



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

**Evaluación experimental del proceso de molienda de crudo
de UCEM Planta Industrial Guapán**

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

Autores:
MATEO SEBASTIÁN ALTAMIRANO PERALTA
DORIS JAZMÍN SACOTO RIVERA

Director:
FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA, ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Dios quien supo guiarme en cada paso y darme la fuerza necesaria para seguir adelante.

A mi mamá Carmita Rivera, a mi papá, quien es un ángel en el cielo, Oswaldo Sacoto y a mis hermanos Erika y Oswaldo, que me brindaron su apoyo y cariño incondicional.

A mis amigos y compañeros quienes me brindaron su amistad y compartieron grandes momentos conmigo.

Doris Jazmín Sacoto Rivera

A Dios y a la virgen María Auxiliadora quienes me han acompañado y protegido en mi caminar, los que me han iluminado he intercedido por mí en muchas circunstancias cruciales, los que nunca me abandonan, fieles y confidentes, a ustedes les dedico este humilde esfuerzo.

De igual manera, dedico esta tesis a mi madre María Eugenia Peralta, a mi padre Jorge Altamirano, a mis hermanos: Camila, Francisco, Tatiana, y a todos mis amigos y familiares que me apoyaron en cada uno de los ámbitos de mi desarrollo formativo y educativo.

Mateo Sebastián Altamirano Peralta

AGRADECIMIENTO

Primero que nada, agradecidos con Dios por permitirnos escalar un peldaño más en la vida, por brindarnos la fortaleza y la decisión necesaria para conseguir cada objetivo planteado caminar.

Gracias a la Universidad del Azuay y a los docentes que nos brindaron sus conocimientos, en especial al Ing. Fernando Valencia, nuestro director de tesis, quien nos ofreció su valiosa ayuda y asesoramiento en la realización de la misma.

A UCEM Planta Industrial Guapán, en especial al Ing. Alfredo Mora y al Ing. Jaime Cadme, quienes nos ofrecieron una mano amiga en todo el proceso y realización de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Ubicación de UCEM Planta Industrial Guapán.....	4
1.3. Descripción del Proceso de Fabricación de Cemento	4
1.3.1. Trituración.....	5
1.3.2. Prehomogenización.....	6
1.3.3. Molienda de crudo.....	7
1.3.4. Homogenización.	8
1.3.5. Clinkerización.....	9
1.3.6. Molienda de cemento.....	12
1.3.7. Despacho de cemento.....	14
1.4. Proceso de Molienda	14

1.4.1.	Carga de material	15
1.4.2.	Carga moledora	15
1.4.3.	Distribución de la carga moledora	16
1.4.4.	Velocidad del molino	18
1.4.5.	Tiempo de residencia del material	19

CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA DE CRUDO DE UCEM - GUAPÁN..... 20

2.1.	Descripción Técnica y Operativa de la Molienda de Crudo.....	20
2.2.	Caracterización del material.....	22
2.2.1.	Comportamiento granulométrico.....	22
2.2.2.	Determinación de humedad.....	27
2.2.3.	Determinación de densidad.....	30

CAPÍTULO III: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL..... 34

3.1.	Descripción del molino de bolas del laboratorio.....	34
3.2.	Matriz de Experimentación	40
3.3.	Metodología.....	41
3.4.	Generación de datos y curvas granulométricas	47
3.4.1.	Granulometrías del 17% de carga moledora	48
3.4.2.	Granulometrías del 30% de carga moledora	50
3.4.3.	Granulometrías del 40% de carga moledora	52

CAPÍTULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	54
4.1. Análisis de resultados	54
4.2. Comparación de resultados	55
4.2.1. Comparación entre curvas granulométricas	56
4.2.2. Comparación entre distribuciones granulométricas	57
4.3. Discusión de resultados	57
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de acceso a UCEM Planta Industrial Guapán.....	4
Figura 1.2 Diagrama del proceso de fabricación de Cemento.	5
Figura 1.3 Trituradora de Martillos.....	6
Figura 1.4 Prehomogenizador.	7
Figura 1.5 Molino de bolas de acero.....	8
Figura 1.6 Horno rotativo.....	10
Figura 1.7 Enfriador de Clinker.	11
Figura 1.8 Canchón de almacenamiento de clinker.	11
Figura 1.9 Secador de Puzolana.	12
Figura 1.10 Molino de bolas para cemento.....	13
Figura 1.11 Empaquetamiento de cemento.....	14
Figura 2.1 Tamices ASTM.....	23
Figura 2.2 Curva granulométrica inicial de la mezcla.	27
Figura 3.1 Curva granulométrica según el tiempo de molienda.	39
Figura 3.2 Distribución granulométrica según el tiempo de molienda.	40
Figura 3.3 Tendido de mix.	42
Figura 3.4 Tendido de caliza pura.....	42
Figura 3.5 Trituradora de mandíbulas.....	43
Figura 3.6 Trituradora de rodillos.	43
Figura 3.7 Método de cuarteo, material caliza.	44
Figura 3.8 Secado del material en el horno.....	44
Figura 3.9 Pesaje del material.	45
Figura 3.10 Pesaje de bolas de acero.	45

Figura 3.11 Molino con bolas de acero y material.....	46
Figura 3.12 Molino de bolas de acero en funcionamiento.	46
Figura 3.13 Etiquetado de muestras.	47
Figura 3.14 Curva granulométrica promedio - 17% Fórmula.....	48
Figura 3.15 Curva granulométrica promedio - 17% Taggart.	49
Figura 3.16 Curva granulométrica promedio - 17% Guapán.	49
Figura 3.17 Curva granulométrica promedio - 30% Fórmula.....	50
Figura 3.18 Curva granulométrica promedio - 30% Taggart.	51
Figura 3.19 Curva granulométrica promedio - 30% Guapán.	51
Figura 3.20 Curva granulométrica promedio - 40% Fórmula.....	52
Figura 3.21 Curva granulométrica promedio - 40% Taggart.	53
Figura 3.22 Curva granulométrica promedio - 40% Guapán.	53
Figura 4.1 Comparación entre curvas granulométricas.....	56
Figura 4.2 Comparación entre distribuciones granulométricas.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del molino de crudo.....	20
Tabla 2.2 Receta de los materiales que ingresan al molino de crudo.	21
Tabla 2.3 Distribución de las bolas de acero al interior del molino de crudo.....	21
Tabla 2.4 Masa mínima recomendada.	24
Tabla 2.5 Granulometría Inicial – Mezcla.	26
Tabla 2.6 Masa mínima recomendada para calcular el porcentaje de humedad de un material.....	28
Tabla 2.7 Composición de la muestra.	29
Tabla 2.8 Ensayos de contenido de humedad.	30
Tabla 2.9 Ensayos de densidad del mix.	32
Tabla 2.10 Ensayos de densidad de caliza pura.	32
Tabla 2.11 Ensayo de densidad de arcilla.	33
Tabla 2.12 Ensayos de densidad de óxido de hierro.	33
Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del molino de crudo.....	34
Tabla 3.2 Peso de la carga moledora.....	35
Tabla 3.3 Distribución de los cuerpos moledores.	36
Tabla 3.4 Carga de material para la molienda experimental.....	37
Tabla 3.5 Distribución en peso del material a moler.	37
Tabla 3.6 Ensayos del tiempo de molienda.....	38
Tabla 3.7 Granulometría para la determinar el tiempo óptimo de molienda.	39
Tabla 3.8 Matriz de experimentación.....	41
Tabla 3.9 Granulometrías promedio con el 17% de carga moledora.	48
Tabla 3.10 Granulometrías promedio con el 30% de carga moledora.	50
Tabla 3.11 Granulometrías promedio con el 40% de carga moledora.	52

Tabla 4.1 Análisis comparativo del 17%.	54
Tabla 4.2 Análisis comparativo del 30%.	55
Tabla 4.3 Análisis comparativo del 40%.	55

ÍNDICE DE ANEXOS

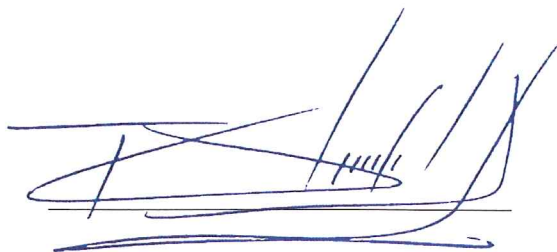
Anexo 1 Tablas y curvas granulométricas de los materiales que ingresan al molino de crudo.....	65
Anexo 2 Tablas y curvas granulométricas de la matriz de experimentación.....	73

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE MOLIENDA DE CRUDO DE UCEM PLANTA INDUSTRIAL GUAPÁN

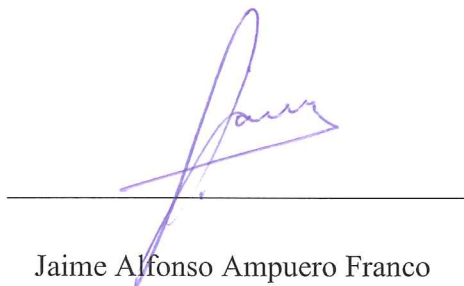
RESUMEN

El presente estudio analiza la incidencia de los parámetros de operación como son: el porcentaje de carga moledora y su distribución en la generación anómala de partículas finas (menor a 10 micras) del proceso de molienda de crudo para la elaboración de cemento de UCEM planta industrial Guapán, para ello se realizó el levantamiento de información de parámetros operacionales, caracterización del material utilizado en la molienda de crudo, elaboración de experimentos variando los parámetros indicados para de esta manera obtener datos relevantes del proceso, evaluarlos e identificar una alternativa óptima y así mejorar la molienda.

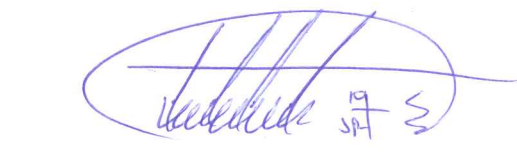
Palabras Clave: molienda, molino de bolas de acero, cemento, carga moledora.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director del Trabajo de Titulación



Jaime Alfonso Ampuero Franco
Coordinador de Escuela



Doris Jazmín Sacoto Rivera



Mateo Sebastián Altamirano Peralta

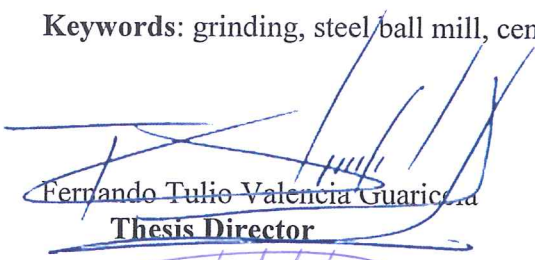
Autores

**EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF RAW GRINDING PROCESS AT
UCEM INDUSTRIAL PLANT, GUAPAN**

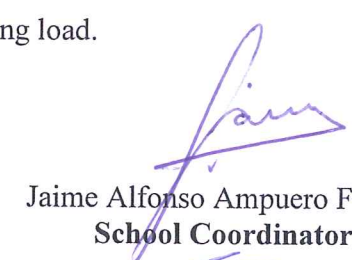
ABSTRACT

This study aimed at analyzing the incidence of the percentage of grinding load parameters and its distribution in the anomalous generation of fine particles (less than 10 microns) of the cement manufacturing raw material grinding process at UCEM (*Union Cementera Nacional, Compañía de Economía Mixta*) Guapan cement industrial plant. For this purpose, the following steps were carried out: information gathering regarding this process, characterization of the material used in the raw grinding, development of experiments by varying the indicated parameters to obtain relevant data of the process, and evaluation and identification of an optimum alternative. All these was done in order to improve the grinding.

Keywords: grinding, steel ball mill, cement, grinding load.


Fernando Tulio Valencia Guarica
Thesis Director


Doris Jazmin Sacoto Rivera


Jaime Alfonso Ampuero Franco
School Coordinator


Mateo Sebastián Altamirano Peralta

Authors


UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas


Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

Doris Jazmín Sacoto Rivera

Mateo Sebastián Altamirano Peralta

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela. Msc.

Septiembre, 2017

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE MOLIENDA DE CRUDO DE UCEM PLANTA INDUSTRIAL GUAPÁN

INTRODUCCIÓN

En Ecuador existen industrias como: la agrícola, farmacéutica, química, minera, construcción, entre otras; que utilizan la molienda para reducir el tamaño de su materia prima por una combinación de impacto y abrasión, facilitando la fabricación de un producto ideal.

La empresa UCEM Planta Industrial Guapán se dedica a la fabricación de cemento, es por eso por lo que debe existir un control exhaustivo en los procesos que intervienen en esta acción como: Trituración, prehomogenización, molienda de crudo, homogenización del crudo, clinkerización, molienda de cemento y despacho de cemento para obtener un producto de calidad que satisfaga la demanda.

En el presente proyecto nos centraremos en la molienda de crudo, donde trabaja un molino de bolas al que ingresa la materia prima obtenida en el proceso de trituración y prehomogenización, además se dosifica pequeñas cantidades de: caliza de alta pureza

(caliza de Guayaquil), arena ferrosa y arcilla; estas tres últimas dependen del requerimiento del laboratorio de control de calidad de la empresa.

En el proceso de molienda de crudo existe cierta cantidad de partículas finas (menor a 10 micras) que recircula constantemente sin salir del sistema, causando una alteración en el comportamiento granulométrico del producto, es por ello que se ve la necesidad de buscar una alternativa para disminuir la cantidad de dichas partículas, para esto se pretende realizar una evaluación experimental en este proceso, modificando dos variables (porcentaje de carga moledora y su distribución) que influyen de manera directa en el proceso de molienda.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

En el proceso de molienda de crudo de UCEM-Planta Industrial Guapán, según el comportamiento del material resultante de este proceso, existe un porcentaje de partículas finas (inferior a 10 micras), visualizado en las curvas granulométricas, que generan una curva de distribución bimodal provocando que parte de estas partículas no salgan del sistema.

Dentro de las posibles causas que generan estas partículas finas tenemos que: no es controlado el porcentaje de retorno que ingresa a las dos cámaras del molino, se observa también que el porcentaje de bolas (17%) que se utiliza en la primera cámara es menor al definido en la teoría (28%-45%), además una posible influencia de la distribución del tamaño de bolas y probablemente exista un sistema de tamizado deficiente al interior del molino.

Todo esto nos lleva al problema ya mencionado, el mismo que podría generar sobremolienda, consumo anormal de acero y variaciones en el consumo energético. Es por eso que surge la necesidad de corregir dicho comportamiento, por ello es importante conocer las características del material a ser molido, y su comportamiento granulométrico previo y posterior al proceso de molienda de crudo.

1.2. Ubicación de UCEM Planta Industrial Guapán

UCEM Planta Industrial Guapán, está ubicada en la parroquia Guapán, cantón Azogues, provincia del Cañar, para su acceso desde la ciudad de Cuenca se toma la Autopista Cuenca – Azogues, luego se dirige hacia el Hospital Regional en dirección a la calle Andrés F. Córdova, para posteriormente ir por la vía a la planta; se recorre aproximadamente 33 km con un tiempo de recorrido aproximado igual a 35 minutos.



Figura 1.1 Mapa de acceso a UCEM Planta Industrial Guapán.

Fuente: Imagen satelital recuperada de Google Earth, 2017.

1.3. Descripción del Proceso de Fabricación de Cemento

El cemento Portland y sus derivados (Puzolánico Tipo IP) son los más empleados en el campo de la construcción debido a que contienen materiales como la caliza, arcilla y yeso, abundantes en la región costera ecuatoriana y en determinados lugares de la sierra y oriente.

En general este cemento es utilizado para la producción de morteros y hormigones mezclándolos con agua y áridos de origen natural o prefabricados, pilar fundamental de las edificaciones.

El proceso para fabricar el cemento incluye las siguientes etapas:

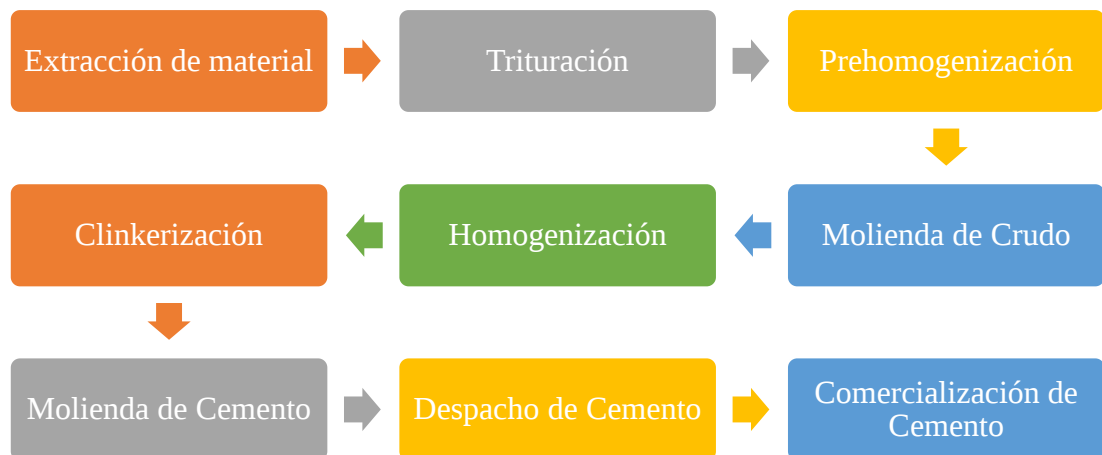


Figura 1.2 Diagrama del proceso de fabricación de Cemento.

1.3.1. Trituración.

La materia prima (caliza) se adquiere de diferentes proveedores y se la almacena en distintas bodegas según su procedencia; esta materia prima debe ser llevada al triturador, para ello se utiliza excavadoras CAT330 CL para el carguío y volquetes de 12 m³ de capacidad para el transporte. La alimentación está en función del Laboratorio de Control de Calidad, el mismo que determina la procedencia de la materia prima que ingresa, así como su cantidad.

En esta etapa se reduce el tamaño del material de entrada que pueden tener una dimensión de 1200 mm x 900 mm x 700 mm hasta obtener en un 95 % un material de salida con tamaño de 25 mm. El equipo que se utiliza es un triturador de martillos, marca Williams Patent Crusher, modelo 780; que tiene una capacidad de 500 t/h, posee un factor de productividad igual a 0.65 y un consumo específico de 2.43 kWh/t, es

accionado por un motor eléctrico de 1500 hp y trabaja un promedio de 9 horas diarias durante 5 días por semana.



Figura 1.3 Trituradora de Martillos.

1.3.2. Prehomogenización.

En el proceso de prehomogenización se almacena la materia prima triturada y se homogeniza; esto se lo realiza en un parque circular marca Pohlig – Heckel - Bleichert, modelo KHO 400/77, cubierta semiesférica, 77 m de diámetro y cuya capacidad nominal es de 40000 t.

En esta área se da dos procesos semiautomáticos, el primero el apilamiento del material triturado en tres pilas de aproximadamente 7000 t, cada una mediante un sistema de apilamiento (banda) con capacidad de 600 t/h; el segundo proceso es la recuperación que consta de un rascador con capacidad de 200 t/h y una cadena recuperadora que transporta el material prehomogenizado a una tolva y esta a su vez lo traslada a bandas transportadoras que las llevan a la siguiente etapa, molienda de crudo.



Figura 1.4 Prehomogenizador.

1.3.3. Molienda de crudo.

Esta etapa consiste en moler la materia prima (mix)¹ proveniente del proceso de trituración y prehomogenización, además de moler en pequeñas cantidades caliza de alta pureza (caliza de Guayaquil), óxido de hierro y arcilla; la cantidad a moler de estas 3 ultimas depende del requerimiento del Laboratorio de Control de Calidad. Se realiza la molienda hasta que el material tenga un retenido del 12%-14% aproximadamente en la malla de 75 micras y una humedad inferior a 1 %, en comparación a la inicial que generalmente es de 12 %.

El equipo que se utiliza para la molienda es un molino horizontal de bolas marca Fuller, posee dos cámaras de molienda y una cámara de secado, es alimentado por los extremos y su descarga es central, tiene una longitud de 7.92 m, con un diámetro de 3.96 m, posee una capacidad nominal de 90 t/h, con un factor de productividad igual al 0.93, es accionado por un motor de 1865 kW, con un consumo específico de 30.54

¹ Mix: Mezcla de calizas de distintos proveedores.

kWh/t en toda el área de producción. Este proceso es un circuito cerrado, donde la separación de las partículas se realiza con un Separador marca Sturtevant Mill Co de 5.49 m de diámetro. El secado de la caliza se lo realiza en la cámara de secado donde se utilizan los gases provenientes del horno que llegan con una temperatura de 320 °C.

Finalmente, el material resultante de este proceso se lo lleva hasta un elevador de cangilones para que lo transfiera a los silos de homogenización.



Figura 1.5 Molino de bolas de acero.

1.3.4. Homogenización.

La homogenización es una etapa que se encarga de mezclar el producto de la molienda de crudo hasta obtener un material homogéneo utilizando aire comprimido, este sistema cuenta con dos silos de hormigón armado, donde uno se utiliza para receptor el producto de la molienda de crudo y el otro sirve para la homogenización. La capacidad de estos silos es de 2340 t; el aire comprimido es generado por un compresor de alto caudal igual a 2 bares de presión, una vez realizado la homogenización del material, este se encuentra listo para alimentar al horno por lo que se almacena el

producto en dos silos inferiores de hormigón armado que poseen una capacidad total de 4542 t.

La alimentación al horno depende del requerimiento del panel de control; se utiliza un sistema de descarga mediante aerodeslizadores y válvulas que regulan el caudal, para el ingreso del material al precalentador del horno.

1.3.5. Clinkerización.

El material crudo homogenizado es alimentado al primer ciclón del pre-calentador con capacidad de 75 t/h, el mismo es tratado hasta que llegue al horno para aumentar la temperatura en 800 °C, cuando el material aumenta su temperatura mientras desciende por el precalentador comienza el proceso de transformación química para la producción de clinker. En el cuarto de control se regula los principales parámetros en la producción del cemento, entre ellos: la velocidad del horno, la velocidad del ventilador de tiro del precalentador, el caudal de alimentación, la cantidad de combustible y el caudal de aire ingresado al enfriador. El clinker producido es llevado por cadena de arrastre y un transportador hasta el almacén de clinker. Los equipos que intervienen en esta etapa son:

Horno

El horno rotativo, es un tubo de acero de 4.11 m de diámetro y 57.91 m de longitud marca Fuller, su revestimiento interno es de material refractario, cuenta con una capacidad de 1100 t/d, es accionado por un motor de 186 kW, está apoyado en tres bases con aros y rodillos que permiten el movimiento y tiene un consumo específico de 27.39 kWh/t.



Figura 1.6 Horno rotativo.

Torre de precalcinación

La torre de precalcinación consta de cuatro etapas de ciclones, la primera tiene dos ciclones donde los gases son transportados por el ventilador de tiro que es accionado por un motor de 933 kW. La alimentación se realiza mediante un sistema de elevador de cangilones de 100 t/h, la torre de precalcinación funciona como un intercambiador de calor entre el material de alimentación y los gases de combustión del horno, además sirve como colector estático porque impide que el material sea arrastrado con los gases.

Enfriador de clinker

Como el nombre lo indica se trata de enfriar el clinker para los procesos posteriores, se usa un enfriador marca Polysius, con capacidad de 1300 t/d, con parilla estática de 4 filas con 5 placas por fila, está equipado con 5 ventiladores que son los que inyectan aire frío al material. Este material a la salida del enfriador se encuentra con un triturador de rodillos, marca Polysius, con consumo energético de 28.5 kW.



Figura 1.7 Enfriador de Clinker.

Almacén de clinker

Se cuenta con dos almacenes, que tienen una capacidad de 15000 t cada uno, el material es transportado mediante dos puentes grúas de 3 y 5 t de capacidad.



Figura 1.8 Canchón de almacenamiento de clinker.

1.3.6. Molienda de cemento.

Esta etapa se inicia con la dosificación de clinker, puzolana y yeso al proceso de premolienda, esta dosificación depende de los requerimientos del Laboratorio de Control de Calidad, donde ingresan partículas de aproximadamente 25 mm y salen de aproximadamente 6 mm, posteriormente el producto obtenido se almacena temporalmente en un silo que tiene una capacidad de 200 t, para luego ser llevado al molino de bolas y finalmente, este producto es transportado hacia los silos de almacenamiento de cemento. Los equipos que intervienen en la molienda de cemento son:

Secador de puzolana

Secador rotativo, cuya capacidad es de 30 t/h y es accionado por un motor de 37 kW se encarga de disminuir la humedad de puzolana del 14 % al 4 %, para ello utiliza el calor producido por la quema de combustible fuel oil # 6.



Figura 1.9 Secador de Puzolana.

Triturador vertical

Este equipo se encarga de la premolienda de cemento para reducir a un tamaño de partícula inferior a 6mm, el triturador es de eje vertical marca Magotteaux, con velocidad de 1678 rpm y es accionado por un motor de 260 kW.

Molino de bolas

Se lo utiliza para la molienda de cemento marca Fuller, cuenta con dos cámaras de molienda, tiene un diámetro de 3.66 m y una longitud de 11.8 m, su capacidad es de 60 t/h, es accionado por un motor de 2238 kW y su consumo específico es de 40.77 kWh/t. para la clasificación del producto se utiliza un separador, marca Fuller.



Figura 1.10 Molino de bolas para cemento.

1.3.7. Despacho de cemento.

El despacho de cemento se realiza generalmente en sacos de 50 kg, para el embolsado del cemento se utiliza dos ensacadoras, marca Haver & Boecker, que cuenta con una capacidad de 2400 bolsas por hora y para la aplicación de los sacos se dispone de dos aplicadores automáticos, cuya capacidad de aplicación es de 2700 sacos por hora. El despacho del material es directamente controlado por Gerencia de Comercialización.

*Nota: El cemento producido es Portland Puzolánico Tipo IP (producto obtenido de la molienda de clinker, yeso y puzolana) en saco de 50 kg y por tonelada a granel.



Figura 1.11 Empaquetamiento de cemento.

1.4. Proceso de Molienda

En el presente proyecto nos enfocamos en la molienda de crudo de UCEM Planta Industrial Guapán, para ello es necesario describir cada uno de los parámetros que influyen directamente en dicho proceso, los parámetros que influyen en este proceso son:

1.4.1. Carga de material

El peso de la carga del material está en función del peso de las bolas de acero; si se requiere que el material molido sea más fino entonces el cociente que existe entre el peso de las bolas de acero (P_B) y el peso del material (P_M) debe ser mayor. (Duda, 1977).

Mardulier nos dice que el valor óptimo de este cociente debe estar comprendido entre 8,1 y 10,1 para que alcance la máxima superficie del material por unidad de energía consumida. Y Scherer especifica que la relación $P_B: P_M$ debe ser de 8.75, es decir que el peso de las bolas de acero debe ser 8.75 veces más que el peso del material a moler. (Duda, 1977).

$$\frac{P_B}{P_M} = 8.1 \sim 10.1$$

$$P_M = \frac{P_B}{8.1 \sim 10.1} \quad (1)$$

Donde:

- P_B = peso de las bolas de acero, en kg.
- P_M = peso del material, en kg.

1.4.2. Carga moledora

El porcentaje de llenado de la carga moledora se debe a la relación que existe entre el volumen libre del molino y el volumen que ocupará las bolas, variando del 28 % al 45% de llenado considerando que serán bolas de acero. (Alcántara Valladares, 2008)

El porcentaje de carga moledora menor a 28% de llenado, hará que se deslicen las bolas sobre la superficie interna del molino y si se coloca carga moledora mayor al 45% de llenado se presentarían problemas en la caída de las bolas para moler el material ingresado al molino. (Duda, 1977)

Para el cálculo del volumen de los cuerpos moledores se aplica la siguiente formula (A Osorio, Restrepo, & Marín, 2009):

$$V_{bolas\ molino} = V_{molino} \times \frac{\% C_M}{100 \%} \times 0.52 \quad (2)$$

Donde:

- $V_{bolas\ molino}$ = Volumen de los cuerpos moledores, en cm^3 .
- V_{molino} = Volumen del molino, en cm^3 .
- $\% C_M$ = Porcentaje de carga moledora, en %.
- 0.52 = Factor de empaquetamiento.

1.4.3. Distribución de la carga moledora

De acuerdo al Apunte de Molienda (2015) de la materia Industrias I de la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad de Buenos Aires menciona que para realizar una distribución de bolas de acero adecuada, debemos considerar el empleo de elementos moledores de distintos tamaños, y sus relaciones como (Facultad de Ingeniería, 2015):

- A mayor diámetro de bolas, mayor fracturamiento por percusión de partículas grandes.
- A menor diámetro de bolas, mayor molienda de las partículas pequeñas debido a que tiene mayor superficie por parte de la carga moledora denominado fricción.
- A mayor diámetro de bolas, la molienda de material duro es más efectiva.

Diámetro máximo de carga moledora

Se procede a definir un diámetro máximo de las bolas de acero, para posteriormente determinar la distribución por tamaños de estos elementos. Para hallar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula de Bond (Jaico, 2009):

$$B = \left(\frac{F_{80}}{K} \right)^{1/2} \times \left(\frac{G.E. \times W_i}{\%V_c \times \sqrt{D}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Donde:

- B = Diámetro máximo de la bola de acero, en plg.
- F_{80} = Tamaño de grano de alimentación, en μm .
- K = Constante: 350 para molienda húmeda y 335 para molienda seca.
- G.E. = Peso específico del material, en gr/cm^3
- W_i = Índice de trabajo, en kW/t .
- $\%V_c$ = Porcentaje de la velocidad crítica del molino.
- D = Diámetro libre del molino, en ft.

Una vez que se defina el diámetro máximo de la bola de acero, se procede a determinar la distribución de las bolas de acero según su tamaño; Taggart especifica que la distribución correcta es 40 %, 30 %, 20 % y 10 % de bolas de acero de mayor a menor diámetro (Jaico, 2009). Además, la distribución de bolas de acero se puede obtener mediante la siguiente fórmula (Ramírez, 2006):

$$Y = \left(\frac{X}{B} \right)^{3.8} \quad (4)$$

Donde:

- Y = porcentaje en peso de las bolas de acero.
- X = Diámetro de bola utilizada, las que tenemos en diferente diámetro, en cm.
- B = Diámetro máximo de la bola de acero, en cm.

1.4.4. Velocidad del molino

Para definir la velocidad que se debe aplicar al molino, es necesario identificar la velocidad crítica, a la cual la fuerza centrífuga se encarga de equilibrar el peso de la carga moledora en todo el proceso haciendo que estos queden adheridos a las paredes internas del molino evitando que las bolas moledoras trituren el material. Es por esta razón que se trabaja con un rango porcentual de la velocidad crítica, según Mular, este porcentaje tiene que ir del 75% al 80% (Jaico, 2009), según Austin y Concha el porcentaje de la velocidad crítica a considerar será en un rango del 70% al 80% (Austin & Concha, 1994) y por último, el Manual Tecnológico del Cemento plantea que este porcentaje será del 65% al 90% (Duda, 1977).

La fórmula para calcular la velocidad crítica es (Adriana Osorio et al., 2007):

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad (5)$$

Donde:

- V_c = Velocidad crítica, en rpm.
- D = Diámetro Interno del Molino, en m.
- d = Diámetro del cuerpo moledor mayor, en m.

Para el cálculo de la velocidad de operación tenemos (Jaico, 2009):

$$V_{op} = V_c \times \%V_c \quad (6)$$

Donde:

- V_{op} = Velocidad de operación
- V_c = Velocidad crítica, en rpm.
- $\%V_c$ = Porcentaje de la velocidad crítica

1.4.5. Tiempo de residencia del material

El tiempo de residencia del material dentro del molino de bolas, depende del material a moler y del tamaño de partículas que se requiera obtener, a mayor tiempo de molienda más finas serán las partículas, y a menor tiempo no se molerán completamente por lo que existiría material relativamente grueso. Cabe mencionar que se debe evitar tiempos grandes ya que se genera sobremolienda, por lo tanto, un elevado consumo energético.

CAPÍTULO II

CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA DE CRUDO DE UCEM - GUAPÁN.

2.1. Descripción Técnica y Operativa de la Molienda de Crudo.

El equipo que se utiliza para la molienda de crudo es un molino de bolas horizontal marca Fuller que posee dos cámaras de molienda y una cámara de secado, es alimentado por los extremos y su descarga es central, cuyas especificaciones técnicas son las siguientes:

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del molino de crudo.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Longitud Total	7.92	m
Longitud Cámara 1	3.96	m
Longitud Cámara 2	3.96	m
Diámetro	3.96	m
Capacidad Nominal	90	t/h
Revestimiento interno	Acero al cromo - molibdeno	
Potencia del motor	1865	kW
Velocidad del Molino	15.97	rpm

Fuente: (UCEM Planta Industrial Guapán, 2017).

Carga de material

Los porcentajes de los diferentes materiales que ingresan al molino de crudo se detalla en la tabla 2.2, estos valores corresponden al promedio típico que ingresan a la molienda de crudo de UCEM planta industrial Guapán.

Tabla 2.2 Receta de los materiales que ingresan al molino de crudo.

Material	Porcentaje
Mix	72 %
Caliza Pura	18 %
Arcilla	9 %
Óxido de Hierro	1 %
Total	100 %

Fuente: (UCEM Planta Industrial Guapán, 2017).

Según el análisis químico de las muestras de mix realizado por departamento químico de UCEM Planta Industrial Guapán, tenemos que los componentes presentes en este material son: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 . (UCEM Planta Industrial Guapán, 2017)

Carga moledora y Distribución de las bolas de acero

El porcentaje de llenado de las bolas de acero para la primera cámara de molienda es del 17% y para la segunda cámara de molienda es del 28%, cuya distribución según el tamaño de bolas de acero es la siguiente:

Tabla 2.3 Distribución de las bolas de acero al interior del molino de crudo.

DISTRIBUCIÓN DE BOLAS DE ACERO					
Primera cámara			Segunda cámara		
Diámetro de bola (mm)	Peso (t)	%	Diámetro de bola (mm)	Peso (t)	%
90	15	36.58	60	3	6
80	12	29.27	50	3	6
70	9	21.95	40	15	30
60	5	12.20	30	29	58
TOTAL	41	100	TOTAL	50	100

Fuente: (UCEM Planta Industrial Guapán, 2017).

Velocidad del molino

Se calcula la velocidad crítica del molino de crudo de la empresa, utilizando la ecuación (5):

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad (5)$$

Donde se obtiene una velocidad crítica igual a 24.12 rpm, de este valor la velocidad óptima con la que debe trabajar el molino se encuentra en un rango del 65% al 90%, lo que corresponde a 15.68 rpm y 21.71 rpm respectivamente; actualmente el molino de crudo de la empresa trabaja a una velocidad de 15.97 rpm, lo que significa que está dentro del rango de la velocidad óptima del molino.

2.2. Caracterización del material.

Se trata de establecer las características del material a moler, en este caso determinamos las características físicas del material que ingresa a la molienda de crudo.

2.2.1. Comportamiento granulométrico.

La finalidad del análisis granulométrico es determinar la distribución por tamaño de las partículas que constituyen una muestra de material. Para determinar la distribución de tamaños se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente y que corresponden a diferentes series como: internacional ISO, americanas Tyler o ASTM.



Figura 2.1 Tamices ASTM.

El porcentaje retenido parcial de cada tamiz se determina mediante la fracción entre el peso retenido por cada tamiz y el peso total de la muestra; pero para el ajuste de las curvas granulométricas se debe trabajar con los porcentajes retenidos acumulados de cada tamiz, es decir constituye el porcentaje retenido por el tamiz y por todos aquellos tamices por encima de este; al contrario, para encontrar el porcentaje pasante acumulado de cada tamiz se calcula diferencia de 100% menos el porcentaje retenido acumulado del tamiz.

Resumen del método

Una muestra de material seca de masa conocida se separa mediante de una serie de tamices de aberturas progresivamente más pequeñas para la determinación de la distribución por tamaño de partículas.

Cantidad de la muestra

La cantidad mínima de material representativo será de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 2.4 Masa mínima recomendada.

Tamaño máximo nominal (mm)	Tamaño mínimo de la muestra de prueba (kg)
9.5	1
12.5	2
19	5
25	10
37.5	15
50	20
63	35
75	60
90	100
100	150
125	325

Fuente: (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Equipos

- Juego de tamices normalizados
- Horno de secado
- Balanza
- Recipientes para el manejo del material
- Vibrador mecánico para tamices

Procedimiento

1. Se homogeniza el material que se va a tamizar y luego se cuarteo.
2. Se pesa el material de acuerdo con lo indicado en la tabla 2.4.
3. El material pesado es llevado al horno, hasta secarlo a una masa constante.
4. Se registra el peso de cada tamiz del juego de tamices, los que deben estar completamente limpios.

5. Se coloca el material en el tamiz superior del juego de tamices, siendo el ultimo tamiz el N° 4 y luego el recipiente del pasante de este tamiz.
6. El juego de tamices con el material es llevado al vibrador mecánico alrededor de 5 a 10 minutos.
7. Posteriormente se registra el peso del tamiz con el material retenido en el mismo.
8. Se procede a tomar una muestra de 500 gr del material pasante del tamiz N°4.
9. Luego esta muestra de 500 gr se la vuelve a tamizar desde el tamiz N° 4 hasta el N° 200.
10. Finalmente se anota el peso de cada tamiz con su material retenido.

Cálculos:

El porcentaje retenido por cada tamiz se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{P_{TM} - P_T}{P_{TOTAL}} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

- % R = Porcentaje retenido.
- P_{TM} = Peso del tamiz más el material retenido, en kg.
- P_T = Peso del tamiz, en kg.
- P_{TOTAL} = Peso inicial de la muestra total, en kg.

Ensayo granulométrico inicial

Se realiza la granulometría de los componentes que ingresan al molino de crudo que son: mix, caliza pura, arcilla y óxido de hierro; para este ensayo se efectúan 3 pruebas para cada uno de ellos, obteniendo sus respectivas curvas granulométricas, de las cuales obtenemos una curva promedio por cada material (Anexo 1), las mismas que nos ayudan a crear una curva general, mezcla de los 4 componentes según sus

respectivos porcentajes mencionados en la tabla 2.2. Las tablas y curvas de la granulometría de cada material se pueden observar en el Anexo 1. A continuación se presenta el comportamiento granulométrico general de la mezcla.

Tabla 2.5 Granulometría Inicial – Mezcla.

Granulometría inicial - Mezcla			
N° Tamiz	Tamaño (mm)	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%
1"	25	4.57%	95.43%
3/4 "	19	15.35%	84.65%
1/2 "	12.5	31.09%	68.91%
3/8"	9.5	39.21%	60.79%
4	4.75	58.08%	41.92%
10	2	70.80%	29.20%
20	0.85	84.10%	15.90%
40	0.425	91.35%	8.65%
50	0.3	93.50%	6.50%
100	0.15	96.98%	3.02%
200	0.075	98.68%	1.32%
Fondo		100.00%	0.00%

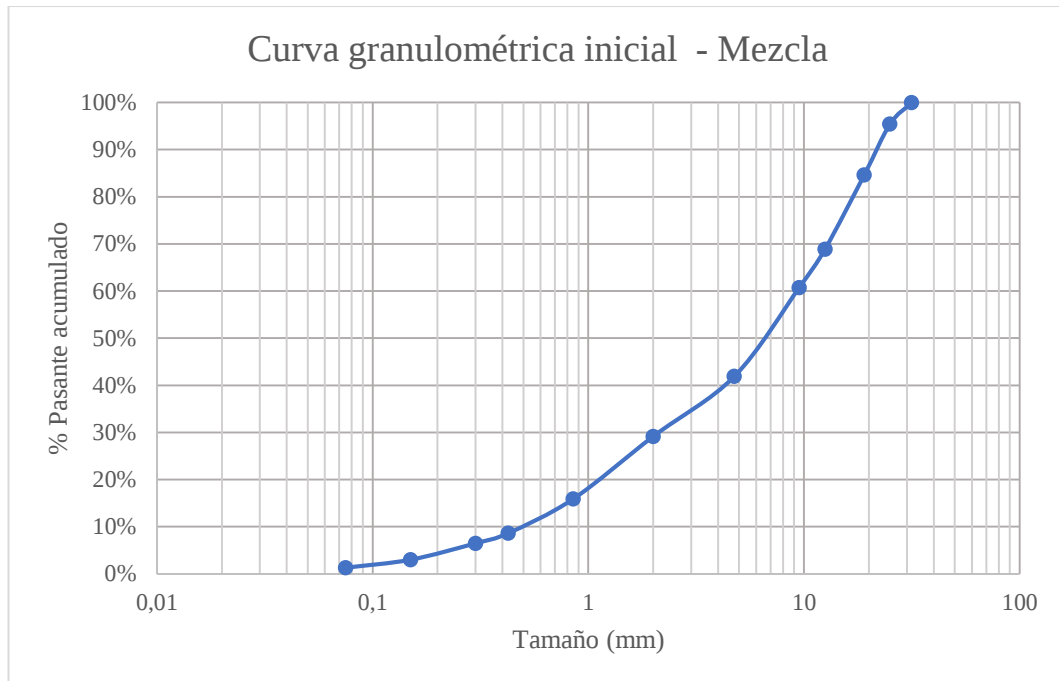


Figura 2.2 Curva granulométrica inicial de la mezcla.

2.2.2. Determinación de humedad.

Se determina la humedad del material que ingresa al molino de crudo según la norma ASTM D-2216 – 98 (Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas por masa). (American Standard for Testing and Materials, 1998)

Resumen del método

Una muestra se seca en un horno a temperatura de $(110 \pm 5^{\circ}\text{C})$ hasta llegar a un peso constante. La pérdida de peso durante el secado se considera como agua. El contenido de agua se calcula usando el peso de agua y el peso del espécimen seco.

Cantidad de la muestra

La cantidad mínima de material húmedo representativo será de acuerdo a la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Masa mínima recomendada para calcular el porcentaje de humedad de un material.

Máximo tamaño de partícula (pasa el 100%)	Tamaño de malla Estándar	Masa mínima recomendada para contenidos de humedad a $\pm 0.1\%$	Masa mínima recomendada para contenidos de humedad a $\pm 1\%$
2 mm o menos	2.00 mm (N° 10)	20 g	20 g
4.75 mm	4.76 mm (N° 4)	100 g	20 g
9.5 mm	9.525 mm (3/8")	500 g	50 g
19.0 mm	19.05 mm (3/4")	2.5 kg	250 g
37.5 mm	38.1 mm (1 1/2")	10 kg	1 kg
75.0 mm	76.2 mm (3")	50 kg	5 kg

Fuente: (American Standard for Testing and Materials, 1998).

Equipos

- Horno
- Balanza
- Recipientes
- Cronómetro

Procedimiento

1. Pesar el recipiente para la muestra y anotarlo.
2. Colocar la muestra húmeda en el recipiente y determinar su peso utilizando una balanza.
3. Poner el recipiente con la muestra en el horno hasta secar el material a una masa constante.
4. Luego retirar el recipiente del horno y esperar hasta que este se enfríe.
5. Finalmente pesar el recipiente con la muestra seca utilizando la misma balanza.

Cálculos:

El porcentaje de agua (humedad) se calcula con la siguiente fórmula:

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_r} \times 100 \quad (8)$$

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

- W = es el contenido de humedad, en %.
- W_1 = es el peso del recipiente más el suelo húmedo, en gr.
- W_2 = es el peso del recipiente más el suelo secado en horno, en gr.
- W_r = es el peso del recipiente vacío, en gr.
- W_w = Peso del agua en gr.
- W_s = Peso seco del material en gr.

Para encontrar el contenido de humedad se realizaron tres ensayos, donde se utiliza la mezcla con los valores promedios de cada material que ingresan al molino de crudo, como se observa en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Composición de la muestra.

Material	Peso (kg)
Mix	0.72
Caliza Pura	0.18
Arcilla	0.09
Óxido de Hierro	0.01
Peso Total de la muestra Húmeda	1

Nota: los pesos de cada material están en relación con el porcentaje típico mensual que ingresa al molino de crudo.

Tabla 2.8 Ensayos de contenido de humedad.

Abreviatura	Nombre	Unidades	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
W_1	Peso recipiente + material húmedo	kg	2.1068	2.4754	2.316
W_2	Peso recipiente + material seco	kg	2.024	2.395	2.231
W_r	Peso recipiente	kg	1.1068	1.4754	1.316
W	Porcentaje de Humedad	%	9.027	8.743	9.290
Promedio del porcentaje de Humedad		%	9.020		

De acuerdo con los ensayos realizados se pudo determinar que el contenido promedio de humedad del material es 9.02 %.

2.2.3. Determinación de densidad.

Se determina la densidad de los materiales que ingresan al molino de crudo, mix, caliza pura, arcilla y óxido de hierro.

Resumen del método

Una muestra seca es pesada en una balanza y de esta misma muestra se calcula el volumen aplicando el Principio de Arquímedes donde “El volumen del cuerpo o muestra sumergida es igual al volumen de fluido desplazado” (Tippens, 2007). La densidad se calcula con la relación masa de la muestra sobre el volumen de esta.

Equipos

- Horno
- Balanza
- Probeta

Procedimiento

1. Secar la muestra para eliminar la humedad presente.
2. Pesar la muestra en un recipiente, aproximadamente 25 gr a 30 gr.
3. Poner agua en una probeta hasta que llegue a la mitad de esta y anotar el volumen de agua en dicha probeta.
4. Poner la muestra pesada en la probeta con agua.
5. Finalmente, anotar el volumen del agua más la muestra.

Cálculos:

El volumen de la muestra se calcula con la siguiente fórmula:

$$V_m = V_{am} - V_a \quad (10)$$

Donde:

- V_m = Volumen de la muestra, en cm^3 .
- V_{am} = Volumen del agua más la muestra, en cm^3 .
- V_a = Volumen de agua, en cm^3 .

La densidad del material se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde:

- ρ = Densidad del material, en gr/cm^3 .
- m = Masa del material, en gr.
- V_m = Volumen del material, en cm^3 .

Tabla 2.9 Ensayos de densidad del mix.

Abreviatura	Nombre	Unidades	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
m	Masa	gr	20	20	20
V_a	Volumen de agua	cm^3	30	30	30
V_{am}	Volumen agua + material	cm^3	39	38.8	38.9
V_m	Volumen del material	cm^3	9	8.8	8.9
ρ	Densidad del material	gr/cm^3	2.222	2.273	2.247
ρ_p	Densidad promedio del material	gr/cm^3		2.247	

Según los ensayos realizados se pudo determinar que el contenido promedio de la densidad del Mix es $2.247 \text{ gr}/\text{cm}^3$.

Tabla 2.10 Ensayos de densidad de caliza pura.

Abreviatura	Nombre	Unidades	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
m	Masa	gr	25	30	25
V_a	Volumen de agua	cm^3	30	30	25
V_{am}	Volumen agua + material	cm^3	39.8	42	34.6
V_m	Volumen del material	cm^3	9.8	12	9.6
ρ	Densidad del material	gr/cm^3	2.551	2.500	2.604
ρ_p	Densidad promedio del material	gr/cm^3		2.552	

Se realiza el ensayo para determinar que el contenido promedio de la densidad de la caliza pura es 2.552 gr/ cm³.

Tabla 2.11 Ensayo de densidad de arcilla.

Abreviatura	Nombre	Unidades	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
m	Masa	gr	20	20	20
V _a	Volumen de agua	cm ³	30	30	30
V _{am}	Volumen agua + material	cm ³	39.1	39	39.1
V _m	Volumen del material	cm ³	9.1	9	9.1
ρ	Densidad del material	gr/cm ³	2.198	2.222	2.198
ρ _p	Densidad promedio del material	gr/cm ³	2.206		

De acuerdo con este ensayo, se puede determinar que el contenido promedio de densidad de la arcilla es 2.206 gr/ cm³.

Tabla 2.12 Ensayos de densidad de óxido de hierro.

Abreviatura	Nombre	Unidades	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
m	Masa	gr	10	10	20
V _a	Volumen de agua	cm ³	40	40	30
V _{am}	Volumen agua + material	cm ³	42.2	42	34.5
V _m	Volumen del material	cm ³	2.2	2	4.5
ρ	Densidad del material	gr/cm ³	4.545	5.000	4.44
ρ _p	Densidad promedio del material	gr/cm ³	4.663		

En este ensayo, se determina que el contenido promedio de densidad del óxido de hierro es 4.663 gr/ cm³.

CAPITULO III

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

3.1. Descripción del molino de bolas del laboratorio.

El equipo que se utiliza para la molienda de crudo a nivel de laboratorio es un equipo a escala fabricado para la realización de este proyecto, que asemeja geométricamente las dimensiones de la primera cámara del molino de crudo de UCEM Planta Industrial Guapán. Es un molino horizontal de una sola cámara y su circuito es abierto, sus especificaciones técnicas son las siguientes:

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del molino de crudo.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Longitud Total	22	cm
Diámetro	21	cm
Volumen	7619.93	cm ³
Potencia del motor	1.5	kW
Velocidad del Molino	92	rpm
Revestimiento interno	Acero	

Carga moledora

Como se vio en el numeral 1.4.2., el porcentaje de la carga moledora normal varia del 28% al 45%. Para este proyecto nos enfocamos en tres variaciones; la primera corresponde al 17 % de carga moledora, este valor se tomó debido a que la empresa utiliza este dato; la segunda variante corresponde al valor de 30 % y para la tercera variante el valor es de 40 %, estando estas dos últimas dentro del rango normal. (Alcántara Valladares, 2008)

Para el cálculo del volumen de los cuerpos moledores se aplica la ecuación (2)

$$V_{bolas\ molino} = V_{molino} \times \frac{\% C_M}{100 \%} \times 0.52 \quad (2)$$

De la cual obtenemos los siguientes resultados en volumen y peso de carga moledora.

Tabla 3.2 Peso de la carga moledora.

% Carga Moledora	Volumen de carga (cm³)	Peso de carga moledora (gr)
17%	673.60	5287.78
30%	1188.71	9331.37
40%	1584.95	12441.83

Distribución de las bolas de acero

Para los ensayos se tiene 4 tamaños de bolas de acero que poseen diámetros de 40mm, 30mm, 25mm y 17mm; las cuales se van a distribuir de acuerdo con los siguientes métodos:

- Método de Taggart: se establece que la distribución es de 40%, 30%, 20% y 10% del peso total de las bolas de acero que ingresan a la cámara de molienda, teniendo en cuenta que se distribuye de mayor a menor diámetro. (Jaico, 2009)
- Método de la Fórmula: se aplica la ecuación (4); $Y = \left(\frac{X}{B}\right)^{3.8}$ para obtener la distribución de los cuerpos moledores, donde: Y= porcentaje en peso de las bolas de acero, X= Diámetro de bola utilizada, las que tenemos en diferente diámetro, en cm; y B= Diámetro máximo de la bola de acero, en cm. (Ramírez, 2006). Basándonos en esta fórmula y en los diámetros de bolas de acero que se dispone. Se encuentra el porcentaje de distribución

de las bolas de acero de mayor a menor diámetro, siendo 45.85%, 33.51%, 16.76% y 3.87%.

- Método de Guapán: se usa la misma distribución de los cuerpos moledores de la primera cámara de molienda que es: 36.58%, 29.17%, 21.95% y 12.20% de mayor a menor diámetro. (UCEM Planta Industrial Guapán, 2017).

Con la distribución de los cuerpos moledores de cada método, se determina el peso de cada tamaño de bola de acero según el porcentaje de la carga moledora que ingresa al molino, que para nuestro caso es del 17%, 30% y 40% y según el método de distribución a utilizar. La matriz de los pesos de las bolas de acero se presenta en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Distribución de los cuerpos moledores.

Método	% de distribución	Diámetro (mm)	Distribución de bolas en gr		
			17%	30%	40%
			5287.78	9331.37	12441.83
Taggart	40%	40	2115.11	3732.55	4976.73
	30%	30	1586.33	2799.41	3732.55
	20%	25	1057.56	1866.27	2488.37
	10%	17	528.78	933.14	1244.18
Fórmula	45.85%	40	2424.51	4278.55	5704.74
	33.51%	30	1772.17	3127.36	4169.82
	16.76%	25	886.37	1564.19	2085.59
	3.87%	17	204.72	361.26	481.68
Guapán	36.58%	40	1934.27	3413.42	4551.22
	29.27%	30	1547.73	2731.29	3641.72
	21.95%	25	1160.67	2048.24	2730.98
	12.20%	17	645.11	1138.43	1517.90

Carga de material

Para la realización de los experimentos de molienda, se utilizó la materia prima de un día en específico, con el objetivo de manejar la misma composición química en todas las muestras, además de respetar los porcentajes de mezcla como se ve en la tabla 2.2. Para el ingreso del material al molino de laboratorio se pasa el material inicial por una trituradora de mandíbulas, seguido de una trituradora de rodillos. Una vez que el material ha sido reducido de tamaño, la cantidad de material que ingresa al molino de laboratorio utiliza una relación entre el peso de las bolas de acero (P_B) y el peso del material (P_M) igual a 10.1, de acuerdo con lo mencionado en el numeral 1.7.1. Al aplicar esta relación determinamos los pesos totales de mezcla que deben ser ingresados en cada experimento de molienda como se ve en la tabla 3.4. y posteriormente identificar los pesos de cada material de acuerdo con su porcentaje en la mezcla como se ve en la tabla 3.5.

Tabla 3.4 Carga de material para la molienda experimental.

Peso de la muestra relación 10,1	
% Carga Moledora	Peso (gr)
17%	523.54
30%	923.90
40%	1231.86

Tabla 3.5 Distribución en peso del material a moler.

Materiales	% de c/componente	Para 17% (gr)	Para 30% (gr)	Para 40% (gr)
Mix	72%	376.95	665.21	886.94
Caliza pura	18%	94.24	166.30	221.74
Arcilla	9%	47.12	83.15	110.87
Óxido de hierro	1%	5.24	9.24	12.32

Velocidad del molino

Se calcula la velocidad crítica del molino del laboratorio utilizando la ecuación (5)

$$V_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad (5)$$

Donde se obtiene una velocidad crítica igual a 102.59 rpm, de este valor la velocidad óptima con la que debe trabajar el molino se encuentra en un rango del 65% al 90%, lo que corresponde a 66.69 rpm y 92.33 rpm, respectivamente; actualmente el molino del laboratorio trabaja con una velocidad de 92 rpm, lo que significa que está dentro del rango de la velocidad óptima del molino.

Tiempo de residencia

Para definir el tiempo de residencia al cual debe de estar sometido el material a moler, se debe realizar distintas pruebas con el fin de encontrar el tiempo óptimo que logre un retenido aproximado del 12% al 14% de partículas de 75 micras y el mayor porcentaje retenido de partículas de 10 micras. En la tabla 3.6 se presentan los ensayos para la determinación del tiempo óptimo de molienda.

Tabla 3.6 Ensayos del tiempo de molienda.

N° Ensayo	Tiempo de molienda (min)
1	30
2	60
3	90
4	120

Se procede a hacer los análisis granulométricos mediante un granulómetro láser Masterizer 3000, obteniendo los siguientes datos y curvas:

Tabla 3.7 Granulometría para la determinar el tiempo óptimo de molienda.

Granulometría para la determinación del tiempo óptimo de molienda								
Tamaño (mm)	30 minutos		60 minutos		90 minutos		120 minutos	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0.09	99.91	0	100	2.63	97.37	0	100
211	3.57	96.43	1.01	98.99	3.9	96.1	0	100
111	15.7	84.3	11.34	88.66	10.31	89.69	3.48	96.52
76	26.15	73.85	20.71	79.29	16.88	83.12	9.39	90.61
45.6	38.57	61.43	31.01	68.99	25.94	74.06	18.18	81.82
27.4	47.41	52.59	38.79	61.21	33.13	66.87	24.75	75.25
11.2	61.34	38.66	51.65	48.35	45.74	54.26	38.61	61.39
3.55	80.62	19.38	72.36	27.64	68.5	31.5	63.09	36.91
0.314	98.27	1.73	97.35	2.65	96.78	3.22	95.92	4.08
0.128	99.96	0.04	99.98	0.02	100	0	99.98	0.02

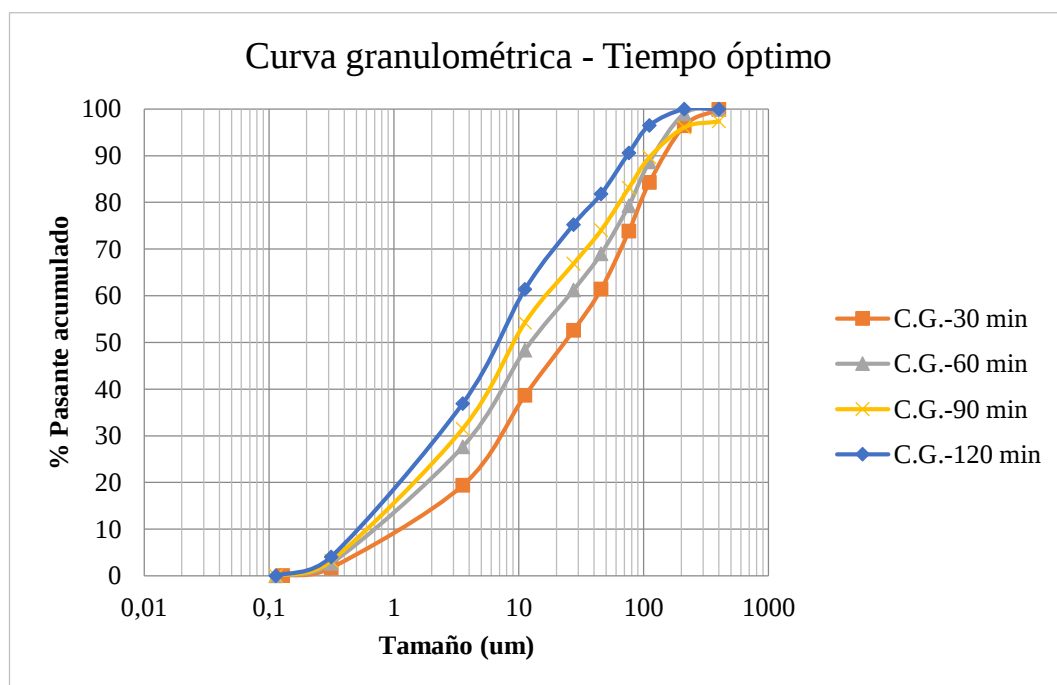


Figura 3.1 Curva granulométrica según el tiempo de molienda.

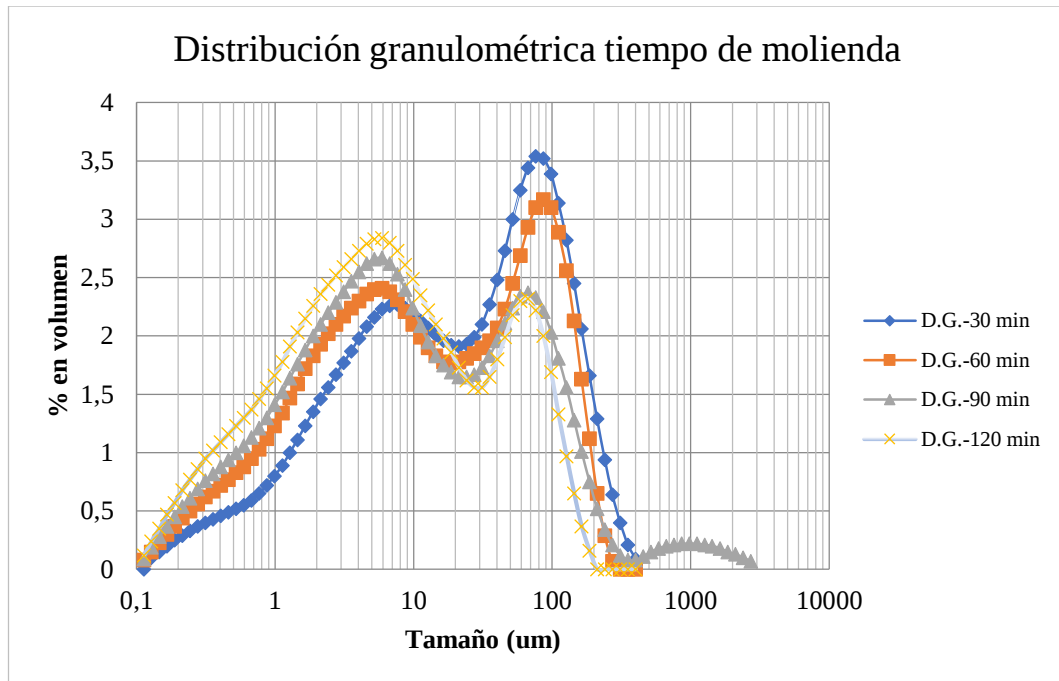


Figura 3.2 Distribución granulométrica según el tiempo de molienda.

Como se puede observar en la tabla 3.7, se determina que el tiempo de molienda necesario para obtener la granulometría ya mencionada corresponde al promedio entre 60 y 90 minutos, obteniendo un tiempo de molienda igual a 75 minutos.

3.2. Matriz de Experimentación

Para la realización de los experimentos se modifican dos parámetros de molienda que son: porcentaje de carga moledora y método de distribución de los cuerpos moledores; como se vio anteriormente, las variantes de cada parámetro de molienda son:

Porcentaje de carga moledora

- 17% de carga moledora.
- 30% de carga moledora.
- 40% de carga moledora.

Métodos de distribución de cuerpos moledores

- Método de Taggart.
- Método de la Fórmula.
- Método de Guapán.

Con los cuales se obtiene la siguiente matriz de experimentación, donde de cada combinación se realizan 3 pruebas para verificar que la información obtenida sea la correcta.

Tabla 3.8 Matriz de experimentación.

Matriz de Experimentación					
Método	% de distribución	Diámetro de bolas (mm)	Porcentaje de Carga Moledora		
			17%	30%	40%
Taggart	40%	40			
	30%	30	17%	30%	40%
	20%	25	Taggart	Taggart	Taggart
	10%	17			
Fórmula	45.85%	40			
	33.51%	30	17%	30%	40%
	16.76%	25	Fórmula	Fórmula	Fórmula
	3.87%	17			
Guapán	36.58%	40			
	29.27%	30	17%	30%	40%
	21.95%	25	Guapán	Guapán	Guapán
	12.20%	17			

3.3. Metodología

A continuación, se presenta la metodología a seguir de cada prueba de la matriz de experimentación (tabla 3.8):

1. Los materiales de la mezcla (mix, caliza, arcilla y óxido de hierro) proporcionados por la planta Guapán, se colocan de manera separada sobre una lona para disminuir el contenido de humedad presente en dichos materiales.



Figura 3.3 Tendido de mix.



Figura 3.4 Tendido de caliza pura.

2. Después de aproximadamente 15 días, se procede a triturar los materiales con el fin de obtener un tamaño ideal en relación con el diámetro del molino del laboratorio.



Figura 3.5 Trituradora de mandíbulas.



Figura 3.6 Trituradora de rodillos.

3. Luego, se utiliza el método del cuarteo para lograr homogenizar cada material.



Figura 3.7 Método de cuarteo, material caliza.

4. Posteriormente se secan los materiales en un horno a una temperatura aproximada de 150 °C, hasta disminuir la humedad en su totalidad.



Figura 3.8 Secado del material en el horno.

5. Se pesa cada material según el porcentaje correspondiente en la mezcla promedio, de acuerdo con la tabla 3.5, según la prueba a realizarse.

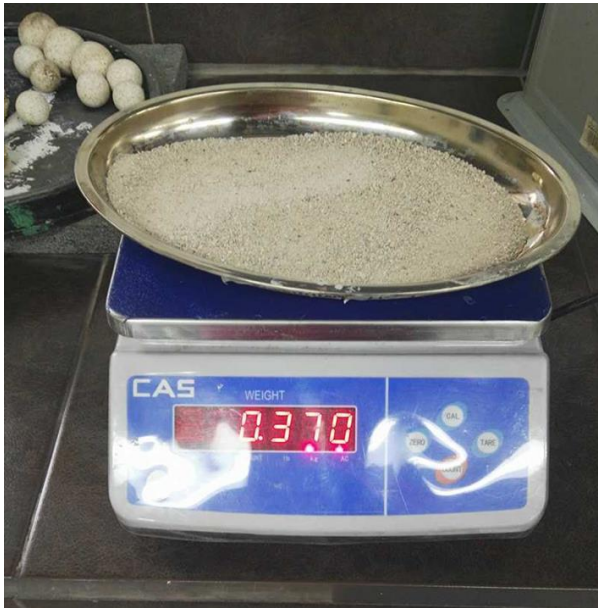


Figura 3.9 Pesaje del material.

6. Luego, se pesan las bolas de acero de acuerdo con la matriz que se observa en la tabla 3.3, según cada experimento.



Figura 3.10 Pesaje de bolas de acero.

7. Seguidamente se colocan los materiales y las bolas de acero, antes pesadas, dentro del molino del laboratorio.



Figura 3.11 Molino con bolas de acero y material.

8. Se procede a moler los materiales durante un tiempo de 75 minutos.



Figura 3.12 Molino de bolas de acero en funcionamiento.

9. Una vez culminada la molienda, se retira el material del molino para colocarlo en una funda plástica etiquetada.

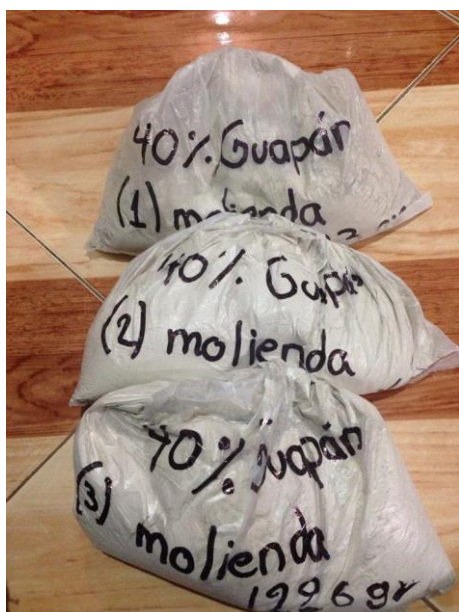


Figura 3.13 Etiquetado de muestras.

10. Posteriormente se llevan muestras de la molienda al Laboratorio Químico de UCEM Planta Guapán, para realizar la granulometría utilizando un granulómetro láser Masterizer 3000 y así obtener los resultados.

3.4. Generación de datos y curvas granulométricas

Los resultados obtenidos del granulómetro láser vienen dados por un porcentaje en volumen de acuerdo con el tamaño de partículas retenidas, con esta información se procede a generar tablas granulométricas con porcentaje retenido acumulado y porcentaje pasante acumulado y así obtener las curvas granulométricas respectivas. Las tablas y curvas granulométricas de las 3 pruebas de cada combinación de la matriz de experimentación se presentan en el Anexo 2; a continuación, se muestran las tablas y curvas granulométricas promedio de las mismas:

3.4.1. Granulometrías del 17% de carga moledora

Tabla 3.9 Granulometrías promedio con el 17% de carga moledora.

Tamaño (um)	Granulometrías con carga de llenado del 17%					
	17% Fórmula		17% Taggart		17% Guapán	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	2.09	97.91	4.60	95.41	0.00	100.00
211	2.85	97.15	5.53	94.47	0.25	99.76
111	10.22	89.78	11.95	88.05	7.01	92.99
76	17.93	82.07	19.17	80.83	14.59	85.41
45.6	27.39	72.61	28.56	71.44	24.70	75.30
27.4	34.42	65.58	35.99	64.01	33.17	66.84
11.2	47.73	52.27	49.10	50.90	46.56	53.45
3.55	71.15	28.85	72.22	27.79	71.05	28.96
0.314	98.99	1.01	99.04	0.97	99.02	0.98
0.11	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00

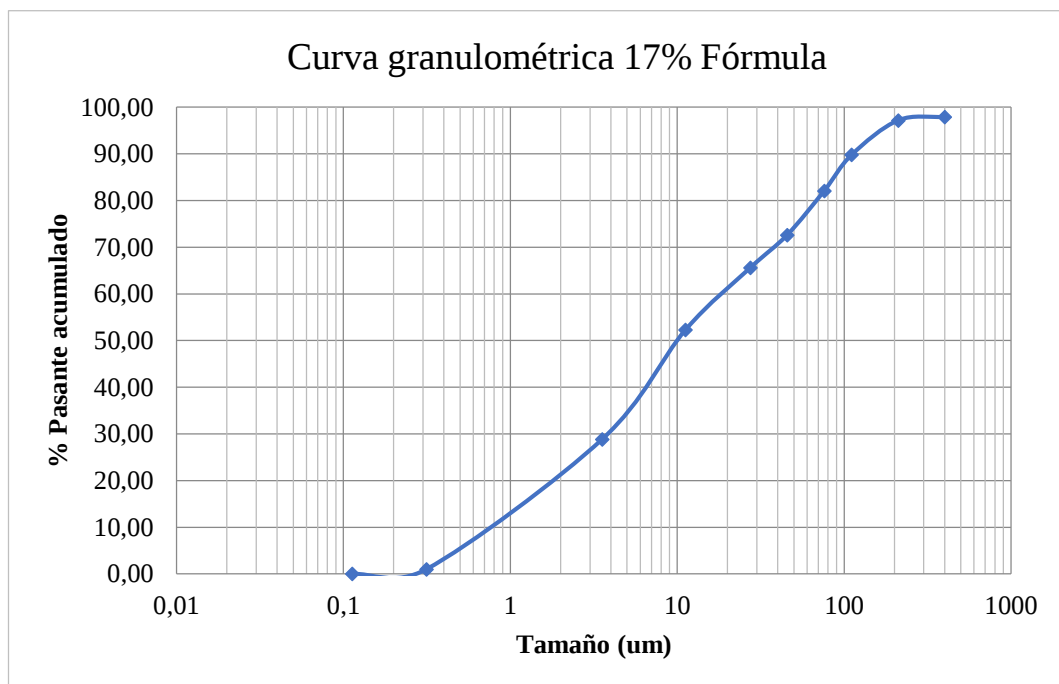


Figura 3.14 Curva granulométrica promedio - 17% Fórmula.

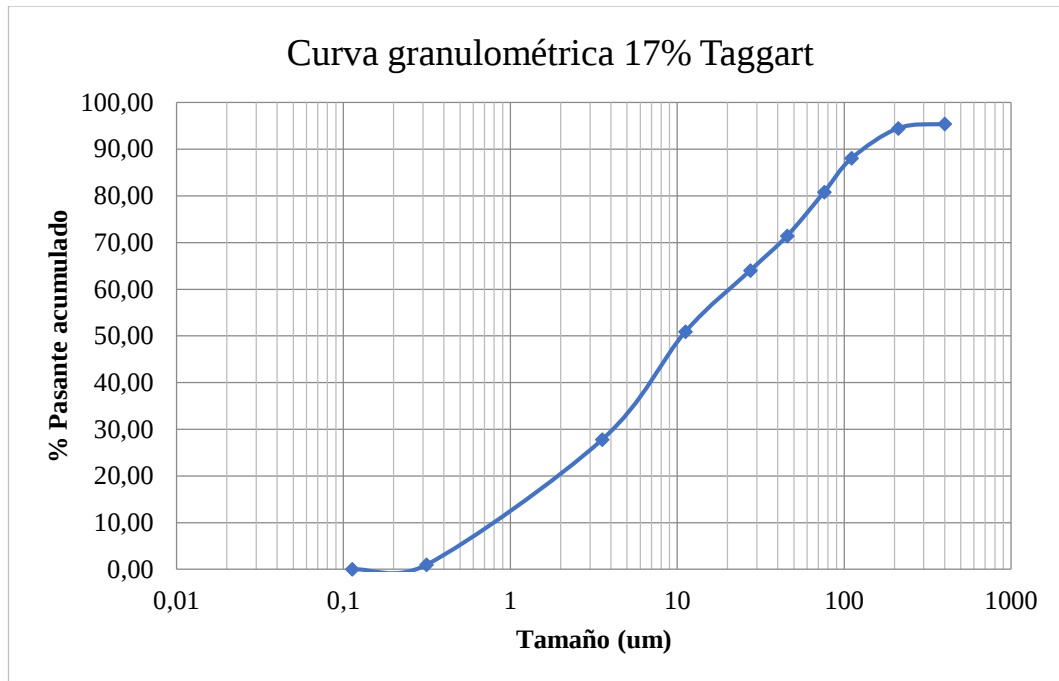


Figura 3.15 Curva granulométrica promedio - 17% Taggart.

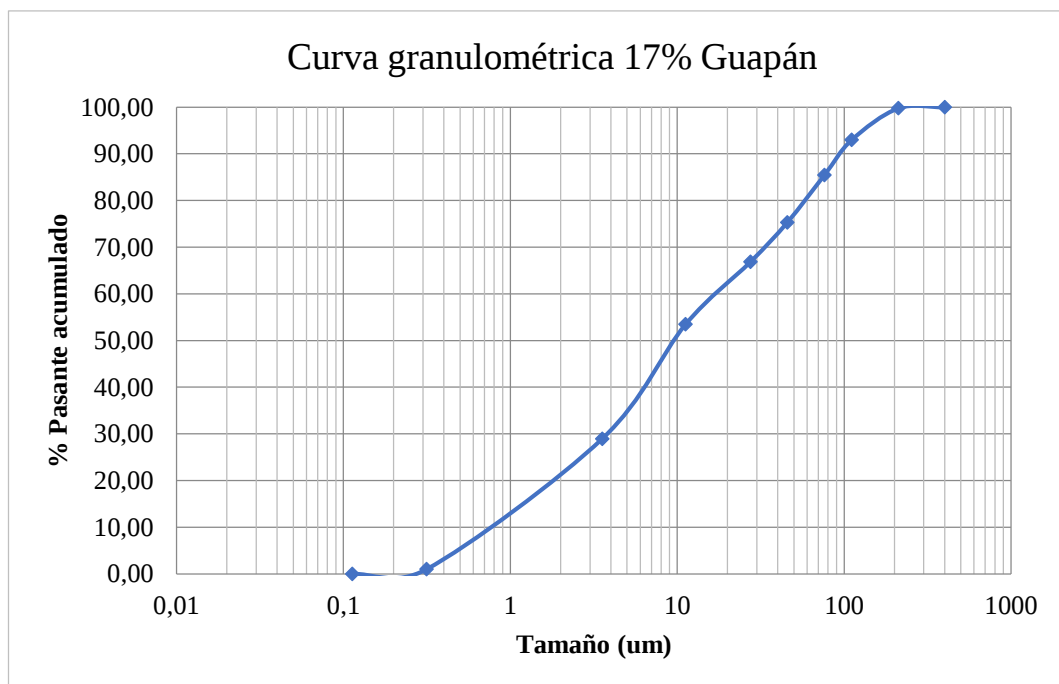


Figura 3.16 Curva granulométrica promedio - 17% Guapán.

3.4.2. Granulometrías del 30% de carga moledora

Tabla 3.10 Granulometrías promedio con el 30% de carga moledora.

Tamaño (um)	Granulometrías con carga de llenado del 30%					
	30% Fórmula		30% Taggart		30% Guapán	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0.78	99.22	0.00	100.00	1.03	98.97
211	2.52	97.48	1.28	98.72	1.65	98.35
111	9.54	90.46	9.83	90.18	7.53	92.47
76	16.57	83.43	18.07	81.93	14.86	85.14
45.6	26.02	73.98	28.26	71.74	24.51	75.49
27.4	33.56	66.44	36.31	63.69	31.98	68.02
11.2	47.09	52.91	50.13	49.87	45.89	54.11
3.55	70.64	29.36	71.14	28.86	69.31	30.69
0.314	97.13	2.87	97.12	2.88	96.96	3.04
0.11	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00

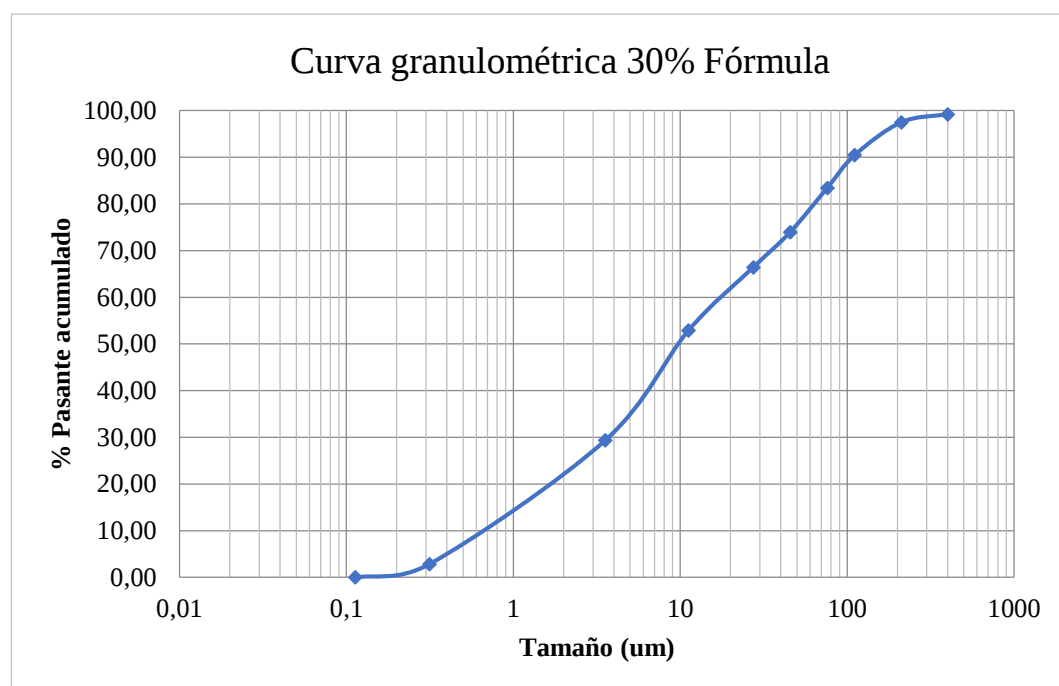


Figura 3.17 Curva granulométrica promedio - 30% Fórmula.

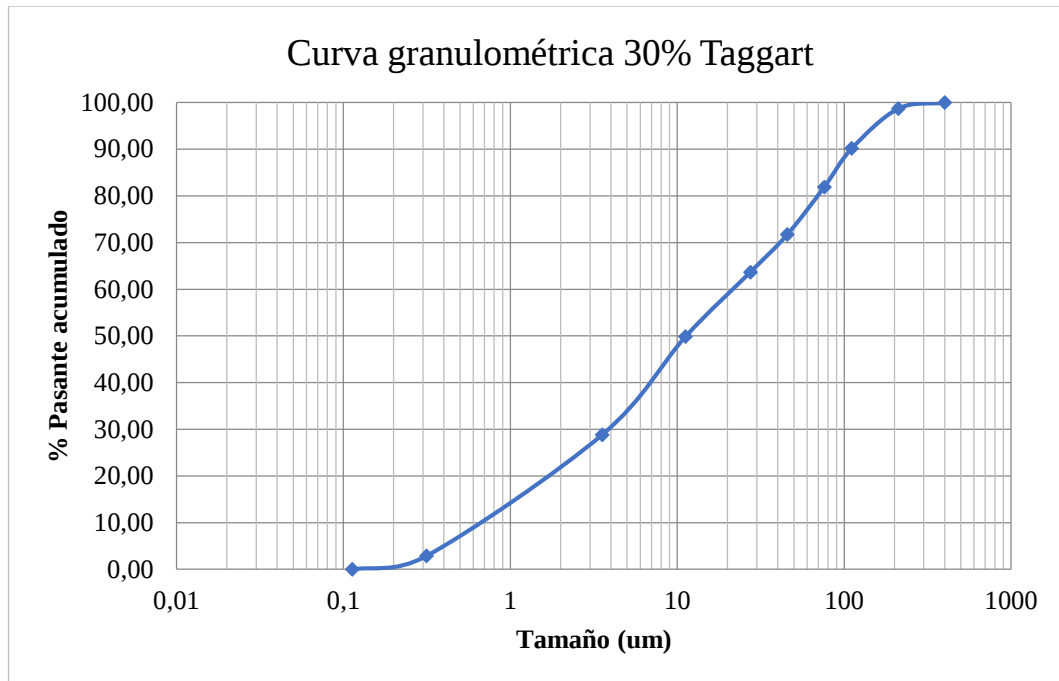


Figura 3.18 Curva granulométrica promedio - 30% Taggart.

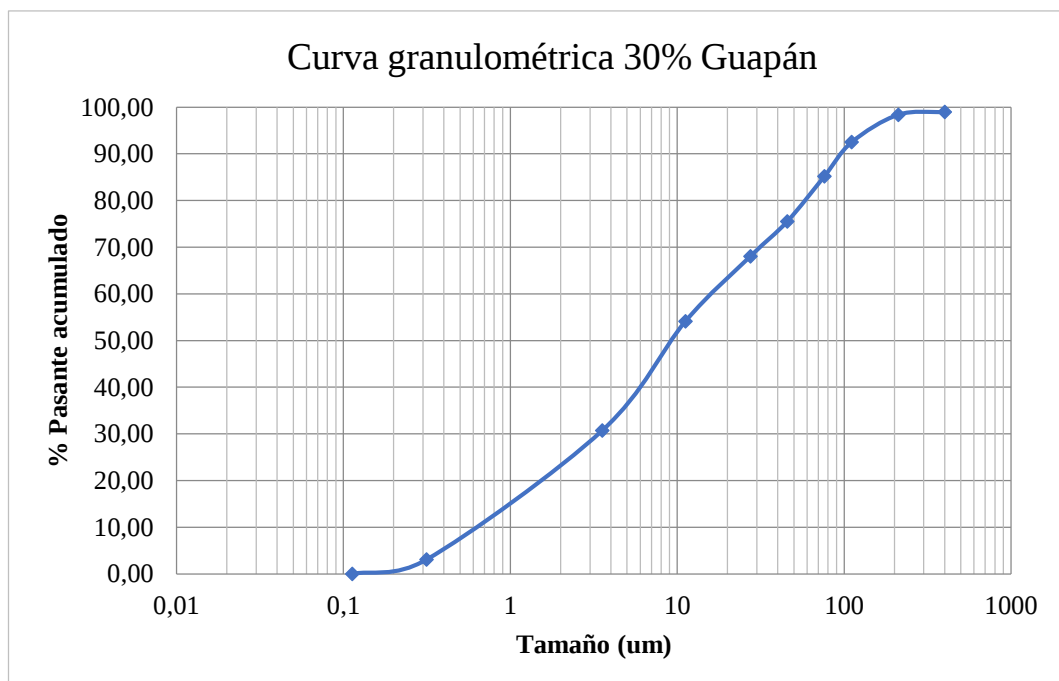


Figura 3.19 Curva granulométrica promedio - 30% Guapán.

3.4.3. Granulometrías del 40% de carga moledora

Tabla 3.11 Granulometrías promedio con el 40% de carga moledora.

Tamaño (um)	Granulometrías con carga de llenado del 40%					
	40% Fórmula		40% Taggart		40% Guapán	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0.10	99.90	4.09	95.92	2.04	97.96
211	2.33	97.67	6.47	93.54	3.11	96.89
111	9.97	90.03	13.78	86.23	9.40	90.60
76	16.94	83.06	20.84	79.17	15.90	84.10
45.6	26.86	73.14	30.40	69.61	26.07	73.93
27.4	35.22	64.78	38.12	61.88	34.38	65.62
11.2	49.41	50.59	52.07	47.94	48.60	51.40
3.55	72.75	27.25	74.97	25.04	71.72	28.28
0.314	97.47	2.53	97.77	2.23	97.31	2.69
0.11	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00

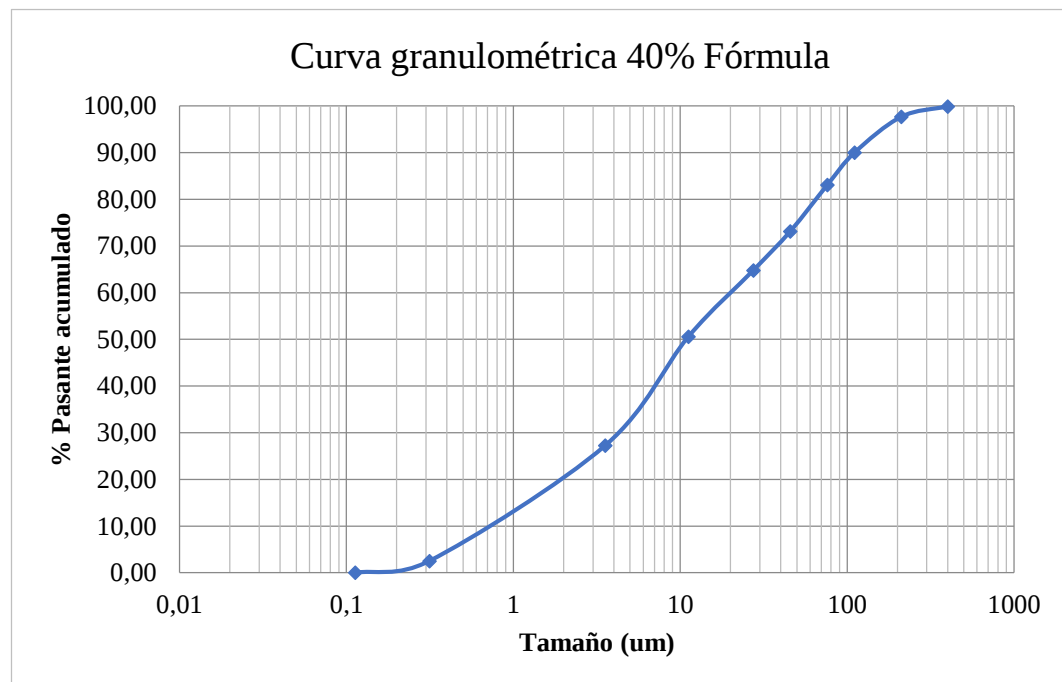


Figura 3.20 Curva granulométrica promedio - 40% Fórmula.

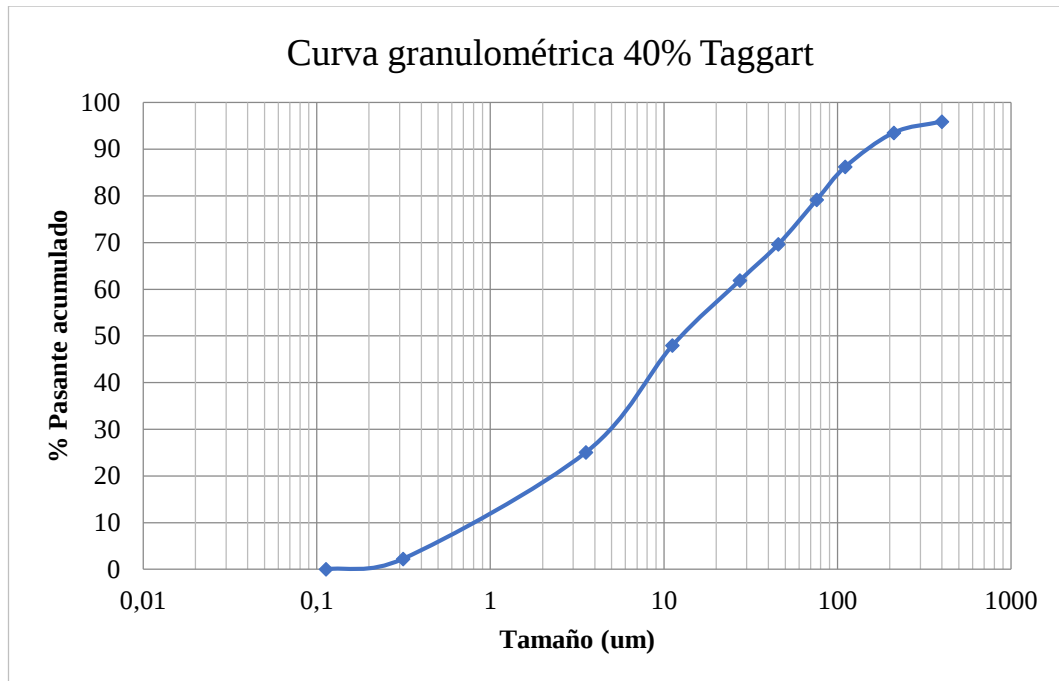


Figura 3.21 Curva granulométrica promedio - 40% Taggart.

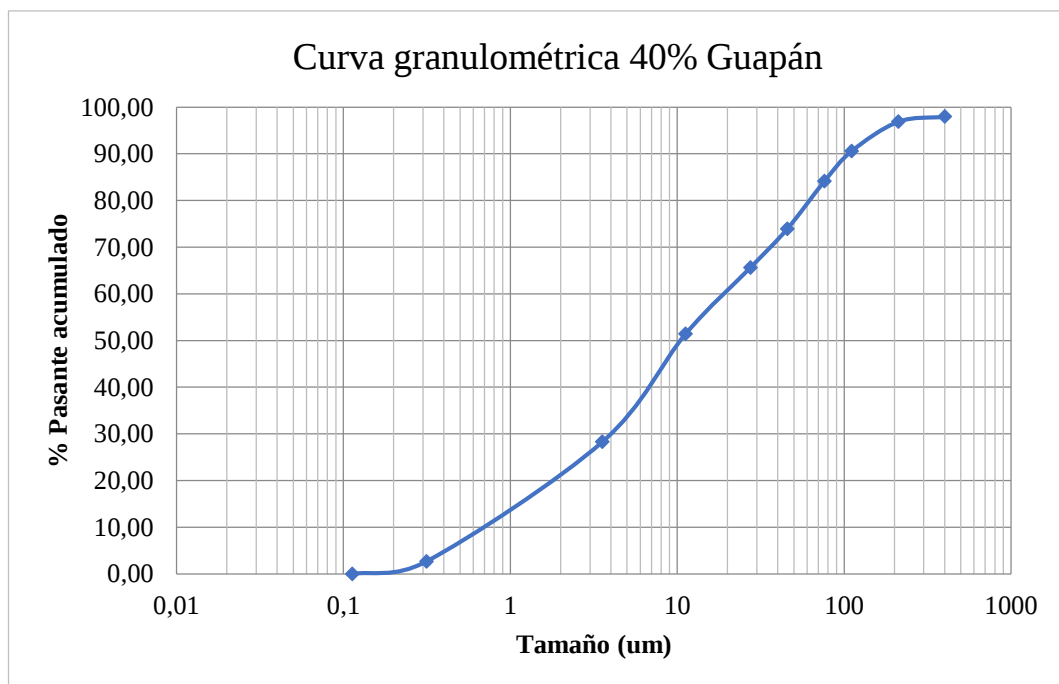


Figura 3.22 Curva granulométrica promedio - 40% Guapán.

CAPITULO IV

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de resultados

Basándonos en los resultados de las granulometrías conseguidas en las tablas 3.09, 3.10 y 3.11 que corresponden al 17%, 30% y 40% de carga moledora respectivamente, se obtiene que las mejores condiciones para disminuir la cantidad de partículas finas, menores a 10 micras, es decir conseguir que el porcentaje pasante acumulado a 10 micras sea el menor, son:

- Análisis comparativo del 17% de carga moledora.

Tabla 4.1 Análisis comparativo del 17%.

Tamaño (um)	17% Fórmula		17% Taggart		17% Guapán	
	%	%	%	%	%	%
	Retenido acumulado	Pasante acumulado	Retenido acumulado	Pasante acumulado	Retenido acumulado	Pasante acumulado
11.2	47.73	52.27	49.10	50.90	46.56	53.45

Como se observa en la tabla 4.1, para el 17% de carga moledora, el método que nos plantea Taggart nos da el mejor resultado, debido a que el porcentaje pasante (50.90%), es el menor de entre los tres métodos de distribución de bolas de acero.

- Análisis comparativo del 30% de carga moledora

Tabla 4.2 Análisis comparativo del 30%.

Tamaño (μ m)	30% Fórmula		30% Taggart		30% Guapán	
	%	%	%	%	%	%
	Retenido acumulado	Pasante acumulado	Retenido acumulado	Pasante acumulado	Retenido acumulado	Pasante acumulado
11.2	47.09	52.91	50.13	49.87	45.89	54.11

En la tabla 4.2 se contempla que para el 30% de carga moledora, el método de Taggart nos da el mejor resultado, ya que el porcentaje pasante acumulado (49.87%), es el menor de entre los tres métodos de distribución de bolas de acero.

- Análisis comparativo del 40% de carga moledora

Tabla 4.3 Análisis comparativo del 40%.

Tamaño (μ m)	40% Fórmula		40% Taggart		40% Guapán	
	%	%	%	%	%	%
	Retenido acumulado	Pasante acumulado	Retenido acumulado	Pasante acumulado	Retenido acumulado	Pasante acumulado
11.2	49.41	50.59	52.07	47.94	48.60	51.40

Para el 40% de carga moledora, el mejor resultado es el método de Taggart, con un porcentaje pasante acumulado del 47.94%, como se ve en la tabla 4.3.

4.2. Comparación de resultados

En base al mejor resultado de cada porcentaje de carga moledora, se procede a compararlos con el resultado del 17% Guapán, que es la representación del funcionamiento del molino de UCEM planta Guapán y así encontrar el experimento ideal, que genere la menor cantidad de partículas menores a 10 micras.

4.2.1. Comparación entre curvas granulométricas

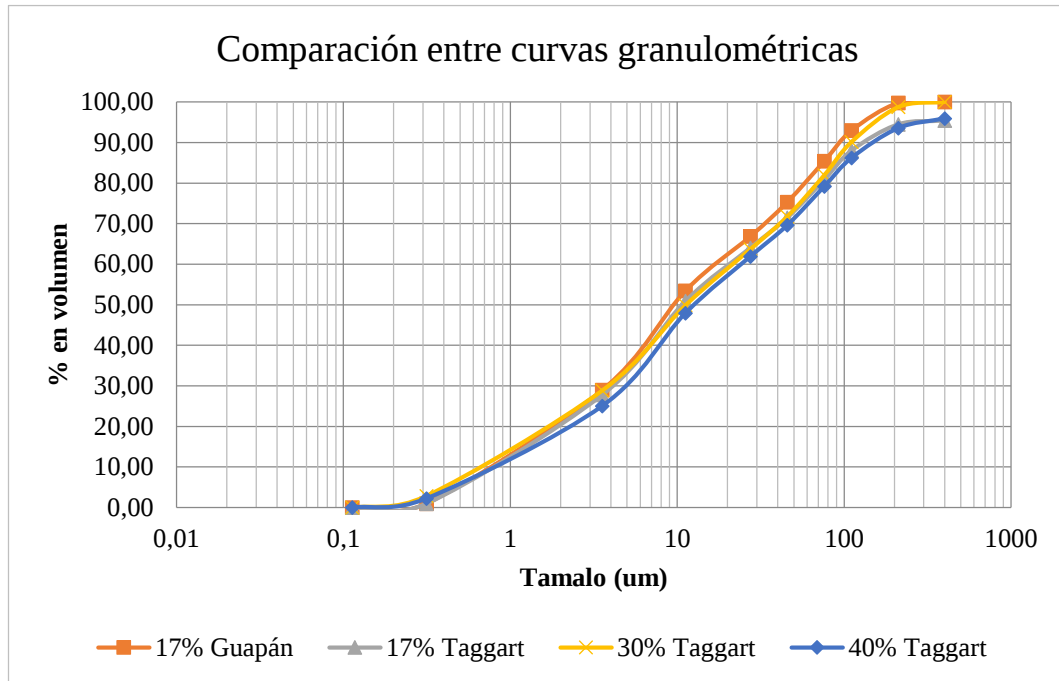


Figura 4.1 Comparación entre curvas granulométricas.

Como se observa en la figura 4.1, la curva granulométrica que genera menos partículas finas (menores a 10 micras) es la que corresponde al 40% Taggart.

4.2.2. Comparación entre distribuciones granulométricas

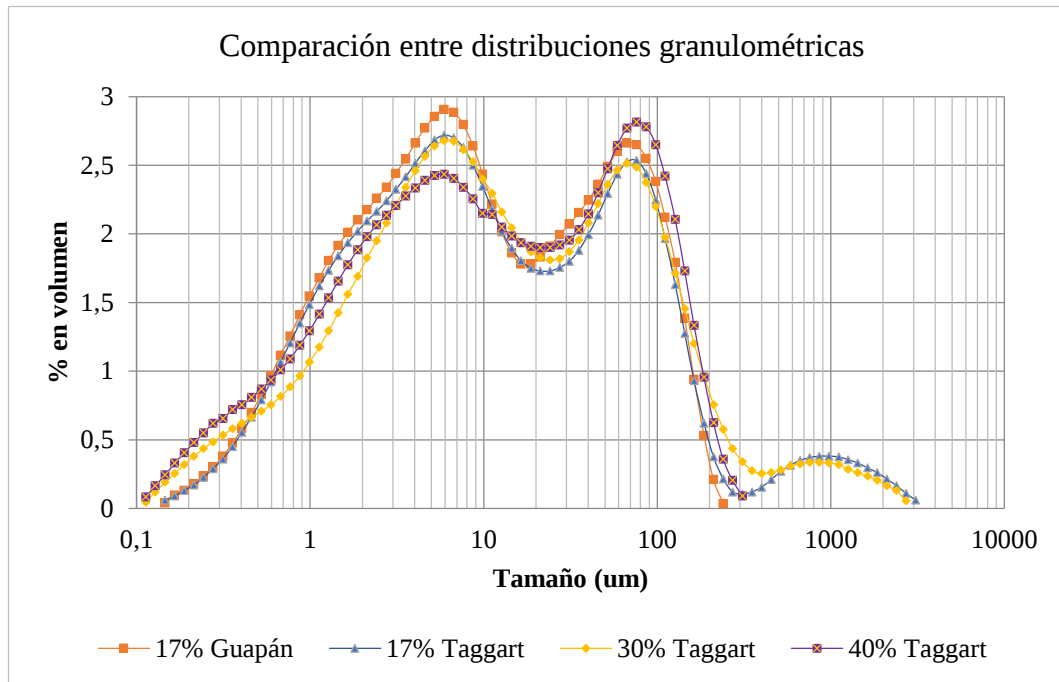


Figura 4.2 Comparación entre distribuciones granulométricas.

En la figura 4.2, se puede ver que la distribución granulométrica del 40% Taggart genera menor cantidad de partículas finas (menores a 10 micras), en comparación a las distribuciones del 17% Guapán, 17% Taggart y 30% Taggart.

4.3. Discusión de resultados

A partir de los resultados encontrados, aceptamos la hipótesis que se plantea en este proyecto, donde dichos resultados nos brindan una idea clara en la determinación y definición del experimento ideal, que consiste en el hallazgo de una combinación entre el porcentaje de carga moledora y el método de distribución de las bolas de acero, que disminuya el porcentaje de partículas finas, menores a 10 micras.

De acuerdo con el modelamiento de parámetros del molino de crudo de UCEM Planta Industrial Guapán como son: geometría del molino (primera cámara), humedad del material, tiempo de molienda aproximado, porcentaje de carga moledora y distribución de cuerpos moledores, se pudo asemejar dichos parámetros a nivel de laboratorio,

considerados en la matriz de experimentación como 17% Guapán, el cual nos arroja un resultado promedio de un pasante acumulado en aproximadamente 10 micras (11.2 μm) del 53.45%, que es similar a la distribución granulométrica real de la planta Guapán.

Luego del análisis comparativo y selección del mejor resultado de cada porcentaje de carga moledora (17%, 30% y 40%), tenemos que el método de distribución de cuerpos moledores efectivo en la disminución de partículas finas es el de Taggart.

En el resultado del 17% Taggart se obtiene un porcentaje pasante acumulado en aproximadamente 10 micras (11.2 μm) igual a 50.90%, obteniendo una disminución de partículas finas del 2.55%, en relación con el resultado del 17% Guapán. De la misma manera se obtiene una mejora en la disminución de partículas finas según el resultado del 30% Taggart igual a 49.87%, donde se disminuye en un 3.58% dichas partículas. Por último, se obtiene un porcentaje pasante acumulado aproximadamente en 10 micras (11.2 μm) igual al 47.94%, correspondiente a 40% Taggart, por lo que se obtiene una disminución del 5.51% de generación de partículas menores a 10 micras.

Las pruebas presentadas en este proyecto, corroboran el texto escrito en la tesis “Diseño práctico de un molino de bolas”, donde se habla que el rango ideal del porcentaje de carga moledora es del 28% al 40% (Alcántara Valladares, 2008), es por eso que 17% Taggart genera más cantidad de finos que los demás, con un menor porcentaje de disminución de partículas finas. Para los resultados del 30% Taggart y 40% Taggart, podemos decir que ambos casos están dentro del rango permitido del porcentaje de carga moledora y que en ellos existe una disminución de partículas finas, al definir el experimento ideal se debe tener en cuenta el mayor porcentaje de disminución que se pueda encontrar, donde en este caso sería el 5.51% que corresponde al 40% Taggart.

La información obtenida en la realización de este proyecto guarda relación a lo expuesto en “Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda.”, donde se señala que la generación de partículas finas menores a 45 micras está influenciada por la variación de parámetros como: velocidad del molino, tiempo de residencia y carga de cuerpos moledores, en el cual se documenta que el cambio de

carga de cuerpos moledores dentro del rango establecido (28%-45%) no influye significativamente en la generación de partículas finas en comparación con los otros dos parámetros mencionados (A Osorio et al., 2009). En este proyecto se confirma que el tiempo de molienda influye de gran manera, el comportamiento es directamente proporcional, es decir, que a mayor tiempo de molienda mayor generación de partículas finas; al referirnos a la velocidad del molino no se puede ratificar lo mencionado anteriormente debido a que el molino del laboratorio trabaja a una velocidad constante. En lo que respecta a carga de cuerpos moledores se considera que si se implementa la combinación 40% Taggart a nivel industrial existiría una disminución significativa del porcentaje de estas partículas finas, obteniendo beneficios económicos para el costo de producción.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

El presente proyecto se ha dedicado a la experimentación mediante la variación de dos parámetros de molienda con el objetivo de encontrar la mejor alternativa que permita disminuir la cantidad de partículas finas, menores a 10 micras y en base a los experimentos realizados se puede concluir que:

- Se consiguió el modelamiento físico del molino de bolas de UCEM planta Guapán, el mismo que se refiere al escalamiento geométrico de la primera cámara del molino y de los materiales de entrada, además se trabajó con condiciones similares a la de la planta como son: humedad del material, rango de velocidad del molino y mezcla promedio de entrada, por lo tanto, se logró que el comportamiento granulométrico de la molienda de laboratorio sea similar a la molienda de Guapán.
- El tiempo óptimo para conseguir la granulometría con mayor porcentaje retenido en 10 micras, es de 75 minutos, el mismo que es un tiempo moderado en relación con el tiempo posible de residencia del material en UCEM planta Guapán.
- Se comparó las granulometrías de cada experimento, en base al porcentaje pasante acumulado, tomando en cuenta la granulometría ideal establecida por UCEM Planta Guapán, donde se logró obtener el mejor método de distribución de cuerpos moledores para cada porcentaje de carga moledora, siendo el método de Taggart el mejor, ya que se pudo demostrar que para el 17%, 30% y 40% de carga moledora presenta los mejores resultados en comparación con el método de la Fórmula y de Guapán.
- La mejor alternativa para disminuir la cantidad de partículas finas, menores a 10 micras, corresponde a la combinación del 40% de carga moledora con el método de Taggart, consiguiendo una disminución del 5.51% contribuyendo al mejoramiento del sistema de molienda, ya que se

observó que esta distribución cuenta con una selección de distribución homogénea de bolas en relación con los otros métodos.

Recomendaciones:

- En lo que respecta a la carga moledora, se recomienda trabajar con un porcentaje cercano al límite superior (28% - 45%), debido a que genera menor cantidad de partículas finas.
- Se recomienda utilizar el método de distribución de Taggart, debido a que este presentó mejores resultados de molienda en el presente estudio.
- De acuerdo con la velocidad de molienda, se recomienda utilizar una velocidad cercana al límite inferior del rango propuesto de la velocidad crítica, ya que, a mayor velocidad, mayor generación de partículas finas. (A Osorio et al., 2009)
- Se recomienda realizar un amplio estudio de cada uno de los componentes de la mezcla que ingresan a la molienda, para definir cuál de estos aporta mayor cantidad de finos en este proceso.
- Se recomienda que se estudie la posibilidad de que previo al ingreso de los materiales al molino de crudo, se realice un secado con el fin de evitar una alta temperatura al interior del molino, para disminuir la plasticidad del material mejorando la ruptura de partículas y luego se realice una clasificación granulométrica para separar las partículas finas que no necesiten ser molidas.
- Se recomienda realizar un estudio que abarque otros parámetros de molienda como velocidad y tiempo de molienda, para determinar la incidencia de estos en la generación de partículas finas.

- Se recomienda estudiar el consumo energético del proceso de molienda de crudo en relación con la variación de parámetros de molienda y así encontrar el beneficio económico que se puede obtener.

BIBLIOGRAFÍA

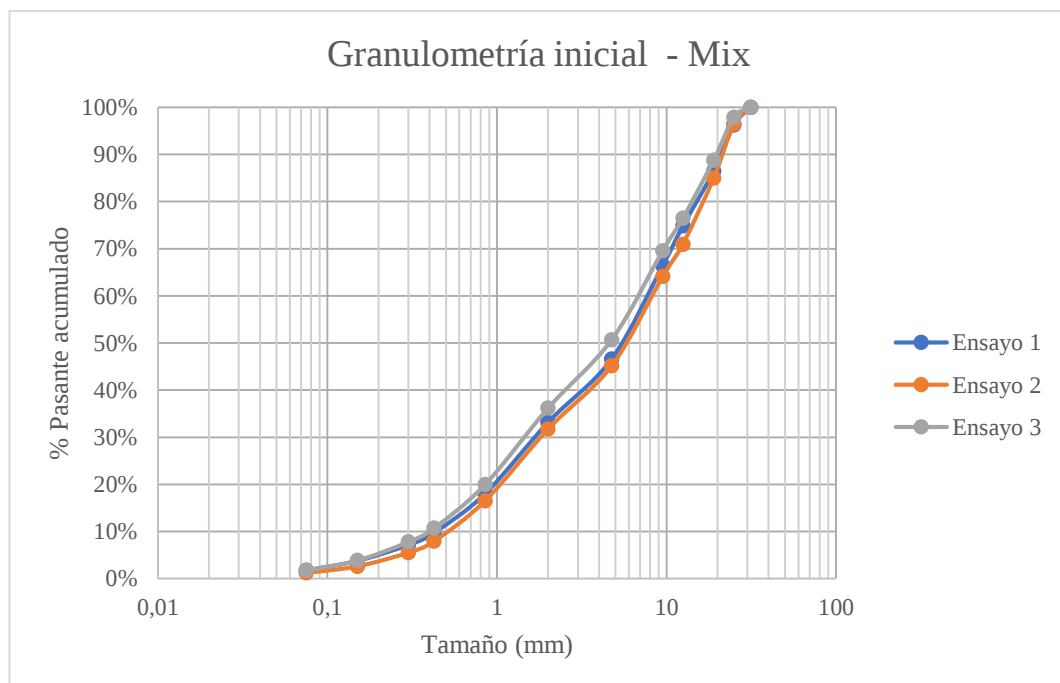
- Alcántara Valladares, J. R. (2008). Diseño práctico de un molino de bolas. Instituto Politécnico Nacional.
- American Standard for Testing and Materials, . (1998). Determinación del contenido de humedad. ASTM 2216-98. Pennsylvania, USA.
- Austin, L., & Concha, F. (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. *CYTED*, (Programa Iberoamerica de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo).
- Duda, W. H. (1977). La molienda en la producción de cemento. Manual Tecnológico del Cemento (p. 539). Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Facultad de Ingeniería, U. (2015). Molienda Industrias I. Buenos Aires. Recuperado de: http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte Molienda.pdf
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, finos y gruesos, 12.
- Jaico, J. (2009). Molienda. Problemas de Procesamiento de Minerales (3rd ed.). Trujillo.
- Osorio, A., Pelaéz, J., Sánchez, R., Rodriguez, N., Fidelgranda, C., & Restrepo, G. (2007). Elaboración de nomogramas de propiedades e implementación del Índice de Trabajo de Bond para la molienda de clinker de cemento. *Scientia et Technica*, (36), 363–368.
- Osorio, A., Restrepo, G., & Marín, J. (2009). Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. *Dyna*, 76, 69–77. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/10247>

- Ramírez, R. (2006). Efecto de la distribución de tamaño de bola en la molienda de Cu, CuO y el aleado mecánico de Cu - 15% atómico de Al en un molino horizontal de bolas. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado de: [https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10922/Efecto de la distribucion de tamano de bola en la molienda.pdf?sequence=1](https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10922/Efecto%20de%20la%20distribucion%20de%20tamano%20de%20bola%20en%20la%20molienda.pdf?sequence=1)
- Tippens, P. E. (2007). Física conceptos y aplicaciones (7th ed.). MCGRAW HILL.
- UCEM Planta Industrial Guapán, . (2017). Descripción de activos fijos. Azogues.

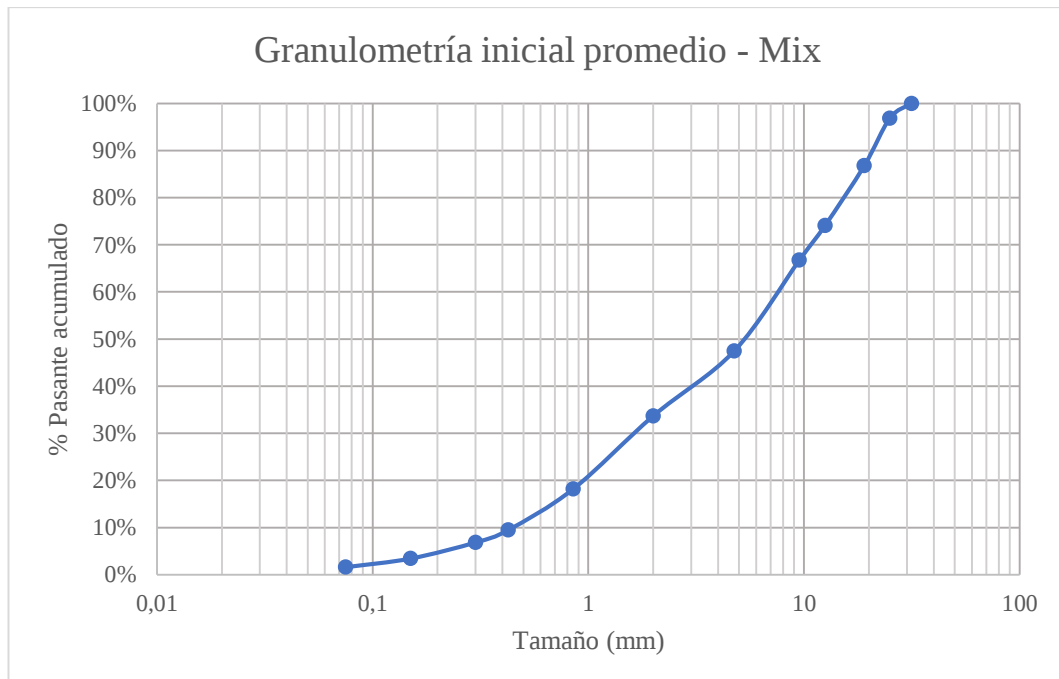
ANEXOS

Anexo 1 Tablas y curvas granulométricas de los materiales que ingresan al molino de crudo.

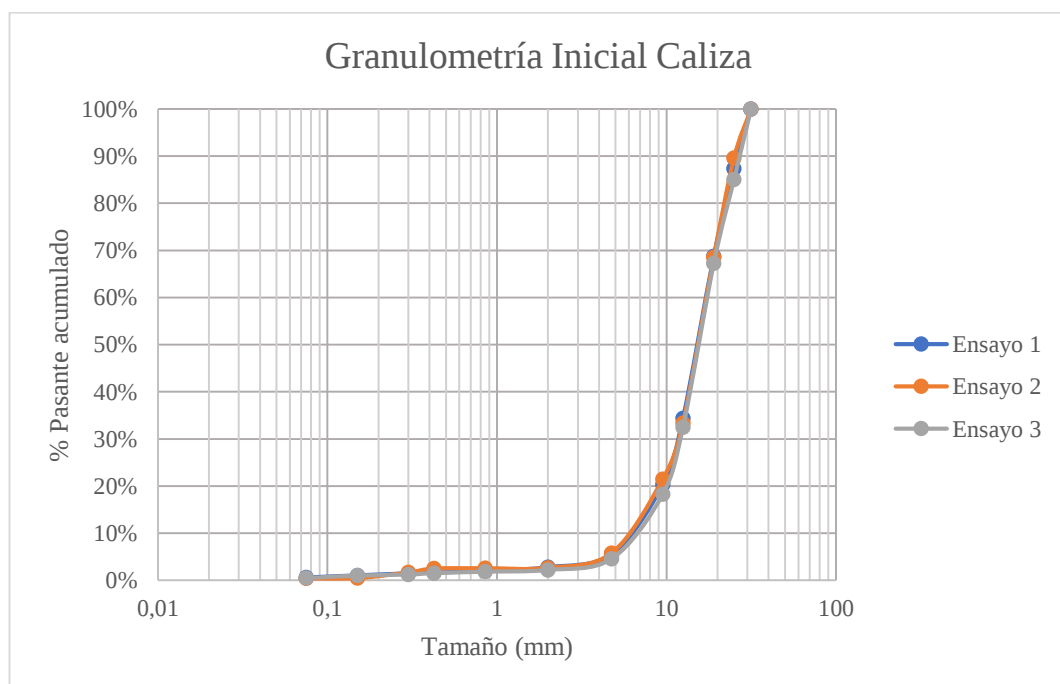
Granulometría inicial - Mix							
N° Tamiz	Tamaño (mm)	Prueba (1)		Prueba (2)		Prueba (3)	
		% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
1 "	25	3.73%	96.27%	3.56%	96.44%	2.09%	97.91%
3/4 "	19	13.53%	86.47%	14.99%	85.01%	11.20%	88.80%
1/2 "	12.5	25.17%	74.83%	29.05%	70.95%	23.53%	76.47%
3/8 "	9.5	33.57%	66.43%	35.86%	64.14%	30.40%	69.60%
4	4.75	53.39%	46.61%	54.83%	45.17%	49.31%	50.69%
10	2	66.83%	33.17%	68.24%	31.76%	63.81%	36.19%
20	0.85	81.98%	18.02%	83.48%	16.52%	80.03%	19.97%
40	0.425	90.24%	9.76%	92.05%	7.95%	89.26%	10.74%
50	0.3	92.82%	7.18%	94.46%	5.54%	92.18%	7.82%
100	0.15	96.22%	3.78%	97.37%	2.63%	96.13%	3.87%
200	0.075	98.23%	1.77%	98.78%	1.22%	98.22%	1.78%
Fondo		100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%



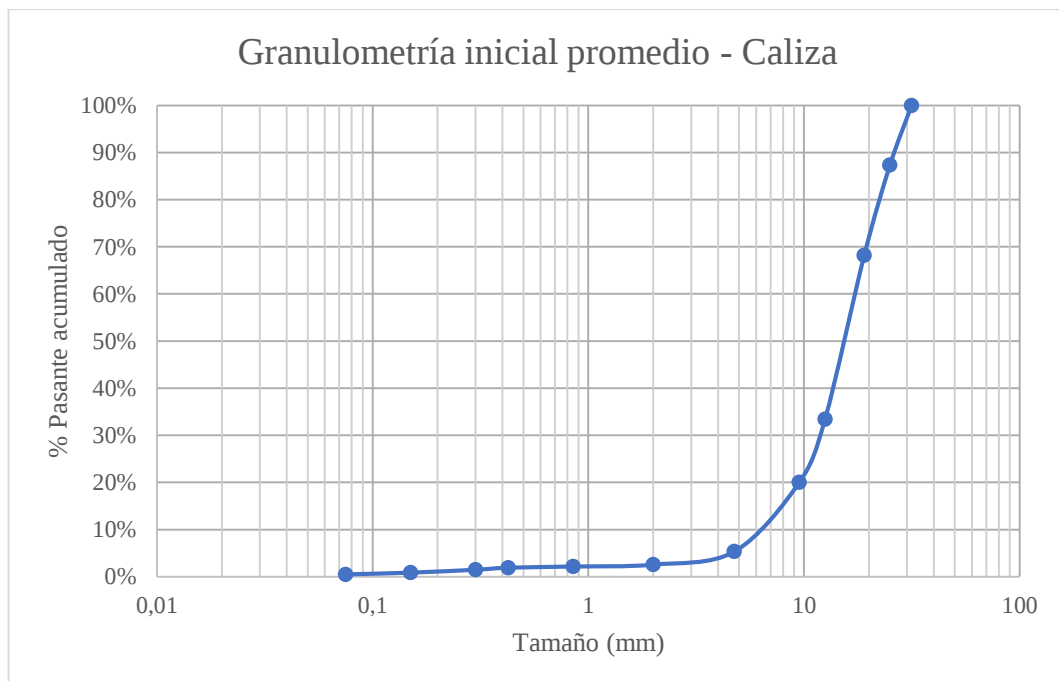
Granulometría inicial promedio - Mix			
N° Tamiz	Tamaño (mm)	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%
1"	25	3.13%	96.87%
3/4 "	19	13.24%	86.76%
1/2 "	12.5	25.92%	74.08%
3/8"	9.5	33.28%	66.72%
4	4.75	52.51%	47.49%
10	2	66.29%	33.71%
20	0.85	81.83%	18.17%
40	0.425	90.52%	9.48%
50	0.3	93.15%	6.85%
100	0.15	96.57%	3.43%
200	0.075	98.41%	1.59%
Fondo		100.00%	0.00%



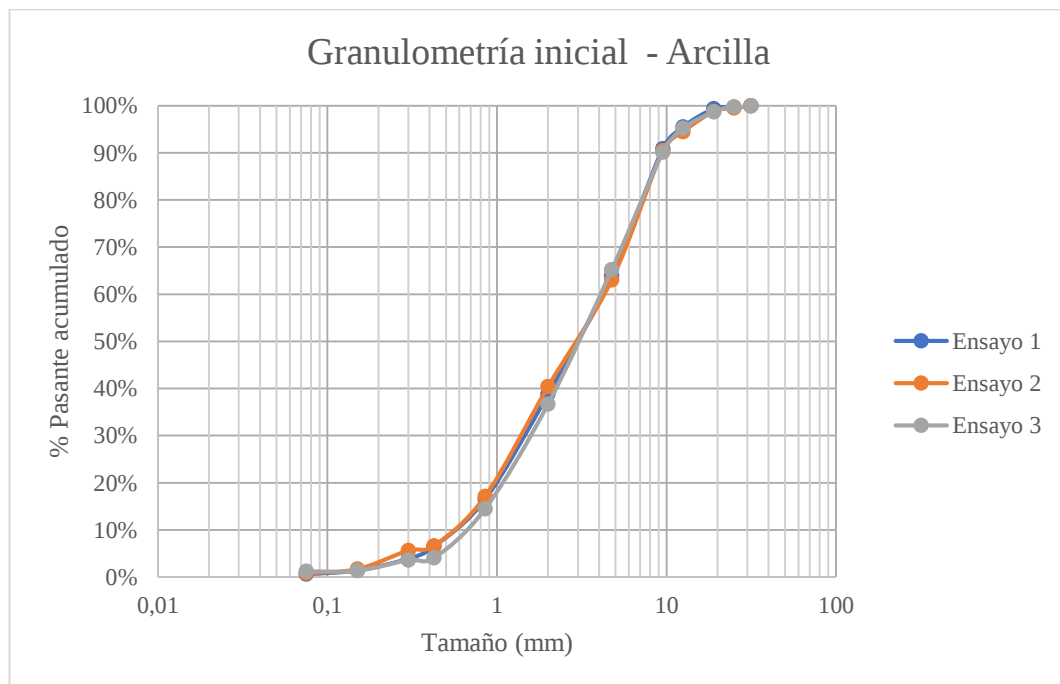
Granulometría Inicial - Caliza							
N° Tamiz	Tamaño (mm)	Prueba (1)		Prueba (2)		Prueba (3)	
		% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
1"	25	12.66%	87.34%	10.42%	89.58%	14.97%	85.03%
3/4 "	19	31.24%	68.76%	31.44%	68.56%	32.71%	67.29%
1/2 "	12.5	65.63%	34.37%	66.63%	33.37%	67.54%	32.46%
3/8"	9.5	79.69%	20.31%	78.51%	21.49%	81.71%	18.29%
4	4.75	94.41%	5.59%	94.17%	5.83%	95.40%	4.60%
10	2	97.20%	2.80%	97.32%	2.68%	97.78%	2.22%
20	0.85	97.97%	2.03%	97.39%	2.61%	98.15%	1.85%
40	0.425	98.35%	1.65%	97.47%	2.53%	98.44%	1.56%
50	0.3	98.51%	1.49%	98.29%	1.71%	98.76%	1.24%
100	0.15	98.93%	1.07%	99.50%	0.50%	98.98%	1.02%
200	0.075	99.39%	0.61%	99.58%	0.42%	99.52%	0.48%
Fondo		100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%



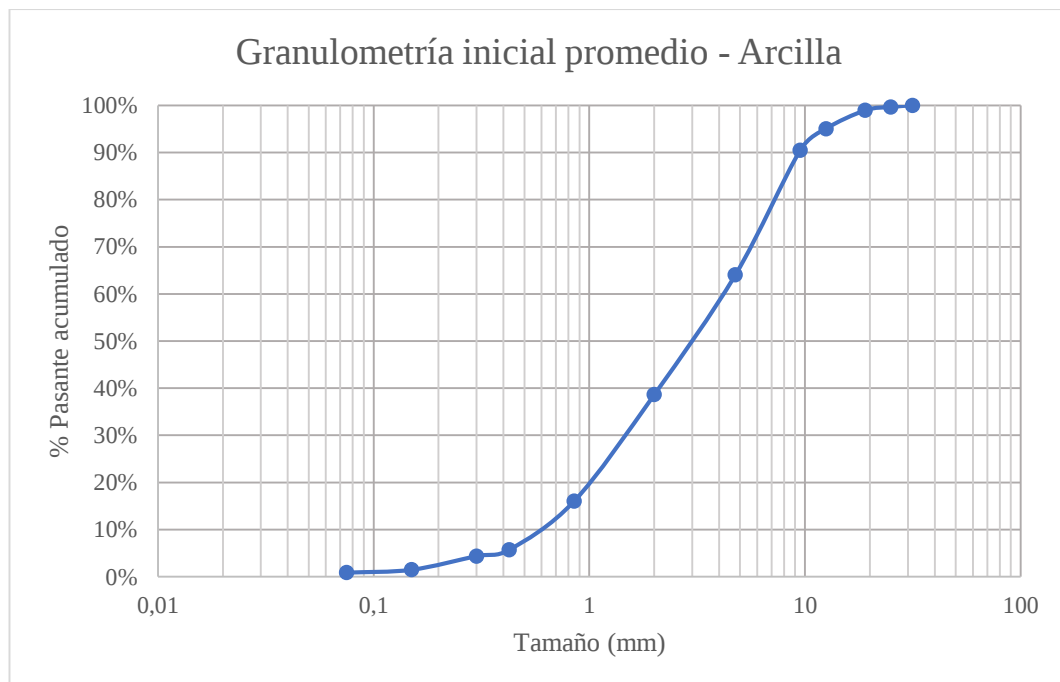
Granulometría inicial promedio - Caliza			
N° Tamiz	Tamaño (mm)	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%
1"	25	12.68%	87.32%
3/4 "	19	31.80%	68.20%
1/2 "	12.5	66.60%	33.40%
3/8"	9.5	79.97%	20.03%
4	4.75	94.66%	5.34%
10	2	97.43%	2.57%
20	0.85	97.84%	2.16%
40	0.425	98.09%	1.91%
50	0.3	98.52%	1.48%
100	0.15	99.13%	0.87%
200	0.075	99.50%	0.50%
Fondo		100.00%	0.00%



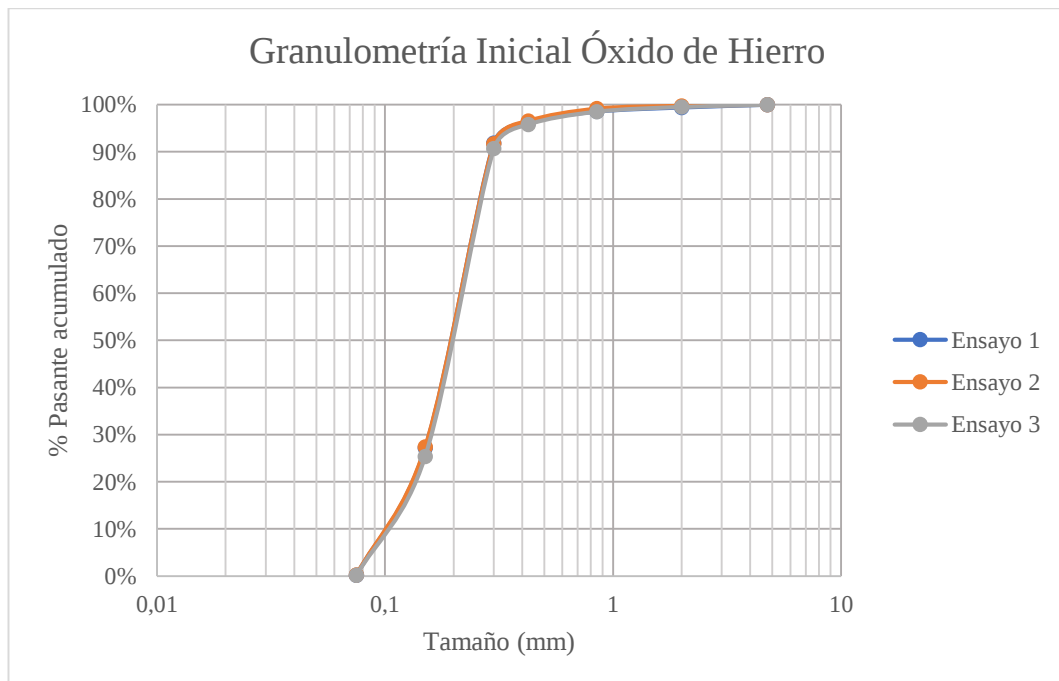
Granulometría inicial - Arcilla							
N° Tamiz	Tamaño (mm)	Prueba (1)		Prueba (2)		Prueba (3)	
		% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
1"	25	0.36%	99.64%	0.50%	99.50%	0.20%	99.80%
3/4 "	19	0.67%	99.33%	1.22%	98.78%	1.29%	98.71%
1/2 "	12.5	4.49%	95.51%	5.52%	94.48%	4.80%	95.20%
3/8"	9.5	9.12%	90.88%	9.55%	90.45%	9.89%	90.11%
4	4.75	36.10%	63.90%	36.99%	63.01%	34.83%	65.17%
10	2	61.20%	38.80%	59.60%	40.40%	63.30%	36.70%
20	0.85	83.50%	16.50%	82.90%	17.10%	85.52%	14.48%
40	0.425	93.51%	6.49%	93.38%	6.62%	95.95%	4.05%
50	0.3	96.11%	3.89%	94.35%	5.65%	96.39%	3.61%
100	0.15	98.58%	1.42%	98.32%	1.68%	98.67%	1.33%
200	0.075	99.41%	0.59%	99.20%	0.80%	98.79%	1.21%
Fondo		100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%



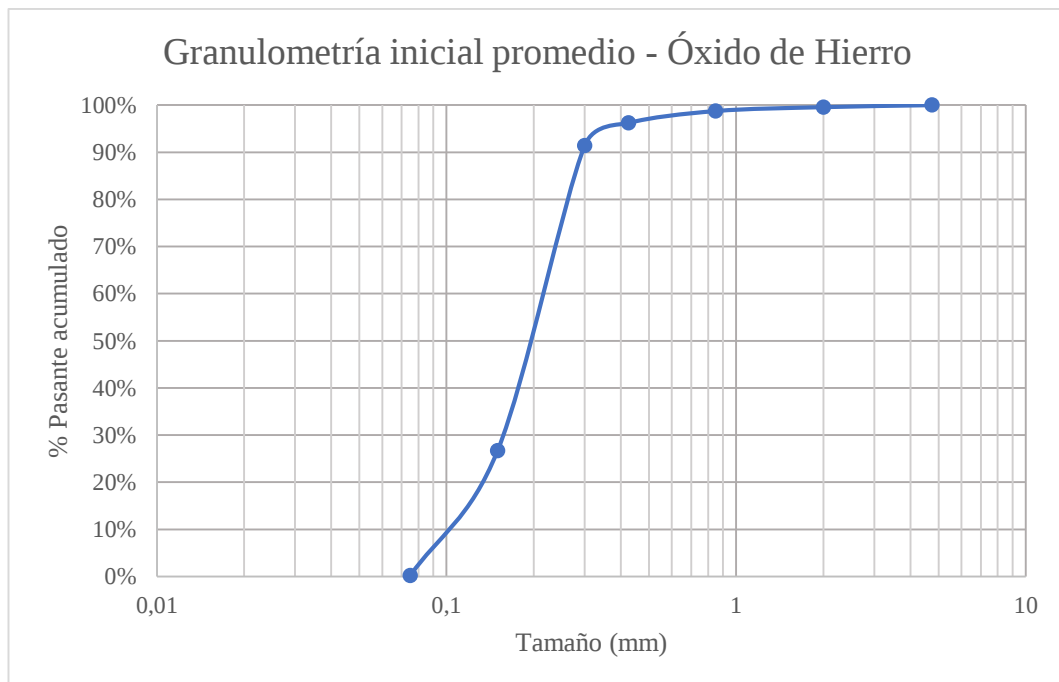
Granulometría inicial promedio - Arcilla			
N° Tamiz	Tamaño (mm)	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
11/4 "	31.5	0.00%	100.00%
1"	25	0.35%	99.65%
3/4 "	19	1.06%	98.94%
1/2 "	12.5	4.94%	95.06%
3/8"	9.5	9.52%	90.48%
4	4.75	35.97%	64.03%
10	2	61.36%	38.64%
20	0.85	83.97%	16.03%
40	0.425	94.28%	5.72%
50	0.3	95.62%	4.38%
100	0.15	98.52%	1.48%
200	0.075	99.13%	0.87%
Fondo		100.00%	0.00%



Granulometría Inicial - Óxido de Hierro							
N° Tamiz	Tamaño (mm)	Prueba (1)		Prueba (2)		Prueba (3)	
		% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
4	4.75	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
10	2	0.58%	99.42%	0.23%	99.77%	0.47%	99.53%
20	0.85	1.45%	98.55%	0.83%	99.17%	1.47%	98.53%
40	0.425	3.71%	96.29%	3.46%	96.54%	4.21%	95.79%
50	0.3	8.14%	91.86%	8.25%	91.75%	9.30%	90.70%
100	0.15	72.82%	27.18%	72.60%	27.40%	74.60%	25.40%
200	0.075	99.81%	0.19%	99.73%	0.27%	99.79%	0.21%
Fondo		100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%

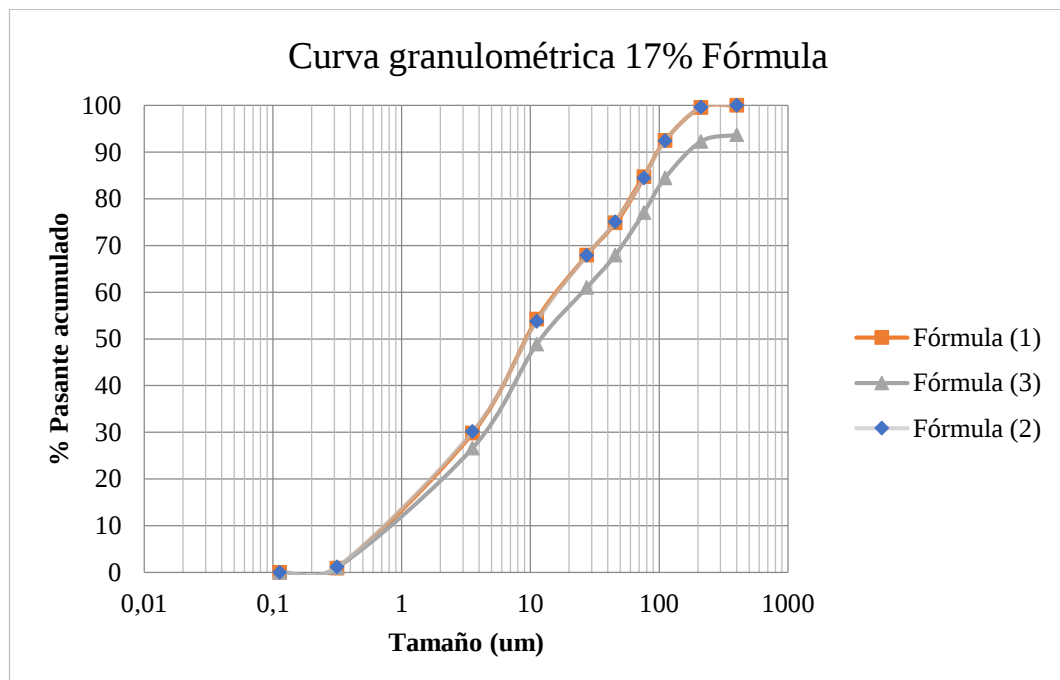


Granulometría inicial promedio - Óxido de Hierro			
N° Tamiz	Tamaño (mm)	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
4	4.75	0.00%	100.00%
10	2	0.43%	99.57%
20	0.85	1.25%	98.75%
40	0.425	3.79%	96.21%
50	0.3	8.57%	91.43%
100	0.15	73.34%	26.66%
200	0.075	99.78%	0.22%
Fondo		100.00%	0.00%

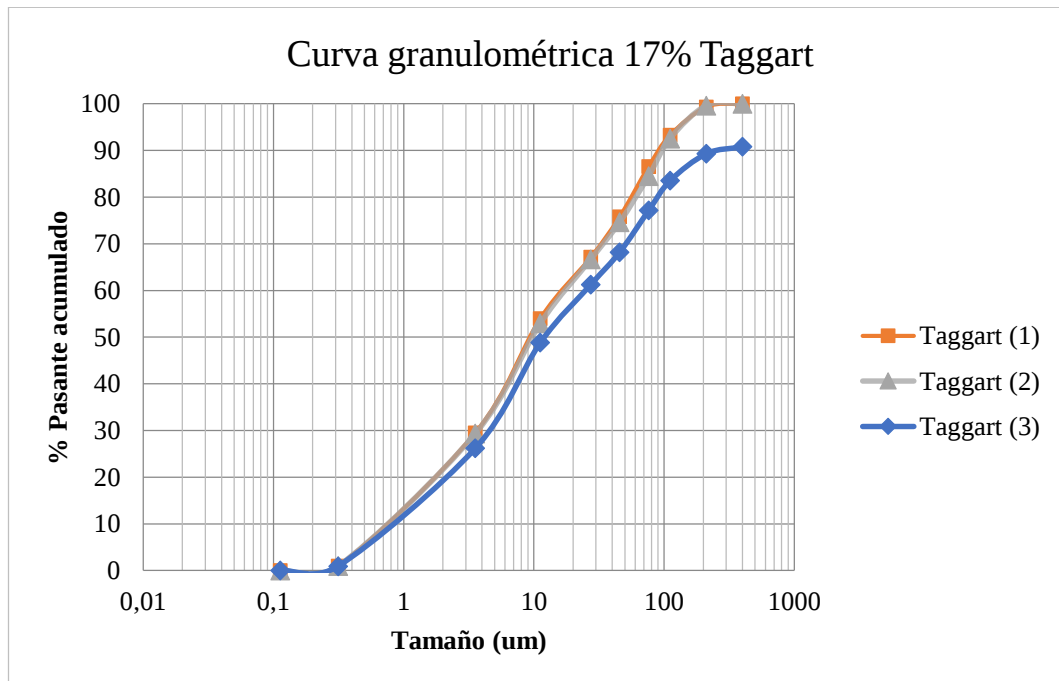


Anexo 2 Tablas y curvas granulométricas de la matriz de experimentación.

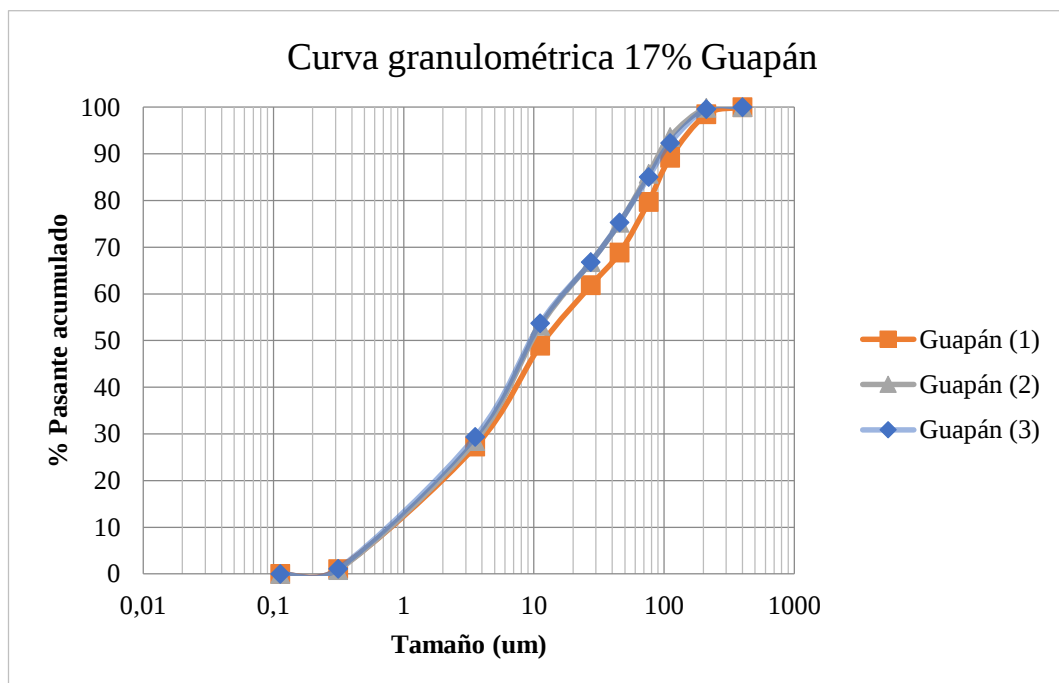
Granulometrías 17% Fórmula						
Tamaño (um)	Fórmula (1)		Fórmula (2)		Fórmula (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0	100	6.28	93.72	0	100
211	0.42	99.58	7.73	92.27	0.39	99.61
111	7.5	92.5	15.57	84.43	7.6	92.4
76	15.29	84.71	22.96	77.04	15.54	84.46
45.6	25.15	74.85	32.08	67.92	24.93	75.07
27.4	32.09	67.91	39.02	60.98	32.16	67.84
11.2	45.81	54.19	51.15	48.85	46.24	53.76
3.55	70.19	29.81	73.41	26.59	69.84	30.16
0.314	99.12	0.88	98.98	1.02	98.87	1.13
0.113	100	0	100	0	100	0



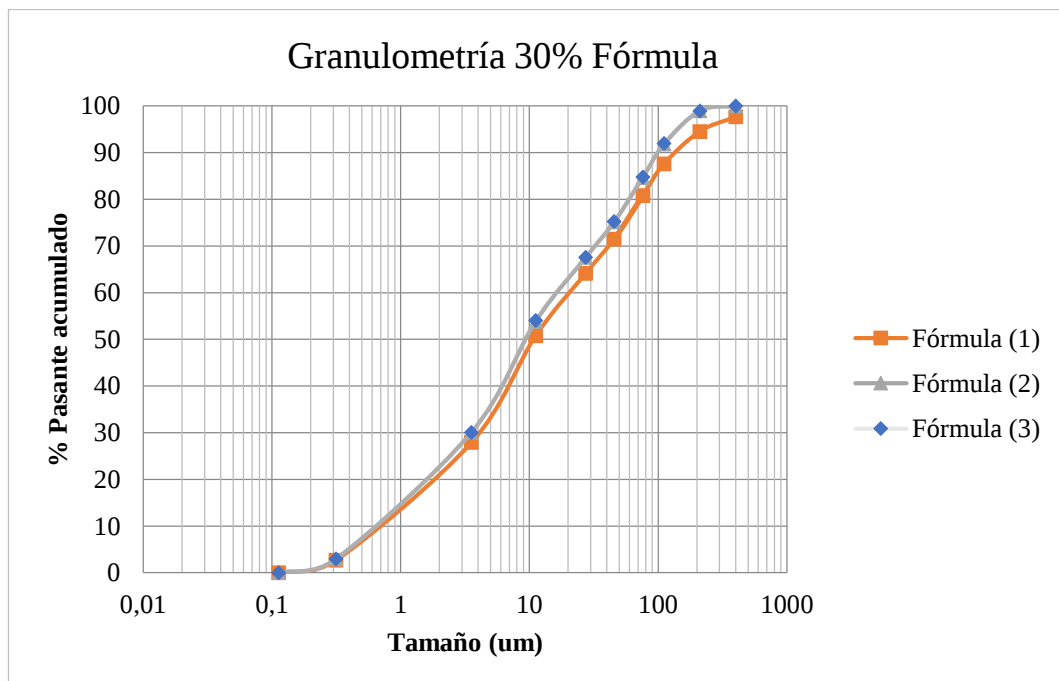
Granulometría 17% Taggart						
Taggart (1)		Taggart (2)		Taggart (3)		
Tamaño (um)	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0	100	0	100	9.19	90.81
211	0.64	99.36	0.38	99.62	10.68	89.32
111	6.72	93.28	7.43	92.57	16.47	83.53
76	13.44	86.56	15.49	84.51	22.85	77.15
45.6	24.17	75.83	25.35	74.65	31.77	68.23
27.4	32.86	67.14	33.28	66.72	38.7	61.3
11.2	45.98	54.02	47.03	52.97	51.17	48.83
3.55	70.46	29.54	70.64	29.36	73.79	26.21
0.314	99.01	0.99	99.02	0.98	99.05	0.95
0.113	100	0	100	0	100	0



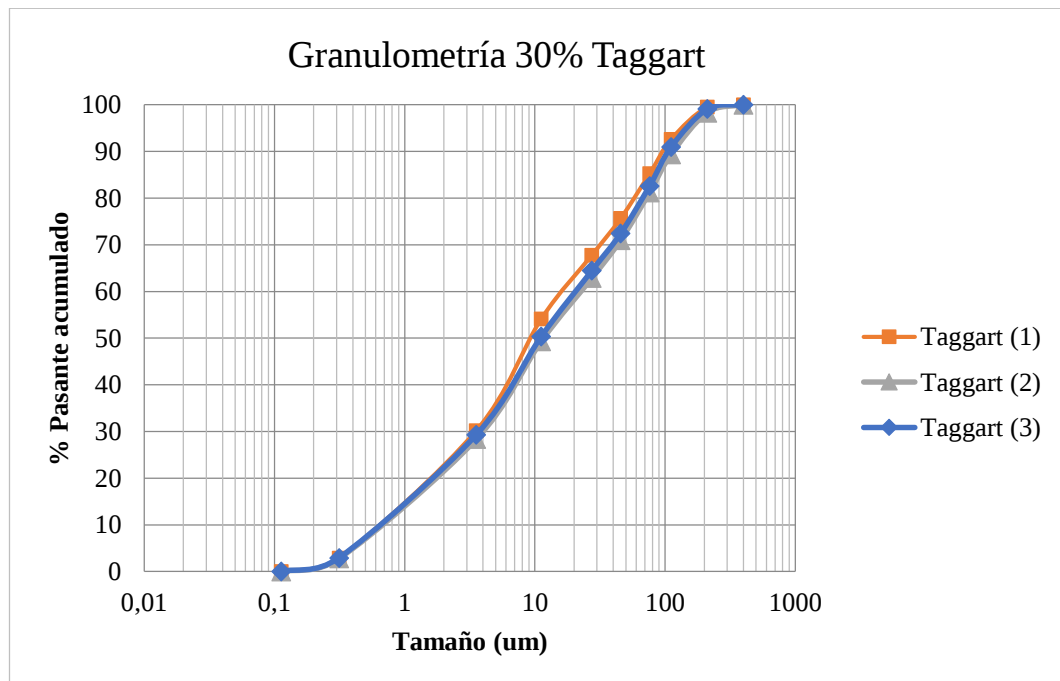
Granulometría 17% Guapán						
Tamaño (um)	Guapán (1)		Guapán (2)		Guapán (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0	100	0	100	0	100
211	1.51	98.49	0.13	99.87	0.36	99.64
111	10.81	89.19	6.36	93.64	7.66	92.34
76	20.25	79.75	14.22	85.78	14.96	85.04
45.6	31.13	68.87	24.73	75.27	24.67	75.33
27.4	38.14	61.86	33.17	66.83	33.16	66.84
11.2	51.05	48.95	46.83	53.17	46.28	53.72
3.55	72.65	27.35	71.5	28.5	70.59	29.41
0.314	98.97	1.03	99.16	0.84	98.88	1.12
0.113	100	0	100	0	100	0



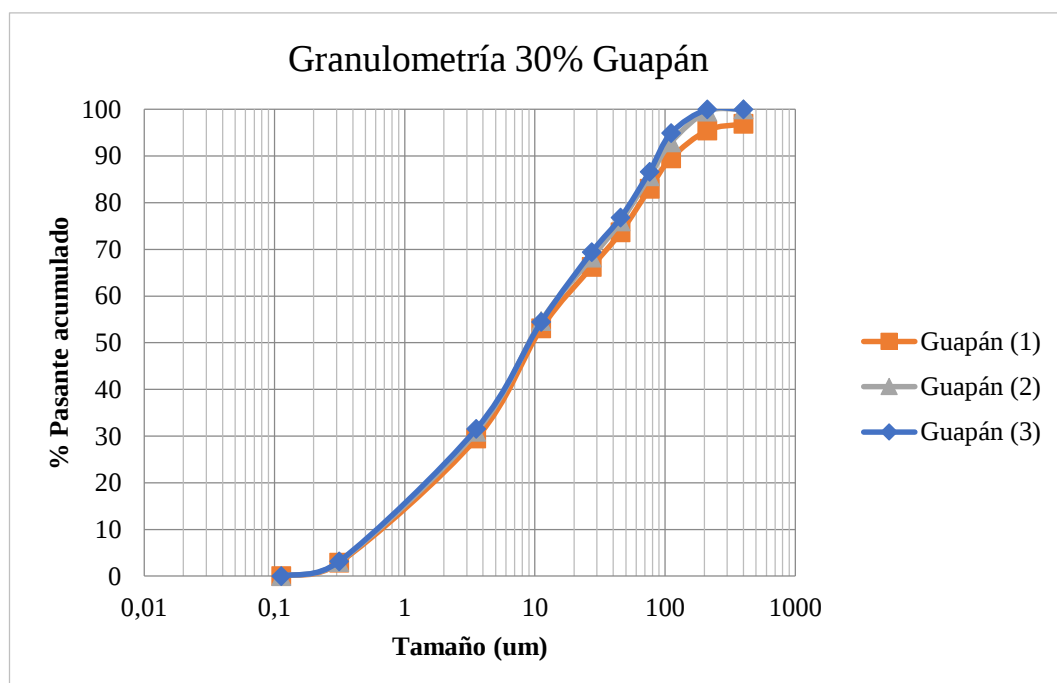
Granulometría 30% Fórmula						
Tamaño (um)	Fórmula (1)		Fórmula (2)		Fórmula (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	2.34	97.66	0	100	0	100
211	5.44	94.56	1.02	98.98	1.09	98.91
111	12.42	87.58	8.17	91.83	8.04	91.96
76	19.19	80.81	15.33	84.67	15.19	84.81
45.6	28.48	71.52	24.83	75.17	24.75	75.25
27.4	35.84	64.16	32.44	67.56	32.4	67.6
11.2	49.22	50.78	46.12	53.88	45.94	54.06
3.55	72.08	27.92	69.9	30.1	69.94	30.06
0.314	97.31	2.69	97.04	2.96	97.04	2.96
0.113	100	0	100	0	100	0



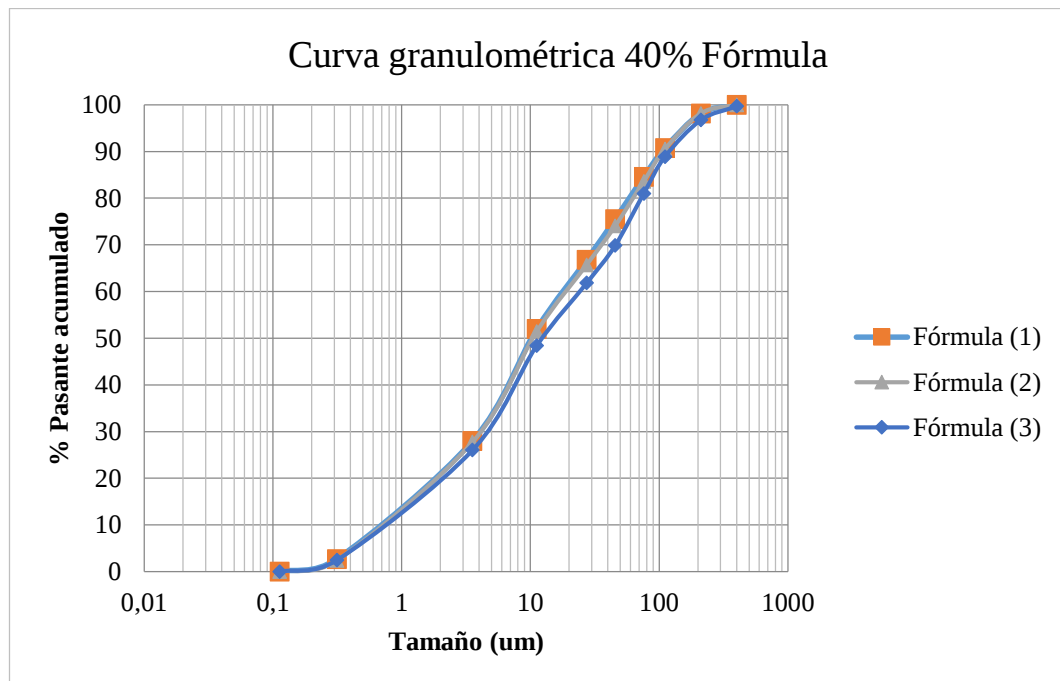
Granulometría 30% Taggart						
Tamaño (um)	Taggart (1)		Taggart (2)		Taggart (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0	100	0	100	0	100
211	0.49	99.51	1.67	98.33	0.89	99.11
111	7.41	92.59	10.62	89.38	9.03	90.97
76	14.76	85.24	18.76	81.24	17.38	82.62
45.6	24.32	75.68	28.97	71.03	27.55	72.45
27.4	32.2	67.8	37.1	62.9	35.52	64.48
11.2	45.85	54.15	50.64	49.36	49.62	50.38
3.55	69.79	30.21	71.61	28.39	70.67	29.33
0.314	97.12	2.88	97.18	2.82	97.06	2.94
0.113	100	0	100	0	100	0



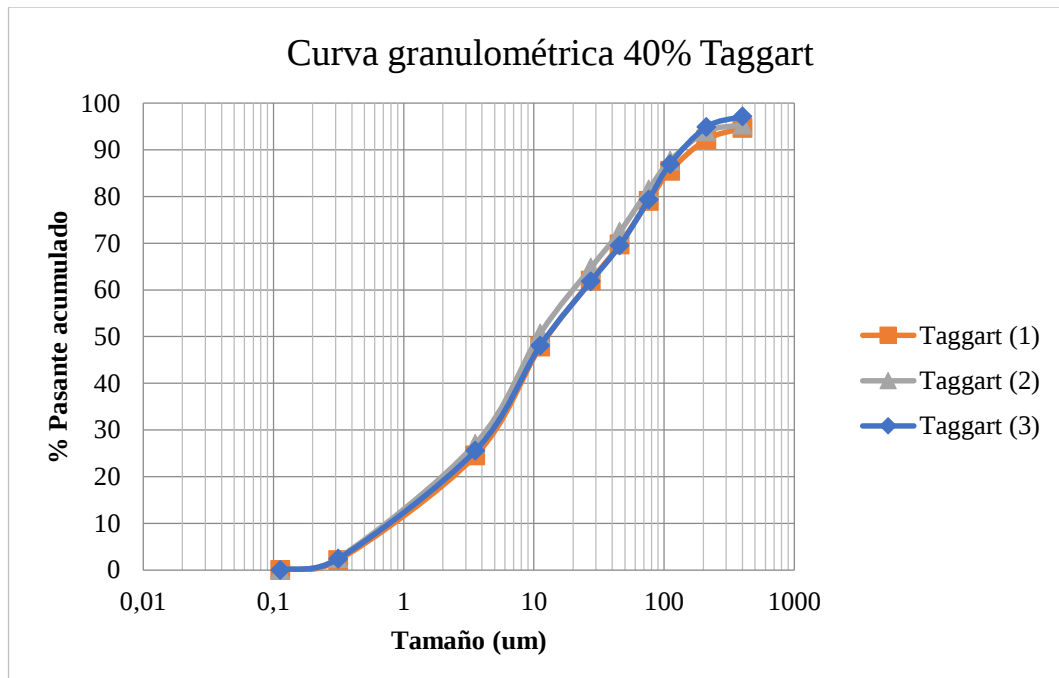
Granulometría 30% Guapán						
Tamaño (um)	Guapán (1)		Guapán (2)		Guapán (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	3.1	96.9	0	100	0	100
211	4.5	95.5	0.44	99.56	0	100
111	10.46	89.54	7.04	92.96	5.09	94.91
76	16.96	83.04	14.3	85.7	13.33	86.67
45.6	26.32	73.68	24.01	75.99	23.19	76.81
27.4	33.69	66.31	31.71	68.29	30.55	69.45
11.2	46.86	53.14	45.29	54.71	45.51	54.49
3.55	70.45	29.55	69.05	30.95	68.42	31.58
0.314	97.12	2.88	96.95	3.05	96.8	3.2
0.113	100	0	100	0	100	0



Granulometría 40% Fórmula						
Tamaño (um)	Fórmula (1)		Fórmula (2)		Fórmula (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0	100	0	100	0.29	99.71
211	1.88	98.12	1.86	98.14	3.24	96.76
111	9.3	90.7	9.5	90.5	11.1	88.9
76	15.44	84.56	16.41	83.59	18.98	81.02
45.6	24.51	75.49	25.96	74.04	30.12	69.88
27.4	33.22	66.78	34.27	65.73	38.16	61.84
11.2	48.04	51.96	48.58	51.42	51.6	48.4
3.55	72.02	27.98	72.25	27.75	73.97	26.03
0.314	97.3	2.7	97.58	2.42	97.53	2.47
0.113	100	0	100	0	100	0



Granulometría 40% Taggart						
Tamaño (um)	Taggart (1)		Taggart (2)		Taggart (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	5.32	94.68	4.63	95.37	2.85	97.15
211	7.81	92.19	6.11	93.89	5.12	94.88
111	14.49	85.51	12.33	87.67	13.06	86.94
76	20.99	79.01	18.52	81.48	20.68	79.32
45.6	30.28	69.72	27.55	72.45	30.51	69.49
27.4	38.04	61.96	35.25	64.75	38.2	61.8
11.2	52.19	47.81	49.32	50.68	51.94	48.06
3.55	75.48	24.52	72.98	27.02	74.45	25.55
0.314	97.92	2.08	97.47	2.53	97.62	2.38
0.113	100	0	100	0	100	0



Granulometría 40% Guapán						
Tamaño (um)	Guapán (1)		Guapán (2)		Guapán (3)	
	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
400	0	100	0	100	6.11	93.89
211	0.52	99.48	1.47	98.53	7.35	92.65
111	6.78	93.22	7.57	92.43	13.84	86.16
76	13.87	86.13	13.69	86.31	20.15	79.85
45.6	24.56	75.44	24.07	75.93	29.57	70.43
27.4	32.84	67.16	32.64	67.36	37.65	62.35
11.2	46.56	53.44	47.31	52.69	51.93	48.07
3.55	70.39	29.61	71.24	28.76	73.54	26.46
0.314	97.19	2.81	97.28	2.72	97.47	2.53
0.113	100	0	100	0	100	0

