectó del lecho y terrazas del río Santa Bárbara, ubicado en el cantón Sígsig.



Figura 1.1 Cantos Rodados Silíceos.

Fuente: Elaboración propia.

1.2. Geología general y georreferenciación

El cantón Sígsig es un cantón que pertenece a la provincia del Azuay, la superficie que ocupa es de 648 km², limita al norte con los cantones Chordeleg y Gualaceo, al sur con Chigiñinda y al este con Limón Indanza. Presenta una topografía irregular existiendo en las cotas más altas desniveles pronunciados y pendientes muy abruptas, la altitud media es de 2498 m.s.n.m.

La litología existente en gran parte de su extensión pertenece a varios procesos ya sea intrusivos, efectos metamórficos o eventos volcánicos. Por otra parte, la geología existente según la memoria técnica perteneciente al cantón Sígsig elaborada por el (Instituto Espacial Ecuatoriano & MAGAP, 2013) afirma:

“La geología se caracteriza por secuencias metamórficas relacionadas con el proceso de acreción, del lado occidental representado por un arco de islas que pertenece al Terreno Alao de origen marino en el Jurásico Tardío, dicha secuencia está intruída por plutones asociado al Magmatismo Triásico-Jurásico perteneciente al Terreno Loja de origen continental, estas unidades lito tectónicas están separadas por una Falla llamada el frente Baños, con dirección NE-SW” (p.32).

Las muestras se obtuvieron en las riberas del río Santa Bárbara, el punto de recolección se encuentra en las coordenadas UTM: Este: 744385.00 Norte:9662098.00

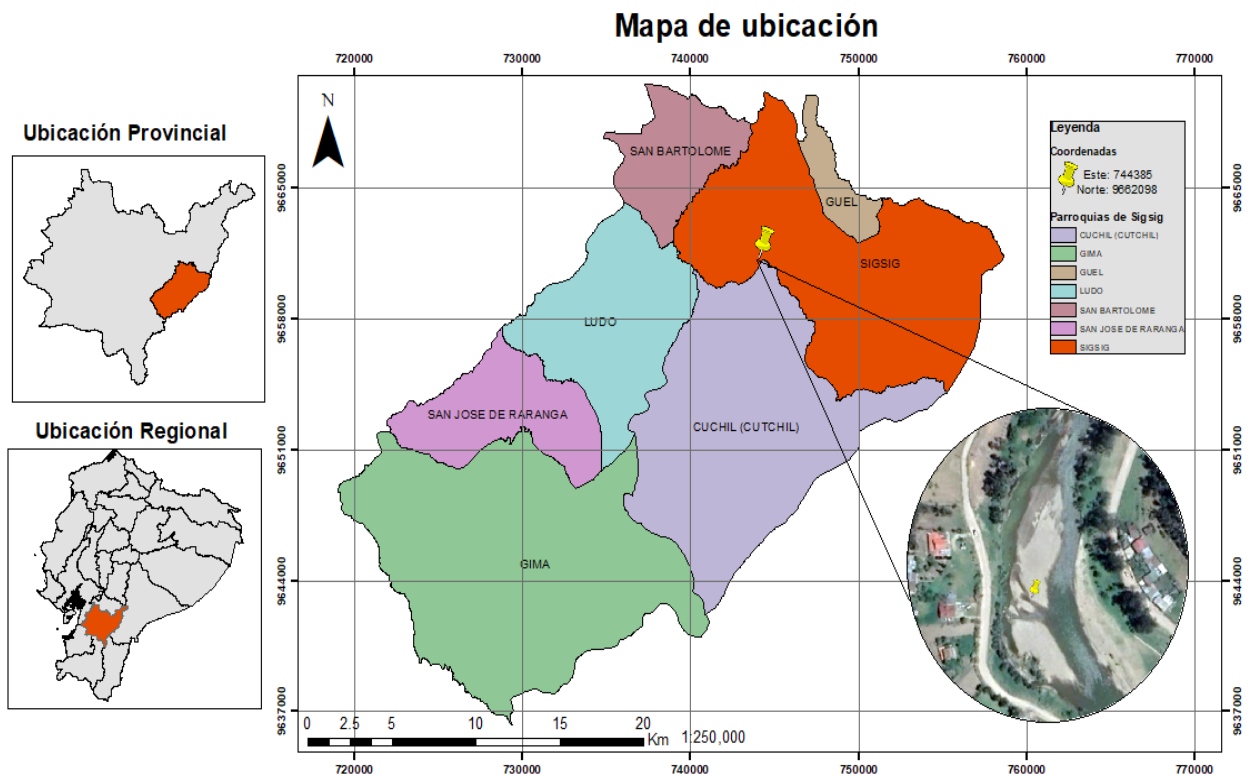


Figura 1.2. Mapa de georreferenciación de la zona de recolección.

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Procesamiento de minerales

El procesamiento mineral tiene como objetivo principal extraer y separar minerales valiosos para su posterior comercialización, una operación importante dentro de este proceso es la conminución, que tiene como fin reducir de tamaño las partículas de mineral para liberar la parte valiosa o para preparar al material para procesos posteriores.

La conminución se divide en dos etapas, dependiendo del destino final del mineral y el rango de tamaño a obtener; la primera es el chancado y se aplica para obtener partículas gruesas ($>2''$) la segunda es la molienda, para obtener partículas de menor tamaño ($\sim 1/2'' - 3/8''$) (Yomineria Chile, 2019).

1.3.1. Trituración o chancado

Al hablar de reducción de tamaño, se debe tener en cuenta que el primer proceso se da al momento de la voladura; el mineral que proviene de la mina tiene una composición heterogénea de tamaños. El objetivo del chancado o trituración es reducir aún más el tamaño, dando como resultado un tamaño homogéneo para luego someterse a un proceso de molienda. El chancado se da en tres etapas: primaria, secundaria y terciaria, dichas etapas van ubicadas de manera lineal; los productos obtenidos tienen tamaños que van desde ocho pulgadas o tres pulgadas, hasta un tamaño final de media pulgada (Minero, 2018).

Para realizar el chancado de material generalmente se emplean trituradoras de mandíbulas, martillos o rodillos que, por fuerzas de compresión o impacto, da como resultado la fragmentación, cuyos productos están en el rango de centímetros y milímetros. (Blanco, 2014).

1.3.2. Molienda

La molienda es el último proceso de fragmentación de rocas que previamente sufrieron una trituración, dicha fragmentación da como resultado productos que están en el rango de milímetros y micras, permitiendo la liberación de especies minerales valiosas

y facilitando así los procesos posteriores de concentración. Los equipos empleados son molinos y pueden desarrollar una molienda tanto seca como húmeda (Blanco, 2014).

El molino es un tipo de reactor según (Austin & Concha, 1994) ya que “La energía suministrada es convertida por la acción mecánica de ruptura y la reacción obtenida es una reducción de tamaño” (p,2-3). Basado en este concepto de reactor, el reactivo es la alimentación, esta tiene una amplia distribución granulométrica la cual puede ser representada por gráficas en las que se indican diferentes fracciones de tamaños acumulados. Por otra parte, se tiene el producto, este es material que sale del molino, de la misma manera que el alimento no tiene un tamaño definido por lo que es importante analizar la distribución de los tamaños de partícula a través de una curva granulométrica (Austin & Concha A. 1994).

1.3.3. Energía de la reducción de tamaño

La mecánica de fracturas es la encargada de describir los procesos que se dan en la reducción del tamaño de partícula; las fracturas son producidas por esfuerzos sobre el mineral. A lo largo del tiempo varios autores han buscado una ecuación para representar la magnitud de energía necesaria para la fractura.

Rittinger: R. P. Rittinger propone que la energía de fractura tiene una relación directamente proporcional al área nueva generada por la fractura. La ecuación formulada es la siguiente:

$$E = K_R \left[\frac{1}{X_{Final}} - \frac{1}{X_{Inicial}} \right] \quad (1)$$

Kick: F. Kick propone que la energía para fracturar materiales se relaciona de manera proporcional a la variación de volumen, es decir, como se encuentra el tamaño final respecto al inicial. La ecuación formulada es:

$$E = K_k \ln \left[\frac{X_{Inicial}}{X_{Final}} \right] \quad (2)$$

Bond: establece que la energía necesaria para fragmentar una partícula es proporcional al volumen de dicha partícula. La ecuación formulada es:

$$E = 2K_B \left[\frac{1}{\sqrt{x_{final}}} - \frac{1}{\sqrt{x_{inicial}}} \right] \quad (3)$$

1.3.4. Tipos de mecanismos de fractura

De acuerdo a (Austin & Concha, 1994) durante el proceso de conminución, ocurren varios mecanismos de fractura que actúan de manera simultánea, dentro del molino pueden darse fracturas por: impacto, astillamiento, abrasión y atrición. Estos se producen por el choque entre bolas y material a moler.

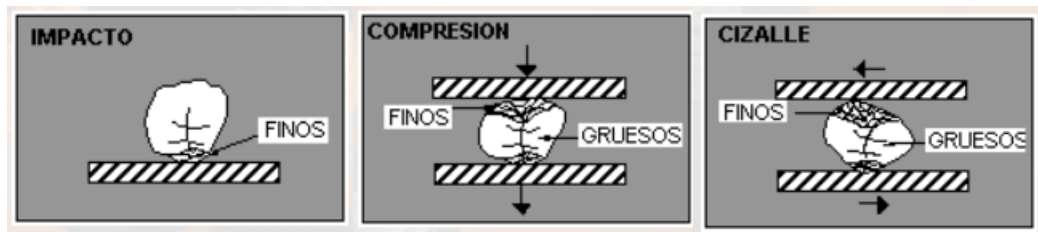


Figura 1.3. Tipos de mecanismos de Fractura.

Fuente: (Yomineria, s.f).

1.3.4.1. Fractura por abrasión

Este tipo de fractura se produce al momento de existir un roce entre partículas, medios molidores y revestimiento, esto genera que sobre la superficie de las partículas exista un esfuerzo de cizalla dando como resultado partículas finas. La cantidad de partículas fracturadas por abrasión depende de la dureza del mineral. (Bustamante, s. f.)

1.3.4.2. Fractura por clivaje

Generalmente este tipo de fractura se da por compresión lenta, las partículas están compuestas por grietas y al existir un esfuerzo sobre cualquiera de ellas, la energía aplicada se desplaza y la fractura va aliviando la carga. (Arana & Gonzáles, 2002)

1.3.4.3. Fractura por impacto

La fracturación por impacto existe cuando las partículas reciben una cantidad de energía superior a la necesaria para la fractura. Durante la rotación del molino las bolas y partículas de material son levantadas, y al momento de caer chocan entre sí produciendo este tipo de fractura.

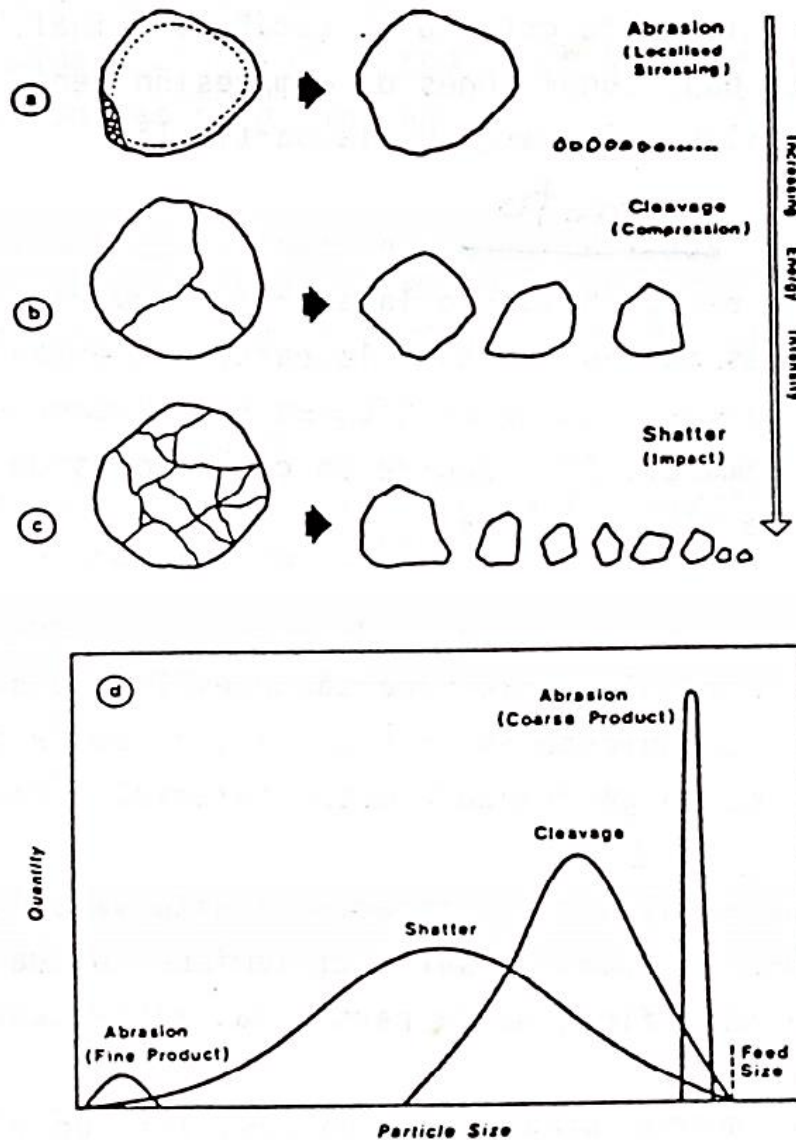


Figura 1.4. Tipo de Fractura,
Fuente: (Gutiérrez & Sepúlveda, 1986).

Los tipos de fractura principales son: impacto y abrasión, estos se dan de acuerdo al tipo de efecto que se produzca en el interior del molino, siendo el efecto cascada o catarata.

Cuando existe el efecto cascada la molienda se produce por abrasión, el movimiento que existe es circular y da como resultado partículas finas, cabe recalcar que este efecto consume mayor tiempo y energía; mientras que el efecto catarata hace que la fractura se produzca por impacto, el movimiento que existe es parabólico dando como resultado una mejor fracturación con un consumo bajo de energía. Los efectos se producen de acuerdo a la velocidad de rotación, una velocidad alta hará que los medios molidores formen una catarata. (Rosales Marín et al., 2020)

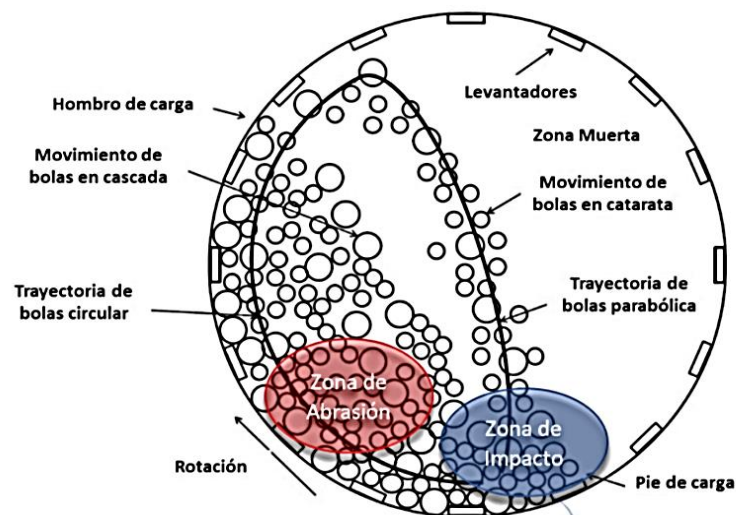


Figura 1.5. Comportamiento de la carga en el interior de un molino.

Fuente: (Rosales Marín et al., 2020).

1.3.5. Tipos de molienda

Dentro de la conminución de material, en la molienda se distingue varios tipos de molienda, que se desarrolla según diferentes tipos de molinos como se indica en la figura 1.6:

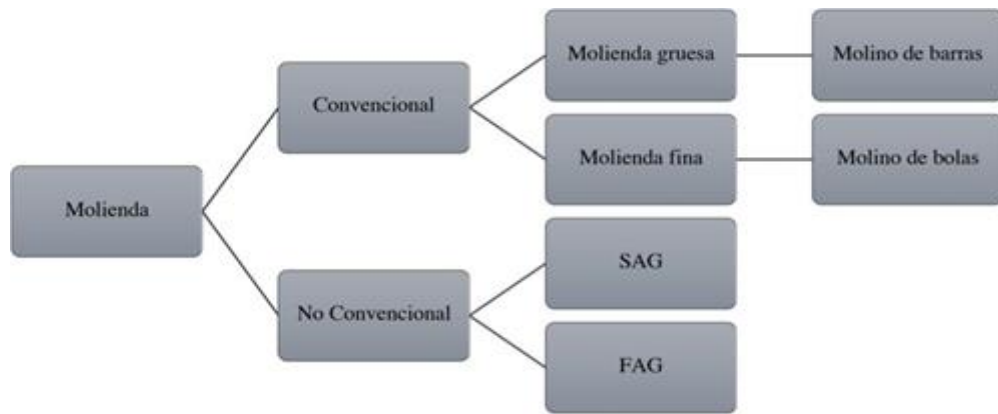


Figura 1.6. Tipos de molienda.

Fuente: (García & Muñoz, 2020).

1.4. Molienda SAG

La molienda SAG (Semiautógena) se considera como un proceso relativamente nuevo, generalmente se usan equipos de grandes dimensiones que sobrepasan los 10 metros de diámetro y 4.5 metros de ancho. Por otra parte, permiten reducir etapas dentro de la fragmentación ya que, por su capacidad de procesamiento, se omite el chancado secundario o terciario, debido a que la dimensión del molino permite que el impacto por caída libre sea mayor, facilitando así la molienda. El tipo de molienda se desarrollará según las necesidades del producto siendo opciones la molienda húmeda o molienda seca. La reducción de tamaño se da gracias al choque entre rocas y a las rocas con bolas de acero, el producto generado tiene una granulometría que está por debajo de las 180 micras el cual pasa a la siguiente fase, es decir a los procesos de concentración (Codelco Chile, 2018).

1.4.1. Parámetros operacionales

Un molino SAG debe cumplir con ciertas especificaciones al momento de entrar en funcionamiento. Estas deben estar correlacionadas y tener una sinergia con la cual el material a moler pueda ser reducido con la mayor eficacia y eficiencia posible; entre ellas se encuentran:

1.4.1.1. Velocidad crítica

Se entiende por velocidad crítica como la velocidad de centrifugación del molino, a la cual las bolas del molino ya no generan ningún efecto de golpe, es decir, se pierde la capacidad de molienda. En este punto las bolas se mantienen adheridas hacia la pared del molino y no son arrojadas en ninguna dirección, en el interior se genera un equilibrio entre la fuerza de gravedad y centrífuga. La velocidad crítica se calcula por medio de la siguiente fórmula (Austin & Concha, 1994):

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad (4)$$

Donde:

D=diámetro interior del molino (m).

d=diámetro máximo de bola (m).

1.4.1.2. Velocidad de rotación

Es la velocidad a la que gira el molino, influye de manera directa en el consumo energético y en la operación de molienda como tal, al girar mueve la carga, la levanta y la hace caer a manera de cascada o catarata. Al momento de caer, produce la molienda del mineral ya sea por impacto, abrasión, etc. (Blanco, 2014). Es importante tener en cuenta la velocidad crítica para poder determinar una velocidad de operación la misma que debe estar entre el 70% al 85% de la velocidad crítica para molinos con una carga de bolas con un valor de $J=0.4$ (Austin & Concha, 1994).

Conocido el valor de la velocidad crítica se puede determinar la velocidad de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\sigma = \sigma_c \gamma \quad (5)$$

Donde:

σ_c = fracción de velocidad

γ = velocidad crítica

1.4.1.3. Grado de llenado

Se define como la representación en volumen que ocupa la carga (mena y medios moledores). Este grado de llenado es una variable que se involucra directamente en la eficiencia de molienda (Blanco, 2014).

Al relacionar el factor de llenado con el consumo de potencia del molino, resulta un valor máximo entre el 50% al 55% del volumen total para un rendimiento de molienda óptima. En efecto, conforme aumenta el grado de llenado (> 55%) disminuye la potencia. (Blanco, 2014).

De acuerdo a (Austin & Concha, 1994) para calcular el factor de llenado (J) es necesario tener el valor de la densidad aparente de la carga y la porosidad del lecho, este valor varía según: la distribución de tamaños de bolas, la industria en la que se aplica y/o fabricante. Para definir la ecuación de J se emplea una porosidad nominal de 0.4.

$$J = \frac{\text{Volumen real de las bolas} / \text{Fracción en volumen de acero en el lecho}}{\text{Volumen del molino}} \quad (6)$$

$$J = \left(\frac{\text{masa de bolas} / \text{densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} \right) * \left(\frac{1.0}{1 - \text{porosidad del lecho}} \right)$$

$$J = \left(\frac{\text{masa de bolas} / \text{densidad de bolas}}{\text{volumen del molino}} \right) * \left(\frac{1.0}{0.6} \right)$$

1.5. Molino SAG de laboratorio

El molino SAG empleado para este trabajo fue desarrollado en la Universidad del Azuay en el año 2020, considerando que este tipo de molinos se caracterizan por tener un diámetro mayor con respecto al ancho del equipo, siendo las dimensiones del mismo 0.6 metros de diámetro y 0.22 metros de ancho. La estructura externa del cilindro está compuesta de acero de 8 mm de espesor y la interna por acero con un ancho de 5 mm, la misma que puede reemplazarse según el desgaste que sufra el molino con el trabajo.

Al molino se le adaptó un variador de frecuencia al motor, que permite regular la velocidad a la que gira, adaptándose a las necesidades de molienda: además de eso tiene un lector de potencia, el mismo que puede ser configurado para obtener hasta 10 datos por segundo.

Los parámetros operacionales del molino son los siguientes:

- Volumen Total: $62.203.68 \text{ cm}^3$.
- Velocidad crítica: 57 r.p.m.
- Velocidad de rotación (75%): 43 r.p.m.
- Potencia del motor: 2.5 hp.

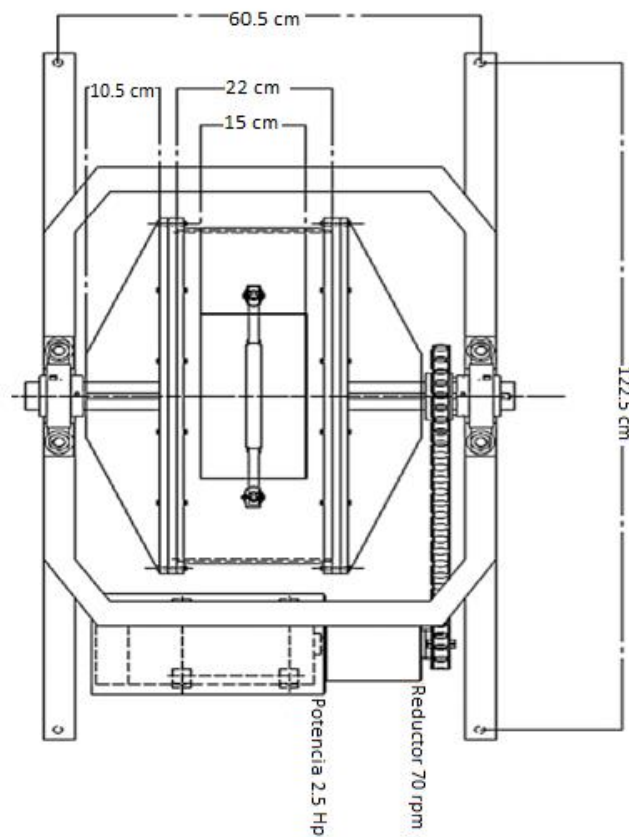


Figura 1.7. Molino SAG de Laboratorio.

Fuente: (García & Muñoz, 2020).

1.6. Análisis granulométrico

Es el proceso por el cual, se determina la proporción de granos o distribución de tamaños de partículas que contiene una cierta cantidad de material; las proporciones varían de acuerdo al tipo de suelo o material de estudio. Este análisis es importante ya que permite conocer cuál es su origen, sus características, las propiedades geomecánicas que puede tener y saber cuál es el tamaño predominante. (Duque & Escobar, 2002).

La distribución de tamaños se puede determinar por medio de dos métodos, de manera numérica o gráfica, esto dependerá del tamaño de la muestra. Por ejemplo, para determinar el tamaño de cantos rodados resulta útil emplear reglas graduadas; para partículas más pequeñas como la arena puede ser calculada por medio de tamices y para partículas aún más pequeñas el cálculo se basa en la ley de Stokes, donde se emplea el uso de hidrómetros o pipetas (Pérez & Márquez, 2017).

Generalmente se usa el método mecánico para la distribución granulométrica, esta emplea tamices normalizados, los mismos que son ordenados de manera decreciente de acuerdo al tamaño de abertura. Para ello primero, se hace pasar una cantidad con peso conocido de material por todos los tamices, segundo el tamizaje puede ser asistido por un ro-tap el mismo que agiliza el trabajo, y finalmente se obtiene la cantidad de masa retenida en cada tamiz, para posteriormente calcular el porcentaje pasante acumulado, siendo posible con estos datos graficar una curva granulométrica (Espinace & Sanhueza, 2004).

Para expresar los datos obtenidos por cualquier método de distribución granulométrica (DTP), se presentan tres opciones de acuerdo a lo expuesto por (Pérez & Márquez, 2017) siendo estas: “histograma de los porcentajes del peso de cada fracción de tamaño; curva de frecuencia en ordenadas aritméticas y curva de frecuencia acumulada”. (p.23). Cualquiera de estas formas de presentar el DTP debe contener en el eje de abscisas los tamaños de tamices de acuerdo a su abertura, yendo de menor a mayor en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas se ubica el peso acumulado en escala natural.

La curva granulométrica nos da una idea de cuáles son los tamaños existentes, pero no indica cual es el tamaño del producto, existen maneras de especificar cuál es la distribución de tamaño, (Austin & Concha, 1994):

- Un punto en la curva, P (80), indica el 80% en peso menor a 200 mallas.
- Dos puntos en la curva, P (50) y P (5), indica el 50% menor a 400 mallas y no más del 5% mayor a 65 mallas.
- Un punto cualquiera, de acuerdo al estudio que se vaya a realizar.

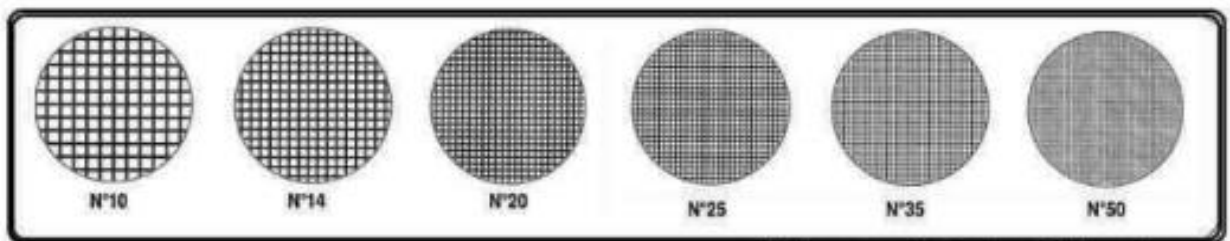


Figura 1.8. Tamaño de mallas.

Fuente: (Duque & Escobar, 2002).



Figura 1.9. Tamices de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

1.7. Velocidad de fractura

Partiendo del concepto planteado por (Austin & Concha, 1994), se establece que “La velocidad de desaparición, de la masa de partículas de tamaño 1 por ruptura, es proporcional a la masa de partículas de tamaño 1 presente en el molino en el tiempo t ” (p.66). Tomando en cuenta que la masa retenida (W) es constante, resulta:

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 w_1(t) \quad (7)$$

El valor de S_1 es la velocidad específica de fractura y es una constante de proporcionalidad que se presenta sus unidades en t^{-1} . Considerando que S_1 no varía con el tiempo se integra la ecuación, teniendo en cuenta que la condición inicial es $w_1(0)$, da como resultado:

$$\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_1 t / 2.3 \quad (8)$$

Aplicando la hipótesis de primer orden en una situación de molienda experimental, es posible aproximarse al valor real de la velocidad de fractura, este concepto fue aplicado por Gardner y Austin, utilizando la técnica de trazadoras radioactivas, en la que si un tamaño es marcado con un trazador, el desaparecimiento de esa fracción de tamaño con el tiempo, puede ser distinguido de la aparición, en ese mismo tamaño de productos de fractura de tamaños mayores, ya que estos no estarían marcados”(Austin y Concha,1994, p.67). resulta:

$$w_j(t)/w_j(0) = \text{ex}(-S_j t) \quad (9)$$

$w_j(t)$ es la fracción de material marcado de tamaño j .

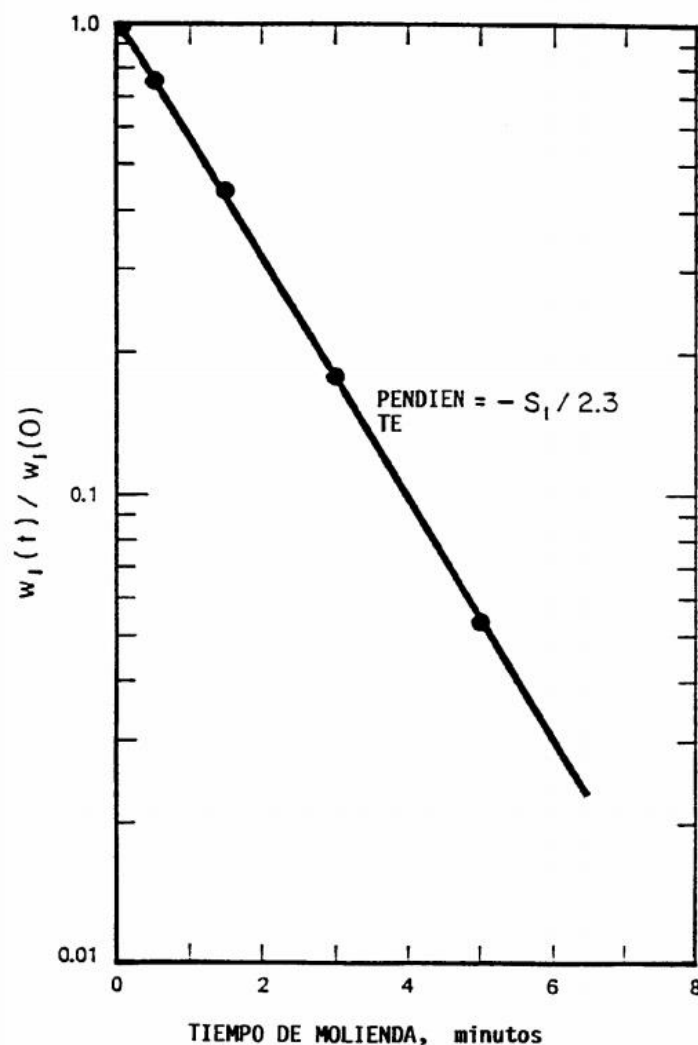


Figura 1.10. Ejemplo de gráfico de primer orden.

Fuente: (Austin & Concha, 1994).

CAPÍTULO II: EXPERIMENTACIÓN

2.1. Selección y caracterización del material silíceo

Como parte inicial del proyecto, se realizó la recolección de muestras, para ello se seleccionó un material con alto porcentaje de sílice, siendo éste, cantos rodados aluviales del río Santa Bárbara (Sígsig), cuyas propiedades químicas indican un alto contenido del mineral de interés para las pruebas.

2.2. Preparación de las muestras

Una vez recolectado el material se procedió a su debida adecuación para posteriormente entrar a la fase de molienda, es decir, el material se sometió a una primera fase de trituración para obtener el mono tamaño deseado: pasante malla 3/8 (9,5mm).



Figura 11. Material a moler.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 10. Vibro Tamiz de Laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la primera etapa de trituración, donde se obtuvo material pasante 3/8, el material sobrante con otros tamaños fue mezclado y reclasificado, utilizando el vibro tamiz de laboratorio para obtener un retenido en la malla 5/16.

Adicionalmente, se realizó la molienda del material de rechazo (tamaño no deseado) para su posterior tamizaje y así obtener el material pasante de malla 200 (Fino) mismo que fue utilizados para los ensayos.



Figura 12. Material Fino.

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Equipo a utilizar

Para realizar los ensayos se utilizaron los siguientes elementos:

- Molino SAG de laboratorio con estas características:
 - Medidas: diámetro= 0,6 m y largo= 0,22 m.
 - Carga y descarga manual.
 - Circuito abierto.
 - Velocidad controlada por panel electrónico.
 - Medidor de potencia.
 - Bolas de acero (3.5 in).
- Material de alimento: material silíceo monotamaño 3/8 (pasante malla 3/8, retenido malla 5/16) y material Fino (pasante malla 200).
- Agua (red pública).

2.4. Condiciones generales de operación

Al iniciar el proceso investigativo, se partió con un ensayo base para posteriormente realizar la comparativa propuesta en el presente trabajo, la cual trata sobre la incidencia en la molienda según la variación del porcentaje de la fracción de finos. El ensayo base constó de los siguientes parámetros:

2.4.1. Capacidad del molino

Según las especificaciones del fabricante el molino puede soportar una carga máxima de 70 Kg la que está comprendida entre mena y medios moledores.

2.4.2. Carga de bolas

De acuerdo a (Universidad de Buenos Aires, 2015) se menciona que para molienda SAG la cantidad de bolas debe ser entre el 4% y el 15 % del volumen total del molino. Para el cálculo de volumen de bolas (V_b) se tomó una fracción de llenado de bolas del 15%, y una porosidad del 0.47. Por lo tanto:

$$V_b = 0.15 * V_t * (1 - 0.47) \quad (10)$$

Cálculo:

$$V_b = 0.15 * 62203.68 * 0.53$$

$$V_b = 4945.19 \text{ cm}^3$$

Partiendo del volumen obtenido, se obtiene la masa de las bolas (m). La densidad de las bolas de acero es de 7.85 gr/cm^3 .

$$\rho = \frac{m}{V_b} \quad (11)$$

Cálculo:

$$m = 7.85 * 4945.19$$

$$m = 38819.76 \text{ gr} = \mathbf{38.82 \text{ Kg}}$$

2.4.3. Velocidad del molino

La velocidad de rotación ideal para que se realice el trabajo de manera correcta debe estar entre el 70% a 85% de la velocidad crítica. De acuerdo al fabricante del molino, la velocidad crítica (γ) es de 57 r.p.m. Para realizar el experimento se usó una velocidad (σ) de 40 r.p.m.

$$\sigma = \sigma_c \gamma \quad \sigma_c = \frac{\sigma}{\gamma} \quad \sigma_c = \frac{40}{57} = 0.7$$

La fracción de velocidad crítica (σ_c), con el molino operando a 40 r.p.m. equivale a 70% por lo tanto se encuentra dentro de los parámetros ideales de velocidad. El intervalo de tiempos propuestos para la toma de las muestras fue en los siguientes minutos: 1, 2.5, 5, 10 y 15 min.

2.5. Condiciones experimentales de operación

Teniendo en cuenta los parámetros iniciales de operación se planteó realizar 5 experimentos, los cuales se rigen a diferentes condiciones operacionales, en las que el peso total de carga de alimento se mantiene constante y se realiza un ajuste de la variación de la fracción de sólidos (gruesos y finos) y de la humedad.

En los dos primeros ensayos de molienda seca y húmeda no fueron añadidos materiales finos; mientras que los tres restantes se vieron influenciados por la adición de sólidos finos en diferentes fracciones, siendo estas del 20%, 40% y 50%.

La eficiencia se evaluó según cuatro aspectos, granulometría, velocidad de fractura, potencia consumida y energía específica de molienda, en cada aspecto se realiza una comparación entre los ensayos para evaluar el comportamiento dado por la adición de finos frente a un ensayo sin finos a lo largo del tiempo de molienda.

2.6. Diseño de experimentos a desarrollar

Los experimentos tuvieron como alimento material silíceo con un monotamaño 3/8 (pasante malla 3/8 retenido malla 5/16) y una pulpa preparada con agua y material fino (0.75 μ m) bajo diferentes fracciones de sólidos finos (20%, 40%, 50%), dichas fracciones se definieron en función de la respuesta reológica de la pulpa madre que fue medida a una tasa de cizalladura de 21 s⁻¹ en una mena silíceo realizada por (Valencia 2019).

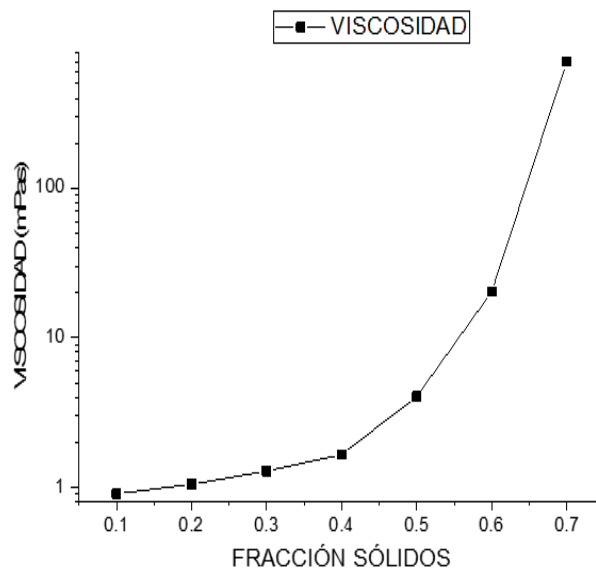


Figura 13. Respuesta reológica de material silíceo.

Fuente: (Valencia, 2019).

Una vez preparado el material de alimento según el porcentaje de finos y humedad de acuerdo a la tabla 2.1, con velocidad constante del molino a 40 rpm, y una carga de bolas constante, se procedió a realizar los ensayos propuestos. Para cada uno se realizó la toma de muestras en los siguientes tiempos: 1, 2.5, 5, 10 y 15 minutos.

La cantidad de muestra mínima tomada fue de 500 gr. Para cada muestra se realizó un tamizaje para su respectivo cálculo de distribución granulométrica (DTP). El molino mantuvo su carga constante para ello fue necesario que luego de cada tamizaje, el material fuera devuelto al molino, para continuar con la molienda, antes de obtener la siguiente muestra. Para el caso de molienda húmeda la muestra se sometió a un proceso de secado previo a ser tamizada, se repuso la cantidad de agua evaporada en el molino.

Para el análisis de granulometría y velocidad de fractura se consideró evaluar todos los ensayos; mientras que para el caso de potencia y energía se consideró tres ensayos: molienda húmeda sin finos, molienda húmeda con adición de finos al 40% y al 50%, ya que son datos suficientes para determinar la tendencia que se presenta. El experimento con sus diferentes configuraciones se detalla a continuación.

Tabla 2.1. Detalle de experimento.

Pulpa			Sólidos Gruesos		Bolas
Fracción en peso	Peso de Sólido Fino	Volumen de Agua	Peso de Sólido Grueso	Peso Total de Carga	Carga de Bolas
Cw	Ws	Vl	Wm	Wt	Wb
	(kg)	(l)	(kg)	(kg)	(kg)
-	-	-	31.77	31.77	38.82
-	-	1.87	29.9	31.77	38.82
0.20	0.47	1.87	29.43	31.77	38.82
0.40	1.24	1.87	28.66	31.77	38.82
0.60	1.87	1.87	28.04	31.77	38.82

Fuente: Elaboración propia.

2.7. Análisis granulométrico

Para el análisis granulométrico se utilizó el método mecánico donde se utilizaron tamices y un ro-tap de laboratorio, el tiempo de tamizaje fue de cinco minutos. Para este análisis se tomó muestras secas con un peso que varió entre los 500 gr a 2000 gr. En la tabla 2.2 se detallan las aberturas de los tamices empleados. El cálculo de las DTP se realizó empleando la distribución de Gates Gaudin Schuhmann (GGS), la misma que se acoplo al modelo y permite obtener resultados más representativos, ya que el margen de error de la distribución es menor.

Tabla 2.2. Equivalencia de tamices.

EE.UU. ASTM E11-87	Internacional ISO 565 (TLB2): 1983
Equivalencia malla N°	Abertura mm/ μ m
3/8	9.5 mm
8	2.36 mm
10	2 mm
30	600 μ m
50	300 μ m
80	180 μ m
100	150 μ m
200	75 μ m

Fuente: Elaboración propia.

2.7.1. Granulometría

Una vez realizado el tamizaje, se pesó la cantidad de material retenido en cada tamiz, se construyó una tabla en la que se indica el peso por tamiz, porcentaje retenido, porcentaje acumulado, pasante y además se indican parámetros de la distribución de Gaudin Schuhmann, revisar anexos.

2.7.2. Distribución de Gates Gaudin Schuhmann

Partiendo de los pesos retenidos por cada tamiz se procedió a realizar la distribución de Gaudin Schuhmann por cada ensayo y tiempo de muestreo empleando las respectivas fórmulas. Las distribuciones de tamaño para cada ensayo se indican a continuación.

Tabla 2.3. Distribución de Schuhmann ensayo seco.

Abertura (μm)	% Pasantes ajustado				
	1 min	2.5 min	5 min	10 min	15 min
9500	20.260	24.731	38.928	51.249	76.30
2360	5.724	7.592	12.926	17.601	28.28
2000	4.925	6.598	11.339	15.501	25.13
600	1.651	2.377	4.372	6.153	10.65
300	0.880	1.320	2.525	3.615	6.50
180	0.554	0.856	1.685	2.442	4.52
150	0.469	0.734	1.459	2.123	3.97
75	0.250	0.408	0.843	1.247	2.42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.4. Distribución de Schuhmann ensayo húmedo.

Abertura (μm)	% Pasantes ajustado				
	1 min	2.5 min	5 min	10 min	15 min
9500	13.624	19.196	79.159	60.495	45.23
2360	4.763	7.412	27.123	21.636	17.22
2000	4.204	6.619	23.881	19.147	15.35
600	1.695	2.907	9.460	7.872	6.66
300	1.004	1.810	5.551	4.719	4.12
180	0.683	1.277	3.748	3.236	2.89
150	0.595	1.127	3.257	2.828	2.55
75	0.353	0.702	1.911	1.695	1.58

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5. Distribución de Schuhmann ensayo con fracción 20% de finos.

Abertura (μm)	% Pasantes ajustado				
	1 min	2.5 min	5 min	10 min	15 min
9500	22.102	24.846	23.581	29.398	38.40
2360	8.461	8.484	8.420	10.864	16.13
2000	7.549	7.466	7.450	9.652	14.55
600	3.292	2.949	3.058	4.082	6.87
300	2.041	1.727	1.832	2.487	4.46
180	1.435	1.165	1.255	1.726	3.25
150	1.266	1.012	1.097	1.515	2.90
75	0.785	0.593	0.657	0.923	1.88

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.6. Distribución de Schuhmann ensayo con fracción 40% de finos.

Abertura (μm)	% Pasantes ajustado				
	1 min	2.5 min	5 min	10 min	15 min
9500	15.466	29.789	22.693	24.921	26.82
2360	6.373	11.116	8.350	9.894	10.91
2000	5.736	9.887	7.414	8.866	9.80
600	2.665	4.217	3.124	3.989	4.50
300	1.714	2.582	1.899	2.519	2.88
180	1.238	1.798	1.316	1.795	2.07
150	1.103	1.581	1.155	1.590	1.84
75	0.709	0.968	0.702	1.004	1.17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.7. Distribución de Schuhmann ensayo con fracción 50% de finos.

Abertura (μm)	% Pasantes ajustado				
	1 min	2.5 min	5 min	10 min	15 min
9500	16.540	18.176	27.655	23.146	28.04
2360	6.740	6.358	10.338	9.104	11.59
2000	6.058	5.611	9.197	8.149	10.43
600	2.788	2.263	3.928	3.637	4.86
300	1.783	1.342	2.407	2.286	3.13
180	1.283	0.913	1.678	1.623	2.26
150	1.141	0.795	1.475	1.437	2.02
75	0.730	0.471	0.904	0.903	1.30

Fuente: Elaboración propia.

2.8. Curvas granulométricas

Las curvas granulométricas se construyeron según el porcentaje pasante, de la misma manera se construyeron curvas ajustadas a la distribución de Schuhmann. Los gráficos indican la curva obtenida por cada tiempo. Las curvas se encuentran en los anexos del 6 al 10.

2.9. Velocidad de fractura

La velocidad de fractura es un parámetro importante para el cálculo de energía, esta muestra el comportamiento cinético en la molienda. Se calculó la velocidad de fractura según cada tamaño, empleando las ecuaciones (7) y (8), los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2.8. Constante Cinética de Fractura (Sj).

	Tamaño (µm)							
	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
Seco	0.060	0.047	0.135	0.119	0.117	0.147	0.137	0.131
Húmedo	0.053	0.068	0.074	0.106	0.109	0.140	0.104	0.098
F. 20%	0.021	0.019	0.028	0.043	0.069	0.063	0.074	0.057
F.40%	0.009	0.017	0.006	0.009	0.036	0.031	0.038	0.025
F.50%	0.0104	0.0133	0.0455	0.0432	0.0534	0.0488	0.0508	0.0437

Fuente: Elaboración propia.

Nota. Las unidades de velocidad se encuentran en min⁻¹.

2.10. Potencia

Como parte del proceso experimental se adaptó al molino un lector de potencia, el mismo que puede ser configurado para tomar cierto número de datos por segundo de acuerdo a los requerimientos de los ensayos. En este caso se tomaron cinco datos por segundo.



Figura 14. Lector de Potencia.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó la lectura de potencia en tres ensayos, debido a que con estos es posible analizar la tendencia de las curvas respecto al consumo de energía, los ensayos seleccionados fueron: molienda húmeda sin finos, molienda con fracción de finos del 20% y 50%. A diferencia de los ensayos anteriores estos no tuvieron interrupciones durante la molienda. Los valores obtenidos se organizaron y promediaron dando así resultados por minuto.

Tabla 2.9. Potencia obtenida por ensayos.

Tiempo (min)	Molienda húmeda	Potencia (W)	
		Fracción de finos 20%	Fracción de finos 50%
1	376.487	365.338	372.628
2	376.420	370.564	373.847
3	375.192	380.263	369.868
4	384.173	383.751	374.351
5	384.015	378.408	377.131
6	387.670	388.463	353.913
7	384.089	383.227	289.756
8	389.174	387.369	263.960
9	388.845	381.631	257.955
10	385.904	372.165	261.764
11	387.284	334.152	246.239
12	366.793	300.612	240.616
13	324.678	269.179	228.617
14	276.655	262.209	232.171
15	269.152	258.291	221.764

Fuente: Elaboración propia.

2.11. Cálculo de energía según las distintas condiciones de molienda

El cálculo de eficiencia se realizó basado en el concepto definido por (Austin & Concha, 1994) en el que se habla de una energía específica constante cuando “Los valores de S deben ser proporcionales a la potencia consumida por el molino por unidad de masa de materia retenido en él” (p.80). La fórmula empleada considera que para el cálculo de energía es necesario tomar en cuenta la potencia suministrada (m_p), la velocidad de fractura (S) y la masa constante de material (W).

$$E = \frac{m_p}{SW} \quad (12)$$

Tabla 2.10. Energía Específica, Ensayo Húmedo.

Tiempo (min)	Tamaño (μm)							
	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1	223.59	174.27	160.14	111.80	108.72	84.65	113.95	120.92
2.5	224.79	175.20	161.00	112.39	109.30	85.10	114.56	121.57
5	228.06	177.76	163.34	114.03	110.89	86.34	116.22	123.34
10	229.19	178.63	164.15	114.59	111.44	86.76	116.80	123.95
15	159.85	124.59	114.49	79.92	77.72	60.51	81.46	86.45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.11. Energía Específica, Ensayo Fracción de Finos 20%.

Tiempo (min)	Tamaño (μm)							
	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1	547.59	605.23	410.69	267.43	166.66	182.53	155.40	201.74
2.5	562.32	621.51	421.74	274.62	171.14	187.44	159.58	207.17
5	567.18	626.89	425.39	277.00	172.62	189.06	160.96	208.96
10	557.83	616.55	418.37	272.43	169.77	185.94	158.30	205.52
15	387.14	427.90	290.36	189.07	117.83	129.05	109.87	142.63

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.12. Energía Específica, Ensayo Fracción de Finos 50%.

Tiempo (min)	Tamaño (μm)							
	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1	1127.78	881.87	257.78	271.50	219.64	240.35	230.88	268.40
2.5	1126.31	880.72	257.44	271.15	219.36	240.03	230.58	268.05
5	1141.41	892.53	260.89	274.78	222.30	243.25	233.67	271.64
10	792.24	619.50	181.08	190.73	154.29	168.84	162.19	188.54
15	671.18	524.83	153.41	161.58	130.72	143.04	137.41	159.73

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Gráficas y análisis de los resultados

El resultado de la investigación tiene impacto en 4 parámetros importantes dentro de la molienda, estos son: granulometría; velocidad de fractura; potencia y energía específica de molienda. Los resultados presentados corresponden a procesos de molienda con carga constante de bolas y alimento, en los que existe variación en la fracción de finos y humedad, las figuras que se presentan a continuación permitieron entender y verificar lo que se menciona en la teoría mediante la experimentación a escala de laboratorio.

3.1.1. Resultados de la granulometría

Al observar las curvas granulométricas (anexo 6-10) obtenidas, se deduce que conforme se adiciona humedad y finos, las curvas tienden a juntarse, es decir, la reducción de tamaño toma más tiempo. Por ejemplo, al evaluar la gráfica del ensayo seco la diferencia de separación entre la curva del minuto 15 frente a la del minuto 1 es considerable; mientras que conforme se adiciona finos las curvas de los ensayos presentan una separación menor entre ellas.

La figura 3.1 muestra una comparación de las curvas granulométricas obtenidas al terminar los 15 minutos de molienda, en el que se grafica el tamaño frente al porcentaje pasante. Se observa que conforme aumenta el contenido de material fino en molienda húmeda, la molienda resulta ineficiente puesto que la granulometría resultante cada vez tiene un menor porcentaje pasante de cada tamiz.

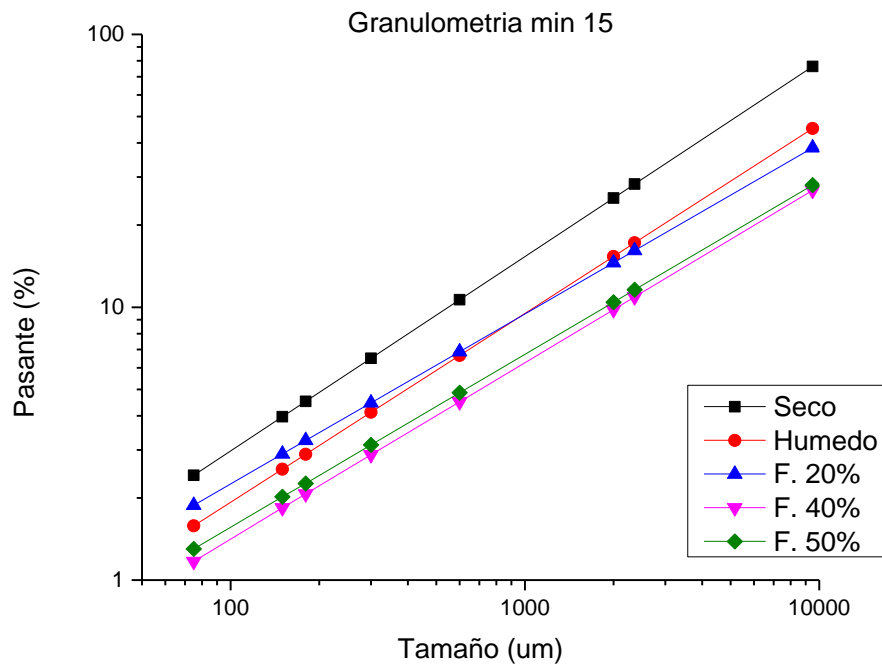


Figura 15. Resultados de Granulometría.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Resultados de la velocidad de fractura

Al usar monotamaños se puede conocer cómo influyen las variables (fracción de finos) en la cinética de fractura y distribución primaria. La velocidad de fractura presentada en la figura 3.2 muestra el comportamiento de la velocidad de fractura de dos tamaños, el primero corresponde a 9500 μm y el segundo a 2360 μm , las curvas presentan una tendencia descendente conforme se adicionan finos a la molienda húmeda haciendo que el proceso de fracturación sea más lento. Se consideran los tamaños más grandes puesto que el análisis corresponde a evaluar la fractura primaria.

La figura 3.3 muestra el comportamiento de la velocidad de fractura de cada ensayo, esta velocidad se mantiene constante durante todo el tiempo de molienda, como se observa para tamaños más pequeños la velocidad es mayor y va disminuyendo conforme el tamaño aumenta, de la misma manera la configuración de molienda empleada con la adición de finos hace que la velocidad disminuya.

En el apartado de anexos se puede observar las gráficas de primer orden de los tres ensayos en el que se muestra aceleración y desaceleración de acuerdo al tamaño, este comportamiento se da por las condiciones que genera la densidad de la pulpa, la carga de bolas y el polvo. Este experimento permite verificar la hipótesis de primer orden en la que se habla de que al triturar o fracturar una cantidad de material con un tamaño que se encuentra dentro de un intervalo determinado, ese tamaño es proporcional con la cantidad dentro del molino. Sin embargo, las gráficas de primer orden del trabajo experimental realizado muestran que la acumulación de finos según el ensayo, afecta muy poco a la velocidad de fractura específica del tamaño mayor del material (9500um) las gráficas muestran una pendiente negativa en todos los casos.

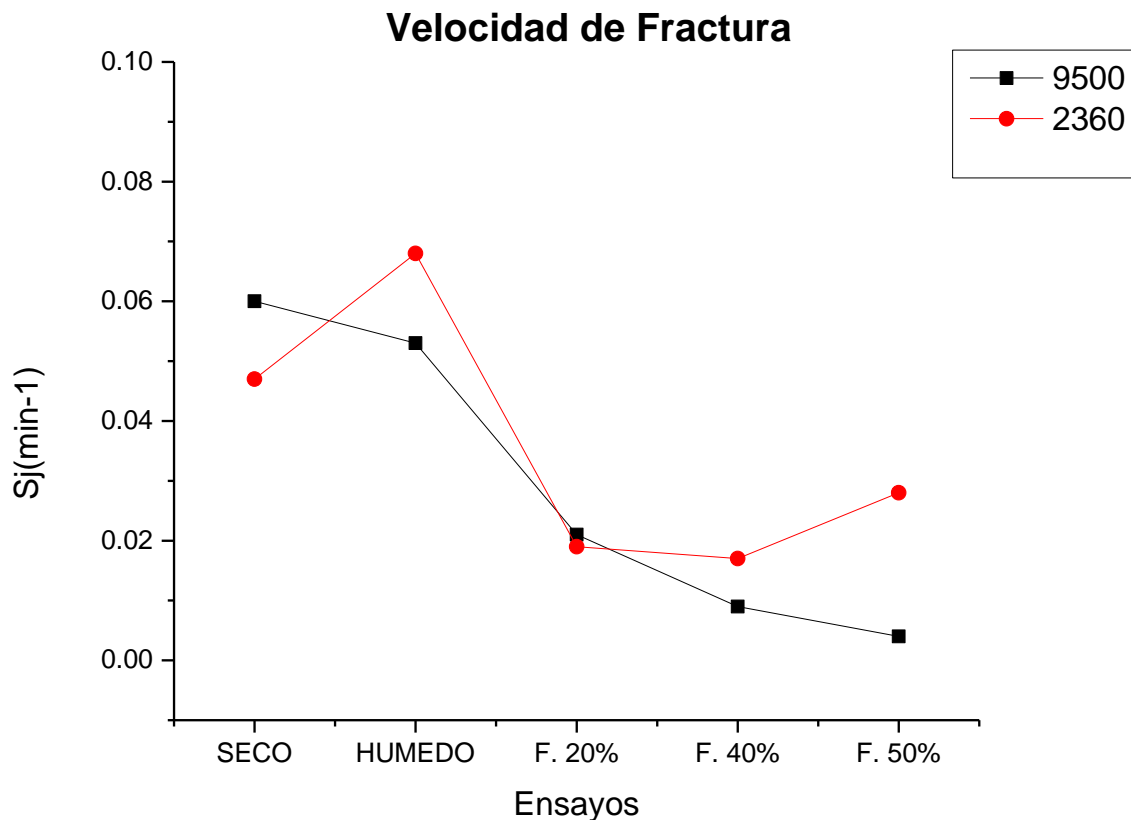


Figura 16. Resultados Velocidad de fractura.

Fuente: Elaboración propia.

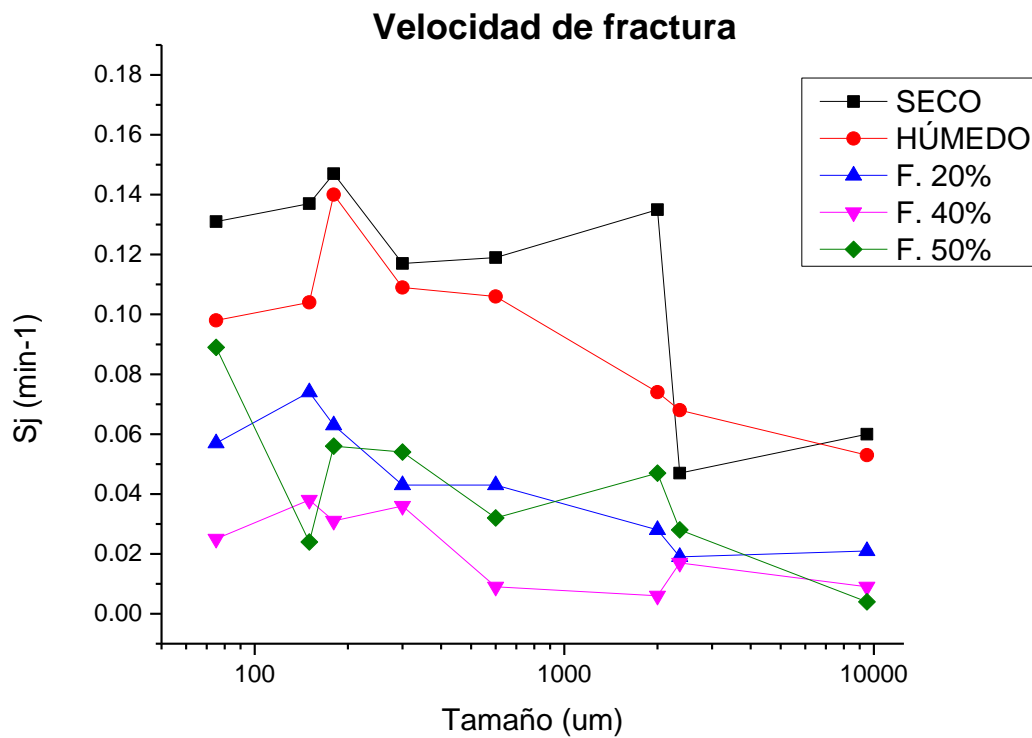


Figura 17. Velocidad de fractura según las diferentes configuraciones de molienda.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Resultados de potencia

Evaluando el consumo de potencia a lo largo de los 15 minutos de molienda de los tres ensayos se observa en la figura 3.4 como el consumo empieza a variar al inicio del minuto 5 para el ensayo con fracción de finos del 50% en comparación con los otros dos, de la misma manera al evaluar el consumo específico se observa una disminución considerable esto representa una reducción del 18.18% de energía.

Tabla 13. Resultados de potencia.

Masa (kg)	Ensayo	Potencia (W)	Consumo Específico (W/kg)	Reducción (%)
31.77	Húmedo	363.769	11.45	-
	Finos 20 %	347.708	10.94	4.42
	Finos 50%	294.639	9.37	18.18

Fuente: Elaboración propia.

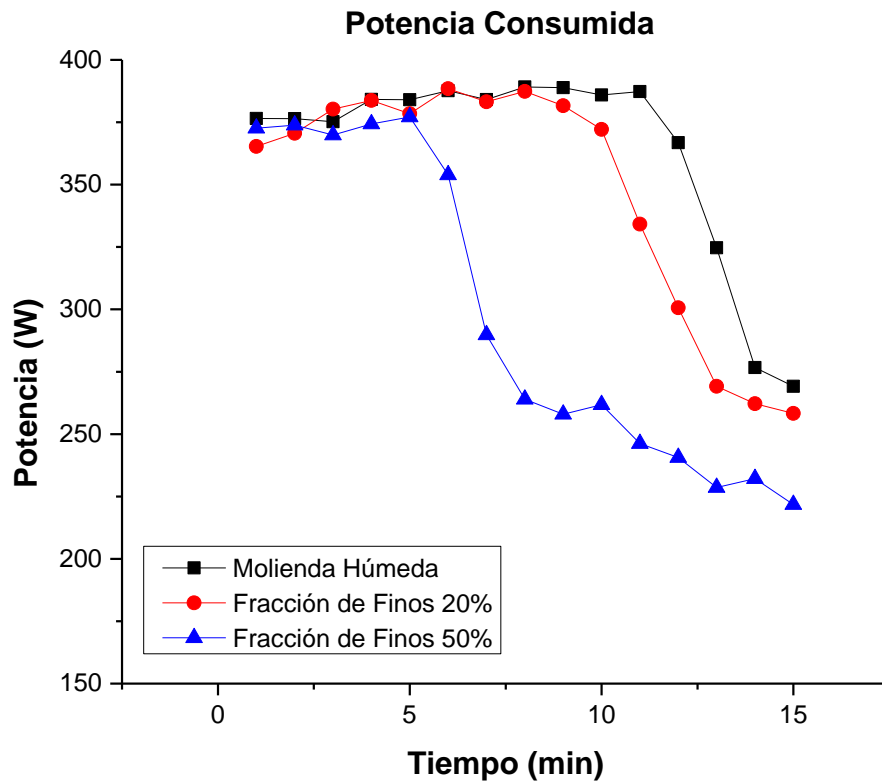


Figura 18. Resultados de Potencia.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Resultados de la energía específica de molienda

Las figuras desde la 3.5 a la 3.12 muestran la energía específica de molienda por kilogramo que se requiere para fracturar cada tamaño, como se mencionó anteriormente se tomaron solo tres ensayos ya que proporcionan información suficiente para determinar la tendencia de consumo energético, para esto se hace una comparación entre los tres ensayos evaluados; molienda húmeda y molienda húmeda con adición de fracción de finos de 20% y 50%. Como se observa el comportamiento conserva la misma tendencia según los tamaños, para tamaños grandes existe mayor consumo de energía y conforme va disminuyendo el tamaño la energía disminuye igual, se debe tomar en cuenta que los cambios de dirección de la curva ocurren a partir del minuto 5 para el ensayo con finos al 50%, mientras que los dos restantes al minuto 10. Estos cambios tienen relación con el consumo de potencia analizado en el párrafo anterior.

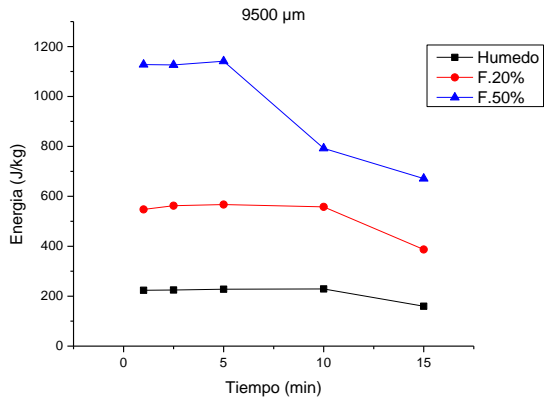


Figura 19. Energía específica 9500 μm.

Fuente: Elaboración propia.

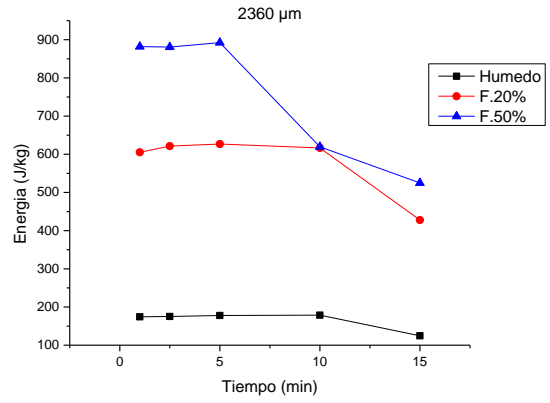


Figura 20. Energía específica 2360 μm.

Fuente: Elaboración propia.

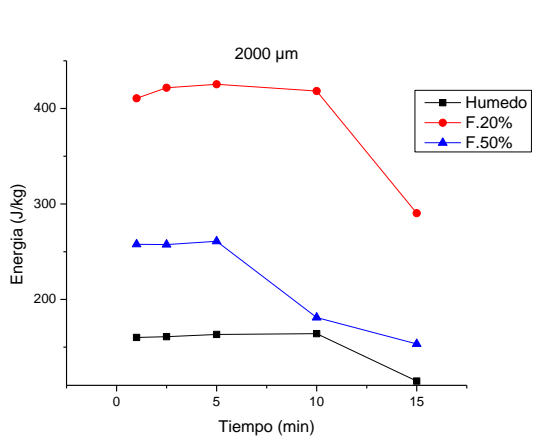


Figura 22. Energía específica 2000 μm.

Fuente: Elaboración propia.

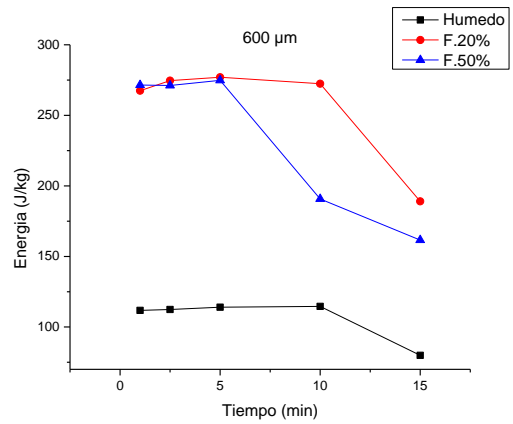


Figura 21. Energía específica 600 μm.

Fuente: Elaboración propia.

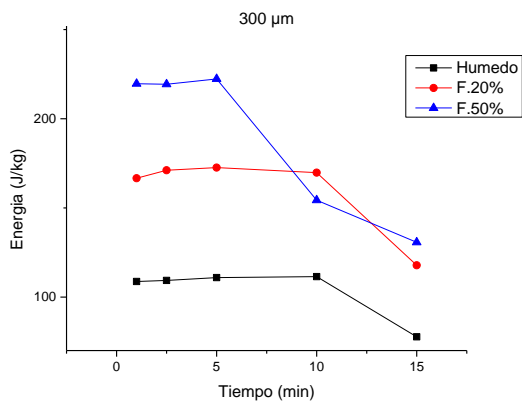


Figura 24. Energía específica 300 μm.

Fuente: Elaboración propia.

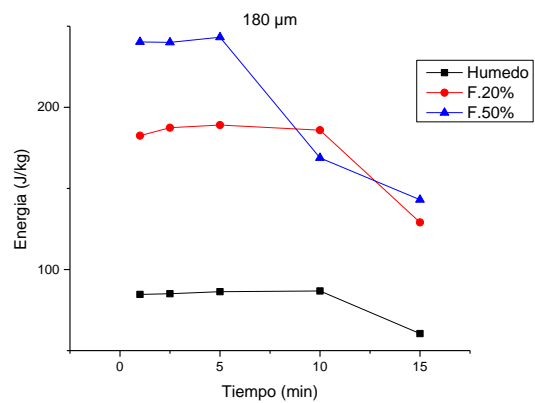


Figura 23. Energía específica 180 μm.

Fuente: Elaboración propia.

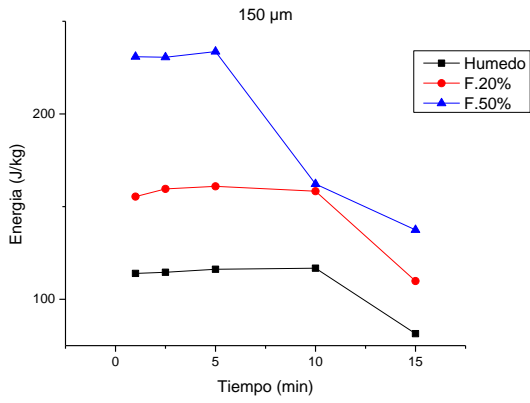


Figura 26. Energía específica 150 µm.

Fuente: Elaboración propia.

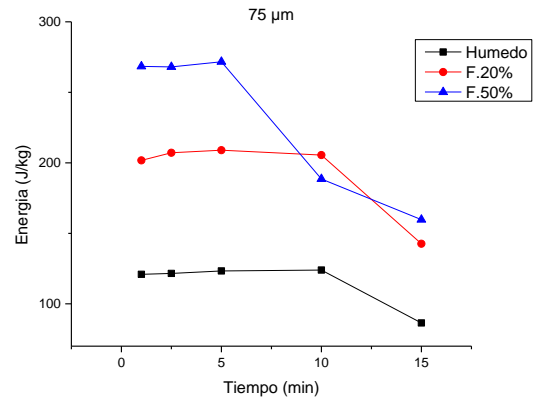


Figura 25. Energía específica 75 µm.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El proyecto presentado tuvo como finalidad determinar cuál es el comportamiento que existe en la molienda húmeda y seca con diferentes fracciones de sólidos finos, evaluando el comportamiento de la granulometría obtenida, potencia consumida, velocidad de fractura y energía específica de molienda, según los resultados obtenidos en la experimentación se concluye que:

- El molino SAG de acuerdo a la teoría y práctica se define como un equipo que sustituye etapas de trituración (secundaria y terciaria), por lo que la función de este tipo de molienda, no es obtener la mayor cantidad de finos posibles sino más bien utilizar los diferentes mecanismos de fractura para debilitar el material y facilitar procesos de molienda posteriores. Al analizar la granulometría obtenida al minuto 15, se observa que la presencia de finos genera una ineficiencia, puesto que el contenido pasante (%) va disminuyendo con el tiempo.
- La reología juega un papel importante dentro del estudio de molienda húmeda, la misma explica el comportamiento del fluido generado por el agua y el contenido de finos, durante los primeros minutos. La consistencia del fluido permite escurrir las partículas de menor tamaño permitiendo que la zona de fractura quede libre y ocurra la fragmentación. Al acumularse material fino la reología de la pulpa cambia e impide la correcta fracturación de los tamaños más gruesos, aumentando la velocidad de fractura de los tamaños más pequeños.
- El aumento de finos cambia la densidad de la pulpa y genera disminución de la velocidad de fractura, de acuerdo a la figura 3.3 el contenido de finos al 40% produce las velocidades mínimas de fractura. Al agregar más contenido de finos, la reología tiende a normalizarse de acuerdo a (Austin & Concha, 1994) en este punto la fractura de las partículas más pequeñas se puede considerar de primer orden.

- En la molienda húmeda durante los primeros minutos de trabajo las partículas finas forman una suspensión de consistencia viscosa de acuerdo a los límites de Atterberg con un determinado índice de plasticidad; conforme avanza la molienda van apareciendo más finos y estos absorben la humedad, haciendo que la masa interna entre en un estado semisólido impidiendo la correcta fractura por impacto.
- La velocidad de fractura indica la cantidad de fracturas que ocurren durante un tiempo determinado, al evaluar los resultados se observa que, al aumentar la humedad y la fracción de finos, la velocidad va disminuyendo haciéndose cada vez más ineficiente el proceso ya que al generarse en el interior del molino una suspensión viscosa, impide fracturar las partículas pequeñas puesto que dicha suspensión absorbe la fuerza de impacto.
- La potencia indica la cantidad de energía eléctrica que se suministra al molino para realizar el trabajo, conforme se aumenta el contenido de finos la potencia tiende a disminuir luego de 5 minutos de molienda, al comparar el ensayo de molienda húmeda frente a la molienda con fracción de finos de 50% se observa una reducción de consumo del 18.18%, esto debido a que la carga al interior del molino al mezclarse con agua y finos durante el tiempo de molienda actúa como una masa semisólida que al elevarse y caer nuevamente impulsada por la fuerza de la gravedad genera un impulso que ayuda a girar el molino.
- Las gráficas de consumo específico de energía son una guía comparativa de eficiencia, ya que valores altos de energía causan ineficiencia de molienda. Al relacionar los consumos de energía y potencia se deduce que para la molienda con fracción de finos del 50% es efectiva durante los primeros 5 minutos, ya que a partir de este punto la energía disminuye y ocurre lo mencionado en la conclusión anterior.

Recomendaciones

- Determinar cuál es la fracción de sólidos adecuada para obtener la mayor eficiencia en molienda SAG, además de realizar estudios complementarios sobre la molienda SAG, debido a que hay más variables que influyen en el proceso, siendo estas: densidad de la pulpa, medios moledores, variación de la velocidad de rotación y análisis del comportamiento de la carga.
- El molino del laboratorio funciona como un circuito cerrado, es por eso que se debe evitar filtraciones de agua durante la molienda húmeda, una manera de hacerlo es impermeabilizando la tapa del molino. Al finalizar la molienda limpiar correctamente el molino y secarlo, para facilitar la realización de experimentos posteriores.
- Evitar contratiempos durante el trabajo de laboratorio, contar con todos los implementos listos y calibrados, tener la cantidad necesaria de material a ser estudiado, además se debe considerar el tiempo necesario para preparar el material en sus procesos de trituración y tamizaje.
- Verificar que los equipos con los que se vaya a trabajar estén funcionando correctamente, para así evitar accidentes y pérdidas de tiempo por reparación.
- Conocer cuáles son las medidas de seguridad que existen en el laboratorio, utilizar todo el tiempo los equipos de protección personal y saber cómo actuar frente a cualquier emergencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arana, J., & Gonzáles, J. (2002). *Mecánica de Fracturas*. Universidad del País Vasco, Servicio Editorial = Euskal Herriko Unibertsitatea, Argitalpen Zerbitzua. <https://web-argitalpena.adm.ehu.es/pdf/UCWEB024559.pdf>
- Austin, L., & Concha A., F. (1994). *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación* (1.a ed.). Universidad Técnica Federico Santa María Ediciones.
- Blanco, E. (2014). *Curso: Tecnología Mineralúrgica* <https://bit.ly/3ziaRv3>
- Bustamante, M. (s. f.). *Conminución de minerales: Trituración y molienda*. Universidad Nacional de Colombia.
- Codelco Chile. (2018). MOLIENDA «Todo a la juguera». Codelco Educa. [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda media t cnico 060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda%20media%20cnico%20060119.pdf)
- Duque G., & Escobar, C. (2002). *Mecánica de suelos*. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/>
- Espinace Abarzua, R., & Sanhueza Plaza, C. (2004). *Texto guía para cátedra de mecánica de suelos*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- García, J., & Muñoz, J. (2020). *Análisis de eficiencia de molienda seca sag para una mena de sulfuros*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9927>
- He, M., & Forssberg, E. (2007). *Influence of slurry rheology on stirred media milling of quartzite*. International Journal of Mineral Processing, 84(1-4), 240-251. Juárez, E. (1974). *Mecánica de suelos I*, 3a ed: Fundamentos de la mecánica de suelos (3.a ed.). Editorial Limusa.
- Instituto Espacial Ecuatoriano & MAGAP. (2013, julio). *Generación De Geoinformación Para La Gestión Del Territorio A Nivel Nacional. Escala 1: 25 000*. <https://n9.cl/6z18g>
- Minero, R. (2018, mayo). Chancado y Molienda en minería: Paso previo hacia el material fino
- Pérez, A., & Márquez, A. (2017). *Sedimentología* (1.ª ed., Vol. 1). Universidad Autónoma Metropolitana. <http://publicacionescbs.izt.uam.mx/DOCS/SEDIMENTOL.pdf>

- Rosales Marín, G., Andrade Martínez, J., Alvarado Macías, G., Espinosa Serrano, E., & Nava Gómez, D. (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), 1–8. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.020>
- Sbarbaro, D., Barriga, J., y Cortes, G. (2005). *A Multi-Input–Single-Output Smith Predictor*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1069-1075.
- Universidad de Buenos Aires. (2015). Industrias 1. En Molienda (p. 20). <https://n9.cl/8n9we>
- Yomineria Chile. (2019). *Conminución*. <https://bit.ly/3e9jMX4>
- Yomineria. (s. f.). *mecanismos de fractura*. Yomineria Chile. Recuperado 11 de julio de 2021, de <https://n9.cl/n3jo>

ANEXOS

Anexo 1. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo seco.

Tamaño (μm)	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1 min								
Retenido (gr)	935.70	231.30	4.80	27.50	10.60	6.40	2.10	4.80
Retenido (%)	76.50	18.91	0.39	2.25	0.87	0.52	0.17	0.39
Ret. Ac (%)	76.50	95.41	95.80	98.05	98.91	99.44	99.61	100.00
Pas(%)	23.50	4.59	4.20	1.95	1.09	0.56	0.39	-
Log(Y(X))	1.37	0.66	0.62	0.29	0.04	-0.25	-0.41	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	20.26	5.72	4.93	1.65	0.88	0.55	0.47	0.25
2.5 min								
Retenido (gr)	800.40	279.90	6.40	33.10	11.10	7.10	2.70	7.60
Retenido (%)	69.70	24.38	0.56	2.88	0.97	0.62	0.24	0.66
Ret. Ac (%)	69.70	94.08	94.64	97.52	98.48	99.10	99.34	100.00
Pas(%)	30.30	5.92	5.36	2.48	1.52	0.90	0.66	-
Log(Y(X))	1.48	0.77	0.73	0.39	0.18	-0.05	-0.18	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	24.73	7.59	6.60	2.38	1.32	0.86	0.73	0.41
5 min								
Retenido (gr)	765.10	492.90	16.30	71.80	23.40	16.70	6.80	18.40
Retenido (%)	54.21	34.92	1.15	5.09	1.66	1.18	0.48	1.30
Ret. Ac (%)	54.21	89.13	90.29	95.37	97.03	98.21	98.70	100.00
Pas(%)	45.79	10.87	9.71	4.63	2.97	1.79	1.30	-
Log(Y(X))	1.66	1.04	0.99	0.67	0.47	0.25	0.12	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	38.93	12.93	11.34	4.37	2.53	1.69	1.46	0.84
10 min								
Retenido (gr)	762.70	533.40	24.80	113.80	38.20	34.30	15.80	23.60
Retenido (%)	49.31	34.49	1.60	7.36	2.47	2.22	1.02	1.53
Ret. Ac (%)	49.31	83.80	85.41	92.76	95.23	97.45	98.47	100.00
Pas(%)	50.69	16.20	14.59	7.24	4.77	2.55	1.53	-
Log(Y(X))	1.70	1.21	1.16	0.86	0.68	0.41	0.18	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	51.25	17.60	15.50	6.15	3.61	2.44	2.12	1.25
15 min								
Retenido (gr)	474.80	627.70	44.60	194.50	68.90	61.20	16.90	47.70
Retenido (%)	30.91	40.86	2.90	12.66	4.48	3.98	1.10	3.10
Ret. Ac (%)	30.91	71.76	74.67	87.33	91.81	95.80	96.90	100.00
Pas(%)	69.09	28.24	25.33	12.67	8.19	4.20	3.10	-
Log(Y(X))	1.84	1.45	1.40	1.10	0.91	0.62	0.49	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	76.30	28.28	25.13	10.65	6.50	4.52	3.97	2.42

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo húmedo.

Tamaño (μm)	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1 min								
Retenido (gr)	604.5 0	138.80	3.40	9.60	3.60	3.00	1.30	4.70
Retenido (%)	78.62	18.05	0.44	1.25	0.47	0.39	0.17	0.61
Ret. Ac (%)	78.62	96.67	97.11	98.36	98.83	99.22	99.39	100.00
Pas(%)	21.38	3.33	2.89	1.64	1.17	0.78	0.61	-
Log(Y(X))	1.33	0.52	0.46	0.21	0.07	-0.11	-0.21	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	13.62	4.76	4.20	1.69	1.00	0.68	0.60	0.35
2.5 min								
Retenido (gr)	976.2 0	267.80	8.70	27.30	11.20	9.70	4.20	14.20
Retenido (%)	73.99	20.30	0.66	2.07	0.85	0.74	0.32	1.08
Ret. Ac (%)	73.99	94.29	94.95	97.02	97.87	98.61	98.92	100.00
Pas(%)	26.01	5.71	5.05	2.98	2.13	1.39	1.08	-
Log(Y(X))	1.42	0.76	0.70	0.47	0.33	0.14	0.03	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	19.20	7.41	6.62	2.91	1.81	1.28	1.13	0.70
5 min								
Retenido (gr)	593.1 0	316.90	10.60	29.10	9.90	7.90	3.80	11.00
Retenido (%)	60.38	32.26	1.08	2.96	1.01	0.80	0.39	1.12
Ret. Ac (%)	60.38	92.64	93.72	96.68	97.69	98.49	98.88	100.00
Pas(%)	39.62	7.36	6.28	3.32	2.31	1.51	1.12	-
Log(Y(X))	1.60	0.87	0.80	0.52	0.36	0.18	0.05	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	79.16	27.12	23.88	9.46	5.55	3.75	3.26	1.91
10 min								
Retenido (gr)	309.1 0	371.40	19.90	61.10	19.90	35.70	5.60	18.50
Retenido (%)	36.75	44.15	2.37	7.26	2.37	4.24	0.67	2.20
Ret. Ac (%)	36.75	80.90	83.26	90.53	92.89	97.14	97.80	100.00
Pas(%)	63.25	19.10	16.74	9.47	7.11	2.86	2.20	-
Log(Y(X))	1.80	1.28	1.22	0.98	0.85	0.46	0.34	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	60.50	21.64	19.15	7.87	4.72	3.24	2.83	1.70
15 min								
Retenido (gr)	311.7 0	337.10	8.20	33.00	16.60	17.00	6.30	16.30
Retenido (%)	41.77	45.18	1.10	4.42	2.22	2.28	0.84	2.18
Ret. Ac (%)	41.77	86.95	88.05	92.47	94.69	96.97	97.82	100.00
Pas(%)	58.23	13.05	11.95	7.53	5.31	3.03	2.18	-
Log(Y(X))	1.77	1.12	1.08	0.88	0.72	0.48	0.34	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	45.23	17.22	15.35	6.66	4.12	2.89	2.55	1.58

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 20 %.

Tamaño (μm)	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1 min								
Retenido (gr)	897.40	478.30	8.70	24.30	10.00	11.90	4.60	19.40
Retenido (%)	61.69	32.88	0.60	1.67	0.69	0.82	0.32	1.33
Ret. Ac (%)	61.69	94.58	95.17	96.84	97.53	98.35	98.67	100.00
Pas(%)	38.31	5.42	4.83	3.16	2.47	1.65	1.33	-
Log(Y(X))	1.58	0.73	0.68	0.50	0.39	0.22	0.13	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	22.10	8.46	7.55	3.29	2.04	1.44	1.27	0.78
2.5 min								
Retenido (gr)	1085.20	659.10	9.30	38.30	15.30	14.00	5.60	19.00
Retenido (%)	58.79	35.71	0.50	2.07	0.83	0.76	0.30	1.03
Ret. Ac (%)	58.79	94.50	95.00	97.08	97.91	98.67	98.97	100.00
Pas(%)	41.21	5.50	5.00	2.92	2.09	1.33	1.03	-
Log(Y(X))	1.61	0.74	0.70	0.47	0.32	0.12	0.01	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	24.85	8.48	7.47	2.95	1.73	1.16	1.01	0.59
5 min								
Retenido (gr)	635.00	343.30	5.30	21.70	8.50	7.30	3.00	11.90
Retenido (%)	61.29	33.14	0.51	2.09	0.82	0.70	0.29	1.15
Ret. Ac (%)	61.29	94.43	94.94	97.04	97.86	98.56	98.85	100.00
Pas(%)	38.71	5.57	5.06	2.96	2.14	1.44	1.15	-
Log(Y(X))	1.59	0.75	0.70	0.47	0.33	0.16	0.06	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	23.58	8.42	7.45	3.06	1.83	1.26	1.10	0.66
10 min								
Retenido (gr)	341.60	257.70	3.90	15.90	7.30	6.70	2.80	9.80
Retenido (%)	52.90	39.91	0.60	2.46	1.13	1.04	0.43	1.52
Ret. Ac (%)	52.90	92.81	93.42	95.88	97.01	98.05	98.48	100.00
Pas(%)	47.10	7.19	6.58	4.12	2.99	1.95	1.52	-
Log(Y(X))	1.67	0.86	0.82	0.61	0.48	0.29	0.18	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	29.40	10.86	9.65	4.08	2.49	1.73	1.52	0.92
15 min								
Retenido (gr)	391.60	367.40	7.10	28.70	16.70	16.30	7.50	23.00
Retenido (%)	45.63	42.81	0.83	3.34	1.95	1.90	0.87	2.68
Ret. Ac (%)	45.63	88.43	89.26	92.60	94.55	96.45	97.32	100.00
Pas(%)	54.37	11.57	10.74	7.40	5.45	3.55	2.68	-
Log(Y(X))	1.74	1.06	1.03	0.87	0.74	0.55	0.43	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	38.40	16.13	14.55	6.87	4.46	3.24	2.90	1.88

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 40 %.

Tamaño (μm)	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1 min								
Retenido (gr)	1188.30	381.30	4.20	14.80	10.50	10.90	4.70	18.50
Retenido (%)	72.76	23.35	0.26	0.91	0.64	0.67	0.29	1.13
Ret. Ac (%)	72.76	96.11	96.36	97.27	97.91	98.58	98.87	100.00
Pas(%)	27.24	3.89	3.64	2.73	2.09	1.42	1.13	-
Log(Y(X))	1.44	0.59	0.56	0.44	0.32	0.15	0.05	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	15.47	6.37	5.74	2.67	1.71	1.24	1.10	0.71
2.5 min								
Retenido (gr)	1104.90	638.10	15.70	55.70	22.60	24.30	8.00	28.40
Retenido (%)	58.22	33.62	0.83	2.94	1.19	1.28	0.42	1.50
Ret. Ac (%)	58.22	91.85	92.68	95.61	96.80	98.08	98.50	100.00
Pas(%)	41.78	8.15	7.32	4.39	3.20	1.92	1.50	-
Log(Y(X))	1.62	0.91	0.86	0.64	0.50	0.28	0.18	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	29.79	11.12	9.89	4.22	2.58	1.80	1.58	0.97
5 min								
Retenido (gr)	933.00	348.70	11.30	31.40	11.90	11.70	4.80	15.00
Retenido (%)	68.21	25.49	0.83	2.30	0.87	0.86	0.35	1.10
Ret. Ac (%)	68.21	93.71	94.53	96.83	97.70	98.55	98.90	100.00
Pas(%)	31.79	6.29	5.47	3.17	2.30	1.45	1.10	-
Log(Y(X))	1.50	0.80	0.74	0.50	0.36	0.16	0.04	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	22.69	8.35	7.41	3.12	1.90	1.32	1.15	0.70
10 min								
Retenido (gr)	524.70	304.90	3.50	15.80	9.30	9.50	4.20	13.80
Retenido (%)	59.24	34.42	0.40	1.78	1.05	1.07	0.47	1.56
Ret. Ac (%)	59.24	93.67	94.06	95.85	96.90	97.97	98.44	100.00
Pas(%)	40.76	6.33	5.94	4.15	3.10	2.03	1.56	-
Log(Y(X))	1.61	0.80	0.77	0.62	0.49	0.31	0.19	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	24.92	9.89	8.87	3.99	2.52	1.79	1.59	1.00
15 min								
Retenido (gr)	504.90	267.50	3.80	17.20	11.40	11.10	4.60	14.20
Retenido (%)	60.49	32.05	0.46	2.06	1.37	1.33	0.55	1.70
Ret. Ac (%)	60.49	92.54	92.99	95.05	96.42	97.75	98.30	100.00
Pas(%)	39.51	7.46	7.01	4.95	3.58	2.25	1.70	-
Log(Y(X))	1.60	0.87	0.85	0.69	0.55	0.35	0.23	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	26.82	10.91	9.80	4.50	2.88	2.07	1.84	1.17

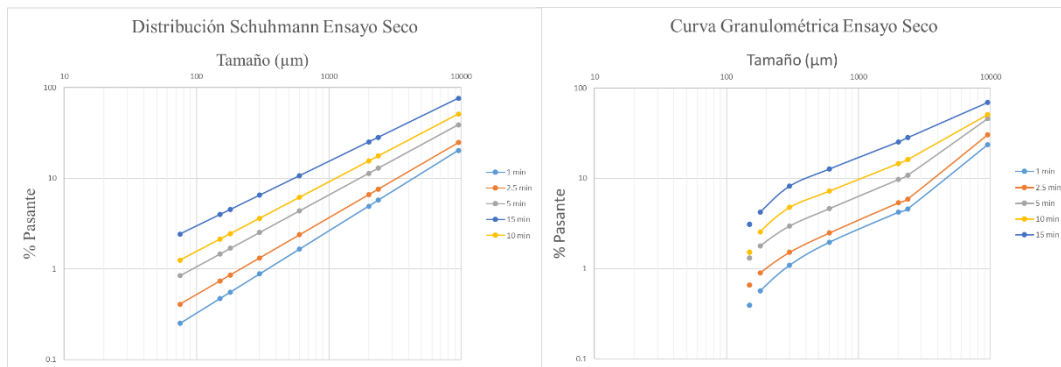
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Tablas peso retenido, granulometría Schuhmann ensayo Finos 50 %.

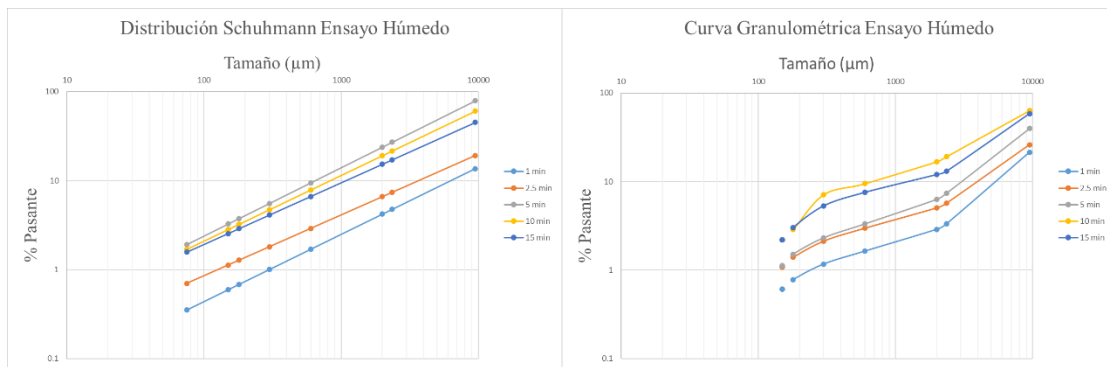
Tamaño (μm)	9500	2360	2000	600	300	180	150	75
1 min								
Retenido (gr)	464.60	161.60	5.90	4.40	4.30	4.60	2.30	7.50
Retenido (%)	70.91	24.66	0.90	0.67	0.66	0.70	0.35	1.14
Ret. Ac (%)	70.91	95.57	96.47	97.15	97.80	98.50	98.86	100.00
Pas(%)	29.09	4.43	3.53	2.85	2.20	1.50	1.14	-
Log(Y(X))	1.46	0.65	0.55	0.46	0.34	0.17	0.06	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	16.54	6.74	6.06	2.79	1.78	1.28	1.14	0.73
2.5 min								
Retenido (gr)	751.40	318.80	14.00	8.20	6.90	7.20	2.60	9.10
Retenido (%)	67.20	28.51	1.25	0.73	0.62	0.64	0.23	0.81
Ret. Ac (%)	67.20	95.71	96.96	97.69	98.31	98.95	99.19	100.00
Pas(%)	32.80	4.29	3.04	2.31	1.69	1.05	0.81	-
Log(Y(X))	1.52	0.63	0.48	0.36	0.23	0.02	-0.09	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	18.18	6.36	5.61	2.26	1.34	0.91	0.80	0.47
5 min								
Retenido (gr)	523.20	316.30	21.60	12.50	10.80	10.50	3.60	13.10
Retenido (%)	57.39	34.70	2.37	1.37	1.18	1.15	0.39	1.44
Ret. Ac (%)	57.39	92.09	94.46	95.83	97.02	98.17	98.56	100.00
Pas(%)	42.61	7.91	5.54	4.17	2.98	1.83	1.44	-
Log(Y(X))	1.63	0.90	0.74	0.62	0.47	0.26	0.16	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	27.65	10.34	9.20	3.93	2.41	1.68	1.47	0.90
10 min								
Retenido (gr)	493.40	291.50	10.90	7.40	7.70	8.20	3.60	12.00
Retenido (%)	59.11	34.92	1.31	0.89	0.92	0.98	0.43	1.44
Ret. Ac (%)	59.11	94.03	95.34	96.23	97.15	98.13	98.56	100.00
Pas(%)	40.89	5.97	4.66	3.77	2.85	1.87	1.44	-
Log(Y(X))	1.61	0.78	0.67	0.58	0.46	0.27	0.16	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	23.15	9.10	8.15	3.64	2.29	1.62	1.44	0.90
15 min								
Retenido (gr)	347.30	177.30	13.40	8.40	8.50	8.20	3.50	10.70
Retenido (%)	60.16	30.71	2.32	1.46	1.47	1.42	0.61	1.85
Ret. Ac (%)	60.16	90.87	93.19	94.65	96.12	97.54	98.15	100.00
Pas(%)	39.84	9.13	6.81	5.35	3.88	2.46	1.85	-
Log(Y(X))	1.60	0.96	0.83	0.73	0.59	0.39	0.27	-
Log(X)	3.98	3.37	3.30	2.78	2.48	2.26	2.18	1.88
GGS	28.04	11.59	10.43	4.86	3.13	2.26	2.02	1.30

Fuente: Elaboración propia.

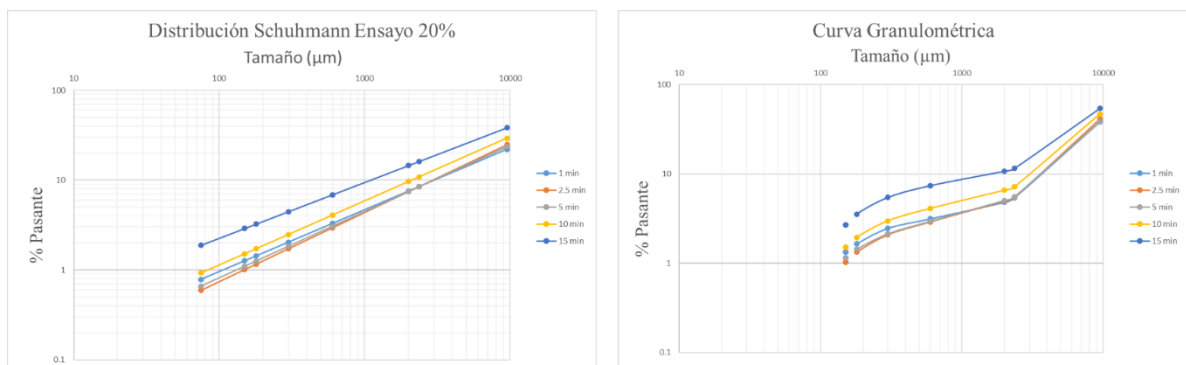
Anexo 6. Curva granulométrica Ensayo Seco.



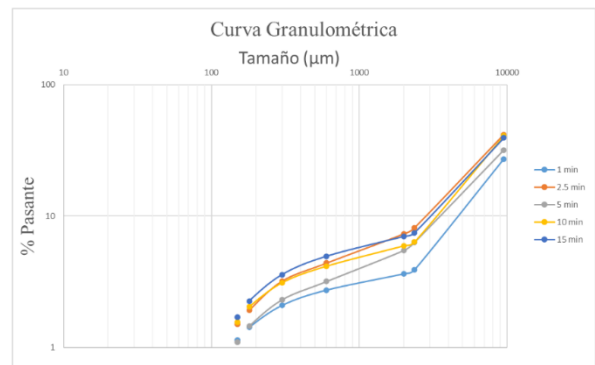
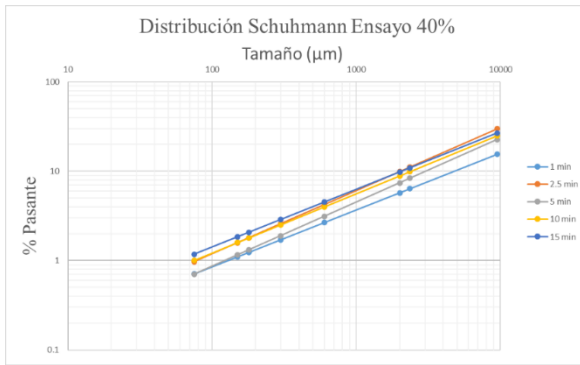
Anexo 7. Curva granulométrica Ensayo Húmedo.



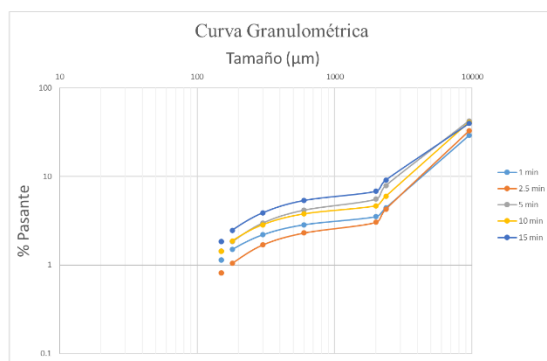
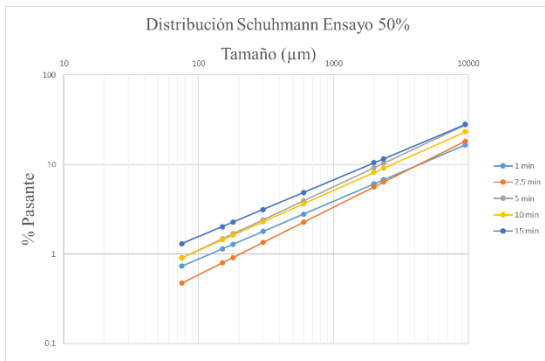
Anexo 8. Curva granulométrica Ensayo Finos 20%.



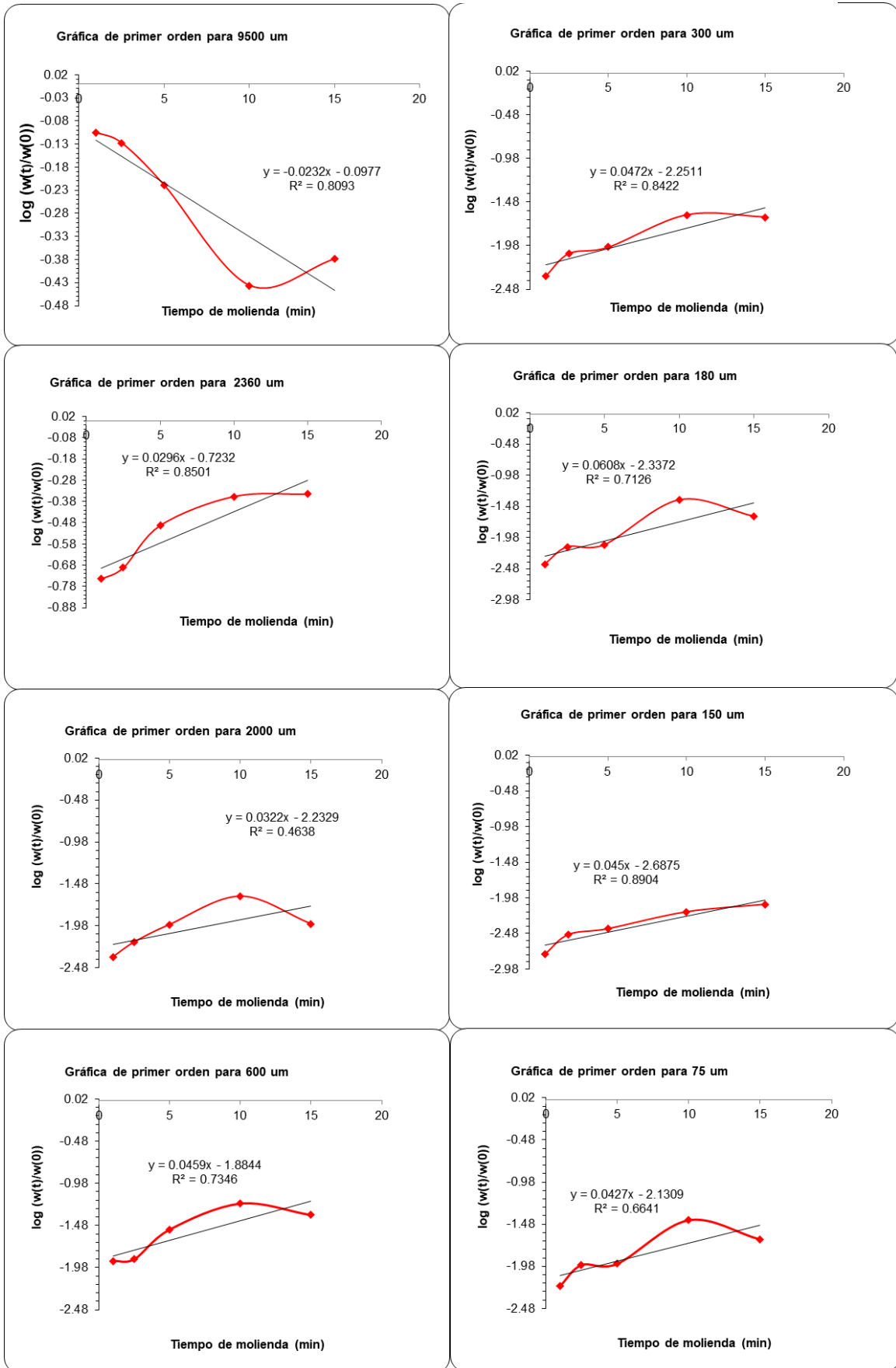
Anexo 9. Curva granulométrica Ensayo Finos 40 %.



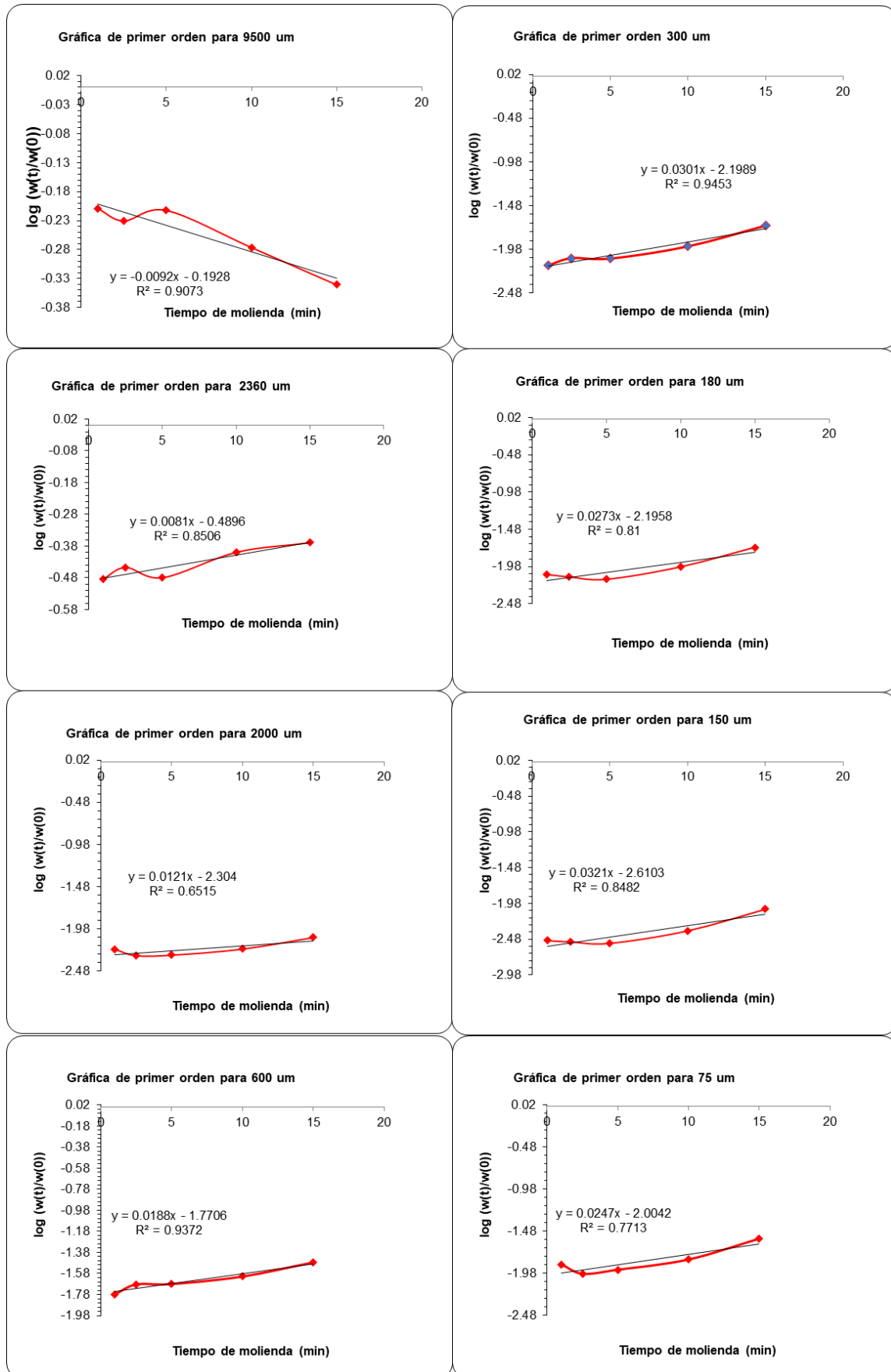
Anexo 10. Curva granulométrica Ensayo Fino 50%.



Anexo 11. Gráficas de primer orden ensayo húmedo.



Anexo 12. Gráficas de primer orden ensayo con Finos 20%.



Anexo 13. Gráficas de primer orden ensayo con Finos 50%.

