



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

**Análisis de la granulometría fina y su relación con la resistencia
a compresión simple en rocas**

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

Autores:

LUIS ESTEBAN BUSTAMANTE FAJARDO

CHRISTIAN XAVIER GUILLÉN ESPINOZA

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA- ECUADOR

2020

DEDICATORIA

Dedicatoria Luis Esteban Bustamante Fajardo:

El estudio es la mejor herencia que dejan los padres a sus hijos.

Es por ello que este trabajo de investigación se la dedico a DIOS y a mi familia, que han sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Sebastián, Amanda y Tania a quienes admiro, quiero y respeto mucho, por compartir momentos especiales conmigo y por todo el apoyo moral brindado a lo largo de mi vida.

Mis cuñados Carlos, Gustavo y Yessica, quienes con su amor y respaldo me han ayudado cada día a cumplir con mis objetivos.

Especialmente este triunfo dedico a mis amados padres, Vicente y Aida por ser los mejores, que con mucho esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar un peldaño más que me hace crecer como persona y crecer en mi vida profesional, gracias por el ejemplo y el apoyo incondicional que me sirvió para no decaer cuando todo parecía complicarse.

Dedicatoria Christian Xavier Guillén Espinoza:

El presente trabajo se lo dedico en primer lugar a Dios y a toda mi familia, que, a pesar del tiempo, esfuerzo, sacrificio y paciencia a lo largo de toda mi carrera universitaria, han sabido guiarme y brindarme el apoyo y las fuerzas necesarias para culminar este gran paso en mi vida.

Como no dedicar de una manera especial a mis padres Xavier y Fabiola, quienes, con tanto amor y sacrificio, pudieron darme todos los instrumentos y el apoyo suficiente para salir adelante y nunca rendirme ante las adversidades que se presentan en la vida cotidiana.

Quiero dedicar también este triunfo a todas esas personas especiales en mi vida; a mi hermana María José, a mi novia Martina y a esos grandes amigos que supieron acompañarme en esta etapa tan importante.

AGRADECIMIENTO

Como prioridad en la vida y con toda la humildad que nuestro corazón emana, primeramente, agradecidos con Dios, quien día a día guía nuestros pasos por el camino correcto, nos ha permitido culminar un peldaño más en nuestra vida y por qué tenemos la certeza de que Él siempre estará guiándonos en cada uno de nuestros logros académicos y cotidianos.

Nuestro profundo agradecimiento a la Universidad el Azuay, a toda la Facultad de Ciencia y Tecnología, la cual nos ha acogido y brindado los conocimientos y materiales necesarios para poder concluir con este recorrido académico.

A nuestros docentes por compartir con nosotros experiencias, conocimientos, consejos, tiempo y lo más importante, su amistad.

Muchas gracias a todos los compañeros que con el tiempo se convirtieron en grandes amigos, por su apoyo moral, dedicación, cariño, y por regalarnos grandes momentos que llevaremos en nuestra memoria y en nuestro corazón.

Finalmente, una especial mención de agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo, principal colaborador durante todo este proceso investigativo y universitario, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y experiencia, permitió el desarrollo de este trabajo. De igual manera agradecer por esa amistad sincera y por el tiempo que nos brindó en toda nuestra carrera universitaria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS | viii |
| RESUMEN | x |
| ABSTRACT | xi |
| INTRODUCCIÓN | xii |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| MARCO TEÓRICO..... | 1 |
| 1.1 Fragmentación | 1 |
| 1.1.1 Trituración primaria..... | 2 |
| 1.1.2 Trituración secundaria | 2 |
| 1.1.3 Trituración terciaria | 2 |
| 1.1.4 Molienda | 2 |
| 1.2 Trituración primaria | 3 |
| 1.2.1 Relación de Trituración (RT) | 4 |
| 1.2.2 Nueva superficie producida..... | 6 |
| 1.2.3 Trituradora de quijadas | 7 |
| 1.2.4 Trituradora de mandíbulas tipo Blake | 10 |
| 1.2.5 Trituradora de mandíbulas de tipo pivote elevado | 10 |
| 1.2.6 Trituradora de mandíbulas excéntrica elevada..... | 11 |
| 1.2.7 Trituradora de mandíbulas tipo Dodge | 12 |
| 1.3 Clasificación de las rocas | 12 |
| 1.3.1 Rocas:..... | 12 |
| 1.3.2 Propiedades físicas de las rocas..... | 13 |

| | |
|--|----|
| Dureza: | 13 |
| Resistencia: | 14 |
| Elasticidad: | 14 |
| Plasticidad: | 15 |
| Abrasividad: | 15 |
| Textura: | 15 |
| Estructura: | 16 |
| 1.3.3 Algunas propiedades ingenieriles de las rocas | 16 |
| Peso específico. - | 16 |
| Porosidad. - | 16 |
| Absorción. - | 16 |
| Índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation-RQD). - | 16 |
| Índice de recuperación. - | 17 |
| Permeabilidad. - | 17 |
| Resistencia de las rocas. - | 18 |
| 1.4 Granulometría | 19 |
| 1.4.1 Clasificación de las partículas minerales del suelo | 19 |
| 1.4.2 Determinación de la granulometría de los suelos | 21 |
| 1.5 Curva granulométrica | 22 |
| 1.6 Resistencia a la compresión simple | 23 |
| 1.6.1 Resistencia a la compresión y el módulo de deformación | 27 |
| 1.6.2 Trabajo de deformación | 27 |
| CAPÍTULO II | 29 |
| EXPERIMENTACIÓN | 29 |
| 2.1 Número de muestras y preparación | 30 |
| 2.2 Proceso de trituración | 34 |
| 2.3 Ejecución de la clasificación | 36 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Elaboración de curvas granulométricas | 40 |
| - 2.4.1 % Retenido: | 40 |
| - 2.4.2 % Retenido acumulado:..... | 40 |
| - 2.4.3 % Pasante acumulado:..... | 41 |
| 2.5 Determinación de la resistencia a la compresión simple | 41 |
| CAPÍTULO III | 44 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS | 44 |
| 3.1 Análisis de resultados de curvas granulométricas | 44 |
| 3.2 Análisis de resultados de resistencia a la compresión simple | 50 |
| 3.3 Propuesta de correlación | 51 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 55 |
| Conclusiones | 55 |
| Recomendaciones | 57 |
| Bibliografía..... | 58 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Diagrama de fuerzas de trituración. | 4 |
| Figura 1.2 Cubo de nueva superficie. | 6 |
| Figura 1.3 Trituradora de Mandíbulas. | 8 |
| Figura 1.4 Trituradora de mandíbulas tipo Blake. | 10 |
| Figura 1.5 Trituradora de mandíbulas de tipo elevado. | 11 |
| Figura 1.6 Trituradora de mandíbulas excéntrica elevada. | 11 |
| Figura 1.7 Trituradora de mandíbulas tipo Dodge..... | 12 |
| Figura 1.8 Curvas de tensión-deformación de diferentes tipos de rocas. | 15 |
| Figura 1.9 Curva Granulométrica. | 22 |
| Figura 1.10 Desarrollo de las fracturas como resultado de compresión | 26 |
| Figura 1.11 Comportamiento del trabajo de deformación. | 28 |
| Figura 2.1 Mapa de localización de muestras obtenidas. | 29 |
| Figura 2.2 Selección de rocas formación “El Tاهual” (Areniscas). | 30 |
| Figura 2.3 Selección de rocas formación “El Tاهual” (Areniscas). | 31 |
| Figura 2.4 Dimesionamiento de muestras. | 31 |
| Figura 2.5 Muestra real de la formación “Cojitambo” (Andesita). | 32 |
| Figura 2.6 Probetas hermanas de la formación “Cojitambo” (Andesita), las cuales serán llevadas al laboratorio. | 32 |
| Figura 2.7 Grupo de muestras de la formación “Cojitambo” (Andesita) enviadas al laboratorio de suelos. | 33 |
| Figura 2.8 Muestras totales de la formación “Racar” (Travertino, mármol rosa) | 33 |
| Figura 2.9 Grupo de muestras de la formación “El Tاهual” (Areniscas) que pasaran por los procesos de trituración y clasificación..... | 34 |
| Figura 2.10 y 2.11 Medición de aristas de las probetas de la formación “Racar” (Travertino)..... | 35 |
| Figura 2.12 Peso de la probeta a realizarse en el análisis. | 35 |
| Figura 2.13 Colocación de la muestra en la trituradora de mandíbulas R22. | 36 |
| Figura 2.14 Partículas obtenidas del proceso de trituración y pesadas en la balanza. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.15 Proceso de clasificación de los tamices colocados en la tamizadora eléctrica. | 37 |
| Figura 2.16 Pesado del tamiz 1/2..... | 38 |
| Figura 2.17 Pesado del tamiz 3/8..... | 38 |
| Figura 2.18 Pesado del tamiz 4..... | 39 |
| Figura 2.19 Pesado del tamiz 10..... | 39 |
| Figura 2.20 Pesado del tamiz 16..... | 40 |
| Figura 2.21 Máquina HUMBODT de compresión. | 42 |
| Figura 2.22 Muestras hermanas de la formación de “Racar” (mármol rosa) para estudio de compresión simple..... | 42 |
| Figura 2.23 Colocación de muestra que será sometida a compresión simple. | 43 |
| Figura 2.24 y Figura 2.25 Ruptura de la muestra. | 43 |
| Figura 3.1 Curva Granulométrica formación “Cojitambo”..... | 48 |
| Figura 3.2 Curva Granulométrica formación “Racar”..... | 49 |
| Figura 3.3 Curva Granulométrica formación “El Tahual”. | 49 |
| Figura 3.4 Área granulométrica formación “Cojitambo”. | 52 |
| Figura 3.5 Área granulométrica formación “Racar”..... | 52 |
| Figura 3.6 Área granulométrica formación “El Tahual”..... | 53 |
| Figura 3.7 Áreas Granulométricas de las 3 zonas de estudio..... | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1 Rango de operación de la fragmentación..... | 3 |
| Tabla 1.2 Ejemplos de Trituración. | 5 |
| Tabla1.3 Ejemplos de Trituración. | 5 |
| Tabla1.4 Tipos de rocas y porcentaje en la corteza terrestre..... | 13 |
| Tabla1.5 Clasificación de la dureza de las rocas. | 14 |
| Tabla 1.6 Valores de clasificación de la Roca..... | 17 |
| Tabla1.7 Grado de permeabilidad..... | 18 |

| | |
|--|----|
| Tabla 1.8 Valores de resistencia. | 18 |
| Tabla 1.9 Sistema de clasificación de las partículas minerales del suelo. | 20 |
| Tabla 1.10 Clasificación de los fragmentos de roca (>2mm)..... | 20 |
| Tabla 1.11 Clasificación Ingenieril de las rocas..... | 25 |
| Tabla 1.12 Clasificación de las rocas según la Resistencia a la Compresión Simple..... | 27 |
| Tabla 2.1 Tabla en formato Excel, utilizada para obtención de datos de granulometría. | 41 |
| Tabla 3.1 Resultados del proceso de trituración y clasificación de las muestras según su peso “Cojitambo”..... | 45 |
| Tabla 3.2 Resultados del proceso de trituración y clasificación de las muestras según su peso “Racar”..... | 46 |
| Tabla 3.3 Resultados del proceso de trituración y clasificación de las muestras según su peso de “El Tahual”. | 47 |
| Tabla 3.4 Valores de resistencia de compresión de “Cojitambo”, “Racar” y “El Tahual”. | 51 |

ANÁLISIS DE LA GRANULOMETRÍA FINA Y SU RELACIÓN A LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCAS

RESUMEN

El presente estudio de investigación nos permitió determinar la correlación existente entre la distribución del tamaño de las partículas y la resistencia a la compresión simple o uniaxial de las rocas.

Para efectuar este estudio se realizó un muestreo de rocas extraídas de tres zonas previamente determinadas, las cuales fueron de los sectores de Cojitambo, provincia de Cañar; Racar y El Tawal, provincia del Azuay.

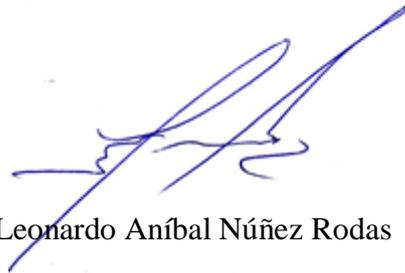
En este proceso se realizó el cálculo de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, para después proceder al proceso de trituración de las probetas en los laboratorios de la Universidad del Azuay, y consiguiente a ello estas fueron expuestas al proceso de clasificación con diferentes tamaños de tamices, con el objetivo de obtener resultados que proporcionaron una representación gráfica, que determinó su correlación.

Palabras clave: Compresión simple o uniaxial, partículas, roca, trituración, probetas, curva granulométrica.



Ernesto Patricio Feijoo Calle

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Luis Esteban Bustamante Fajardo

Autor



Christian Xavier Guillén Espinoza

Autor

ANALYSIS OF THE FINE GRANULOMETRY AND ITS RELATIONSHIP TO SIMPLE COMPRESSION RESISTANCE IN ROCKS

ABSTRACT

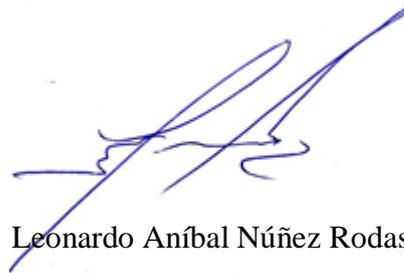
This research determined the correlation between the distribution of particle size and resistance to single or uniaxial compression of rocks. For this study, we carried out a sampling of rocks that were extracted from three previously determined areas in Cojitambo, province of Cañar; Racar and El Tahual, province of Azuay. In this process, the calculation of resistance to uniaxial compression of the rock was carried out to then proceed to the process of trituration of the test pieces in the laboratories from University of Azuay. As a result of the trituration, the test pieces were exposed to the sorting process with different sieve sizes, in order to obtain results that provided a graphical representation that determined its correlation.

Key Words: Single or uniaxial compression, particles, rock, trituration, test pieces, granulometric curve.



Ernesto Patricio Feijoo Calle

Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



Luis Esteban Bustamante Fajardo

Author



Christian Xavier Guillén Espinoza

Author

Translated by

Luis Bustamante and Christian Guillén

ANÁLISIS DE LA GRANULOMETRÍA FINA Y SU RELACIÓN A LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCAS

INTRODUCCIÓN

En labores de minería, tanto a cielo abierto como en subterráneo, para la determinación de parámetros, en lo referente a la estabilidad del macizo rocoso, un dato muy importante, es la determinación de la resistencia a la compresión, del material rocoso presente en la zona de estudio.

Para estimar la resistencia a la compresión uniaxial de una roca, se utilizan diferentes métodos y/o ensayos que se realizan en campo y en laboratorio; teniendo en cuenta que la obtención de dichos valores va desde una estimación meramente subjetiva hasta una medición indirecta.

Uno de estos métodos es, la obtención de la resistencia a la compresión simple o uniaxial de las rocas, a través de las propiedades intrínsecas de las mismas, en donde el resultado equivale a las correlaciones de múltiples ensayos y el análisis de los núcleos de las rocas, permitiendo caracterizar y correlacionar los parámetros para formaciones específicas.

Por otro lado, la clasificación de las rocas es variada de acuerdo a la fuerza de compresión, para la determinación de este parámetro, lo óptimo es el envío de las muestras de estudio al laboratorio. Sin embargo, para esta investigación, se pretende demostrar que esta clasificación se puede realizar en la mina, siendo necesarios equipos como una trituradora y un juego de tamices que facilitarían la realización de una prueba de trituración primaria y su respectiva clasificación granulométrica, para obtener la clasificación de la roca.

Una vez realizada esta prueba, se determinará la correlación existente entre las diferentes curvas granulométricas y la resistencia a la compresión simple de las rocas o materiales tratados, se analizarán tres tipos de rocas que pertenecen a las siguientes zonas: “Cojitambo” (provincia de Cañar), “Racar” y “El Tاهual” (provincia del Azuay).

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Fragmentación

La fragmentación de rocas en minería es el principio de un proceso para la recuperación del material de interés. Al fragmentar la roca, esta adquiere un tamaño necesario y adecuado para poder realizar su transporte. (Flores, 2019).

En la actualidad, tanto en minería a cielo abierto como en minería subterránea, se requieren la utilización de explosivos que hace posible, el arranque de la roca y posteriormente el transporte hacia la planta de tratamiento y beneficio. (Flores, 2019)

“Garantizar la fragmentación óptima de rocas en la voladura, es esencial para evitar los costos adicionales que implican una voladura secundaria”. (Tocalino, 2020)

Generalmente, más del 50% de la energía utilizada en una planta de tratamiento completa, es gastada en la reducción del tamaño del material a procesar.

Hay otros factores importantes que influyen en la elección de un proceso para la fragmentación de un material como:

- Las características técnicas de los aparatos disponibles.
- El costo de los equipos comparado con el beneficio económico por la extracción del material.
- La disponibilidad en el mercado de los equipos a utilizar.
- La facilidad de mantenimiento de los equipos. (Tocalino, 2020).

Sin embargo, cuando hablamos de minería artesanal en el Ecuador, el aspecto de los consumos energéticos en la fragmentación de material es muchas veces omitido.

La fragmentación de materiales comprende varias etapas:

- Trituración primaria.
- Trituración secundaria.
- Trituración terciaria.
- Molienda.

1.1.1 Trituración primaria

La trituración primaria es utilizada para la trituración del material grueso, es decir tal como llega de la mina, muchas veces es producto del uso de explosivos que fragmenta el material hasta un tamaño menor.

El tamaño de salida de la trituración primaria, depende de las características técnicas y funcionales de la maquinaria utilizada, además del consumo energético y de las características de las trituradoras secundarias o de las máquinas que siguen en el diagrama de flujo. (Flores, 2019)

1.1.2 Trituración secundaria

Partiendo del material proveniente de la trituración primaria, el tamaño de las partículas se reduce a un valor entre 3 y 2 pulgadas, dejándolo en condiciones, para comenzar a desarrollar operaciones de concentración preliminar. Aquí se utilizan quebrantadoras, que por lo general son de tipo giratorio o cónico. Estas máquinas son similares a las utilizadas en la trituración primaria, diferenciándose únicamente por las velocidades a las cuales el material es triturado (aproximadamente 500 rpm) y en que la abertura de salida, es más estrecha que la abertura de las trituradoras primarias. La trituración secundaria prepara el material para la trituración terciaria o para trabajar directamente en la etapa de molienda.(Martes Hernandez, De La Cruz, & Valdez, 2015).

1.1.3 Trituración terciaria

Aquí se fragmenta el producto de la trituración secundaria hasta tamaños entre 1/2 y 3/8 de pulgada. No siempre es utilizada, generalmente es reemplazada por la etapa de molienda. Se encuentran maquinas como trituradoras giratorias y cónicas.(Luis Espinoza de Leon, 1984).

1.1.4 Molienda

Es la encargada de efectuar la reducción de material al tamaño final, es decir hasta el grado requerido, para posteriores procesos donde se requiera un material fino.

Las diferentes etapas de una conminución, son siempre completadas por una o más fases de clasificación de material, por el tamaño principalmente, para evitar la producción de finos en exceso.(Martes Hernandez, De La Cruz, & Valdez, 2015).

En la tabla 1.1 se observa la relación de las etapas de trituración y sus rangos de operación.

Tabla 1.1 Rango de operación de la fragmentación.

| | Tamaño de Entrada | Tamaño de Salida |
|------------------------|-------------------|------------------|
| Trituración Primaria | Trozos grandes | <100 mm |
| Trituración Secundaria | <100 mm | <25 mm |
| Trituración Terciaria | <25 mm | <10 mm |
| Molienda | <10 mm | Tamaño final |

Fuente:(Flores, 2019).

1.2 Trituración primaria

La trituración primaria es la etapa, en donde se realiza la primera fragmentación del mineral bruto, es decir, se tritura el mineral (rocas máximo de 60" o 150cm) hasta un producto de 8" a 6" (20 a 15cm).(Alex Portillo, 2019)

Se debe tener en cuenta, la relación del tamaño de alimentación que admite la trituradora y el tamaño del producto de salida, ya que de esta relación depende el esfuerzo que la maquina podría aplicar. La efectividad del proceso depende de los siguientes factores: La cantidad de roca en la trituradora, el porcentaje de poros o vacíos, la dureza de la roca, el ángulo de inclinación de las quijadas, la distancia entre las quijadas y la velocidad a la cual el equipo trabaja. (Alex Portillo, 2019)

Para realizar una trituración de minerales se efectúa normalmente esfuerzos de compresión simple, fracturándose estos en el momento de llegar a su límite elástico.

Consecuentemente para llegar a este punto es necesario transmitir a la superficie del material una fuerza de tal intensidad, que permita traspasar el límite elástico mencionado. Cada vez que un mineral se tritura hay un consumo de energía proporcional a la nueva superficie producida.

Con el objetivo de indicar el principio de trituración, se analizan las fuerzas que actúan en una quebradora de quijada en la figura 1.1. Las quijadas de una quebradora están colocadas en un ángulo determinado. (Flores, 2019).

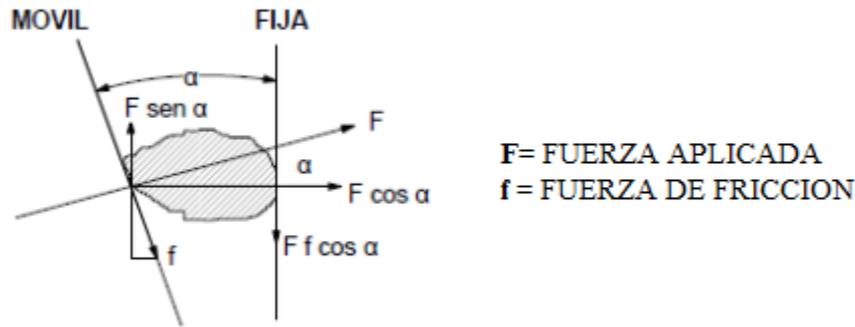


Figura 1.1 Diagrama de fuerzas de trituración.

Fuente: (Luis Espinoza de Leon, 1984).

“La fuerza F generada por la quijada móvil, rompe a la roca en su punto de contacto, y esta se descompone en dos fuerzas, una normal aplicada a la quijada fija ($F \cos \alpha$) y otra fuerza vertical ($F \sin \alpha$)”. (Luis Espinoza de Leon, 1984).

El valor de la fuerza normal, está dado por el coeficiente de fricción, el cual es variable, dependiendo de la naturaleza del mineral, siendo igual a la tangente del ángulo de fricción entre la roca y la quijada móvil. Teóricamente los dos puntos de contacto entre la roca y las quijadas poseen un coeficiente de fricción aproximado de 0,2 a 0,3. (Luis Espinoza de Leon, 1984).

1.2.1 Relación de Trituración (RT)

Esta relación es la que existe entre el tamaño de mineral que se alimenta en una trituradora y el tamaño del mismo material cuando se descarga, tomándose como (F) alimentación y (P) descarga, estos valores deben corresponder a un tamaño similar correspondiente al 80% de cada producto, esta relación queda expresada en los siguientes terminos:

$$RT = \frac{F}{T} \quad (1)$$

Suponiendo que se alimenta a una trituradora con mineral de 10” y se tritura a 2”, conociendo las granulometrias tanto de alimentación como de descarga que se especifican en las tablas 1.2 y 1.3, se puede determinar los valores de tamaños tanto de la alimentación (F), como de la descarga (P). (Luis Espinoza de Leon, 1984).

Tabla1.2 Ejemplos de Trituración.

| ALIMENTACIÓN | | |
|--------------|-------------|----------|
| Producto | Tamaño (cm) | Peso (%) |
| "=-10"+9" | | 37,6 |
| "=9"+8" | | 10,6 |
| "=8"+6" | | 9,4 |
| "=6"+4" | | 8,2 |
| "=4"+2" | | 17,6 |
| "=-2" | | 16,6 |
| "=-10" | -25,4 | 100 |
| "=-9" | -22,86 | 62,4 |
| "=-8" | -20,32 | 51,8 |
| "=-6" | -15,24 | 42,4 |
| "=-4" | -10,16 | 34,2 |
| "=-2" | -5,08 | 16,6 |
| (F) | 244000 | MICRAS |

Fuente: (Luis Espinoza de Leon, 1984).

Tabla1.3 Ejemplos de Trituración.

| DESCARGA | | |
|--------------|-------------|----------|
| Producto | Tamaño (cm) | Peso (%) |
| "=-2"+1" | | 38,6 |
| "=-18"+3/4" | | 14,9 |
| "=-3/4"+1/2" | | 13,9 |
| "=-1/2"+1/4" | | 15,8 |
| "=-1/4" | | 16,8 |
| "=-2" | | -5,08 |
| "=-1" | -2,54 | 61,4 |
| "=-3/4" | -1,91 | 46,5 |
| "=-1/2" | -1,27 | 32,6 |
| "=-1/4" | -0,64 | 16,8 |
| (P) | 39000 | MICRAS |

Fuente: (Luis Espinoza de Leon, 1984).

Para el ejemplo de trituración presentado en la tabla 1.2 y la tabla 1.3 se ha determinado tanto el alimento (F), como de la descarga (P), la relación de trituración sería la siguiente:

$$RT = \frac{F}{T} = \frac{244000}{39000} = 6,25 \quad (2)$$

Esta relación ha sido determinada bajo los conceptos señalados, es muy diferente de la que comúnmente utilizada mediante el producto de las relaciones directas de admisión (10'') y de descarga (2''), la cual nos proporcionaría una relación de trituración en este caso errónea. (Luis Espinoza de Leon, 1984).

$$RT = \frac{10''}{2''} = 5 \quad (3)$$

1.2.2 Nueva superficie producida

Con el objetivo de demostrar con facilidad el concepto de superficie original y de superficie producida, vamos a suponer que un cubo al ser triturado, se fracturará en partes iguales, consecuentemente el cubo de la figura 1.2, tendrá un área o superficie original (S). (Flores, 2019)

$$S = 6x^2 \quad (4)$$

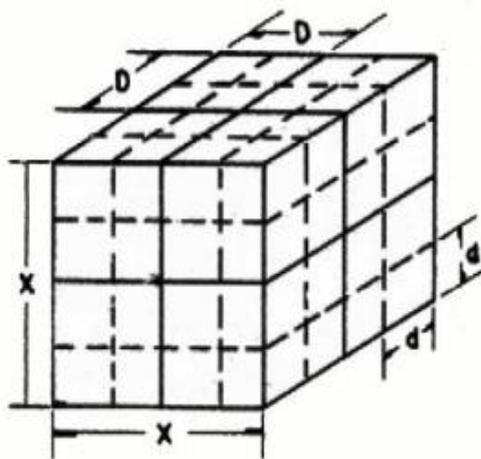


Figura 1.2 Cubo de nueva superficie.

Fuente: (Flores, 2019).

Las partículas se trituran con la siguiente relación de trituración:

$$RT = \frac{x}{d} \quad (5)$$

Entonces, la nueva superficie (NS) equivale a:

$$NS = 6D^2 \quad (6)$$

En la trituración primaria los bloques de alimentación poseen tamaños por lo general muy grandes, es decir entre 15cm o más. Las capacidades de producción en una trituradora giratoria son de 5000 t/h.(Martes Hernandez, De La Cruz, & Valdez, 2015).

A diferencia de las otras secciones dentro de una planta de procesamiento y tratado de mineral, las trituradoras no pueden trabajar las 24 horas del día, debido a diferentes factores que alteran la actividad productiva como son:

- Interrupciones producidas por la insuficiente alimentación.
- Pérdidas de tiempo por problemas mecánicos en las máquinas de trituración.
- El traslado del material, ya que el mismo se realiza generalmente en dos turnos, siendo usado el otro turno para las operaciones de arranque del material.

Por ello, se recomienda que la capacidad de trituración (incluyendo, secundaria y terciaria) debe aumentar horariamente con relación al resto de la planta, la cual generalmente trabaja de manera continua.

Las tolvas de material grueso preceden a las trituradoras primarias para la recepción de cargas, que son vaciadas desde elevadores y camiones y deben tener una amplia capacidad de almacenamiento, para tener una alimentación constante y permanente a la trituradora durante todo el periodo de funcionamiento.(Flores, 2019).

Existen dos trituradoras muy importantes en el proceso de trituración primaria y estas son:

- La trituradora de quijadas.
- La trituradora giratoria.

1.2.3 Trituradora de quijadas

Conocida también como trituradora, quebrantadora o chancadora de mandíbulas.

Las trituradoras de mandíbulas reducen el tamaño de la roca o mineral por medio de la compresión. Son las más utilizadas debido a su capacidad, para triturar todo tipo de materiales de cualquier dureza, así mismo su operación es de bajo costo y fácil mantenimiento.

La trituradora se destina principalmente para el chancado del material de primer nivel o primaria (trituration gruesa y media). La trituradora de mandíbulas, perteneciente a la escuela de minas como se observa en la figura 1.3, consta de un motor eléctrico que gira por medio de una polea que conduce el eje excéntrico, dejando que la mandíbula móvil pueda acercarse y distanciarse constantemente a la mandíbula fija, realizando múltiples fracturaciones, para que las partículas disminuyan de tamaño, cayendo gradualmente hasta que son evacuadas. (Alex Portillo, 2019).

Al momento de introducir el alimento a la chancadora, el material es depositado desde el extremo de la cavidad de trituración (por seguridad), mientras los dientes de la mandíbula empujan con gran fuerza las partículas hacia la pared para su posterior fractura. (Flores, 2019).



Figura 1.3 Trituradora de Mandíbulas.

Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento de la trituradora consiste en dos quijadas superpuestas con la abertura de la boca hacia arriba. Las dos quijadas tienen un ángulo agudo entre ellas de máximo 26° , una quijada está apoyada con respecto a la otra quijada que es fija. El alimento que es colocado desde lo alto de la cavidad, es triturado y liberado, por la parte inferior del equipo de trituración. (Ortiz, 2005).

Las placas de trituración son sustituidas de acuerdo a su deterioro y son construidas con acero y un porcentaje de manganeso entre el 12 al 14%, son resistentes a la abrasión; estas placas pueden ser lisas o corrugadas dependiendo del material que vaya a ser triturado. Las trituradoras de mandíbulas son clasificadas comercialmente de acuerdo a sus áreas

de alimentación, es decir el largo de las quijadas y a la abertura de la boca de alimentación.(Ortiz, 2005).

Los fragmentos grandes de roca, exigen la aplicación de fuerzas muy considerables para poder romperlas. Estas fuerzas se obtienen gracias a la trituradora de mandíbulas, mediante la aplicación progresiva de fuerzas obtenidas a través del motor y de la correa de transmisión.(Flores, 2019).

Las quebrantadoras que son usadas para rocas de una dureza grande o intermedia, se caracterizan porque las superficies de trituración no son paralelas, sino convergen hacia abajo, se acercan y se alejan alternativamente con una pequeña amplitud, pero nunca tienen contacto entre sí, el espacio de separación permite recibir el alimento de material y, para la posterior descarga del producto triturado se realiza por la parte inferior, por lo que el material entra circula y sale en virtud únicamente de la fuerza de la gravedad.(Flores, 2019).

La apertura de las mandíbulas oscila entre 1.25 y 7.5 cm (1/2" a 3"), según el tamaño de la trituradora y las características de la roca. Las mandíbulas se abren y cierran de 250 a 400 veces por minuto. (Luna, 2016).

Existen cuatro tipos de trituradoras de mandíbulas, estas son:

- Tipo Blake
- Pivote elevado
- Excéntrica elevada
- Dodge

1.2.4 Trituradora de mandíbulas tipo Blake

La trituradora tipo Blake cuenta con dos mandíbulas, una fija y una móvil, que son las que producen la desintegración de las rocas con un movimiento conocido como masticación. La mandíbula móvil se acerca y aleja de la fija pivoteando en un punto superior de suspensión.(Blanc, 2017).

El movimiento de la mandíbula se logra por el accionamiento de un motor, que se acopla a través de correas, con un eje. En forma excéntrica al eje, va acoplada una biela que sube

y baja. Dicha biela, en su parte inferior tiene una articulación, a las que van unidas dos riostras o placas riostras.(Blanc, 2017).

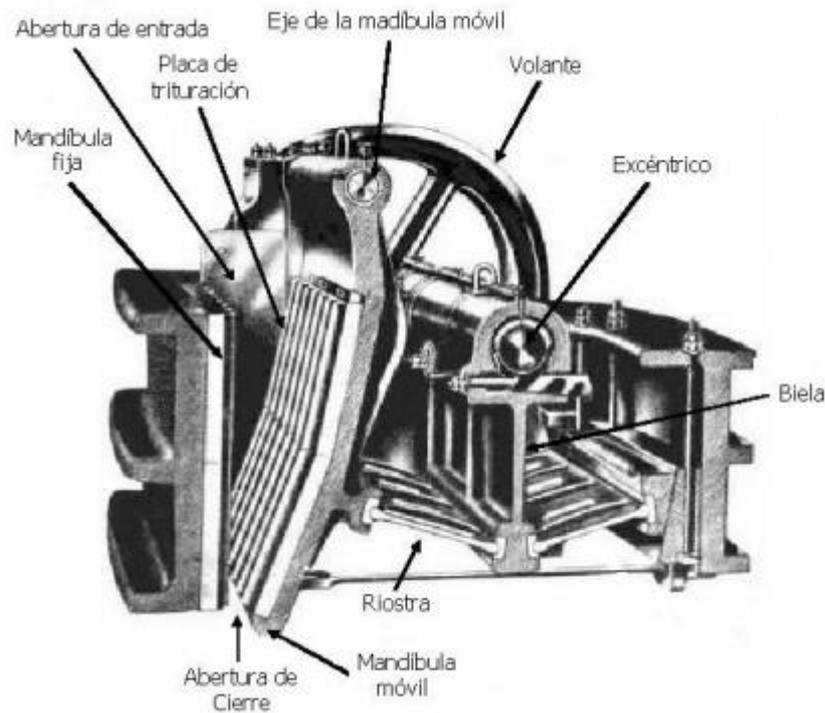


Figura 1.4 Trituradora de mandíbulas tipo Blake.

Fuente:(Ortiz, 2005).

1.2.5 Trituradora de mandíbulas tipo pivote elevado

Es una trituradora similar al tipo Blake, el pivote se halla en la parte superior, su característica principal es que permite la admisión y descarga del material de forma regulable.(Miranda Ríos, 2014).

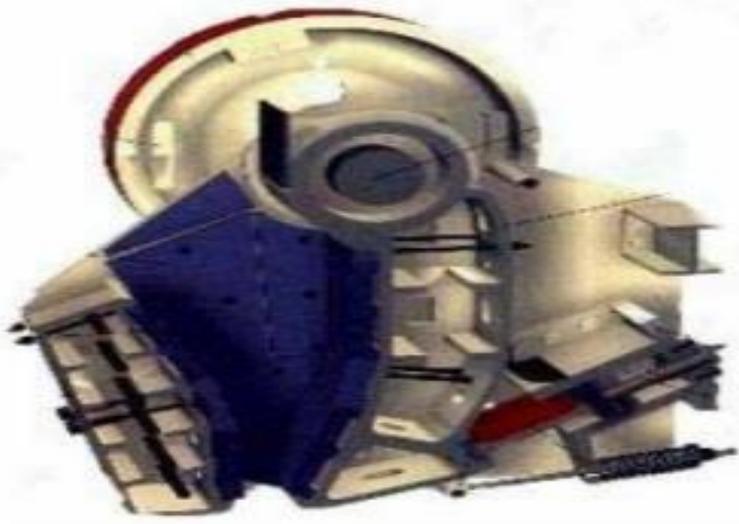


Figura 1.5 Trituradora de mandíbulas de tipo elevado.

Fuente:(Luna, 2016).

1.2.6 Trituradora de mandíbulas tipo excéntrica elevada

Es una trituradora similar al tipo Blake, con la diferencia de que el movimiento es realizado por una fuerza excéntrica que mueve una leva a través de una placa de articulación, la cual brinda el movimiento a la mandíbula móvil que está suspendida en la parte superior.(Ortiz, 2005).



Figura 1.6 Trituradora de mandíbulas excéntrica elevada.

Fuente:(Ortiz, 2005).

1.2.7 Trituradora de mandíbulas tipo Dodge

La trituradora Dodge, utiliza una variación de diseño en la que, la quijada oscilante se pivotea en la parte inferior y toda la sección es impulsada por una palanca sin la acción de la rótula. La diferencia básica con la trituradora Blake es que el movimiento máximo se produce en la abertura de alimentación y, en consecuencia, el punto de menor movimiento se encuentra en la abertura de salida, lo que dificulta en gran medida la capacidad de dicha máquina.(Miranda Ríos, 2014).

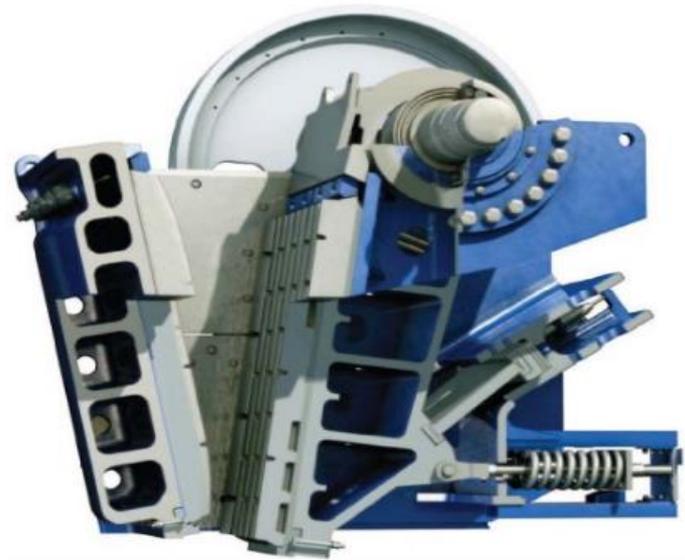


Figura 1.7 Trituradora de mandíbulas tipo Dodge.

Fuente:(Ortiz, 2005).

1.3 Clasificación de las rocas

1.3.1 Rocas: Son compuestos minerales de gran amplitud, conformados por uno o varios minerales. Las rocas se subdividen en:

- Ígneas
- Sedimentarias
- Metamórficas

Dentro de estos tres grupos podemos encontrar tipos y ejemplos de rocas, con su respectivo porcentaje en volumen que ocupan dentro de la corteza terrestre. (Viggiano-Guerra, 2015).

Tabla 1.4 Tipos de rocas y porcentaje en la corteza terrestre.

| ROCAS | % VOLUMEN DE LA CORTEZA |
|---|--------------------------------|
| Sedimentarias | |
| Arenas | 1.7 |
| Arcillas y limos | 4.2 |
| Carbonatos (incluyendo depósitos sálicos) | 2 |
| Ígneas | |
| Granitos | 10.4 |
| Granodioritas, dioritas | 11.2 |
| Sienitas | 0.4 |
| Basaltos, gabros, anfibolitas, eclogitas | 42.5 |
| Dunitas, peridotitas | 0.2 |
| Metamórficas | |
| Gneises | 21.4 |
| Esquistos | 5.1 |
| Mármoles | 0.9 |
| Totales | |
| Sedimentarias | 7.9 |
| Ígneas | 64.7 |
| Metamórficas | 27.4 |

Fuente: (Viggiano-Guerra, 2015).

1.3.2 Propiedades físicas de las rocas

Las rocas presentan varias propiedades físicas que pueden influir en los diferentes mecanismos de estudio de las mismas. Dichas propiedades son: (Linan, 1994).

Dureza: Es una propiedad que tiene cada roca dependiendo de la composición de los granos, minerales constituyentes, porosidad, grado de humedad, etc. Se entiende como la resistencia, que posee cada roca, y que no debe ser superada para no ser rayada o para que no se pueda romper. La dureza de las rocas se clasifica por medio de la escala de Mohs, y se clasifican de la siguiente manera como se muestra en la tabla 1.5 (Tiburcio Martínez, 2012).

Tabla 1.5 Clasificación de la dureza de las rocas.

| Clasificación | Dureza MOHS | Resistencia a la compresión (MPa) |
|---------------|-------------|-----------------------------------|
| Muy dura | +7 | +200 |
| Dura | 6-7 | 120-200 |
| Medio dura | 4.5-6 | 60-120 |
| Medio blanda | 3-4.5 | 30-60 |
| Blanda | 2-3 | 10-30 |
| Muy blanda | 1-2 | -10 |

Fuente: (Linan, 1994).

Resistencia: Es una propiedad que poseen las rocas, caracterizada por oponerse a la destrucción de la misma, al estar sometida a una carga o fuerza exterior, la cual puede ser estática o dinámica. Esta propiedad depende mucho de la fragilidad de las rocas, ya que muchos defectos o irregularidades, pueden presentar mayor o menor resistencia a la compresión y también la resistencia depende de la composición mineralógica, es decir de los tamaños de los cristales, si estos son de gran tamaño hace que su resistencia disminuya. (Linan, 1994).

Elasticidad: Las rocas al estar constituidas por minerales, tienen un comportamiento elástico-frágil, que se rige por la Ley de Hooke, en referencia a la relación esfuerzo-deformación. Se rompen cuando las tensiones aplicadas superan el límite de elasticidad que presenta cada mineral. Según las deformaciones producidas por un esfuerzo se puede clasificar a las rocas en 3 grupos:

1. **Elasto-frágiles:** obedecen a la Ley de Hooke.
2. **Plástico-frágiles:** donde la destrucción se da por deformación plástica.
3. **Muy plásticas o porosas:** donde la deformación es insignificante.

Las propiedades de elasticidad de las rocas se caracterizan por el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν). (Tiburcio Martínez, 2012).

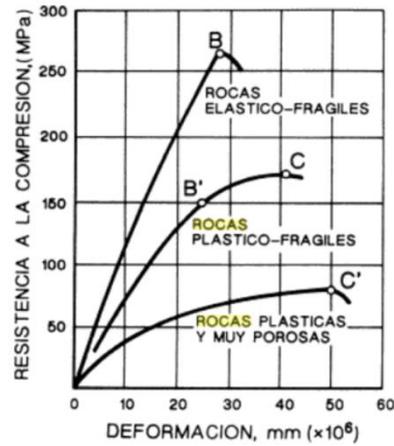


Figura 1.8 Curvas de tensión-deformación de diferentes tipos de rocas.

Fuente: (Linan, 1994).

Plasticidad: Propiedad que va de la mano con la elasticidad, la plasticidad depende de igual manera de la composición mineral de las rocas y puede disminuir al aumentar el contenido de minerales “duros” (feldespato, cuarzo, etc.).(Verao, 2004).

Abrasividad: Es una propiedad que se da durante el movimiento, es decir, en el proceso de rozamiento de las rocas y la capacidad de las mismas para desgastar la superficie de otra roca o mineral considerado más duro. Existen varios factores que aumentan la capacidad abrasiva de las rocas entre ellos se encuentran:(Viggiano-Guerra, 2015).

- Dureza de granos que conforman a las rocas.
- Forma de los granos.
- Tamaño de granos.
- Porosidad de la roca.
- Heterogeneidad (presentan superficies ásperas).

Textura: Propiedad que se refiere principalmente a la estructura que tienen los granos de los minerales que constituyen a las rocas, es decir, tamaño, forma, porosidad, etc. (Linan, 1994)

Estructura: Aquí intervienen las propiedades estructurales de los macizos rocosos, tales como: planos de estratificación, diaclasas, fallas, rumbos, buzamientos, esquistosidad, etc.

Para el tratamiento de rocas y minerales, es necesario realizar una preparación de los mismos, dentro de esa preparación, se requiere efectuar una reducción del tamaño; por medios físicos, que se conocen como trituración y molienda. (Tiburcio Martínez, 2012).

1.3.3 Algunas propiedades ingenieriles de las rocas

Peso específico. -Es el peso por unidad de volumen de una roca, expresado en kg/cm³.

Este parámetro es fuertemente afectado por la porosidad y por el agua que contiene la roca cuyo referente es la absorción. (Gabriels & Lobo, 2010).

Porosidad. -Es la capacidad de contener espacios vacíos entre los elementos sólidos de una roca. Se expresan en porcentaje y se obtiene de la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total. (Verao, 2004).

Absorción. -Propiedad que poseen las rocas de absorber agua por capilaridad cuando se ponen en contacto en una zona húmeda. (Tiburcio Martínez, 2012).

Índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation-RQD). -Este índice refleja el grado de alteración y de discontinuidad de la roca que puede deberse al fracturamiento, o fisuración, producto de las discontinuidades.

Su cálculo es una estimación de la capacidad de carga de la roca, se obtiene de núcleos de rocas que provienen de la perforación de pozos en macizos rocosos. (Guamán García & Mendieta Girón, 2013).

Su cálculo se efectúa de la siguiente manera:

$$RQD = \frac{\text{Suma de los segmentos mayores a 10cm}}{\text{Longitud del muestreo}} \times 100 \quad (7)$$

Tabla 1.6 Valores de clasificación de la Roca.

| R.Q.D (%) | CALIDAD | PRESIÓN ADMISIBLE kg/cm² |
|------------------|----------------|--|
| 0-25 | Muy mala | 10-30 |
| 25-30 | Mala | 30-65 |
| 50-75 | Buena | 65-120 |
| 75-90 | Muy buena | 120-200 |
| 90-100 | Excelente | 200-300 |

Fuente: (Guaman García & Mendieta Girón, 2013).

Índice de recuperación. -Es una estimación de la resistencia de las rocas. Se obtiene a partir de núcleos de roca como el RQD.

Se obtiene con la siguiente formula:

$$R\% = \frac{\text{Longitud total recuperada}}{\text{Longitud total perforada}} \times 100 \quad (8)$$

A valores altos tanto del RQD como del R, se asume que las rocas son impermeables con buenas propiedades mecánicas, en tanto que a valores bajos tanto del RQD como del R, se asume que las rocas son permeables, con propiedades mecánicas mucho menos deseables. (Guaman García & Mendieta Girón, 2013).

Permeabilidad. -Es la capacidad que poseen las rocas de dejarse atravesar por un fluido, cuando están sometidas a un cierto gradiente hidráulico, es una propiedad que está regida por la Ley de Darcy.

La estimación o interpretación del cálculo de esta propiedad tiene dos valencias (positiva y negativa) ya que en el agua subterránea conviene que sea de gran magnitud, pero en el ambiente constructivo es preferible que sea baja o nula. (Torrijo Echarri & Franch i Vaca, 2008).

Tabla 1.7 Grado de permeabilidad.

| Grado de permeabilidad relativa | Coefficiente de permeabilidad (m/s) | Tipos de Rocas |
|--|--|-----------------------|
| Alta | $>10^{-2}$ | Grava |
| Media | $10^{-2} - 10^{-4}$ | Arena |
| Baja | $10^{-4} - 10^{-9}$ | Arena fina o Limo |
| Impermeable | $<10^{-9}$ | Arcilla |

Fuente: (Torrijo Echarri & Franch i Vaca, 2008).

Resistencia de las rocas. -Hay que considerar que existen diferentes tipos de esfuerzos, a continuación, citaremos los 4 tipos de esfuerzos:

- Esfuerzos de Compresión.
- Esfuerzos Cortantes.
- Esfuerzos de Tensión.
- Esfuerzos de Torsión.

La resistencia en general es medida por las cargas de ruptura por aplastamiento de una muestra cúbica, prismática o cilíndrica.

Como, por ejemplo:

Tabla 1.8 Valores de resistencia.

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Roca de densidad 2,7 | 400 kg/cm ² |
| Ladrillos y yeso | 100 kg/cm ² |
| Concreto | 360 kg/cm ² |
| Hierro | 3600 kg/cm ² |

Fuente: (Julio, 2015).

1.4 Granulometría

La fase sólida del suelo se encuentra compuesta de varias partículas (minerales y orgánicas), las cuales poseen diferentes formas y tamaños, originados generalmente por la desintegración de las rocas o por la descomposición de los residuos vegetales. Dichas partículas determinan en gran parte, las propiedades físicas del suelo, por ejemplo: estructura, porosidad, densidad aparente y permeabilidad. (Gabriels & Lobo, 2010).

La fase sólida se puede clasificar en partículas individuales, pero en la mayoría de casos se encuentra en forma de agregados, es decir, cuando las partículas están unidas unas con otras. La granulometría o textura, llamada también distribución de las partículas en formas individuales, no es muy común en el suelo, se utiliza más como un indicador descriptivo de la matriz o esqueleto del suelo. El término 'textura' se lo utiliza para representar la composición proporcional de partículas individuales de los minerales del suelo, es decir; arena, limo y arcilla, excluyendo a las partículas con un diámetro mayor a 2 mm, las cuales se conocen como fragmentos de roca o agregados del suelo. La distribución de tamaño de partículas se refiere a la distribución porcentual de los diferentes tamaños de partículas presentes en el suelo, es decir la granulometría

Los términos granulometría y textura son considerados básicamente como sinónimos, pero no obstante el término textura se utiliza con más frecuencia para describir a la sensación de deslizar entre los dedos (tacto) una muestra de suelo y es utilizado comúnmente a nivel de campo como un primer diagnóstico del suelo, en cambio el análisis granulométrico se lo realiza únicamente como una prueba de laboratorio mediante tamices. (Gabriels & Lobo, 2010).

1.4.1 Clasificación de las partículas minerales del suelo

Existen diferentes sistemas de clasificación, de las partículas minerales del suelo, de acuerdo a su diámetro, cuando es menor a 2 mm, se considera como material fino. Los sistemas más usados se presentan en el siguiente cuadro. (Gabriels & Lobo, 2010).

Tabla 1.9 Sistema de clasificación de las partículas minerales del suelo.

| | | USDA μm (micrómetros) | IUSS μm (micrómetros) |
|----------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Arena | muy gruesa | 2000-1000 | - |
| | gruesa | 1000-500 | 2000-200 |
| | media | 500-250 | - |
| | fina | 250-100 | 20-200 |
| | muy fina | 100-50 | - |
| Limo | | 50-2 | 20-2 |
| Arcilla | | < 2 | < 2 |

Fuente: (Gabriels & Lobo, 2010).

El término fracción gruesa del suelo, se utiliza para las partículas mayores de 2 mm de diámetro. Cuando estas representan el 40% del volumen de un suelo, se denominan como suelo pedregoso o esquelético. Existen varios sistemas de clasificación de fragmentos gruesos, uno de los sistemas más utilizados es el del “Manual de Estudios de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos” (SoilSurveyDivision Staff), que se presenta a continuación. (Gabriels & Lobo, 2010).

Tabla 1.10 Clasificación de los fragmentos de roca (>2mm).

| Forma y tamaño | | |
|---|---------|--------------|
| Fragmentos de rocas irregulares, cubos angulares o subangulares, equiaxiales | | |
| Diámetro (mm) | 2-5 | Grava fina |
| | 5-20 | Grava media |
| | 20-75 | Grava gruesa |
| | 75-250 | Guijarro |
| | 250-600 | Piedra |
| | >600 | Canto rodado |
| Fragmentos planos | | |
| Longitud (mm) | 2-150 | Esquisto |
| | 150-30 | Laja |
| | 380-600 | Piedra |
| | >600 | Canto rodado |

Fuente: (Gabriels & Lobo, 2010).

La textura es la propiedad más estudiada del suelo, ya que es el mejor elemento para caracterizar al suelo desde el punto de vista físico. Ciertas características del suelo, como,

por ejemplo; permeabilidad, consistencia, capacidad de intercambio de iones, retención de agua, porosidad, infiltración y la estructura, dependen en gran medida de la textura del suelo. La mayoría de las propiedades (físicas, químicas y biológicas) de un suelo depende directamente de su superficie específica, ya que muchas de las reacciones y procesos se producen en dichas superficies de las partículas.

Existen varias aplicaciones directas de la textura, las más utilizadas son: para el reconocimiento de suelos, la taxonomía de suelos, tasa de infiltración o conductividad la hidráulica, etc. (Gabriels & Lobo, 2010).

1.4.2 Determinación de la granulometría de los suelos

Los métodos más utilizados para la determinación de la granulometría de los suelos son los siguientes: tamizado en seco o húmedo, textura al tacto, sedimentación (método de la pipeta y el método del hidrómetro), uso del microscopio electrónico. Los métodos de la pipeta e hidrómetro son procedimientos estándar para determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo (fracción fina > 2 mm). No obstante, el método del hidrómetro, es comúnmente usado para determinar los tamaños de partículas finas del suelo (fracción fina < 50 μm). (Gabriels & Lobo, 2010).

El método de la pipeta consiste en medir el peso en porcentaje (%) de cada tamaño de partícula que se encuentra en suspensión, es decir, suelo/agua. Se asume que todas las partículas son esféricas y tienen la misma gravedad específica. La suspensión es estabilizada y las partículas con un diámetro menor a 50 μm son separadas mediante sedimentación y por tamizado (50 μm – 2000 μm).

La granulometría o análisis granulométrico de fragmentos de roca o agregados, incluye todo procedimiento mecánico o manual, que tiene por objetivo la separación de las partículas del agregado según distintos tamaños, con el fin que se puedan conocer las proporciones o cantidades en peso de cada tamaño que conforma el peso total. Para separar mediante tamaños se debe utilizar mallas con diferentes aberturas, llamadas tamices. Estas proporcionarán el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas, y las cuales serán expresadas como porcentajes retenidos. Con estos porcentajes se procede a trazar la gráfica de los valores de material, formando curvas. (Flores, 2019).

1.5 Curva granulométrica

La curva granulométrica es una representación gráfica de los resultados obtenidos en un laboratorio, cuando la estructura de un suelo es analizada desde el punto de vista del tamaño de las partículas que forman dicho suelo. (Vallejo, y otros, 2016).

Para la obtención de dicha representación gráfica, las partículas de mayor tamaño, se separan por medio de tamices que poseen aberturas de mallas estandarizadas y luego las cantidades que han sido retenidas en cada tamiz son pesadas. (Vallejo, y otros, 2016).

Es importante al realizar la reducción de tamaño lograr mantener las curvas lo más empinadas posible, como se muestra a continuación:

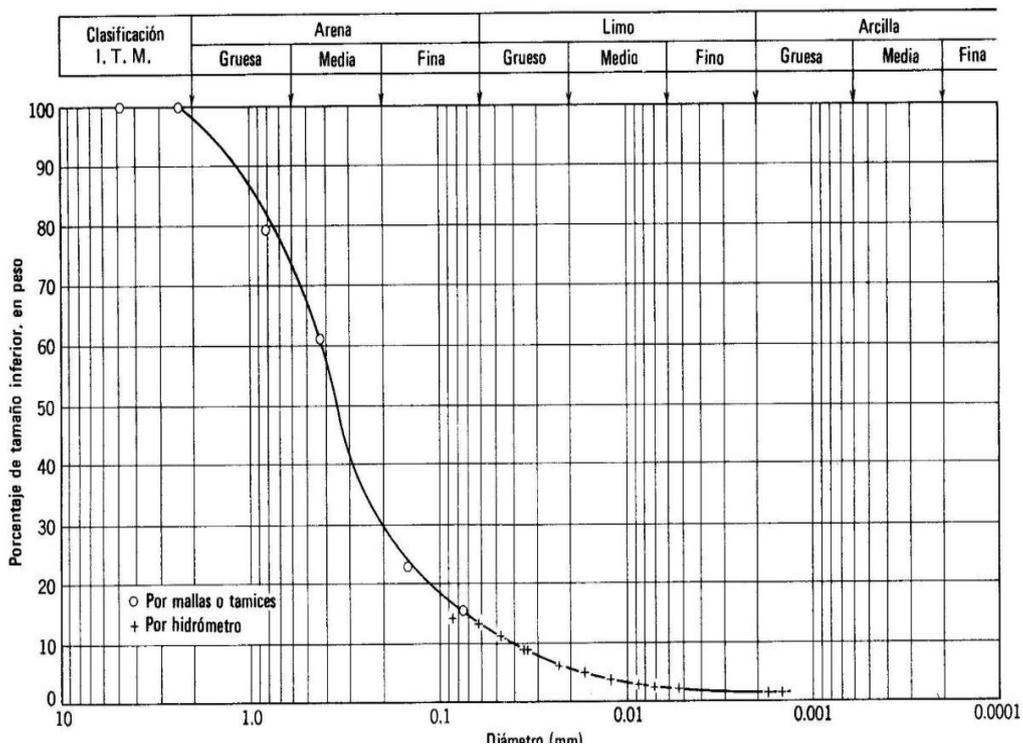


Figura 1.9 Curva Granulométrica.

Fuente:(Vallejo, y otros, 2016).

Las curvas pueden ser representadas de varias maneras, pero la más utilizada proporciona el uso de diagramas semilogarítmicos, en donde el eje de las abscisas representa los tamaños de mallas o la clasificación en general en una escala logarítmica, mientras que en el eje de las ordenadas representara el porcentaje de pasante o retenido en una escala lineal. (Flores, 2019).

El análisis granulométrico se lleva a cabo mediante métodos mecánicos, estos pueden ser series de cribas o tamices, también pueden ser realizados por métodos hidráulicos y neumáticos. (Flores, 2019).

Cuando se realiza el estudio de una muestra granulométrica, es necesario identificar a la muestra con un solo número es decir un tamaño característico o un tamaño medio. (Salager, 2007).

Para escoger el tamaño resultante existen diferentes formas de calcularlo, especialmente si se desea adaptar al tipo de fenómeno que esté involucrado, los factores que definen los valores que indican la noción de los principales parámetros de una distribución son:(Salager, 2007).

- Modo o moda.
- Media aritmética.
- Mediana.
- Media geométrica.

1.6 Resistencia a la compresión simple

En ingeniería, el ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. En la mayoría de los casos se realiza con hormigones y metales (sobre todo aceros), aunque puede realizarse sobre cualquier material. (Lambe & Whitman, 2004).

La resistencia a la compresión de la mayoría de los materiales siempre es menor que la resistencia a la tracción, pero se presentan excepciones, por ejemplo el hormigón.

También se la conoce como el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que tiende a fallar debido a la rotura de una fractura, se puede definir, como una propiedad independiente.

La resistencia a la compresión simple o uniaxial, es muy importante en Mecánica de Suelos, ya que ayuda a determinar los valores de carga última del suelo, el cual se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de la carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un resultado muy preciso. (Tiburcio Martinez, 2012).

La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima, por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión. (Lambe & Whitman, 2004).

Es importante entender el comportamiento de los suelos sometidos a cargas, ya que es en ellos, donde se va a desarrollar estructuras de obras civiles que requieren de una base firme o que puedan aprovechar las resistencias del suelo, en beneficio de su propia capacidad y estabilidad. (Lambe & Whitman, 2004).

Debido a la compleja y variable naturaleza de los suelos a estudiar, especialmente en lo referido al esfuerzo cortante, existen muchos métodos de ensayos para evaluar sus características, pero el ensayo de compresión simple cumple con nuestro objetivo buscado, sin la necesidad de utilizar métodos complejos y la utilización de maquinaria que en algunos casos puede ser inaccesible, lo que significa que la compresión simple conlleva un menor gasto. (Tiburcio Martinez, 2012).

Sabiendo que existen diferentes métodos para la evaluación de las características del suelo, el método de la compresión simple ayuda a identificar características y comportamientos de suelos cuando es sometido a un esfuerzo, dicho método nos ayudara a determinar el objetivo buscado en este análisis.

Este método se aplica a materiales cohesivos que no expulsan agua durante la etapa de carga y que mantienen su resistencia intrínseca, después de remover las presiones de confinamiento, como las arcillas o los suelos cementados. (Tiburcio Martinez, 2012).

La resistencia a la compresión simple, es una medida de resistencia de la matriz rocosa, que representa el esfuerzo de compresión máximo axial, que puede soportar una muestra de material antes de ser fracturado. (Agcasco, 2007).

De una manera general, este ensayo se lo realiza sobre probetas de roca que pueden ser cubicas o cilíndricas, con un diámetro recomendable de 50 mm, a continuación, en la tabla 1.11 se muestra una clasificación de las rocas según su resistencia a la compresión uniaxial.

Tabla 1.11 Clasificación Ingenieril de las rocas.

| Clase | Descripción | Resistencia a la compresión uniaxial | | Tipo de roca |
|----------|------------------------|--------------------------------------|-----------|--|
| | | (PSI) | (MPa) | |
| A | Resistencia muy alta | 32000 | 220 | Cuarcitas, diabasas. |
| B | Resistencia alta | 16000-32000 | 110 a 220 | Mayoría de rocas ígneas. Ciertas rocas metamórficas. Areniscas Cementadas. Lutitas resistentes. Mayoría de las calizas. Ciertas dolomitas. |
| C | Resistencia media | 8000-16000 | 55 a 110 | Algunas lutitas, areniscas y Calizas porosas. Esquistos y rocas metamórficas |
| D | Resistencia baja | 4000-8000 | 28 a 55 | Rocas porosas de baja Densidad. Areniscas Deleznales. Tufas y lutitas arcillosas. Rocas meteorizadas y químicamente alteradas de |
| E | Resistencias muy bajas | 4000 | 28 | Cualquier litología. |

Fuente: (Agcasco, 2007).

La resistencia a la compresión simple, es una propiedad de gran ayuda para determinar la resistencia de la roca, ya que se obtienen valores que van desde los 10 a los 2000 Kg/cm². Aquí se incluyen propiedades físicas como: densidad, porosidad, permeabilidad a líquidos y gases, capacidad calorífica, conductividad, expansión térmica, también propiedades químicas como: la resistencia a soluciones ácidas y alcalinas, y a las reacciones que se generan por la presencia de las sales. Dentro de las propiedades mecánicas que se incluyen en la resistencia a la compresión simple están: la tensión, flexión, impacto y penetración por otro cuerpo. (Agcasco, 2007).

En conclusión, la resistencia a la compresión simple es la fuerza (carga, peso) aplicada por unidad de área, a la que el material se rompe por una fracturación por cizalla o extensional. Esta propiedad es muy importante en la mecánica de materiales, tanto para

una situación no confinada (uniaxial), como confinada (triaxial). La compresión uniaxial, o conocida también como longitudinal, se la mide en una prensa hidráulica, que registra el esfuerzo aplicado sobre el cubo o probeta de cualquier tipo de material en una dirección del espacio, y la deformación lineal inducida en esa misma dirección. (Agcasco, 2007).

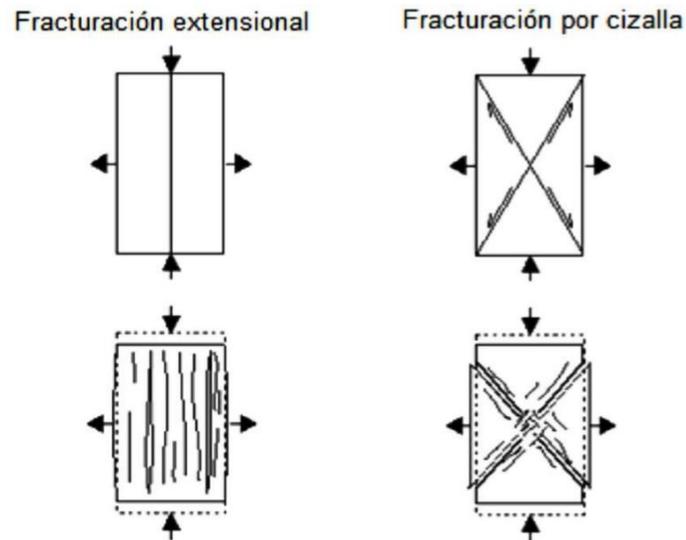


Figura 1.10 Desarrollo de las fracturas como resultado de compresión.

Fuente:(Agcasco, 2007).

Las rocas naturales son resistentes a la compresión, pero varían debido a sus propiedades como: composición mineral, porosidad, estructura, etc. A continuación, se presenta la tabla 1.12 donde se encuentra la clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión simple.

Tabla 1.12 Clasificación de las rocas según la Resistencia a la Compresión Simple.

| Descripción | Resistencia a la Compresión Simple en MPa | Ejemplo de Roca |
|----------------------|--|----------------------------|
| Resistencia muy baja | 1 al 25 | Yeso, sal de roca |
| Resistencia baja | 25-50 | Carbón, limonita, esquisto |
| Resistencia media | 50-100 | Arenisca, pizarra, lutita |
| Resistencia alta | 100-200 | Mármol, granito, gneiss |
| Resistencia muy alta | >200 | Cuarcita, gabro, basalto |

Fuente: (Flores, 2019).

1.6.1 Resistencia a la compresión y el módulo de deformación

El conocer la resistencia de un material es vital, para la determinación de diversos problemas prácticos tales como la predicción de deformaciones de un material en el cual se va a realizar estudios. (Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

Los parámetros tanto de resistencia, como de deformación tienen en común su dependencia del módulo de elasticidad, no obstante, diversos factores influyen de distinta manera, haciendo incierta su correlación, tales como: el contenido de humedad, la forma, la textura superficial, la concentración volumétrica y el tamaño máximo del material a tratar. (Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

1.6.2 Trabajo de deformación

Durante la deformación, una fuerza exterior realiza un trabajo a una velocidad lenta y gradual, para no producir ninguna aceleración. (Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

Sin embargo, si el cuerpo es elástico, todo el trabajo efectuado por las fuerzas (una en este caso) se utiliza para vencer las fuerzas elásticas internas, y se transforma íntegramente en energía potencial elástica de deformación. (Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

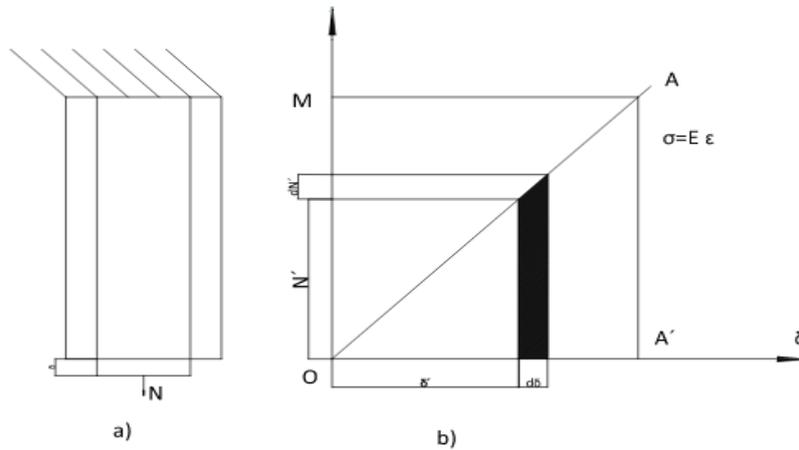


Figura 1.11 Comportamiento del trabajo de deformación.

Fuente:(Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

Siendo N el valor final de la fuerza y δ el correspondiente al alargamiento de la barra.

En un diagrama cartesiano, la relación entre los sucesivos valores de N y δ , es representada por la ecuación a continuación. (Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

Esta es una relación lineal ya que:

$$\sigma = \frac{N}{\Omega} \text{ y } \varepsilon = \frac{\delta}{l} \text{ y por tanto } N = \left(E \frac{\Omega}{l} \right) \cdot \delta \quad (9)$$

Por lo tanto, a un valor intermedio (N') de la fuerza N corresponde un valor intermedio, del alargamiento y a un incremento diferencial (dN') corresponde, el incremento diferencial de la deformación ($d\delta'$). El trabajo elemental efectuado durante este incremento diferencial es:

$$dZ = N' \cdot d\delta' \quad (10)$$

Lo que se representa en el rectángulo que se ve en la figura 1.11, es la medida que desprecia el infinitésimo de orden superior $\frac{1}{2} dN' * d\delta'$. (Perepérez Ventura & Calavera Ruiz, 1981).

CAPÍTULO II

EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se explicará detalladamente las operaciones realizadas para la obtención de los objetivos planteados en este trabajo de investigación.

Empezaremos con la descripción de cada una de las muestras: su proceso de trituración, clasificación y determinación de resistencia, al momento de ser expuestas a fuerzas de compresión uniaxial.

Para esto se determinaron tres lugares, de los cuales, se obtuvo el muestreo de las rocas, los lugares fueron:

- Cojitambo (Provincia del Cañar)
- El Tahual (Provincia del Azuay)
- Racar (Provincia del Azuay)



Figura 2.1 Mapa de localización de muestras obtenidas.

Fuente:(mapamundi.online, 2019).

2.1 Número de muestras y preparación

Para la realización de este trabajo, se procedió a tomar un total de 180 muestras de los sitios que hemos nombrado anteriormente, es decir; 60 muestras de cada formación: 60 en “Cojitambo”, 60 en “El Tاهual” y 60 en “Racar”. El criterio utilizado para la toma de dichas muestras, es que las mismas deberán encontrarse sin ningún tipo de alteración, ningún tipo de fracturas y sin estar muy expuestos a factores climáticos (humedad, vegetación, etc.). La georreferenciación de dichos sitios de muestreo son los siguientes:

- Tاهual: WGS 1984 UTM Zona 17S Este 738029,8 m Norte 9685627,6 m
- Cojitambo: WGS 1984 UTM Zona 17S Este 734789,6 m Norte 9695552,2 m
- Racar: WGS 1984 UTM Zona 17S Este 717289,6 m Norte 9683803,3 m



Figura 2.2 Selección de rocas formación “El Tاهual” (Areniscas).

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.3 Selección de rocas formación “El Tuhual” (Areniscas).

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, al ser escogidas y extraídas las muestras, son llevadas a un taller para que se realice el trabajo de corte, con el objetivo de obtener un paralelepípedo de las siguientes dimensiones (5x5x10 cm), esto permitirá realizar la investigación con mayor facilidad. El resultado de la probeta que se espera obtener una vez realizado el trabajo de corte en el taller es el siguiente:

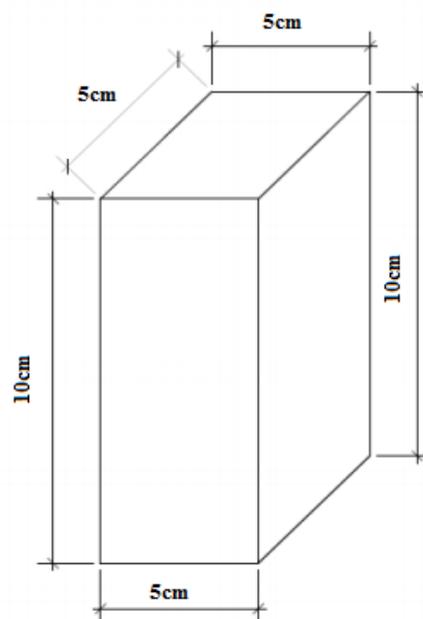


Figura 2.4 Dimesionamiento de muestras.

Fuente:Elaboración propia.

En el taller se logra obtener las probetas reales con las dimensiones mencionadas, dando como resultado la siguiente figura:



Figura 2.5 Muestra real de la formación “Cojitambo” (Andesita).

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidas las 60 probetas de cada uno de los sitios de estudio, se procedió a dividir las en dos grupos iguales, es decir 30-30 probetas, de las cuales el primer grupo fue llevado al laboratorio de minas para realizar los procesos de trituración y clasificación, mientras que el otro grupo restante conformado de sus probetas hermanas, fueron llevadas al laboratorio de suelos, para el consiguiente proceso de compresión uniaxial. A continuación, se podrá observar las muestras separadas y enumeradas con diferente color según el proceso a realizarse (marcador rojo a trituración y marcador negro a compresión uniaxial).



Figura 2.6 Probetas hermanas de la formación “Cojitambo” (Andesita), las cuales serán llevadas al laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.7 Grupo de muestras de la formación “Cojitambo” (Andesita) enviadas al laboratorio de suelos.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.8 Muestras totales de la formación “Racar” (Travertino, mármol rosa)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.9 Grupo de muestras de la formación “El Tahuall” (Areniscas) que pasaran por los procesos de trituración y clasificación.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Proceso de trituración

Para el proceso de trituración, se procedió primeramente a pesar cada una de las probetas antes y después de ser trituradas, con el objetivo de adquirir el peso final de la muestra triturada. Además, se midió cada una de las aristas de la probeta, para comprobar las dimensiones.

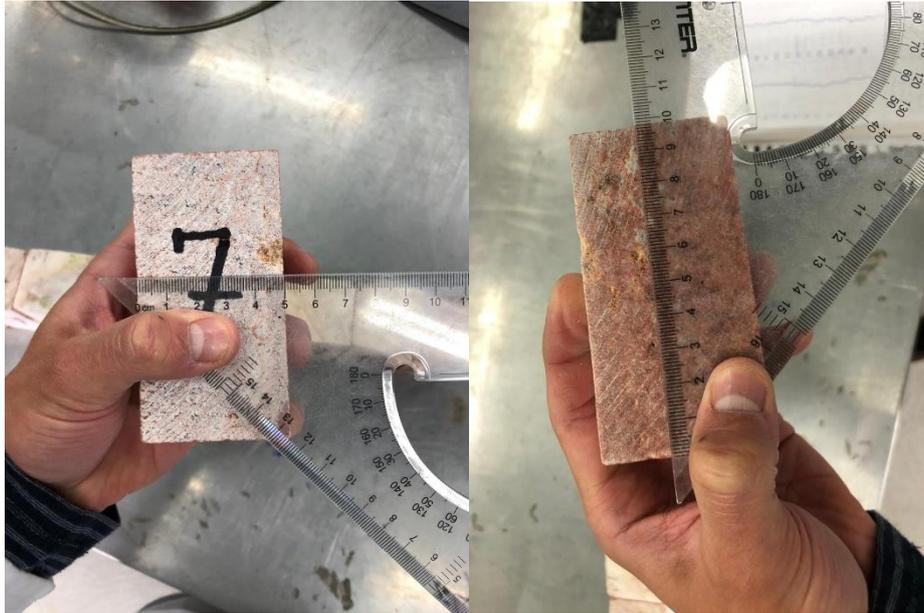


Figura 2.10 y 2.11 Medición de aristas de las probetas de la formación “Racar” (Travertino).

Fuente: Elaboración propia.

El peso final triturado es fundamental, y se convirtió en el dato inicial para realizar posteriormente el proceso de clasificación en los tamices. (Figura 2.12).



Figura 2.12 Peso de la probeta a realizarse en el análisis.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, para el proceso de trituración de la muestra pesada, se utilizó la trituradora de mandíbulas que se encuentra disponible en el laboratorio de minas, la R22, como podemos observar en la siguiente figura: (Figura 2.13).



Figura 2.13 Colocación de la muestra en la trituradora de mandíbulas R22.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe recalcar, que cada una de las muestras introducidas dentro de la trituradora, fueron realizadas como se muestra en la figura 2.13, es decir horizontalmente, con el fin de obtener un resultado lo más homogéneo posible, luego se recogieron las muestras trituradas y se procedió a pesarlas.



Figura 2.14 Partículas obtenidas del proceso de trituración y pesadas en la balanza.

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Ejecución de la clasificación

Para el proceso de clasificación, se utilizó las partículas procedentes del proceso de trituración, las cuales fueron colocadas en una serie de tamices. Consiguiente a esto, los

tamices fueron colocados en la tamizadora eléctrica del laboratorio de suelos. El proceso de tamizado fue realizado a cada una de las muestras trituradas, por un tiempo constante de 2 minutos.

Para la ejecución del proceso de clasificación se utilizaron los tamices con las siguientes aberturas:

- 1/2 (12.5 mm)
- 3/8 (9.5 mm)
- 4 (4.75 mm)
- 10 (2 mm)
- 16 (1.18 mm)

Se podrán observar los tamices en la Figura 2.15.



Figura 2.15 Proceso de clasificación de los tamices colocados en la tamizadora eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminados los 2 minutos de tamizado, se procedió a pesar cada tamiz con las partículas retenidas en cada uno de los mismos. El peso de cada tamiz tomara un papel importante para determinar la distribución granulométrica.

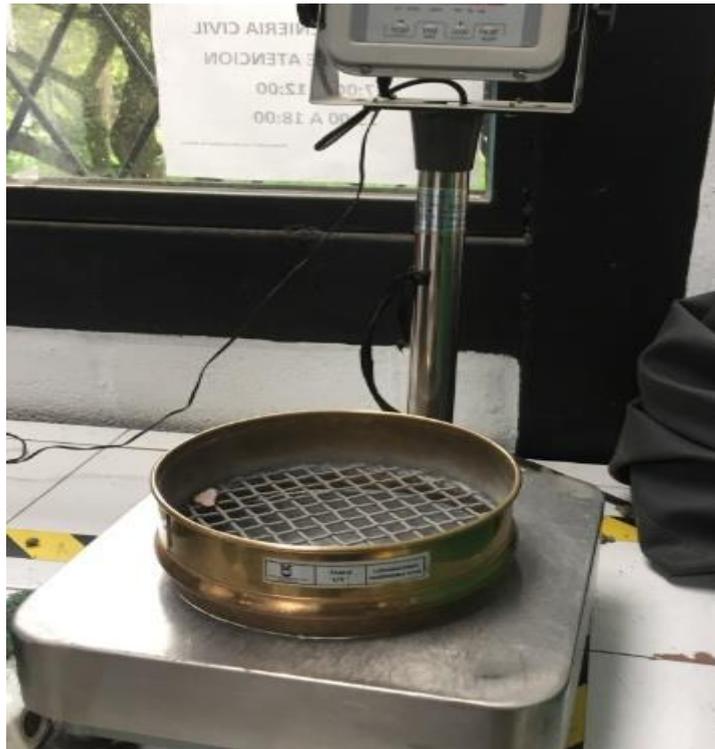


Figura 2.16 Pesado del tamiz 1/2.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.17 Pesado del tamiz 3/8.

Fuente: Elaboración propia.

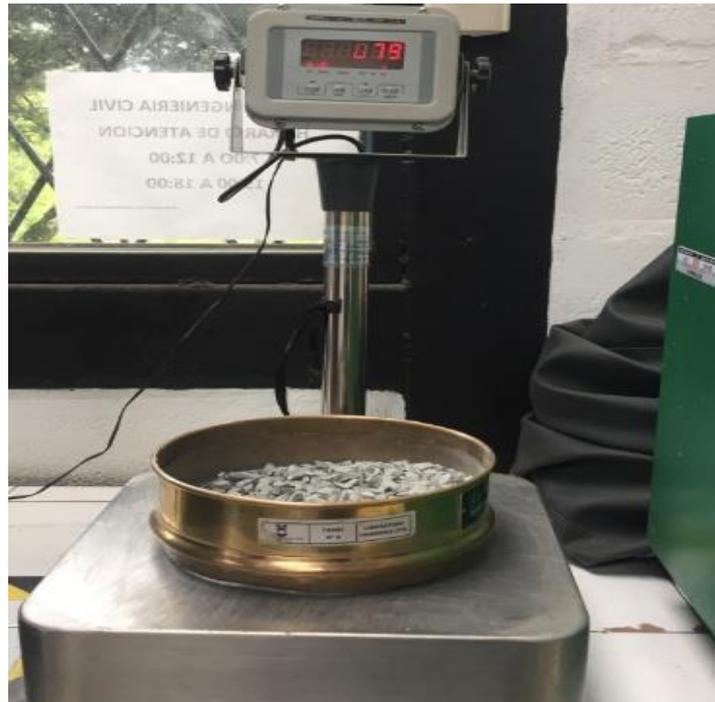


Figura 2.18 Pesado del tamiz 4.

Fuente: Elaboración propia.

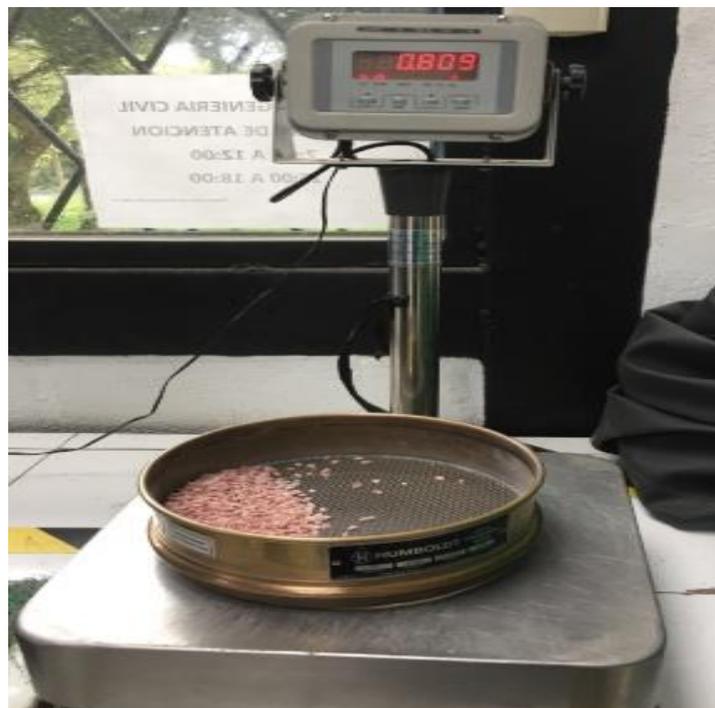


Figura 2.19 Pesado del tamiz 10.

Fuente: Elaboración propia.

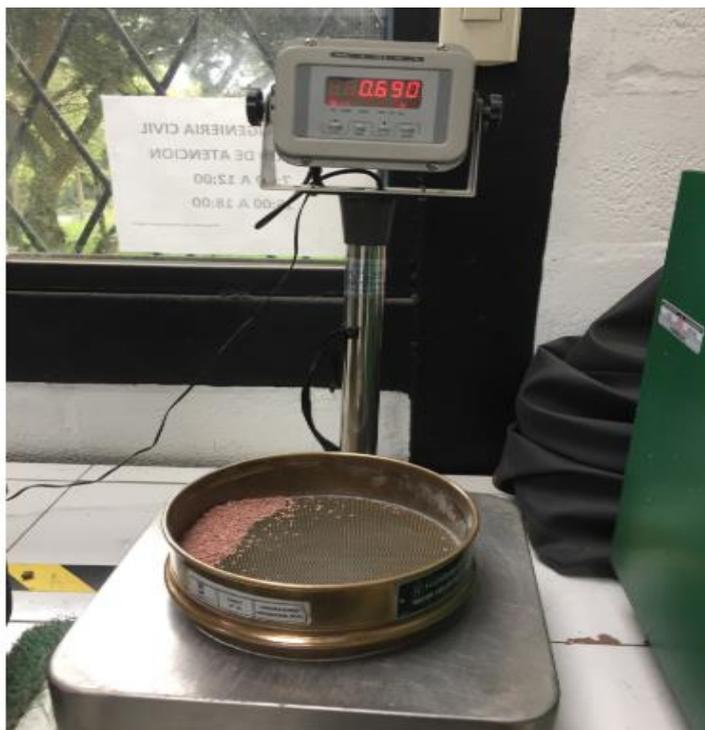


Figura 2.20 Pesado del tamiz 16.

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Elaboración de curvas granulométricas

Para la elaboración de las curvas granulométricas, se utilizó principalmente el software Excel, para interpretar los datos obtenidos en cada una de las muestras. En el software se detallaron los pesos obtenidos de cada tamiz y las partículas retenidas en los mismos, también se ingresó el peso final triturado de cada muestra.

Una vez interpretados los datos en el software Excel, se procedió a calcular los distintos porcentajes mediante las siguientes formulas:

- **2.4.1 % Retenido:** Corresponde al porcentaje en masa del suelo directamente retenido en el tamiz.

$$\%retenido = \frac{\text{peso retenido en el tamiz}}{\text{peso de la muestra total}} * 100 \quad (11)$$

- **2.4.2 % Retenido acumulado:** Corresponde al porcentaje en masa de todas las partículas de mayor tamaño que la abertura, que un determinado tamiz ha retenido. Se calcula como la suma de todos los porcentajes parciales retenidos en los

tamices de abertura de mayor tamaño, más el porcentaje parcial de lo retenido en ese tamiz.

$$\%retenidoacumulado = \frac{\%retenidotamiz\#1}{\%retenidotamiz\#2} + \%retenidotamiz\#3 \quad (12)$$

- **2.4.3 % Pasante acumulado:** Corresponde al porcentaje en masa de todas las partículas de menor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula entre 100 y el porcentaje retenido en ese tamiz.

$$\%pasanteacumuladotamiz2 = 100 - (\%retenidoacumuladotamiz2) \quad (13)$$

Tabla 2.1 Tabla en formato Excel, utilizada para obtención de datos de granulometría.

| PESO MUESTRA# | | | | | |
|--------------------------|--|---------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| N TAMIZ " | APERTURA DE LA MALLA (mm) | PESO DEL TAMIZ | % RETENIDO | % RETENIDO ACUMULADO | % PASANTE ACUMULADO |
| 1/2 | 12,5 | | | | |
| 3/8 | 9,5 | | | | |
| 4 | 4,75 | | | | |
| 10 | 2,00 | | | | |
| 16 | 1,18 | | | | |
| FONDO | | | | | |
| TOTAL | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Determinación de la resistencia a la compresión simple

Como explicamos anteriormente, para este proceso se utilizó el otro grupo de las muestras hermanas (30 muestras). Éstas fueron llevadas al laboratorio de suelos, donde se utilizó la máquina HUMBOLDT de compresión simple que se observa a continuación.



Figura 2.21 Máquina HUMBOLDT de compresión.

Fuente: Elaboración propia.

Con dicha máquina se obtuvo el valor de la fuerza con la que logramos romper la muestra. Configuramos los valores de la fuerza obtenida para que esté en las unidades de kilogramos fuerza (kgf).

Este valor de fuerza sirvió únicamente para la determinación de la resistencia a la compresión simple.



Figura 2.22 Muestras hermanas de la formación “Racar” (mármol rosa) para estudio de compresión simple.

Fuente: Elaboración propia.

Se colocó las muestras en unos moldes metálicos, y se los adaptó a la altura adecuada para que la maquina pueda aplicar la fuerza necesaria, y logre romper las muestras.



Figura 2.23 Colocación de muestra que será sometida a compresión simple.

Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a la compresión por parte de la máquina y al momento de escuchar el fracturamiento de la muestra, se la detuvo, obteniendo el valor de la fuerza exacta en (kgf), además de la fractura de la muestra cómo se observa en las figuras 2.24 y 2.25.



Figura 2.24 y Figura 2.25. Ruptura de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente trabajo de investigación buscó determinar la manera en la que se relacionan los valores de la resistencia a la compresión uniaxial de las rocas, con la distribución del tamaño de las partículas de las mismas, para posteriormente utilizar dichos valores en los sistemas de clasificación de macizos rocosos.

Para realizar estas operaciones, se utilizaron equipos estándar, entre ellos:

- Trituradora de mandíbulas R22.
- Tamices.
- Máquina HUMBOLDT.

Las muestras de cada formación fueron cortadas para adquirir la forma de un paralelepípedo y las dimensiones finales, basándonos en diferentes parámetros técnicos que detallaremos en el transcurso de este capítulo.

El número de probetas con las que se trabajó es de 180 en total, las cuales se obtuvieron de las 3 zonas detalladas a continuación:

1. **Cojitambo**, presenta una morfología de tipo multiforme, es una formación volcánica, constituida por una Andesita, ubicada en la provincia de Cañar.
2. **Racar**, constituida principalmente por un mármol rosado llamado Travertino, ubicado en la provincia del Azuay.
3. **El Tahual**, formada por Areniscas, ubicada en la provincia del Azuay.

3.1 Análisis de resultados de curvas granulométricas

Inicialmente en este análisis, se realizaron los procesos de trituración de cada probeta (MARCADOR ROJO), utilizando una trituradora de mandíbulas MEM R22. Luego de haber sido expuesta al proceso de trituración, se procedió a las pruebas de clasificación granulométrica, utilizando específicamente la tamizadora eléctrica con un tiempo de tamizado de 2 minutos en cada muestra. Para la clasificación se utilizaron los tamices 1/2, 3/8, 4, 10, y 16 respectivamente.

Los valores de clasificación de cada muestra, de las 3 zonas de estudio se encontrarán detallados a continuación en las siguientes tablas:

Tabla 3.1 Resultados del proceso de trituración y clasificación de las muestras según su peso (Kg) “Cojitambo”.

| COJITAMBO | | | | | |
|-------------------|----------------|---------------|----------------|-------------|----------------|
| # MUESTRAS | 12.5 mm | 9.5 mm | 4.75 mm | 2 mm | 1.18 mm |
| 1C | 0.815 | 0.862 | 1.075 | 0.792 | 0.687 |
| 2C | 0.833 | 0.872 | 1.045 | 0.779 | 0.683 |
| 3C | 0.83 | 0.841 | 1.083 | 0.795 | 0.688 |
| 4C | 0.826 | 0.864 | 1.085 | 0.793 | 0.687 |
| 5C | 0.83 | 0.857 | 1.052 | 0.778 | 0.683 |
| 6C | 0.814 | 0.848 | 1.08 | 0.793 | 0.687 |
| 7C | 0.815 | 0.879 | 1.072 | 0.792 | 0.688 |
| 8C | 0.815 | 0.871 | 1.084 | 0.791 | 0.687 |
| 9C | 0.819 | 0.867 | 1.077 | 0.786 | 0.686 |
| 10C | 0.838 | 0.852 | 1.081 | 0.799 | 0.689 |
| 11C | 0.829 | 0.875 | 1.074 | 0.78 | 0.686 |
| 12C | 0.819 | 0.882 | 1.084 | 0.789 | 0.687 |
| 13C | 0.808 | 0.877 | 1.05 | 0.794 | 0.685 |
| 14C | 0.814 | 0.851 | 1.082 | 0.792 | 0.687 |
| 15C | 0.821 | 0.876 | 1.052 | 0.787 | 0.687 |
| 16C | 0.805 | 0.872 | 1.093 | 0.795 | 0.691 |
| 17C | 0.831 | 0.867 | 1.083 | 0.787 | 0.687 |
| 18C | 0.821 | 0.863 | 1.081 | 0.784 | 0.687 |
| 19C | 0.803 | 0.846 | 1.087 | 0.798 | 0.689 |
| 20C | 0.852 | 0.87 | 1.076 | 0.784 | 0.687 |
| 21C | 0.827 | 0.868 | 1.067 | 0.786 | 0.685 |
| 22C | 0.823 | 0.857 | 1.075 | 0.795 | 0.687 |
| 23C | 0.831 | 0.88 | 1.071 | 0.783 | 0.686 |
| 24C | 0.803 | 0.856 | 1.102 | 0.801 | 0.688 |
| 25C | 0.836 | 0.869 | 1.079 | 0.78 | 0.684 |
| 26C | 0.818 | 0.859 | 1.069 | 0.78 | 0.686 |
| 27C | 0.815 | 0.866 | 1.077 | 0.78 | 0.685 |
| 28C | 0.809 | 0.884 | 1.107 | 0.794 | 0.689 |
| 29C | 0.828 | 0.848 | 1.065 | 0.786 | 0.687 |
| 30C | 0.809 | 0.855 | 1.072 | 0.786 | 0.684 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.2 Resultados del proceso de trituración y clasificación de las muestras según su peso “Racar”.

| RACAR | | | | | |
|-------------------|----------------|---------------|----------------|-------------|----------------|
| # MUESTRAS | 12.5 mm | 9.5 mm | 4.75 mm | 2 mm | 1.18 mm |
| 1R | 0.801 | 0.821 | 1.077 | 0.809 | 0.69 |
| 2R | 0.809 | 0.833 | 1.099 | 0.803 | 0.703 |
| 3R | 0.794 | 0.805 | 1.036 | 0.838 | 0.708 |
| 4R | 0.806 | 0.815 | 1.046 | 0.831 | 0.707 |
| 5R | 0.812 | 0.836 | 1.078 | 0.807 | 0.687 |
| 6R | 0.798 | 0.835 | 1.073 | 0.817 | 0.697 |
| 7R | 0.799 | 0.849 | 1.076 | 0.81 | 0.691 |
| 8R | 0.816 | 0.823 | 1.069 | 0.842 | 0.71 |
| 9R | 0.799 | 0.826 | 1.072 | 0.818 | 0.701 |
| 10R | 0.821 | 0.827 | 1.075 | 0.811 | 0.691 |
| 11R | 0.818 | 0.796 | 1.049 | 0.841 | 0.708 |
| 12R | 0.801 | 0.823 | 1.034 | 0.847 | 0.713 |
| 13R | 0.81 | 0.822 | 1.082 | 0.823 | 0.703 |
| 14R | 0.806 | 0.818 | 1.058 | 0.816 | 0.694 |
| 15R | 0.808 | 0.802 | 1.046 | 0.855 | 0.715 |
| 16R | 0.797 | 0.826 | 1.013 | 0.857 | 0.721 |
| 17R | 0.806 | 0.836 | 1.075 | 0.812 | 0.689 |
| 18R | 0.813 | 0.835 | 1.054 | 0.801 | 0.687 |
| 19R | 0.81 | 0.81 | 1.017 | 0.857 | 0.716 |
| 20R | 0.815 | 0.813 | 1.051 | 0.816 | 0.69 |
| 21R | 0.808 | 0.82 | 1.066 | 0.844 | 0.71 |
| 22R | 0.81 | 0.813 | 1.071 | 0.853 | 0.71 |
| 23R | 0.813 | 0.82 | 1.088 | 0.812 | 0.69 |
| 24R | 0.801 | 0.828 | 1.064 | 0.817 | 0.692 |
| 25R | 0.823 | 0.826 | 1.054 | 0.842 | 0.708 |
| 26R | 0.811 | 0.839 | 1.072 | 0.813 | 0.691 |
| 27R | 0.801 | 0.824 | 1.09 | 0.828 | 0.703 |
| 28R | 0.805 | 0.834 | 1.078 | 0.811 | 0.687 |
| 29R | 0.8 | 0.815 | 1.073 | 0.838 | 0.711 |
| 30R | 0.804 | 0.826 | 1.052 | 0.814 | 0.689 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.3 Resultados del proceso de trituración y clasificación de las muestras según su peso de “El Tahual”.

| EL TAHUAL | | | | | |
|-------------------|---------------|--------------|---------------|------------|---------------|
| # MUESTRAS | 12.5mm | 9.5mm | 4.75mm | 2mm | 1.18mm |
| 1T | 0.809 | 0.844 | 1.07 | 0.795 | 0.691 |
| 2T | 0.821 | 0.857 | 1.037 | 0.786 | 0.687 |
| 3T | 0.816 | 0.855 | 1.072 | 0.806 | 0.693 |
| 4T | 0.831 | 0.859 | 1.042 | 0.803 | 0.693 |
| 5T | 0.814 | 0.835 | 1.07 | 0.796 | 0.691 |
| 6T | 0.825 | 0.852 | 1.052 | 0.796 | 0.689 |
| 7T | 0.812 | 0.853 | 1.051 | 0.798 | 0.689 |
| 8T | 0.802 | 0.871 | 1.066 | 0.795 | 0.69 |
| 9T | 0.823 | 0.849 | 1.051 | 0.791 | 0.69 |
| 10T | 0.808 | 0.87 | 1.065 | 0.8 | 0.689 |
| 11T | 0.822 | 0.831 | 1.065 | 0.805 | 0.693 |
| 12T | 0.825 | 0.844 | 1.071 | 0.801 | 0.691 |
| 13T | 0.806 | 0.875 | 1.064 | 0.799 | 0.689 |
| 14T | 0.81 | 0.868 | 1.07 | 0.794 | 0.689 |
| 15T | 0.822 | 0.846 | 1.075 | 0.787 | 0.687 |
| 16T | 0.842 | 0.844 | 1.084 | 0.796 | 0.691 |
| 17T | 0.821 | 0.853 | 1.057 | 0.795 | 0.691 |
| 18T | 0.804 | 0.845 | 1.058 | 0.792 | 0.691 |
| 19T | 0.818 | 0.856 | 1.072 | 0.81 | 0.694 |
| 20T | 0.818 | 0.864 | 1.026 | 0.795 | 0.688 |
| 21T | 0.811 | 0.839 | 1.063 | 0.802 | 0.693 |
| 22T | 0.832 | 0.859 | 1.056 | 0.798 | 0.689 |
| 23T | 0.797 | 0.839 | 1.082 | 0.813 | 0.695 |
| 24T | 0.812 | 0.864 | 1.067 | 0.8 | 0.689 |
| 25T | 0.811 | 0.86 | 1.081 | 0.801 | 0.69 |
| 26T | 0.812 | 0.873 | 1.076 | 0.802 | 0.69 |
| 27T | 0.827 | 0.854 | 1.049 | 0.786 | 0.688 |
| 28T | 0.821 | 0.858 | 1.065 | 0.806 | 0.693 |
| 29T | 0.826 | 0.858 | 1.061 | 0.797 | 0.687 |
| 30T | 0.813 | 0.852 | 1.073 | 0.803 | 0.693 |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en las figuras 3.1, 3.2, y 3.3 se podrá observar las representaciones gráficas de la distribución de las partículas de cada zona, a las cuales las hemos diferenciado con colores; verde, rojo y azul, para Cojitambo, Racar y El Tahual respectivamente.

Se ha representado de la siguiente manera: El eje de las abscisas representa el tamaño de las partículas en milímetros, mientras que el eje de las ordenadas, representa el pasante acumulado en porcentaje (%), datos generados en la curva granulométrica.

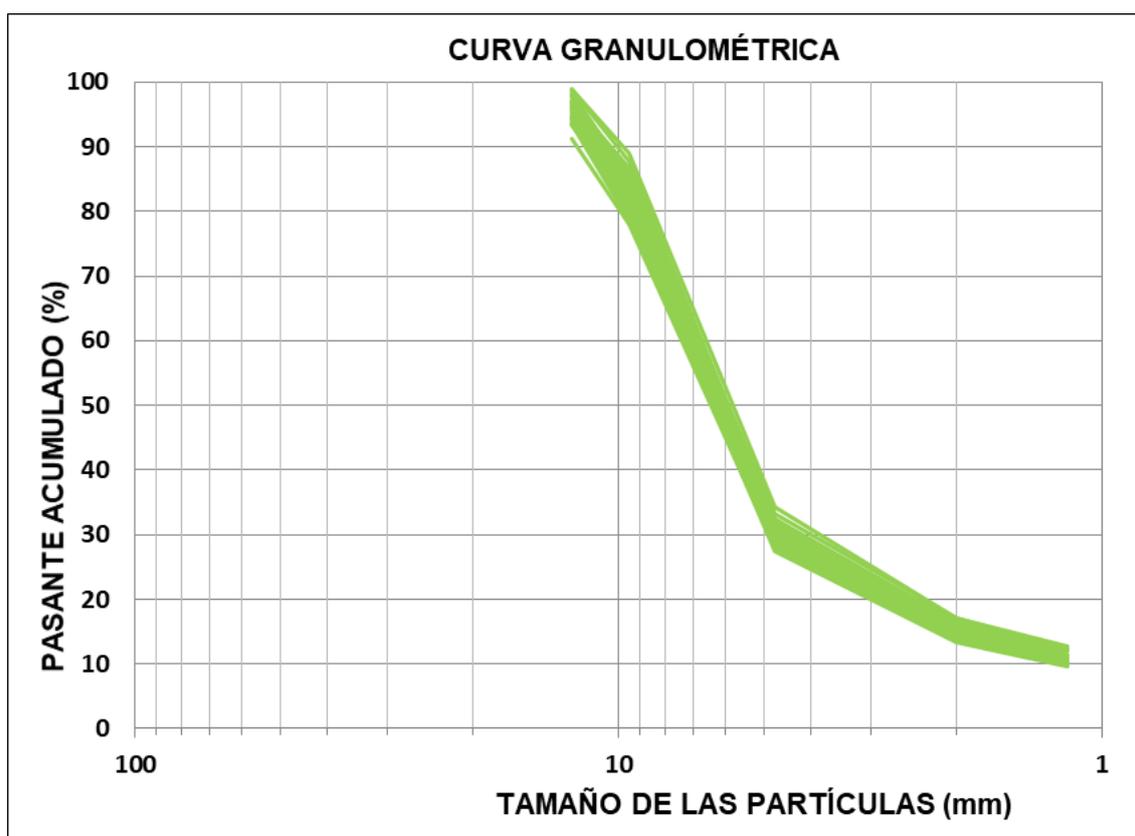


Figura 3.1 Curva granulométrica Formación "Cojitambo".

Fuente: Elaboración propia.

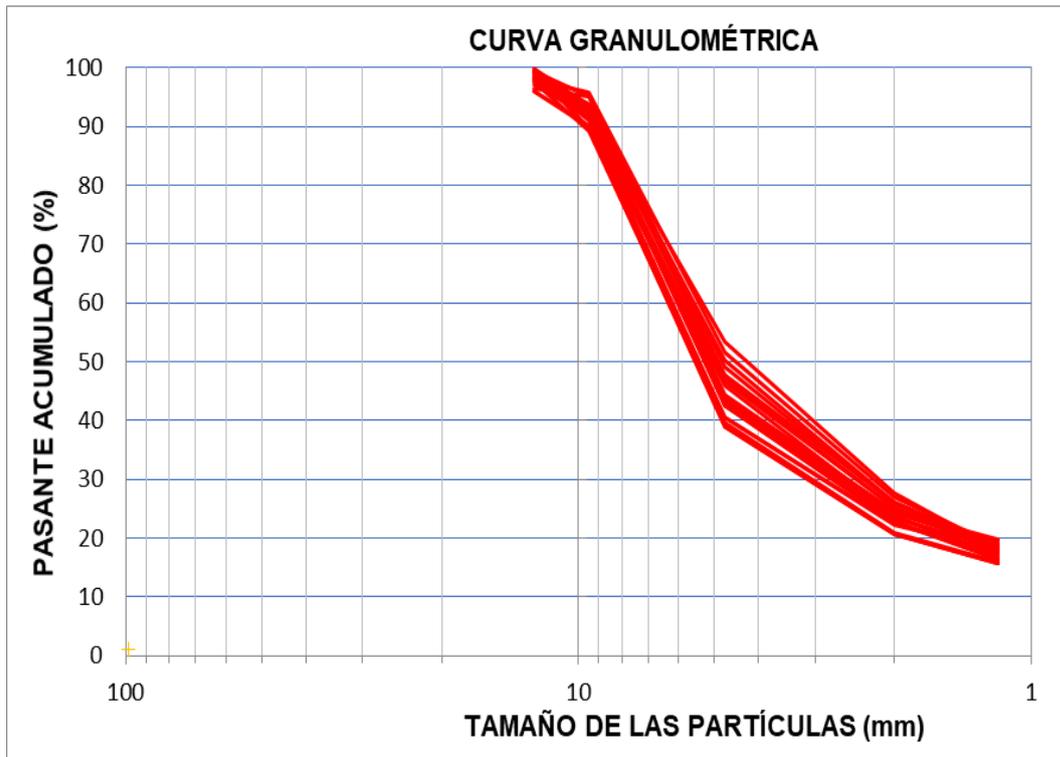


Figura 3.2 Curva granulométrica Formación “Racar”.

Fuente: Elaboración propia.

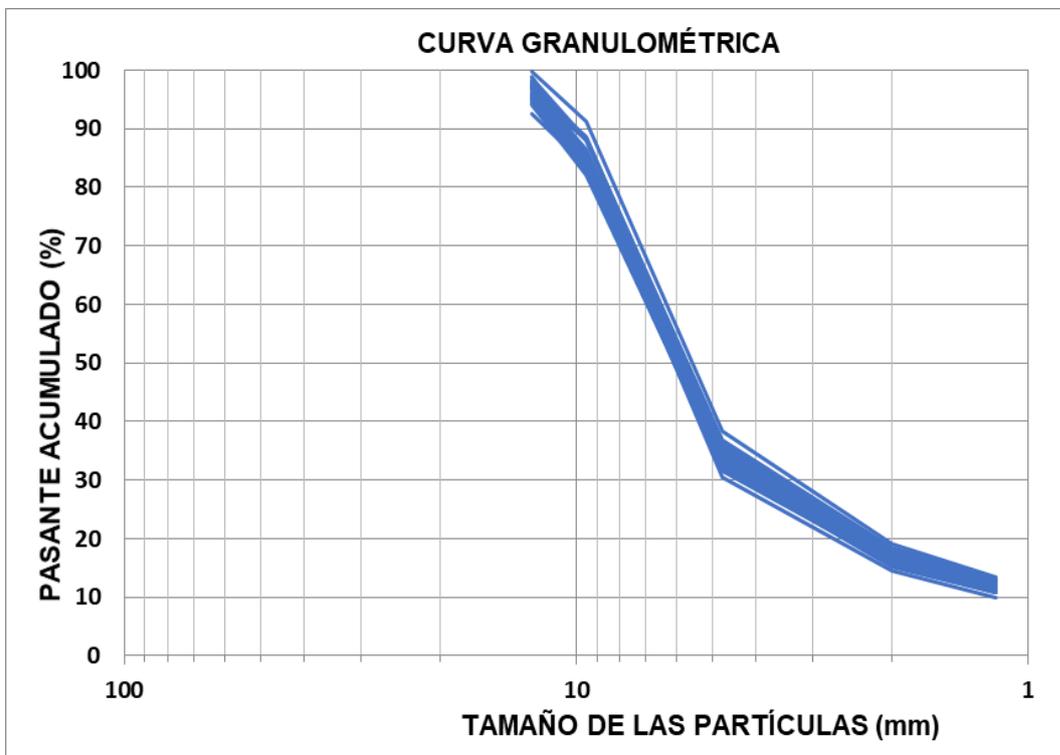


Figura 3.3 Curva granulométrica Formación “El Tahal”.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de ser analizadas las correspondientes curvas granulométricas, se puede determinar que, para cada zona de estudio se encuentra un área representada en la gráfica, la cual se forma únicamente, por la representación de las curvas granulométricas, a dicha área la denominamos “ÁREA GRANULOMÉTRICA”. La misma está compuesta por 30 curvas correspondientes a las muestras analizadas, obtenidas de los procesos realizados de trituración y clasificación.

3.2 Análisis de resultados de resistencia a la compresión simple

En esta etapa de estudio, se ejecutaron las pruebas de resistencia de compresión simple a cada una de las probetas hermanas (MARCADOR NEGRO), y con los valores obtenidos de las 30 probetas, se determinó el promedio de la resistencia en MPa.

Se utilizó la máquina Humboldt, que es una prensa con facultades para someter materiales a ensayos tanto de tensión y de compresión. Ésta se la puede observar en la (Figura 2.20).

La presión aplicada por la máquina Humboldt se consigue mediante placas o mandíbulas, las cuales son accionadas por un sistema hidráulico o de igual manera por tornillos. Esta permite calcular y comprobar la resistencia de diferentes tipos de materiales, para conseguir esto, la máquina posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta, midiendo en forma gráfica la deformación y la carga al momento de su ruptura. (Flores, 2019).

Para el óptimo uso de la máquina se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Adecuarla para cilindros, cubos, vigas y núcleos de mezclas.
- La capacidad de la maquina Humboldt es de 2500 a 250000 lb con una precisión de $\pm 0,5\%$ de la carga indicada.
- La configuración estándar incluye platos con cilindros de 6” x 12” (150mm x 300mm). (Flores, 2019)

Los resultados de compresión simple de cada una de las 3 zonas de estudio los detallaremos en las siguientes tablas:

Tabla 3.4 Valores de resistencia de compresión de “Cojitambo”, “Racar” y “El Tahual”.

| COJITAMBO | | RACAR | | EL TAHUAL | |
|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| # | RCS (MPa) | # | RCS (MPa) | # | RCS(MPa) |
| 1 | 9 | 1 | 19 | 1 | 27 |
| 2 | 51 | 2 | 24 | 2 | 12 |
| 3 | 38 | 3 | 24 | 3 | 18 |
| 4 | 10 | 4 | 19 | 4 | 12 |
| 5 | 45 | 5 | 11 | 5 | 35 |
| 6 | 36 | 6 | 24 | 6 | 29 |
| 7 | 26 | 7 | 29 | 7 | 38 |
| 8 | 20 | 8 | 21 | 8 | 34 |
| 9 | 14 | 9 | 11 | 9 | 22 |
| 10 | 36 | 10 | 24 | 10 | 50 |
| 11 | 43 | 11 | 18 | 11 | 12 |
| 12 | 35 | 12 | 35 | 12 | 19 |
| 13 | 10 | 13 | 24 | 13 | 63 |
| 14 | 447 | 14 | 22 | 14 | 10 |
| 15 | 41 | 15 | 20 | 15 | 29 |
| 16 | 45 | 16 | 15 | 16 | 15 |
| 17 | 18 | 17 | 22 | 17 | 25 |
| 18 | 16 | 18 | 24 | 18 | 37 |
| 19 | 19 | 19 | 26 | 19 | 32 |
| 20 | 14 | 20 | 26 | 20 | 53 |
| 21 | 11 | 21 | 34 | 21 | 22 |
| 22 | 12 | 22 | 19 | 22 | 30 |
| 23 | 46 | 23 | 21 | 23 | 19 |
| 24 | 10 | 24 | 10 | 24 | 30 |
| 25 | 14 | 25 | 15 | 25 | 13 |
| 26 | 14 | 26 | 48 | 26 | 19 |
| 27 | 12 | 27 | 23 | 27 | 10 |
| 28 | 11 | 28 | 34 | 28 | 33 |
| 29 | 11 | 29 | 28 | 29 | 56 |
| 30 | 17 | 30 | 20 | 30 | 41 |
| PROMEDIO | 24 | PROMEDIO | 23 | PROMEDIO | 28 |

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Propuesta de correlación

Una vez conocidos los resultados de las 3 zonas de estudio, se han desarrollado las gráficas de cada una de ellas, en las cuales se involucran el área granulométrica y la resistencia a la compresión simple de las rocas que han sido objeto de estudio. Cada una de las gráficas presentan su valor promedio de resistencia, todo lo antes mencionado se verá detallado a continuación:

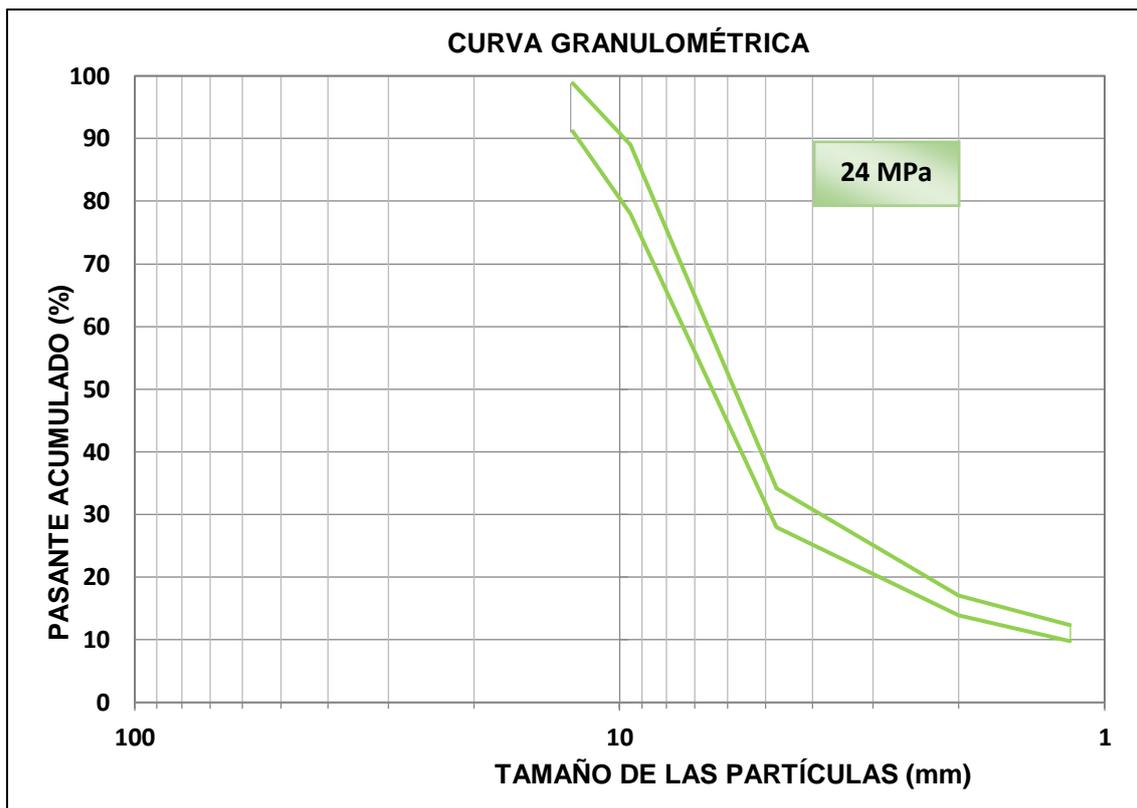


Figura 3.4 Área granulométrica Formación “Cojitambo”.

Fuente: Elaboración propia.

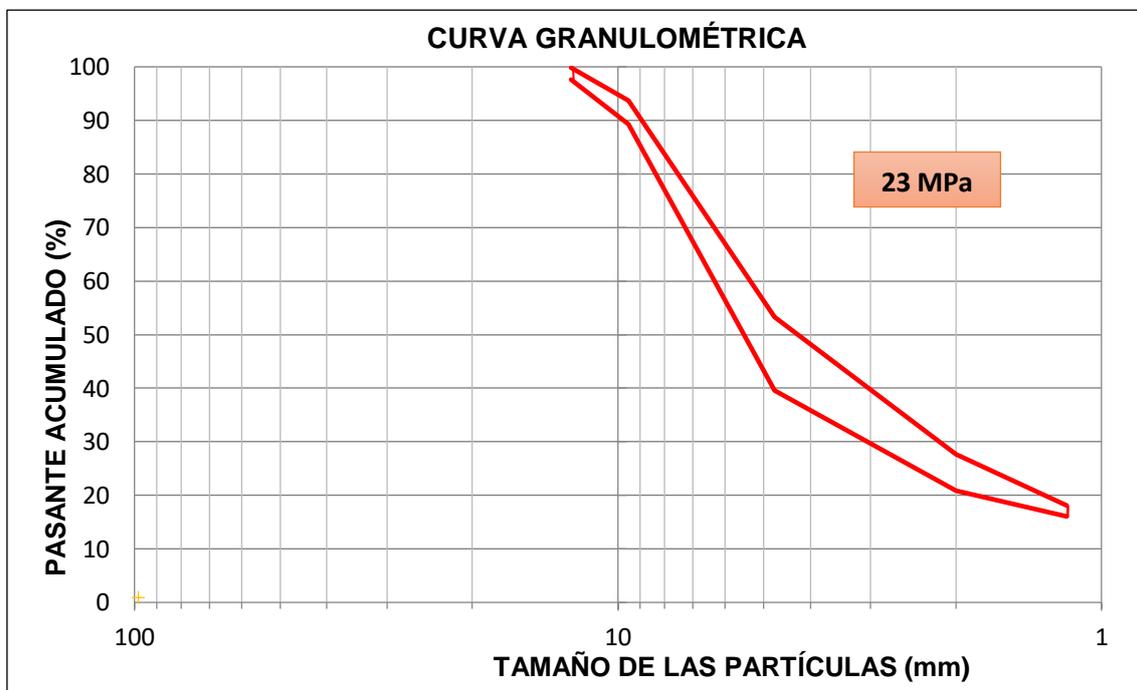


Figura 3.5 Área granulométrica Formación “Racar”.

Fuente: Elaboración propia.

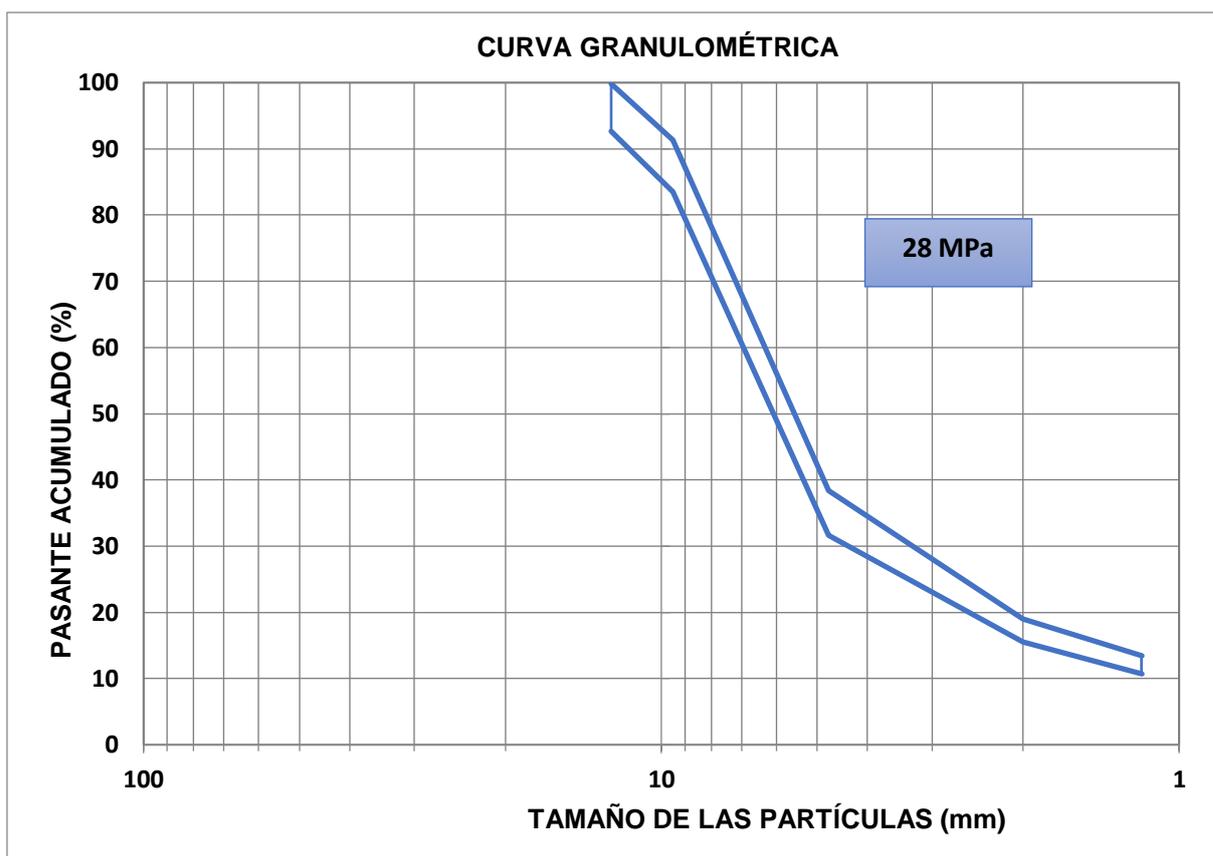


Figura 3.6 Área granulométrica Formación “El Tاهال”.

Fuente: Elaboración propia.

Con la ayuda de los tres gráficos anteriores, se consiguió establecer una gráfica final, en donde se observan las tres áreas granulométricas de cada zona de estudio, con su respectiva resistencia a la compresión. Obteniendo como resultado los siguientes valores para Cojitambo, Racar y el Tاهال: 24, 23 y 28 MPa respectivamente. Con esto se puede argumentar que, a mayor resistencia a la compresión simple, aumentara el porcentaje (%) de finos, producto del impacto en la trituración esto, se puede visualizar en tamices con tamaños de 1.18 a 4.75 mm, que fueron los utilizados, mientras que, a menor resistencia, el porcentaje de finos será menor, esto se refleja en los tamices restantes desde 4.75 a 12.5 mm.

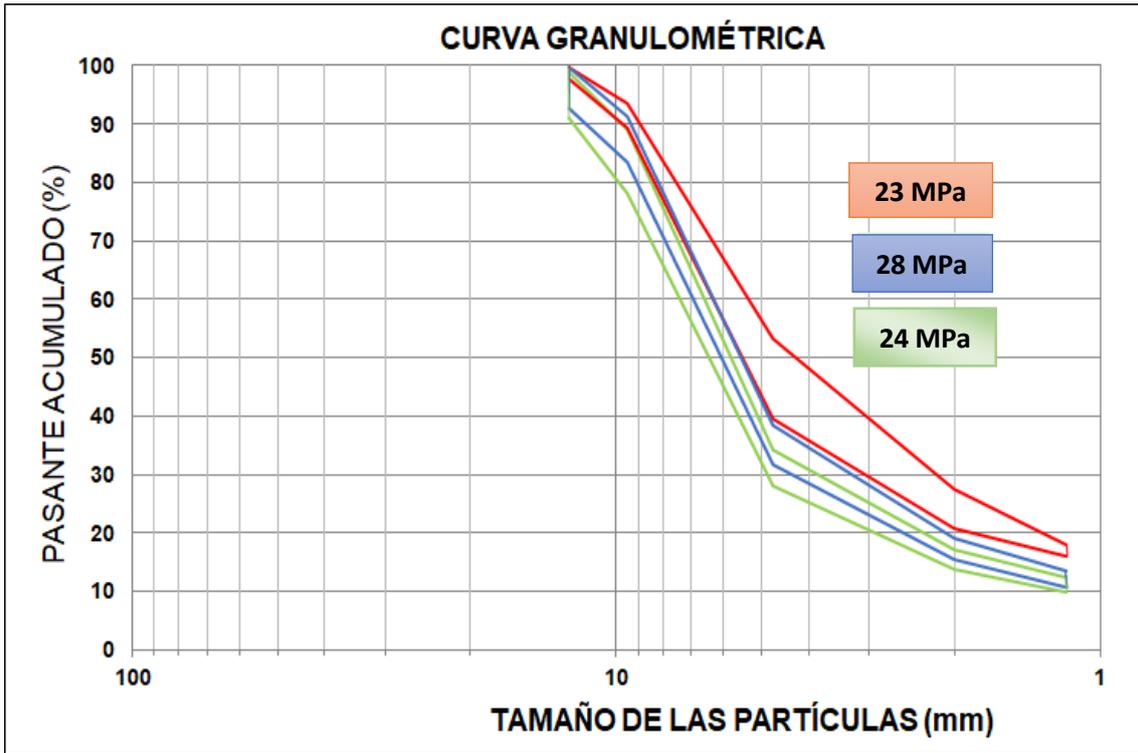


Figura 3.7 Áreas granulométricas de las 3 zonas de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Mediante la investigación realizada, se introdujo el concepto de “Área Granulométrica”, la cual se genera con muestras de similares características y propiedades físico-químicas, dicho concepto lo podemos observar en las gráficas de las curvas granulométricas generada para cada una de las zonas de muestreo.
- Uno de los procesos más importantes de este estudio de investigación, fue el ensayo de trituración y clasificación de las muestras, ya que permitió conocer la resistencia a la compresión de las rocas en un corto período de tiempo y sin un gasto significativo, lo cual es ventajoso comparado con los otros procesos que se realizan para obtener igual información, mediante el envío de muestras al laboratorio.
- Las curvas granulométricas, como podemos observar en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 que son las curvas de cada uno de los sitios de muestreo, presentan variaciones entre la curva de menor valor y la curva de mayor valor, la cual genera un área granulométrica limitada y marcada para cada una de las zonas realizadas.
- Analizando los resultados obtenidos en cada una de las zonas de muestreo (Cojitambo, Racar, El Tاهual) reconocemos que el trabajo empleado para la determinación en campo, de la resistencia a la compresión simple en rocas, se ve reflejado en que el aumento a la resistencia a la compresión, aumenta el porcentaje de finos, esto se observa en el porcentaje acumulado en los tamices finos de 1.18 mm a 4.75mm.
- Esta correlación obtenida es fundamental en la aplicación de estudios geotécnicos, análisis del comportamiento de la roca y clasificación de macizos rocosos, determinando el comportamiento de la roca, cuando está sometida a compresión, obteniendo su resistencia, sin necesidad de enviar muestras al laboratorio.
- Los valores resultantes de la resistencia a la compresión de la roca en cada una de las zonas de muestreo son los siguientes: para la zona de Cojitambo, el valor promedio es de 24 MPa, la zona de Racar tiene un valor promedio de 23 MPa, mientras que la zona de El Tاهual tiene un valor promedio a la resistencia de 28 MPa, dichos valores se definen específicamente con sus respectivas áreas granulométricas.

- Como podemos observar en la figura 3.7, las áreas granulométricas, se presentan con la resistencia a la compresión simple promedio, obteniendo un relación entre las curvas granulométricas y la resistencia a la compresión, lo que nos proporciona la idea de que se podría generar un modelo, para generalizar la determinación de la resistencia a la compresión de materiales distintos por este procedimiento.

Recomendaciones

- Realizar el mismo tipo de pruebas en materiales o rocas de diferentes sitios, para generalizar el procedimiento y poder obtener el mayor provecho de los resultados.
- Al momento de realizar el pesaje de las muestras en el proceso de clasificación, se debe tener mucho cuidado, ya que si nos equivocamos en el pesaje este podría alterar los resultados.
- El tiempo en el proceso de tamización de las muestras se debe realizar de una manera constante, para que los valores que se registren en este proceso sean lo mas semejantes posibles.
- Tanto en proyectos mineros y civiles, una de las etapas más importantes, es la determinación de la resistencia a la compresión de la roca, para ello se recomienda enviar una muestra al laboratorio, para que a partir de datos reales, se puedan correlacionar con los datos obtenidos por las curvas granulométricas, obteniendo una mayor certeza.
- Es recomendable ejecutar este estudio con un mayor número de tamices, en este caso se realizó con 5 tamices de diferentes medidas, lo cual nos proporcionó datos validos para verificar la existencia del área granulométrica. Sin embargo, con un mayor numero de tamices el resultado podra ser mas exacto.
- El proceso de trituración se lo debe ejecutar de la misma forma en cada una de las muestras, con material de entrada de iguales características geométricas, para que los resultados de la distribución de las partículas en la salida del proceso de trituración no se vean alterados.
- Los valores de la resistencia a la compresión de los materiales estudiados en este trabajo, deben ser verificados mediante el envío demuestras a un laboratorio certificado, con la finalidad de poseer áreas granulométricas con valores reales y garantizados.
- Pararealizar este estudio de investigación, lo óptimo sería conseguir materiales de los cuales ya se conozca el valor de resistencia a la compresión, para poder determinar, con este proceso si los valores determinados se ubican de forma coherente en la figura 3.7 y asi poder correlacionar dicho proceso.

Bibliografía

- Agcasco, R. (2007). *Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación*. Granada, España.
- Alex Portillo, J. B. (2019). *Diseño de una planta metalurgica circuitos trituracion y molienda*. Chihuahua.
- Blanc, E. (2017). *Tecnología de los Aparatos de Fragmentación y de clasificación Dimensional*. Madrid.
- Bustamante Fajardo, L. E., & Guillén Espinoza, C. X. (2020). *Análisis de la Granulometría fina y su relación a la Resistencia a Compresion Simple en rocas*. Cuenca.
- Flores, A. (2019). Correlacion de la distribución de partículas mediante el proceso de fgmentación para la determinación de la resistencia a la compresión simple de rocas.
- Gabriels, D., & Lobo, D. (2010). Metodos para determinar granulometria y densidad aparente del suelo. 37-39.
- Guaman Garcia, V. E., & Mendieta Girón, F. A. (2013). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construccion "Las Victorias"*. Cuenca.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2004). *Mecánica de Suelos*. Limusa S.A.
- Linan, C. C. (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas*. España.
- Luis Espinoza de Leon, V. M. (1984). *Teoria y practicas de trituración y molienda*. Izcalli.
- Luna, E. (2016). Elaboracion de guias practicas de procesos metalurgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay.
- mapamundi.online*. (2019).
- Martes Hernandez, L., De La Cruz, A., & Valdez, D. (2015). *Trituración y Moliendas*.

- Mendez, E. A. (2016). *Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay.*
- Miranda Ríos, J. C. (2014). *Máquinas Mineras.*
- Ortiz, E. T. (2005). *Diseño y Construcción de una Trituradora de Mandíbulas de Excentrica Elevada.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Perepérez Ventura, B., & Calavera Ruiz, J. (1981). *Relaciones entre la resistencia a compresión simple y la resistencia a tracción y el módulo de deformación en compresión bajo cargas de servicio de corta duración en los hormigones fabricados con cementos pa-350 del país valenciano.* Valencia.
- Salager, J.-L. (2007). *Granulometría Teoría.* Mérida.
- Tiburcio Martínez, J. (2012). *Comportamiento y Laboratorio de Suelos I.* Guerrero.
- Tocalino, R. (2020). *Fragmentación óptima de rocas.* Lima.
- Torrijo Echarri, J., & Franch i Vaca, J. (2008). *Fundamentos Básicos de Geotecnia.* Valencia.
- Vallejo, M., Colcha, V., Chávez, K., Villalta, J., Macas, J., & Lopez, S. (2016). *Análisis Granulométrico en agregado fino y grueso.* Riobamba.
- Verao, J. (2004). *Geotécnica-propiedades ingenieriles.*
- Viggiano-Guerra, J. (2015). *Propiedades Ingenieriles de las Rocas.* Morelia.