



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

**Propuesta de correlación entre el corte de rocas y el Índice de  
Point Load Test Is (50)**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

**PAÚL ANDRÉS ALMACHE RODRÍGUEZ**

**Director:**

**ERNESTO PATRICIO FEJOO CALLE**

**CUENCA – ECUADOR**

**2021**

## **DEDICATORIA**

La presente tesis se la dedico a toda mi familia, principalmente a mis padres Teodoro, Jakeline y Freddy, que, con sus valores inculcados, gran esfuerzo, sacrificio y por su ejemplo de trabajo han ayudado en mi formación como persona y en la culminación de mis estudios universitarios.

A mi hermano Freddy y mi abuelita Aida, por sus consejos y por haberme apoyado siempre; a mis amigos y compañeros por el apoyo constante, por haber compartido proyectos, ideas y por darme una mano sin esperar nada a cambio.

Dedico de manera especial a Stephanie Dávila por su apoyo, cariño y confianza, pues ella fue un principal cimiento y motivación para la construcción de mi vida profesional.

A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi persona una formación tanto como profesional y ser humano.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la fuerza y la capacidad de conseguir una de las metas más deseadas en mi vida, también por darme la fortaleza de no rendirme y seguir adelante.

A la Universidad del Azuay y a los ingenieros que influenciaron en el desarrollo de este trabajo, un especial agradecimiento a mi Director de Tesis el Ingeniero Patricio Feijoo, por el tiempo y disponibilidad que presento durante el desarrollo de este proceso.

A la Escuela de Ingeniería en Minas por la formación profesional y a los ingenieros Leonardo Núñez, Eduardo Luna, Patricio Feijoo, Fernando Valencia y Dr. Juan Calderón e Ing. Julia Martínez por haber compartido sus conocimientos y su amistad.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	iv
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	x
<b>RESUMEN</b> .....	xi
<b>ABSTRACT</b> .....	xii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	3
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	3
1.1 Geología y caracterización de las rocas .....	3
1.1.1 Clasificación de las Rocas.....	3
1.1.2 Ciclo de las rocas .....	7
1.1.3 Tipo de rocas plutónicas.....	9
1.1.4 Tipo de rocas volcánicas .....	11
1.1.5 Geología regional .....	13
1.1.6 Geología local .....	14
1.2 El corte en rocas .....	15
1.2.1 Importancia del disco de corte .....	17
1.2.2 Tipos de equipos de corte .....	17
1.3 Resistencia a la compresión simple.....	21
1.3.1 Aspectos de ensayos de compresión simple .....	23
1.4 El Índice de Point Load Test .....	27
1.4.1 Sistemas y máquina de Franklin .....	28
1.4.2 Metodología de obtención del $I_s$ (50).....	31

<b>CAPÍTULO II</b> .....	34
<b>EXPERIMENTACIÓN</b> .....	34
2.1 Número de muestras y preparación .....	34
2.2 Proceso de corte.....	37
2.2.1 Componentes y operación de la cortadora de disco (Covington's) .....	38
2.2.2. Corte de probetas .....	40
2.3 Ejecución del Índice de Point Load Test.....	44
2.3.1 Acoplamiento de las puntas cónicas .....	44
2.3.2 Comprobación de las probetas.....	45
2.3.3 Ruptura de probetas .....	46
2.3.4 Descripción de la tabla de las probetas después de la rotura .....	48
2.4 Determinación de la resistencia a la compresión simple.....	49
2.4.1 Ruptura de las probetas.....	50
2.4.2 Descripción de la tabla de las probetas ejercidas a compresión simple.....	52
<b>CAPÍTULO III</b> .....	53
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	53
3.1 Análisis de resultados de corte en rocas .....	53
3.2 Análisis de resultados del Índice de Point Load Test.....	55
3.3 Propuesta de correlación .....	58
3.3.1 Método de mínimos cuadrados .....	58
3.3.2 Correlación entre la compresión simple y la velocidad de corte .....	60
3.3.3 Resultado final de la correlación .....	63
3.4 Interpretación y análisis de resultados.....	64
<b>CONCLUSIONES</b> .....	66
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	67
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	68
<b>ANEXOS</b> .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo sedimentario .....	7
Figura 1.2 Ciclo de las rocas .....	8
Figura 1.3 Granito .....	9
Figura 1.4 Diorita .....	10
Figura 1.5 Gabro .....	10
Figura 1.6 Andesita porfídica.....	11
Figura 1.7 Riolita .....	12
Figura 1.8 Basalto .....	13
Figura 1.9 Hoja Geológica Azogues Escala 1:100000.....	14
Figura 1.10 Geología Local Cojitambo.....	15
Figura 1.11 Equipo Eléctrico Automático con Hilo Diamantado .....	18
Figura 1.12 Rozadora de Brazo.....	19
Figura 1.13 Máquina de Corte con Disco .....	19
Figura 1.14 Cortadora de Disco Covington's .....	21
Figura 1.15 Esquema con características principales de la prensa.....	24
Figura 1.16 Curva Tensión-Deformación .....	25
Figura 1.17 Curvas Tensión-Deformidad axial y Tensión-Deformación diametral .....	26
Figura 1.18 Ensayo de carga puntual mediante la prensa Franklin.....	28
Figura 1.19 Diagrama de una punta cónica.....	29
Figura 1.20 Ilustración sobre componentes de la máquina de Franklin.....	30
Figura 1.21 Determinación de las dimensiones de los fragmentos irregulares.....	32
Figura 2.1 Ubicación en coordenadas UTM WGS84 .....	34
Figura 2.2 Zona de estudio (Cojitambo) .....	35

Figura 2.3 Altura de la Probeta .....	36
Figura 2.4 Longitud de la Probeta.....	36
Figura 2.5 Ancho de la Probeta.....	37
Figura 2.6 Cortadora de Disco (Covington’s).....	37
Figura 2.7 Ilustración sobre componentes de la Cortadora de Disco (Covington’s) .....	38
Figura 2.8 Medición entre la mordaza y disco .....	40
Figura 2.9 Senalización de probetas.....	40
Figura 2.10 Inicio del corte de la probeta .....	41
Figura 2.11 Resultado del corte de la probeta.....	42
Figura 2.12 Plano con medidas para las puntas cónicas .....	44
Figura 2.13 Puntas cónicas acopladas a la prensa Humboldt.....	45
Figura 2.14 Mediciones de las probetas en centímetros con su relación “D=Y” y “L=X” .....	46
Figura 2.15 Marcación del punto intermedio en la parte superior e inferior de la probeta antes de la ruptura .....	46
Figura 2.16 Ubicación correcta de la probeta entre las puntas cónicas .....	47
Figura 2.17 Resultado de ruptura de la probeta .....	47
Figura 2.18 Ilustración de los componentes de la Máquina de Compresión “Humboldt” .....	49
Figura 2.19 Relación de diámetro y largo de la probeta (D/L) .....	50
Figura 2.20 Posicionamiento de la probeta .....	51
Figura 2.21 Inicio de ruptura de la probeta .....	51
Figura 2.22 Resultado de ruptura de la probeta .....	52
Figura 3.1 Gráfico de correlación entre el $I_{s(50)}$ y la Velocidad de Corte .....	58
Figura 3.2 Proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados .....	59

Figura 3.3 Gráfico de correlación entre el Is y la Velocidad de Corte.....62

Figura 3.4 Proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados .....62

Figura 3.5 Correlaciones de Compresión Simple e Índice de Point Load Test con la Velocidad de Corte.....63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales rocas ígneas .....	4
Tabla 1.2 Composición química de algunas rocas plutónicas típicas en porcentaje.....	5
Tabla 1.3 Metamórficas provenientes de la metamorfosis regional .....	6
Tabla 1.4 Clasificación de la resistencia a la compresión simple .....	22
Tabla 1.5 Clasificación según su cohesión y ángulo de fricción .....	23
Tabla 2.1 Dimensiones de las probetas .....	35
Tabla 2.2 Tiempo de Corte de las Probetas.....	43
Tabla 2.3 Dimensiones de las probetas en centímetros con sus respectivas fuerzas para determinar el Índice de Point Load Test .....	48
Tabla 2.4 Dimensiones de las probetas en centímetros con sus respectivas fuerzas a la compresión simple .....	52
Tabla 3.1 Resultados del Corte de las probetas del Cojitambo.....	53
Tabla 3.2 Resultado de cálculos de la ruptura de las probetas en el ensayo del Índice de Point Load Test .....	56
Tabla 3.3 Resultado de cálculos de la ruptura de las probetas en compresión simple.....	60

## ÍNDICE DE ANEXOS

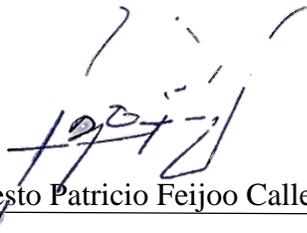
Anexo 1 Ubicación de la probeta en la máquina de disco diamantado Covington's .....	70
Anexo 2 Material rocoso (andesita) del Cojitambo .....	70
Anexo 3 Probetas marcadas antes del proceso de corte .....	71
Anexo 4 Placa con descripción del modelo de la máquina de compresión Humboldt ....	71
Anexo 5 Resultado de ruptura de la probeta entre las puntas cónicas .....	72
Anexo 6 Vista superior de ruptura de la probeta en compresión simple .....	72
Anexo 7 Distribución de puntos Is en relación a la Velocidad de Corte .....	73

## **PROPUESTA DE CORRELACIÓN ENTRE EL CORTE DE ROCAS Y EL ÍNDICE DE POINT LOAD TEST IS (50)**

### **RESUMEN**

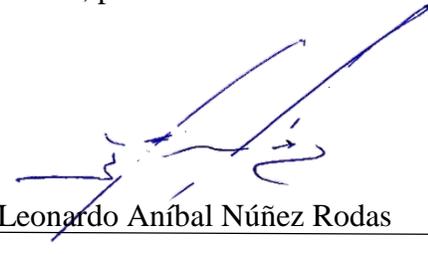
El presente trabajo tuvo como objetivo principal, determinar la correlación entre el corte en rocas y el Índice de Point Load Test, con la finalidad de poder ejecutar en campo una metodología sencilla pero efectiva, para determinar la resistencia a la compresión simple. Para el estudio fue necesario la obtención de muestras de roca provenientes del cerro Cojitambo (Provincia de Cañar) para posteriormente elaborar 60 probetas con dimensiones de 5x5x10 cm. En estas probetas se realizó un corte, donde se tomó el tiempo de ejecución, para obtener de esta manera ejemplares de 5x5x5 cm y 5x5x4,3 cm, aproximadamente. Con las probetas de 5x5x5 cm se ejecutó la ruptura en la prensa Humboldt acoplada con puntas cónicas, y en el caso de las muestras de 5x5x4,3 cm se utilizó una prensa de compresión simple. Finalmente se elaboraron correlaciones con el Índice de Point Load Test  $Is_{(50)}$  y los ensayos de compresión simple, en relación a la velocidad de corte, obteniendo como resultado final una fórmula de dichas correlaciones.

**Palabras clave:** correlación, compresión, rocoso, probetas, prensa.



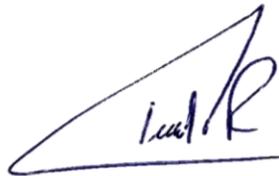
Ernesto Patricio Feijoo Calle

**Director del Trabajo de Titulación**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



Paúl Andrés Almache Rodríguez

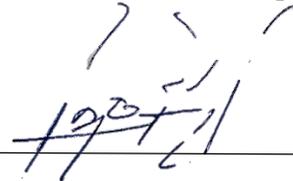
**Autor**

## **CORRELATION PROPOSAL BETWEEN THE ROCK CUT AND THE POINT LOAD TEST INDEX IS (50)**

### **ABSTRACT**

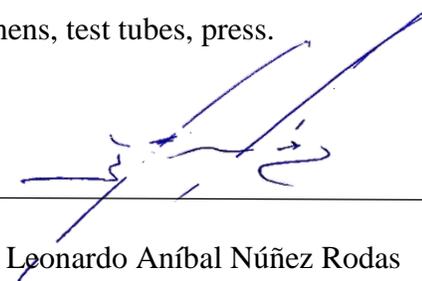
The main objective of this investigation and work, is to determine a correlation between the rock cut and the Point Load Test Index, in order to be able to execute a simple but effective methodology in field to determine the Simple Compression Resistance, for which, it will be initially necessary to obtain rock samples from Cojitambo (Cañar Province) and later elaborate 60 specimens with dimensions of 5x5x10 cm. In these test tubes, a cut was made in which the execution time was taken, in order to obtain specimens of 5x5x5cm and 5x5x4.3 cm approximately. With the 5x5x5cm specimens or test tubes, the rupture was executed in the Humboldt press coupled with conical tips, and in the case of the 5x5x4.3 cm samples, they were cut in the simple compression press. Afterwards, correlations were built after using the Point Load Test Index IS (50) and Simple Compression, in relation to the cutting speed, in order to obtain a formula of said correlations as a final result.

Keywords: correlation, compression, rocky, specimens, test tubes, press.



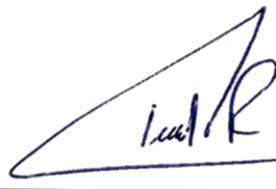
Ernesto Patricio Feijoo Calle

**Thesis Director**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

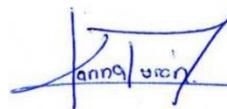
**Faculty Coordinator**



Paúl Andrés Almache Rodríguez

**Author**

**Translated by**



Karina Durán

Paúl Andrés Almache Rodríguez

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Enero, 2021

## **PROPUESTA DE CORRELACIÓN ENTRE EL CORTE DE ROCAS Y EL ÍNDICE DE POINT LOAD TEST IS (50)**

### **INTRODUCCIÓN**

Antes de realizar cualquier tipo de actividad minera es importante determinar las características del material rocoso existente, sobre el cual se van a desarrollar las mismas. Estableciendo principalmente los parámetros adecuados para la ejecución de taludes o túneles. Para todo este proceso, es necesario el envío de muestras al laboratorio, ya que no siempre se cuentan con los equipos necesarios para el análisis de las muestras in situ.

Uno de los más grandes problemas en explotación minera ya sea en subterránea o a cielo abierto, es el análisis de las muestras para la obtención de la resistencia del material, ya que esto involucra un costo alto. Este costo elevado, se debe a que a medida que avanza la explotación se necesitan desarrollar varios análisis, sumado a ello se involucra la necesidad de transportar las muestras hacia los laboratorios para sus debidos estudios, todo esto genera costos elevados y retrasos en la obtención de resultados.

No hay estudios existentes de propuestas de correlación entre la velocidad de corte de rocas y el Índice de Point Load Test Is (50), en el presente trabajo se determinó la correlación antes mencionada, además de la compresión simple con relación a la velocidad de corte de rocas. De esta forma se intenta generar una alternativa para hallar la resistencia de la roca, sin la necesidad de enviar constantemente varias muestras a laboratorios, lo que involucra menores costos y retrasos en el desarrollo de la explotación minera.

Los resultados obtenidos se podrán aplicar a diferentes tipos de materiales, teniendo en cuenta el proceso secuencial desarrollado en la presente investigación, para garantizar adecuados resultados. El resultado final fue la obtención de una ecuación correspondiente a las dos correlaciones anteriormente mencionadas, que, como ya se había indicado previamente servirá como una alternativa en los procesos mineros.

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Geología y caracterización de las rocas

La Geología es una ciencia que busca comprender la tierra y se considera una ciencia universal. Una gran parte de la Geología se basa en investigaciones y experimentos realizados en campo. Sin embargo, la Geología también se lleva a cabo en el laboratorio, por ejemplo, el estudio de diversos materiales terrestres, mediante el uso de microscopios y pruebas a las que son sometidas las muestras geológicas, permiten comprender muchos procesos básicos. La geología generalmente requiere conocimientos de: física, química y biología (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La Geología se ha dividido históricamente en Geología física y Geología histórica, aunque ahora hay una tendencia a hablar más sobre Geodinámica interna y externa. En Geología podemos destacar algunas ramas como: Estratificación, Paleontología, Mineralogía, Petrología, Geomorfología (Alamo, 1994).

##### 1.1.1 Clasificación de las Rocas

Las rocas son agregados naturales de partículas minerales, combinadas mediante una fuerte cohesión permanente. Si en un material su resistencia a la compresión simple (sin drenaje) es superior a  $5 \text{ kg / cm}^2$ , generalmente se considera como roca (Gonzalez M. , 2001).

Las rocas que forman la corteza terrestre se dividen en tres categorías: rocas ígneas, rocas metamórficas y rocas sedimentarias.

**Las rocas ígneas:** Se forman al enfriarse y solidificarse los aglomerados del fluido caliente llamado magma. La composición química de los primeros 16 km de la corteza, muestra claramente que algunos elementos como el Si, O, Fe y Al dominan y representan aproximadamente el 87%, seguidos de elementos como los alcalinos y alcalinos térreos,

entre los cuales se encuentran: Ca, Mg, Na y K. En una pequeña proporción se encuentran elementos como: Ti, P, Mn, S, Cl y C (Besoain, 1970).

Tabla 1.1. Principales rocas ígneas.

Clasificación por origen	Clasificación por composición			
	(SiO <sub>2</sub> > 65%) Ácida	(SiO <sub>2</sub> 66-62%) Semi-ácida	(SiO <sub>2</sub> 66-52%) Semi-básica	(SiO <sub>2</sub> 52-45%) Básica
<b>Volcánica</b>	Riolita	Traquita	Andesita	Basalto
<b>Hipabisal</b>	Pórfido granítico	Pórfido sienítico	Pórfido diorítico	Dolerita
<b>Plutónica</b>	Granito	Sienita	Diorita	Gabro
<b>Minerales principales</b>	Ortosa, plagioclasa, cuarzo y biotita	Ortosa, plagioclasa, biotita, hornblenda y la mayoría sin cuarzo	Plagioclasa, biotita, hornblenda y augita	Plagioclasa, augita y olivino
<b>Características</b>	Claras=Leucocratas Livianas sálicas			Obscuras=melanocratas Pesadas félicas

Fuente: (Besoain, 1970).

De acuerdo con su profundidad y método de cristalización, se pueden dividir en tres categorías: rocas hipabisales, rocas plutónicas y rocas volcánicas.

1. **Las rocas plutónicas:** Son aquellas rocas de grano grueso que suelen cristalizar en grandes masas al interior de la corteza terrestre, tienen un enfriamiento lento y un claro ejemplo es el granito (Besoain, 1970).

Tabla 1.2. Composición química de algunas rocas plutónicas típicas en porcentaje.

	<b>Granito</b>	<b>Sienita</b>	<b>Gabro</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	70.2	60.2	48.2
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14.5	16.3	17.9
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1.6	2.7	3.2
<b>FeO</b>	1.8	3.3	6
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.39	0.67	0.97
<b>CaO</b>	2	4.3	11
<b>MgO</b>	0.88	2.5	7.5
<b>MnO</b>	0.12	0.14	0.13
<b>K<sub>2</sub>O</b>	4.11	4.5	0.89
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3.5	trazas	2.6
<b>CO<sub>2</sub></b>	trazas	trazas	trazas
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.19	0.28	0.28
<b>SO<sub>3</sub></b>	trazas	trazas	trazas
<b>S</b>	trazas	trazas	trazas
<b>HOH</b>	trazas	trazas	trazas

Fuente: (Besoain, 1970).

2. **Las rocas hipabisales:** Son rocas formadas por cristales de tamaño mediano, y sus procesos de enfriamiento y cristalización están centrados. Por lo general, aparecen a manera de pequeñas intrusiones como diques. Muchas de estas rocas son diabasas con un notable desarrollo de la estructura porfídica (Besoain, 1970).
3. **Las rocas volcánicas:** Son rocas producidas mediante un rápido enfriamiento de la lava en la superficie de la tierra. Muchas de estas rocas son basaltos (Besoain, 1970).

Dentro de las rocas ígneas existen rocas extrusivas que cristalizaron en la superficie (rocas volcánicas) y rocas intrusivas aquellas que lo han hecho en el interior de la tierra (plutónicas e hipabisales) (Besoain, 1970).

**Las rocas metamórficas:** Son rocas ígneas o rocas sedimentarias cuya forma, textura, estructura o composición ha cambiado. En las rocas metamórficas, la estructura original y la textura o composición mineralógica de la roca madre a menudo desaparecen. Las rocas metamórficas vienen en numerosas variedades, dependiendo de: combinaciones de agentes metamórficos, intensidad y el tipo de roca madre; por lo tanto, se encuentran una gran variabilidad de minerales presentes en las rocas metamórficas (Godoy, 2005).

Las rocas metamórficas más importantes se muestran en la Tabla 1.3. Entre ellas se encuentra el gneis con una composición similar al granito que contienen elementos negros, ricos en minerales ferromagnéticos (biotita, anfíbolita) y elementos blancos, ricos en cuarzo y feldespato. Además se encuentran rocas como el Esquisto de mica, las cuales poseen un alto metamorfismos y están cubiertas de minerales de filita (Besoain, 1970).

Tabla 1.3. Metamórficas provenientes de la metamorfosis regional.

Profundidad	Principales componentes	Estructura	Roca principal	Roca secundaria
Epizona Zona de transformación (superior)	cuarzo, sericita, clorita, talco y anfíbol	grano fino esquistosa	pizarra sericitica	pizarra (arcillosa)
Mesozona Zona de transformación (intermedia)	cuarzo, muscovita, biotita, epidota, anfíbol, distena y granate	grano medio esquistosa	esquisto micáceo	esquisto micáceo
Katazona Zona de transformación (profunda)	cuarzo, ortoclasa, plagioclasa, biotita, piroxeno, anfíbol, silimanita, distena y granate	grano grueso a medio débilmente pizarroso hasta casi compacta	gneis ortoclásico	gneis silimanítico

Fuente: (Besoain, 1970).

**Las rocas sedimentarias:** Son de origen exógeno y provienen de cambios meteorológicos, químicos y biológicos en las rocas existentes. Son de origen secundario y los productos detríticos resultantes se transportan en suspensión o se disuelven parcialmente en el agua, para finalmente depositarse como capas o estratos en cuencas de sedimentación (Besoain, 1970).

Las rocas sedimentarias son de gran importancia para la formación del suelo porque tienen una superficie específica, más grande que las rocas ígneas o metamórficas, están menos consolidadas y esto permite un asentamiento biótico rápido y un desarrollo más rápido (Besoain, 1970).

La siguiente ilustración muestra un diagrama simple del ciclo sedimentario, es decir, los cambios que experimentan la roca parental y sus sucesivas transformaciones.

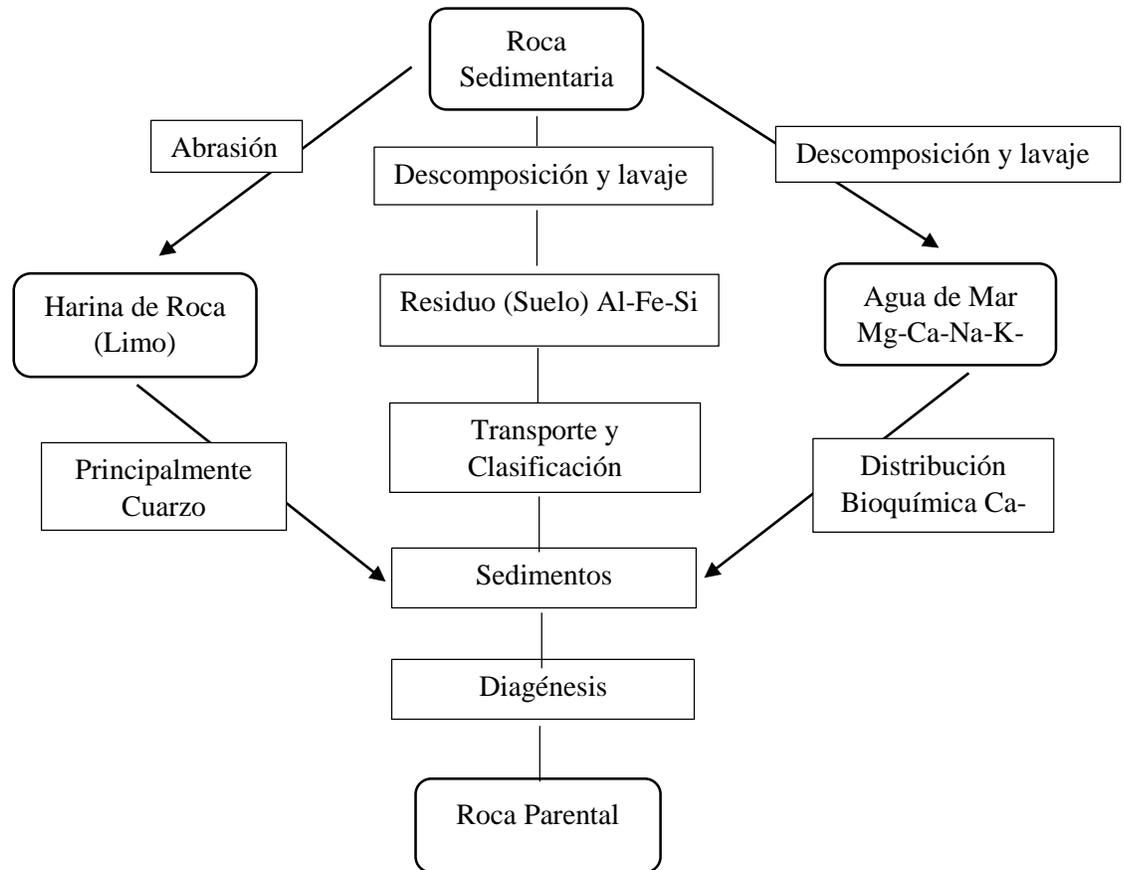


Figura 1.1. Ciclo sedimentario.

Fuente: (Besoain, 1970).

### 1.1.2 Ciclo de las rocas

Una roca es un sistema fisicoquímico con fases equilibradas (minerales), es decir, en las condiciones del sistema, ningún mineral crece a expensas de otro. Sin embargo, el equilibrio puede romperse si las sustancias que causan variaciones en la composición química, ingresan al sistema o si se intercambia energía con otros sistemas en los que los cambios de temperatura y presión modifican significativamente el mineral. Por lo tanto, un cierto tipo de roca, puede convertirse en otro tipo de roca, según las condiciones a las que esté expuesta mediante procesos geológicos. Esta serie de procesos se denominó Ciclo de las Rocas o Ciclo Geológico (Lopez, et al., 2008).

El ciclo de rocas da a conocer, que todos los tipos de rocas superficiales están expuestas a la erosión, el transporte y la sedimentación, donde al final del ciclo sedimentario, luego

de ser depositados los materiales, sufren una alteración física y química que provoca su compactación lo que se conoce con el término genérico de diagénesis, convirtiendo a los sedimentos en rocas sedimentarias (Lopez, et al., 2008).

El ciclo no es unidireccional, de modo que una roca sedimentaria puede sufrir epigénesis y puede cambiar a otra roca sedimentaria. Este ciclo no solo se produce en rocas sedimentarias, por ejemplo; una roca metamórfica puede transformarse en otra roca metamórfica, así como una roca plutónica puede estar sujeta a deformaciones y recrystalizaciones que logran la apariencia de una roca metamórfica. Las intrusiones magmáticas pueden conducir a la formación de aureolas de metamorfismo de contacto, en rocas encajantes y en rocas metamórficas (Lopez, et al., 2008).

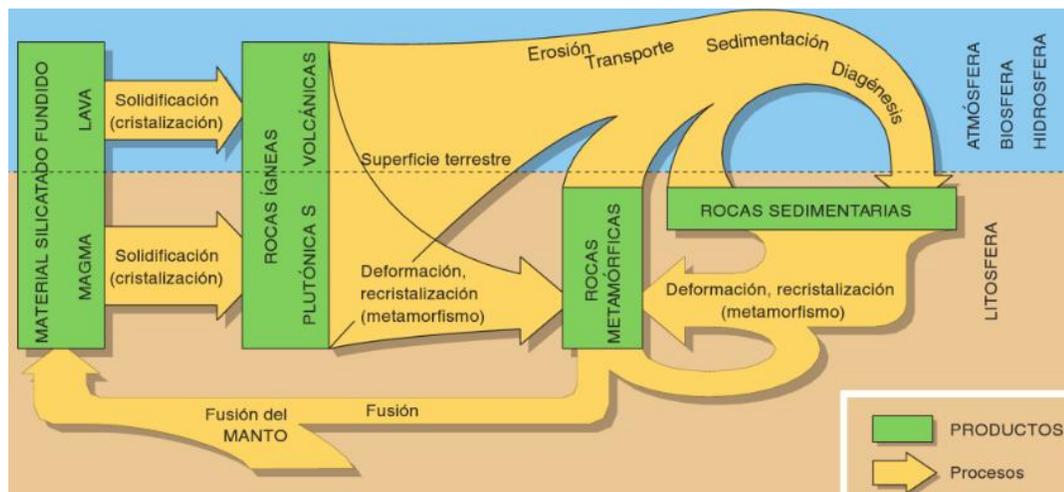


Figura 1.2. Ciclo de las rocas.

Fuente: (Lopez, et al., 2008).

### 1.1.3 Tipo de rocas plutónicas

**Granito:** Es una roca fanerítica que consiste en aproximadamente 25 % de cuarzo y cerca del 65 % de feldespato, principalmente de variedades ricas en potasio y sodio, el 10% está compuesto de mica que puede ser moscovita. Los cristales de cuarzo, son de forma esférica, vidriosos y de color gris claro. En contraste, los cristales de feldespato no son vidriosos, generalmente son de color blanco a gris o de color rosa salmón, y tienden a tener formas rectangulares y no esféricas. Cuando el feldespato potásico domina, el granito es de color rosa oscuro, casi rojizo (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.3. Granito.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

**Diorita:** Es una roca de intrusión, de grano grueso que se asemeja al granito gris. Sin embargo, se diferencia del granito ya que carece de cristales de cuarzo visibles, y porque contiene un mayor porcentaje de silicatos oscuros. La composición mineral de la diorita es esencialmente plagioclasa, rica en sodio y anfíboles, con una cantidad mínima de biotita. Dado que los granos de feldespato son claros y los cristales de anfíboles son oscuros parecen ser aproximadamente iguales en abundancia, la diorita tiene un aspecto de sal y pimienta (Figura 1.4) (Tarbuck & Lutgens, 2005).

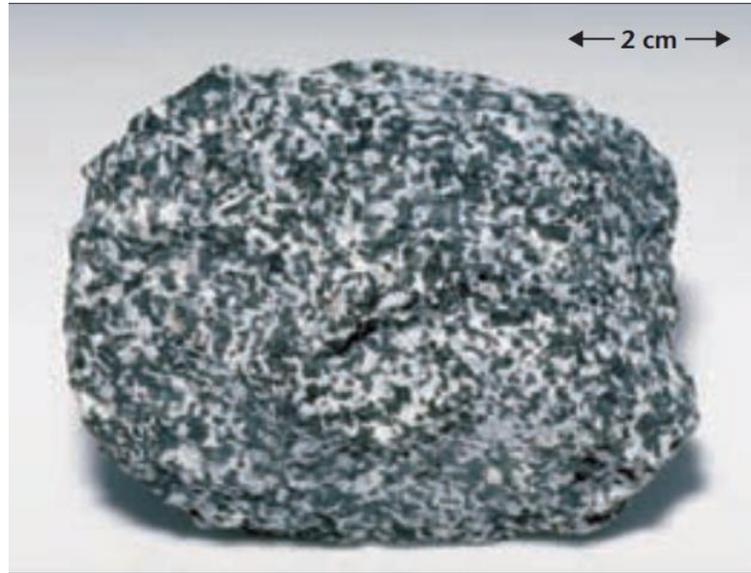


Figura 1.4. Diorita.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

**Gabro:** Es el equivalente intrusivo del basalto. Tiene tonalidades de colores que van de verde muy oscuro a negro y se compone principalmente de piroxeno y plagioclasa rica en calcio. Si bien, el gabro no es una parte común de la corteza continental, representa un porcentaje significativo de la corteza oceánica. Grandes porciones del magma que formaron los depósitos subterráneos, que una vez alimentaron las erupciones basálticas eventualmente se solidificaron, formando gabros (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.5. Gabro.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### 1.1.4 Tipo de rocas volcánicas

**Andesita:** Es una roca gris medio, de grano fino, de origen volcánico. La andesita a menudo muestra una textura porfídica (Figura 1.6). Si este es el caso, los fenocristales son generalmente cristales de plagioclasa rectangulares transparentes o cristales de anfíboles negros alargados. La andesita contiene pequeñas cantidades de cuarzo (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.6. Andesita porfídica.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

**Riolita:** Es el equivalente extrusivo del granito, y como el granito, consiste esencialmente en silicatos claros (Figura 1.7). Este hecho explica su color, que generalmente es de marrón claro a rosado o, a veces, presenta un color gris claro. La riolita es afanítica y a menudo contiene fragmentos vítreos y huecos que indican un enfriamiento rápido en un ambiente cerca de la superficie. Si la riolita contiene fenocristales, estos generalmente son pequeños y están hechos de cuarzo o feldespato de potásico. A diferencia del granito, que está muy extendido en la corteza terrestre, los depósitos de riolita son menos comunes y generalmente menos voluminosos (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.7. Riolita.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

**Obsidiana:** La obsidiana es una roca con un enlace atómico desordenado porque no tiene una fórmula química bien definida. La textura de la obsidiana es afanítica. En otros casos, cuando el magma se enfría con bastante rapidez, se forman pequeños granos de mineral que a veces requieren el uso de una lupa para identificarlos (Rodríguez, 2004).

**Basalto:** Es una roca volcánica de color verde oscuro a negro de grano fino, que consiste principalmente en piroxeno y plagioclasa rica en calcio con pequeñas cantidades de olivinos y anfíboles (Figura 1.8). Si el basalto es porfídico, generalmente contiene fenocristales de plagioclasa de calcio pequeños y claros, mientras que existen casos en que los fenocristales de olivino, presentan un aspecto vítreo incrustados en una pasta oscura (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.8. Basalto.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### **1.1.5 Geología regional**

Las cotas tienen una variación que oscila entre 2.000 y 2.900 metros, el drenaje se dirige hacia la Cuenca Amazónica. La población se concentra en áreas que confirman una cuenca de sedimentos en zonas que son menos escarpadas. (Bristow & Guevara, 1980).

Aquí se encuentran rocas sedimentarias y volcánicas de gran espesor del terciario superior y del cuaternario, ocupan la cuenca de la ciudad de Cuenca y descansan sobre las rocas volcánicas continentales y rocas marinas cretácicas sedimentarias. Al este de las Cordilleras orientales, se forman rocas metamórficas del Paleozoico o Mesozoico (Bristow & Guevara, 1980).



El yeso es abundante en casi todos los niveles, y se han observado calizas cristalinas de 2 metros de largo y 50 centímetros de espesor. (Bristow & Guevara, 1980).

En la **Formación Azogues** hay una superposición con la Formación Loyola en la base. La secuencia está predominada por areniscas gruesas tobáceas, que se caracterizan por su color café, pero los depósitos de limo y arcilla generalmente no tienen más de 1 metro de espesor. Se puede encontrar un conglomerado basal bien desarrollado, donde la formación ha superado al subyacente. La unión superior con Guapán es relativamente gradual. El espesor máximo se estimó en 280 metros. (Bristow & Guevara, 1980).

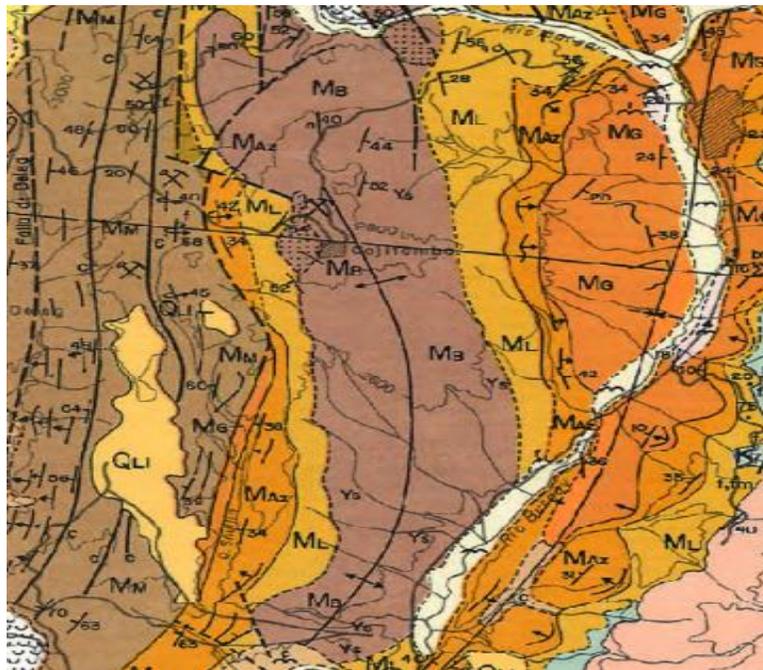


Figura 1.10. Geología Local Cojitambo.

Fuente: (Bristow & Guevara, 1980).

## 1.2 El corte en rocas

Una de las propiedades a tener en cuenta al cortar rocas, es la versatilidad de la máquina de corte, particularmente con respecto a la posibilidad de variar el rendimiento y la velocidad periférica del disco durante el proceso de corte (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

En particular, en los túneles, el corte puede producir excavaciones que se acercan mucho a la forma y al tamaño deseado, lo que reduce el costo de revestimientos adicionales debido a la rotura excesiva y sobre todo, se reduce el número de personas expuestas a condiciones subterráneas peligrosas, como la recolección y el manejo de explosivos (Vogt, 2016).

Si el corte se puede aplicar especialmente en zonas estrechas, se genera la posibilidad de reducir significativamente la disgregación de los depósitos, ya que no se utiliza explosivos, se reducen los requisitos de sismicidad y de ventilación, lo que reduce tanto el riesgo como el costo (Vogt, 2016).

En túneles y otras concentraciones que podrían estar cerca de asentamientos humanos, el corte genera significativamente menor vibración y ruido que el uso de explosivos. Por lo tanto, la roca es más resistente y segura (Vogt, 2016).

Debe tenerse en cuenta que, cortar un material requiere el consumo energético de la sierra, de modo que para materiales duros y para condiciones de corte altos (especificando la velocidad de corte o régimen, como la superficie de la roca cortada por unidad de tiempo) la potencia requerida puede ser superior a la suministrada. En estos casos, y si se va a mantener el régimen de corte, se puede aumentar la velocidad periférica del disco, reduciendo así el consumo de energía (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

El consumo de energía de la máquina (para el mismo régimen de corte) también se puede reducir, disminuyendo la profundidad de corte y aumentando la velocidad transversal del disco (esta es la velocidad de movimiento del disco con respecto a la roca que se está cortando). En general, cuanto mayor es el consumo de energía, mayor es el flujo de refrigerante (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

El refrigerante es otro factor a considerar. Su trabajo es enfriar (especialmente el diamante), lubricar (reducir la fricción entre el diamante y la superficie de la roca), lavar (eliminar las astillas y el lodo creado en el corte de la roca) y facilitar la precipitación de estos lodos. La efectividad del tipo de refrigerante, depende de la composición de los segmentos y las propiedades de la roca a cortar. En este sentido, la elección correcta de

refrigerante puede extender la vida útil del disco y reducir el consumo energético, además del ruido generado durante el corte (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

### **1.2.1 Importancia del disco de corte**

El disco consta de un núcleo o núcleo metálico y una corona o segmento formado por una matriz de enlace metálico (generalmente de bronce o cobalto y a veces con diferentes proporciones de wolframio y níquel) que contiene pequeños cristales de diamante (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

Hay tres tipos básicos de discos de diamante: aquellos con un borde continuo (poco utilizado en los aserraderos de rocas ornamentales), aquellos con segmentos de ranuras normales (más comúnmente utilizados para mármoles, granitos y pizarras) y aquellos con segmentos con ranuras reducidas (que permiten tener mejor calidad de superficie, aunque menor velocidad de corte que las ranuras normales) (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

Todos estos componentes, así como su diseño (diámetro, morfología de los segmentos, tamaño del diamante, etc.) determinan la idoneidad de un disco en particular, para cortar los diversos tipos de materiales (Suarez del Rio, Rodriguez, Calleja, & Ruiz de Argandoña, 1998).

### **1.2.2 Tipos de equipos de corte**

Se deben tener en cuenta las consideraciones iniciales al elegir el equipo de corte, esto se realiza sobre la base de la detección de los siguientes aspectos intrínsecos de la roca tales como: abrasividad, resistencia a la compresión, tenacidad, dureza, porosidad, etc. También es necesario tener en cuenta el ritmo de producción y el grado de mecanización de las tareas a realizar. (UPM, 2007).

**Máquina eléctrica automática con hilo diamantado:** Consiste en un bastidor que soporta las unidades de accionamiento principal y auxiliar para el movimiento a lo largo del carril. Este último movimiento se realiza mediante un sistema de piñón y cremallera, que incluso permite trabajar en bancos inclinados. Las poleas tienen un diámetro de 800 mm, logrando una considerable potencia transferida al cable. El consumo de agua durante el corte varía según el tipo de roca, pero puede estar entre 3 y 6 m<sup>3</sup>/h (UPM, 2007).



Figura 1.11. Equipo Eléctrico Automático con Hilo Diamantado.

Fuente: (UPM, 2007).

**Máquina rozadora de brazo:** Consiste en una banda de plástico resistente, en la parte exterior se montan y sujetan las placas de acero (porta-útiles), mientras que en el interior se ubican los patines de nylon. La correa es impulsada por una rueda de goma y es guiada por patines de nylon que se mueven en la ranura perimetral del brazo. Los brazos de corte son estructuras de acero robustas con dos placas laterales de acero, cuyos bordes forman la ranura guía. La máquina posee un sistema de inyección de agua que permite que la cadena se enfríe y al mismo tiempo elimine los residuos creados durante el corte (UPM, 2007).



Figura 1.12. Rozadora de Brazo.

Fuente: (UPM, 2007).

**Máquina de corte con disco:** Básicamente consiste en un disco de corte que está montado en un bastidor móvil. En algunas máquinas, los discos pueden rotar en ambas direcciones y tienen diámetros entre 1,5 y 3 metros. Con este tipo de equipo, el accionamiento puede ser eléctrico o se puede utilizar un motor diésel, ambos corresponden al accionamiento de bombas hidráulicas y transmisores. El rendimiento de corte con discos de diamante varía entre 5 y 8 m<sup>2</sup>/h para rocas de dureza media (UPM, 2007).



Figura 1.13. Máquina de Corte con Disco.

Fuente: (UPM, 2007).

**Máquina de corte con chorro de agua a alta presión:** Este equipo se basa en la disgregación de rocas por la acción y el impacto de un chorro de agua, a una velocidad muy alta, accionada por una bomba de alta presión, que actúa sobre las micro fracturas existentes. Con estos dispositivos la presión del fluido posee una velocidad de 300 m/s y alcanzan valores de 150 MPa, mientras que a 500 m/s se alcanzan valores de 300 MPa, que son más altos, que la resistencia de la mayoría de los materiales rocosos. Las velocidades de corte generalmente dependen del equipo utilizado, de esta forma, se alcanzan valores de 0,6 y 1,5 m<sup>2</sup>/h cuando se trabaja con potencias de 30 y 80 kW, utilizando diferentes combinaciones de caudales y presiones (UPM, 2007).

**Máquina cortadora de disco (Covington's):** Esta es una sierra de inmersión, es decir, el fluido de corte se deposita en el tanque y la hoja de sierra giratoria levanta el fluido de corte alrededor de la pieza, no genera polvo ya que el mismo, es evitado debido al fluido depositado en el tanque de sierra. La campana encaja exactamente en el tanque y evita fugas, esta campana se puede abrir con un brazo de acero resistente para facilitar la carga y descarga de piezas (CEC, 2019).

Esta máquina cuenta con un chasis de acero con recubrimiento para polvo, además de un sistema de retorno rápido, que permite que el carro se devuelva manualmente a cualquier posición, también un ensamblado con tornillo de banco, un motor y un disco de diamante. La covington's pueden utilizar discos desde 18 pulgadas, hasta discos de 36 pulgadas, esta máquina de corte está construida con materiales de alta resistencia (CEC, 2019).

El tanque debe contener fluidos (agua-aceite) con una relación 10:1 para su correcta funcionalidad y evitar el calentamiento del disco y el levantamiento de polvo.



Figura 1.14. Cortadora de Disco Covington's.

Fuente: (CEC, 2019).

### **1.3 Resistencia a la compresión simple**

La resistencia a la compresión simple de las rocas, es la medida más común para definir el grado de rotura y el proceder geomecánico de un macizo rocoso determinado (Burbano & Garcia, 2016).

Para la obtención de la resistencia a la compresión simple en el laboratorio, se requieren muestras escrupulosamente preparadas y disponer de un tiempo considerable para poder conocer los resultados, además de un alto costo. Las rocas anisotropas en específico, presentan dificultades para determinar la resistencia a la compresión debido a su composición, lo que genera la elaboración de numerosas pruebas de laboratorio, para obtener parámetros representativos de sus resistencias (Burbano & Garcia, 2016).

Según el libro de Ingeniería Geológica, se define a la resistencia como el esfuerzo que sufre una roca en determinadas deformaciones. Cuando la resistencia se calcula en

probetas de roca sin confinar, se designa al experimento como resistencia a la compresión simple y su valor se emplea para la clasificación geotécnica de las rocas. A continuación, se adjuntan los valores típicos de ensayos de resistencia uniaxial o de compresión simple, para diferentes tipos de roca.

Tabla 1.4. Clasificación de la resistencia a la compresión simple.

roca intacta	resistencia a compresión simple (Mpa)	
	valores medios	rango de valores
Andesita	210-320	100-500
Anfibolita	280	210-530
Anhidrita	90	80-130
Arenisca	55-140	30-235
Basalto	150-215	80-350
Caliza	80-140	60-200
Cuarcita	200-320	100-500
Diabasa	240-350	130-365
Diorita	180-245	120-335
Dolerita	200-300	100-350
Dolomía	90-250	65-350
Esquisto	50-60	20-160
Gabro	210-280	180-300
Gneiss	160-200	85-250
Granito	170-230	100-300
Grauvaca	180	80-220
Limolita		35-250
Lutita	30-70	10-100
Marga	70-140	70-190
Mármol	120-200	60-250
Pizarra	100-180	90-250
Sal	12	5-30
Toba		10-46
Yeso	25	10-40

Fuente: (Gonzalez & Vallejo, 2002).

La resistencia está en función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material (además de otros valores extrínsecos al material rocoso). La cohesión “c” es la fuerza de asociación entre las partículas minerales que forman la roca. El ángulo de fricción interna “phi” es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, para la mayoría de las rocas éste ángulo varía entre 25° y 45°. A continuación, se incluirán valores característicos de la cohesión y ángulo de fricción de la matriz rocosa:

Tabla 1.5. Clasificación según su cohesión y ángulo de fricción.

roca	Cohesión (Mpa)	Angulo de fricción (°)
Andesita	28	45
Arenisca	8-35	30-50
Basalto	20-60	48-55
Caliza	5-40	35-50
Caliza margosa	1-6	30
Cuarsita	25-70	40-55
Diabasa	90-120	40-50
Diorita	15	50-55
Dolomía	22-60	25-35
Esquisto	25	25-30*
	20-15*	20-30*
Gabro	30	35
Gneiss	15-40	30-40
Granito	15-50	45-58
Grauvaca	6-10	45-50
Mármol	15-35	35-45
Lutita	3-35	40-60
		12-25*
Pizarra	10-50	40-55
	<10*	15-30*
Toba	0,7	
Yeso		30

Fuente: (Gonzalez & Vallejo, 2002).

### 1.3.1 Aspectos de ensayos de compresión simple

#### 1.3.1.1 Ensayo de compresión simple propiamente dicho

El propósito de este ensayo es medir la resistencia a compresión de una probeta cilíndrica de roca, sometida a una carga axial. Para realizar el ensayo, hay que disponer de una prensa con capacidad adecuada, que permita emplear la carga sobre la probeta a velocidad constante, hasta que se produzca la rotura en la misma en un intervalo de tiempo entre 5 y 15 minutos, también la velocidad de carga puede establecerse entre intervalos de 0,5 a 1 MPa/s (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

La probeta se coloca entre los discos de la prensa (Figura 1.15), bien centrada. Donde se aplica una carga de asentamiento equivalente al 1 % de la resistencia a la compresión simple estimada. En ese momento, el reloj indicador de carga se pone en cero. Se fija la velocidad de aplicación de la carga, dando comienzo la compresión, hasta que la muestra se rompa.

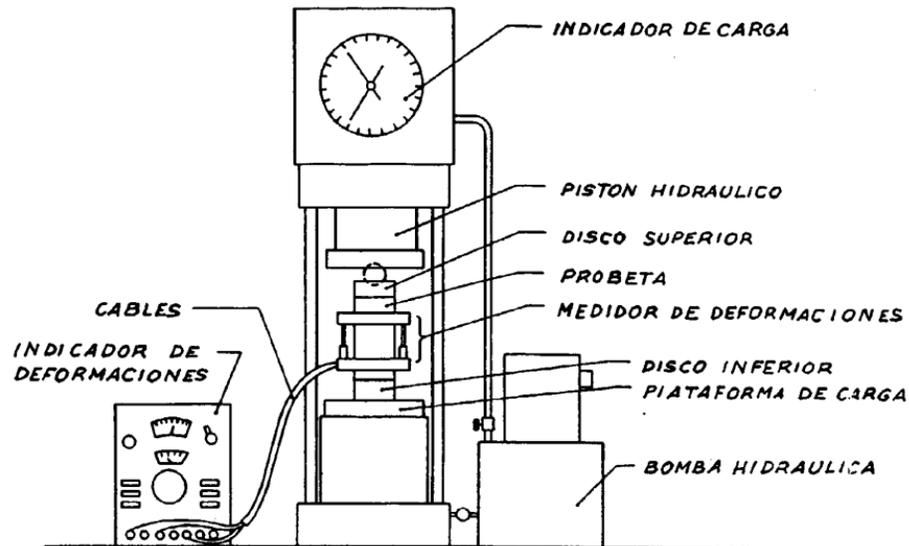


Figura 1.15. Esquema con características principales de la prensa.

Fuente: (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

Los cálculos para la resistencia a compresión simple de una probeta se los puede calcular con la siguiente fórmula a continuación:

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_c$  = resistencia a compresión simple.

P = es la carga máxima a la que ha sido sometida la probeta durante el ensayo.

S = es el área de la sección transversal de la probeta.

(Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

### 1.3.1.2 Determinación del módulo de elasticidad

Para realizar este ensayo hay que disponer de una prensa adecuada, con suficiente capacidad para aplicar una carga axial a una velocidad constante (Figura 1.15). La muestra se coloca centrada en la prensa sobre el disco inferior, el disco superior se coloca sobre la probeta y se aplica una carga equivalente al 1 % de la resistencia a la compresión simple estimada (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

Posteriormente se empieza a aplicar la carga, la primera lectura de la deformación se hace al llegar al 5 % de la resistencia y las sucesivas lecturas se hacen al 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 y 60 % de la resistencia estimada. Acto seguido, de una forma análoga, se procede a rebajar la carga aplicada siguiendo los mismos valores anteriores hasta la descarga total, aplicando nuevamente la carga, hasta alcanzar la rotura (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

Los cálculos para la resistencia a compresión uniaxial se los obtiene dividiendo la carga máxima a la que se ha sometido la muestra por el área de la sección normal de la misma. A continuación, se presenta una curva tensión-deformación (Figura 1.16).

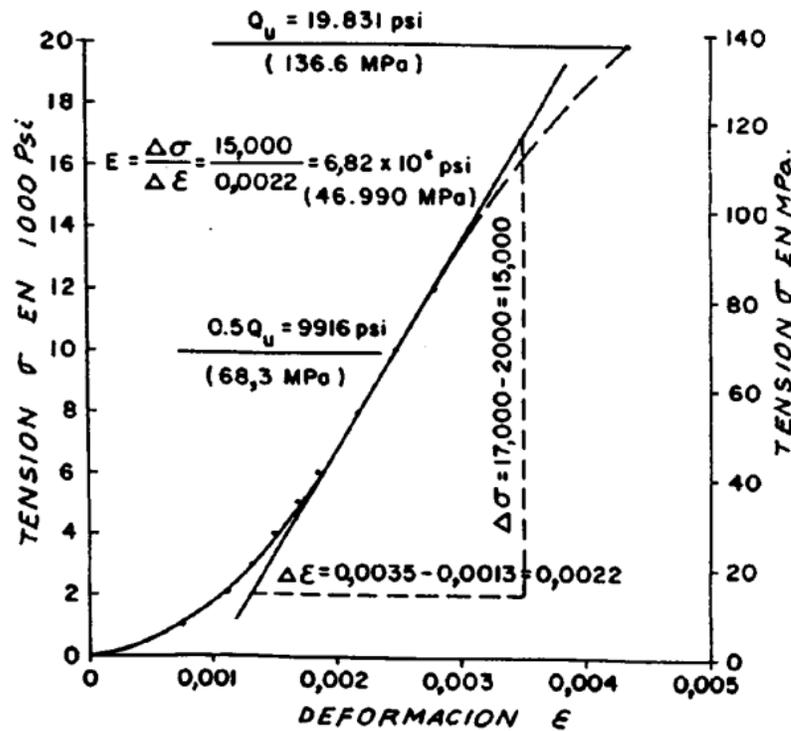


Figura 1.16. Curva Tensión-Deformación.

Fuente: (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

Para el módulo de Elasticidad o módulo de Young se lo calcula con la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta\sigma$  = es el incremento de tensión entre dos puntos de la tangente elegidos arbitrariamente.

$\Delta\varepsilon$  = es el incremento de deformación correspondiente.

(Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

### 1.3.1.3 Determinación del coeficiente de Poisson

Para determinar el coeficiente de Poisson, se requiere por lo menos una galga extensométrica vertical y otra horizontal para medir los desplazamientos correspondientes durante el proceso de compresión. El procedimiento a seguir en el ensayo es idéntico que en el caso de la determinación del módulo de elasticidad de Young mencionado anteriormente (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

Una vez terminado el ensayo se trazan las curvas tensión-deformación axial y tensión-deformación diametral (Figura 1.17).

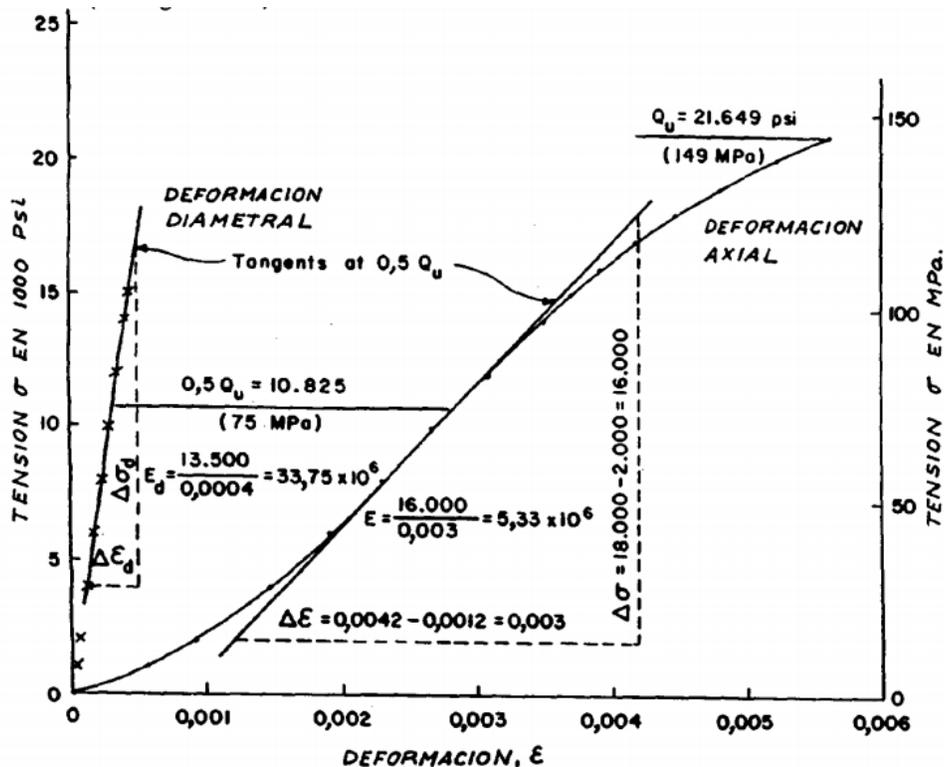


Figura 1.17. Curvas Tensión-Deformidad axial y Tensión-Deformación diametral.

Fuente: (Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

La ecuación a utilizar para la obtención del coeficiente de Poisson es:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{transveral}}{\varepsilon_{axial}} \quad (3)$$

(Ramirez, de la Cuadra, Lain, & Grijalbo, 1984).

#### **1.4 El Índice de Point Load Test**

La prueba de carga puntual, es una de las pruebas más importantes que se usan para la determinación RCS, ya que la prensa puede ser usada in situ o en un laboratorio, además requiere de muy poca o nula preparación de muestras para realizar las distintas pruebas (Cordero & Vazquez, 2019).

El ensayo de carga puntual o de rotura entre puntas PLT (Point Load Test), es un ensayo básico que puede realizarse en el campo, con testigos sin modificación o con fragmentos de roca. Este se fundamenta en aplicar una carga puntual en un trozo de roca hasta su rotura, obteniendo un índice ( $I_s$ ) que se correlaciona con la resistencia a compresión simple de la roca (Ferrer & Vallejo, 2007).

El valor de la prueba de carga puntual, se puede usar como una estimación indirecta de la compresión uniaxial de la roca, la muestra a ejecutar puede ser un núcleo de roca, un bloque o un bulto irregular roca (Pohjanpera , Toivo, & Johansson, 2005).

El ensayo de carga puntual consiste en romper un pedazo de roca entre dos puntas cónicas de acero endurecido (Figura 1.18). Las muestras que posteriormente van a ser colocadas entre dichas puntas pueden ser de cualquier forma, pero lo recomendable es que su diámetro no sea inferior a 50 mm, ya que, el volumen de dicha probeta influye en su resistencia.

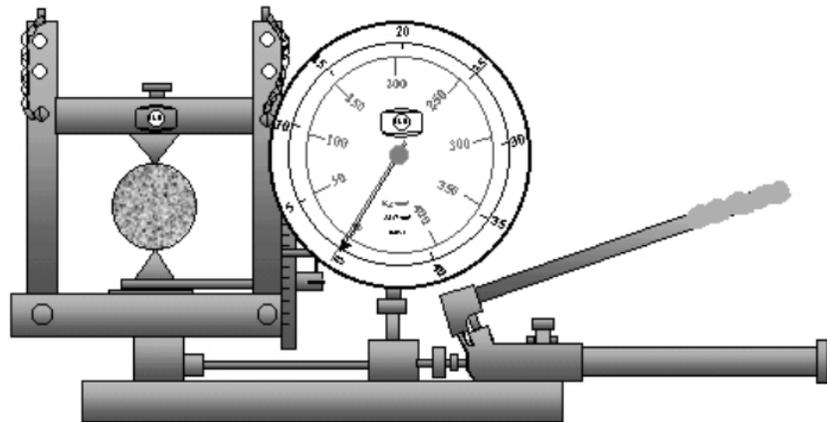


Figura 1.18. Ensayo de carga puntual mediante la prensa Franklin.

Fuente: (Ramirez & Monge, 2004).

### 1.4.1 Sistemas y máquina de Franklin

El procedimiento que se lleva a cabo por intermedio de una prensa portátil, la cual según demuestra la International Society of Rock Mechanics, consta de tres sistemas esenciales que son:

- 1) **Sistema de carga:** Este sistema se encarga de generar y aplicar la carga a la que se someterá la roca. En general, esta prensa se compone de una bomba hidráulica, un bastidor de carga, puntas cónicas y el ariete (Cordero & Vazquez, 2019).
  - **Bomba hidráulica:** Es una de las partes más importantes de este sistema de carga, porque se encarga de generar la fuerza o carga que se utilizará en una prueba determinada, por lo que será necesario tener suficiente capacidad de carga para romper las muestras más grandes y más fuertes, en las que se realizan las pruebas (Cordero & Vazquez, 2019).
  - **Puntas cónicas:** Estos son elementos donde se aplica la carga puntual en la roca, poseen la forma geométrica de un cono de  $60^\circ$  y su punta es una esfera con un radio de 5mm, tal como se muestra (Figura 1.19) a continuación:

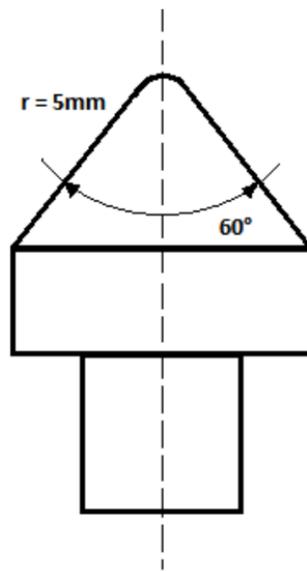


Figura 1.19. Diagrama de una punta cónica.

Fuente: (Cordero & Vazquez, 2019).

- **Marco de carga:** Este elemento, es el que da la accesibilidad del desplazamiento ascendente y descendente de las puntas cónicas durante el ensayo. Este marco tiene un nivel de apertura ajustable que va desde los 15 a 100 mm, siendo el espacio donde se acomodarán los testigos de roca. Este marco tiene la tarea de no permitir el desplazamiento lateral o el deslizamiento de las puntas cónicas durante el ensayo sobre todo en el caso de rocas irregulares (Cordero & Vazquez, 2019).
  - **Ariete:** Es la pieza de metal que recibe la energía de la bomba hidráulica y la transmite al marco de carga.
- 2) **Sistema de medición de carga:** Su función, es la determinación de la carga P de falla, requerida para romper las muestras de roca. Este sistema deberá cumplir con los siguientes requisitos:
- Las mediciones tendrán una precisión de  $\pm 5\%$ , independientemente del tamaño o la resistencia del espécimen ensayado.
  - El sistema debe ser resistente a golpes hidráulicos y vibraciones para que la precisión de las lecturas no se vea afectada adversamente.

- La falla es generalmente repentina y a una carga máxima, por lo que el dispositivo deberá retener el valor de falla para que pueda ser registrado (Cordero & Vazquez, 2019).

3) **Sistema de medición de distancia:** Su función es permitir medir la distancia D entre los puntos de contacto de las puntas cónicas. Cumpliendo con los siguientes requisitos:

- Las mediciones de D tendrán una precisión de  $\pm 2\%$  o menor, independientemente del tamaño de la muestra ensayada.
- El sistema debe ser resistente a golpes hidráulicos y vibraciones para que la precisión de las lecturas no se vea afectada adversamente.
- El sistema de medición deberá permitir el manejo del valor “cero desplazamiento” cuando las dos puntas cónicas estén en contacto y preferiblemente deberán incluir un ajuste cero (Cordero & Vazquez, 2019).

El diseño de la máquina de prueba, tiene puntas y medidores independientes para que puedan intercambiarse cuando estas partes están dañadas o desgastadas. El sistema de medición puede utilizar instrumentos mecánicos o electrónicos para que la carga medida tenga la precisión de lectura requerida (ASTM, 2016).

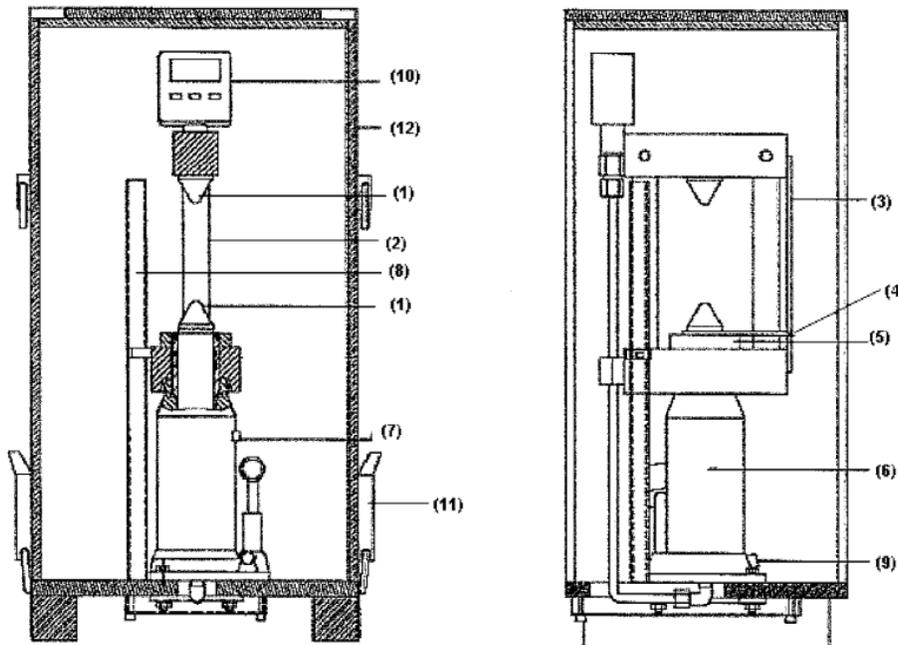


Figura 1.20. Ilustración sobre componentes de la máquina de Franklin.

Fuente: (ASTM, 2016).

Los numeros mencionados anteriormente de la máquina de Franklin en la figura 1.20 son:

1. Dos puntas cónicas.
2. Dos columnas de marco de la cruceta fija.
3. Escala.
4. Puntero escala.
5. Un perno.
6. El cuerpo de la bomba hidráulica.
7. Tapon de llenado de aceite.
8. Mango de la bomba.
9. Válvula de liberacion de presión.
10. Caja cerrada para la cubierta superior.
11. Lectura digital de presión.
12. Tapa superior del probador de carga puntual.

#### 1.4.2 Metodología de obtención del $I_S$ (50).

El indice de carga puntual sin corrección se lo puede obtener mediante la ecuación siguiente:

$$I_S = \frac{P*1000}{D_e^2} \quad (4)$$

Dónde:

P= Carga aplicada en kN.

De = Diámetro del núcleo equivalente en mm (ver figura 1.21).

Is= Índice de carga puntual, MPa.

(Navarrete, et al., 2013).

Se toman las distancias de los fragmentos, los cuales deben cumplir con las disposiciones que se indican en la norma. La razón  $0.3 < D / W < 1$  que de preferencia quede cerca de 1. La distancia  $L > 0.5W$  (L distancia del extremo de la roca a las puntas cónicas) y se conoce el W (espesor de la roca), como se demuestra en la figura 1.21.

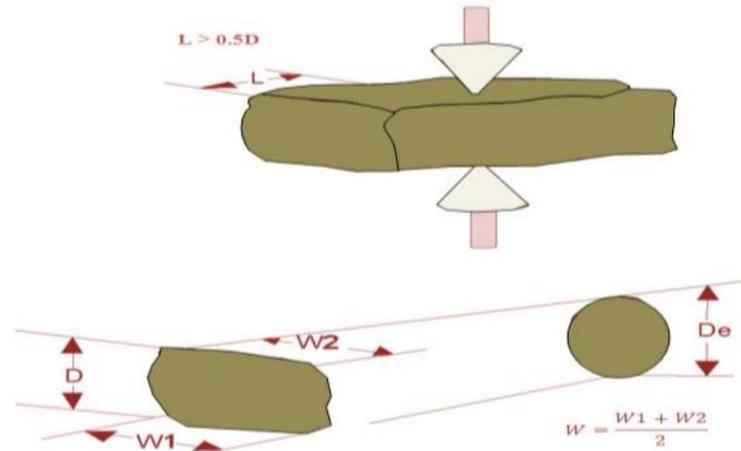


Figura 1.21. Determinación de las dimensiones de los fragmentos irregulares.

Fuente: (Navarrete, y otros, 2013).

Para fragmentos irregulares se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (5)$$

Donde  $A = WD =$  Área transversal mínima paralela a la dirección de la carga en  $mm^2$ .

El índice de resistencia a la carga puntual corregido,  $Is_{(50)}$  de una muestra de roca se define como el valor de  $Is$  que se ha medido por una prueba diametral con  $D = 50$  mm. Cuando una clasificación de roca es fundamental, el método más fiable para conseguir  $Is_{(50)}$  es llevar a cabo las pruebas con diámetros de  $D = 50$  mm o muy cercanos a dicho valor. Sin embargo, la mayoría de las pruebas de carga puntual, son llevadas a cabo utilizando tamaños de muestras diferentes al diámetro mencionado (Navarrete, y otros, 2013).

Para la corrección de tamaño se utiliza la siguiente ecuación:

$$Is_{50} = FxIs \quad (6)$$

Donde,

F es el factor de corrección por tamaño y se realiza mediante la ecuación a continuación:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (7)$$

Para las pruebas realizadas en muestras cercanas al estándar de 50 mm de diámetro, la corrección se realiza mediante el uso de la ecuación siguiente:

$$F = \sqrt{\frac{D_e}{50}} \quad (8)$$

(Navarrete, y otros, 2013)

## CAPÍTULO II

### EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo, se dará una explicación detallada de las operaciones realizadas para lograr los objetivos establecidos en presente trabajo. Primeramente, se proporcionará el número de muestras utilizadas, seguidamente se indicará su preparación, proceso de corte, ejecución del índice de prueba de carga puntual y finalmente la determinación de la resistencia a la compresión simple.

#### 2.1 Número de muestras y preparación

Como primer paso se realizó la toma de 60 muestras de la zona de estudio del Cojitambo con coordenadas: Este 0734850 y Norte 9695082, cabe indicar que dichas coordenadas son UTM WGS84 como se muestran en las imágenes a continuación (Figura 2.1 y 2.2).



Figura 2.1. Ubicación en coordenadas UTM WGS84.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.2. Zona de estudio (Cojitambo).

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizó el corte respectivo de las 60 muestras antes mencionadas, cada una de ellas con dimensiones de 5x10x5 cm aproximadamente, que son las dimensiones seleccionadas para la elaboración de esta tesis, las dimensiones de cada una de las muestras se pueden observar detalladamente a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dimensiones de las probetas.

	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
<b>Probeta 1</b>	5.1	9.7	4.9	<b>Probeta 21</b>	5.05	9.85	4.9	<b>Probeta 41</b>	4.95	9.95	5
<b>Probeta 2</b>	5.1	9.75	4.85	<b>Probeta 22</b>	5	9.75	5	<b>Probeta 42</b>	4.9	9.8	5
<b>Probeta 3</b>	5	9.9	5	<b>Probeta 23</b>	4.9	9.7	4.8	<b>Probeta 43</b>	4.9	9.75	4.9
<b>Probeta 4</b>	4.85	9.8	5	<b>Probeta 24</b>	5.1	9.85	4.95	<b>Probeta 44</b>	4.95	9.7	5
<b>Probeta 5</b>	5	9.8	5	<b>Probeta 25</b>	5	9.8	4.9	<b>Probeta 45</b>	5	9.8	5.1
<b>Probeta 6</b>	4.9	9.8	5	<b>Probeta 26</b>	4.8	9.75	5.1	<b>Probeta 46</b>	5	9.95	4.9
<b>Probeta 7</b>	5.1	9.7	4.9	<b>Probeta 27</b>	4.9	9.8	5	<b>Probeta 47</b>	4.95	9.75	4.85
<b>Probeta 8</b>	5	9.75	4.9	<b>Probeta 28</b>	4.85	9.8	5	<b>Probeta 48</b>	4.85	9.9	5
<b>Probeta 9</b>	4.95	9.9	4.9	<b>Probeta 29</b>	5	9.8	4.85	<b>Probeta 49</b>	5	9.8	4.85
<b>Probeta 10</b>	4.9	9.8	5	<b>Probeta 30</b>	5	9.9	4.95	<b>Probeta 50</b>	5	9.85	4.85
<b>Probeta 11</b>	4.9	9.85	5.05	<b>Probeta 31</b>	4.9	9.8	4.95	<b>Probeta 51</b>	5	9.9	4.85
<b>Probeta 12</b>	5	9.8	5	<b>Probeta 32</b>	4.95	9.85	4.85	<b>Probeta 52</b>	4.9	9.85	4.95
<b>Probeta 13</b>	4.9	9.8	5	<b>Probeta 33</b>	4.9	9.8	5.05	<b>Probeta 53</b>	4.95	9.8	5
<b>Probeta 14</b>	4.95	9.85	4.9	<b>Probeta 34</b>	5	9.8	5.05	<b>Probeta 54</b>	4.9	9.8	4.9
<b>Probeta 15</b>	5	9.8	4.9	<b>Probeta 35</b>	4.85	9.75	4.95	<b>Probeta 55</b>	5	9.8	4.9
<b>Probeta 16</b>	4.9	9.8	5	<b>Probeta 36</b>	4.95	9.8	5.05	<b>Probeta 56</b>	5	9.7	5
<b>Probeta 17</b>	4.85	9.8	4.85	<b>Probeta 37</b>	4.9	9.75	4.9	<b>Probeta 57</b>	5	9.85	4.9
<b>Probeta 18</b>	4.9	9.75	4.95	<b>Probeta 38</b>	4.85	9.7	5	<b>Probeta 58</b>	4.9	9.85	4.95
<b>Probeta 19</b>	5	9.85	5.05	<b>Probeta 39</b>	4.95	9.85	4.9	<b>Probeta 59</b>	4.95	9.8	4.9
<b>Probeta 20</b>	5	9.75	4.9	<b>Probeta 40</b>	4.9	9.8	4.95	<b>Probeta 60</b>	4.95	9.75	4.9

Fuente: Elaboración propia.

Una vez creadas las probetas, se verificó que estas no presenten grietas y que las dimensiones fueran muy próximas a las mencionadas anteriormente, tal como se muestra en las siguientes figuras:



Figura 2.3. Altura de la Probeta.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.4. Longitud de la Probeta.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.5. Ancho de la Probeta.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Proceso de corte

Para realizar el proceso de corte de las probetas, fue necesario el uso de una máquina cortadora de disco. Se utilizó la cortadora modelo Covington's, la cual está disponible en el laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay.



Figura 2.6. Cortadora de Disco (Covington's).

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.1 Componentes y operación de la cortadora de disco (Covington's)

Es de suma importancia saber los componentes de la máquina a utilizar, por lo cual en la siguiente figura se procede a describir cada una de las partes de la Cortadora de Disco (Covington's) que se utilizó para la realización del corte de las probetas.

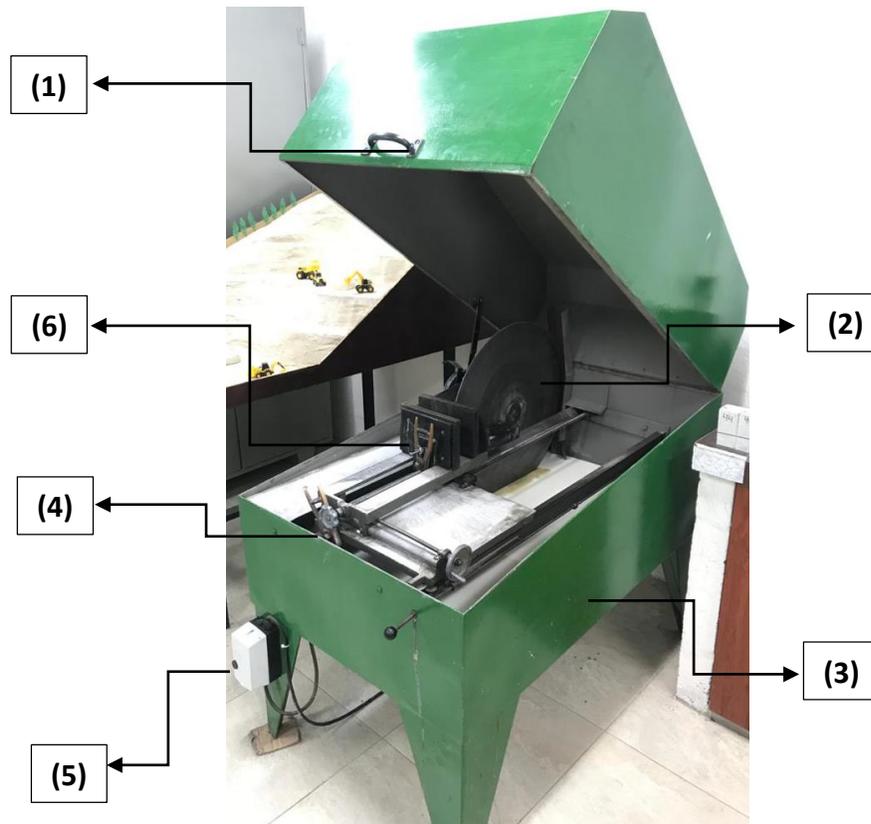


Figura 2.7. Ilustración sobre componentes de la Cortadora de Disco (Covington's).

Fuente: Elaboración propia.

Los números mencionados anteriormente de la máquina Cortadora de Disco (Covington's) son:

1. Tapa protectora.
2. Disco cierra diamante.

3. Cuba refrigerante.
4. Mecanismo de avance.
5. Interruptor de encendido y apagado.
6. Mecanismo de ajuste de la muestra.

**Descripción de los pasos a seguir para la operación de la Cortadora de Disco (Covington's):**

1. Utilizar equipos de protección personal.
2. Levantar la tapa de la máquina cortadora.
3. Verificar el nivel de fluido de corte, mínimo 30 mm sobre el filo inferior del disco.
4. Colocación de la muestra de roca (probeta) en las mordazas y observar que la superficie de contacto dentro de las mordazas sea la máxima (superficies planas).
5. Aproximar la roca al disco a una distancia cercana a 5 mm para optimizar el tiempo de corte.
6. Bajar la tapa.
7. Poner en marcha el motor con el interruptor de encendido.
8. Realizar un control de rotación y de ruidos extraños, ya que puede ocurrir una rotura o inmovilización del disco con materiales duros o no homogéneos.
9. Apagar el motor al concluir el corte.
10. Elevar la tapa de la máquina cortadora y retirar la probeta cortada.

### 2.2.2. Corte de probetas

Antes de empezar el proceso de corte, se debe medir las distancias que existe entre la mordaza y el disco en conjunto con la probeta y trazar una línea en la probeta, para poder realizar el corte de manera adecuada como se muestra (Figura 2.8 y 2.9).



Figura 2.8. Medición entre la mordaza y disco.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.9. Señalización de probetas.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe recalcar que se trabajó con un radio de disco de 30 cm y con 78,14 litros de una solución conformada por agua y aceite, este valor se obtuvo a partir de la medición del ancho por el largo de la máquina y por la altura del fluido (obtenido de la base del tanque hasta la altura máxima del fluido). El fluido tenía una relación 10:1 de agua y aceite.

La probeta seleccionada, poseía dimensiones de 5x10x5 cm aproximadamente, el trazo de línea por donde paso la sierra estuvo a 6.3cm por fuera de las mordazas, a 0.4cm se encontraba el disco de la probeta. Con estas especificaciones se realizó el proceso de corte y se tomó el tiempo que llevaba la ejecución de corte a la probeta, como se puede observar a continuación:

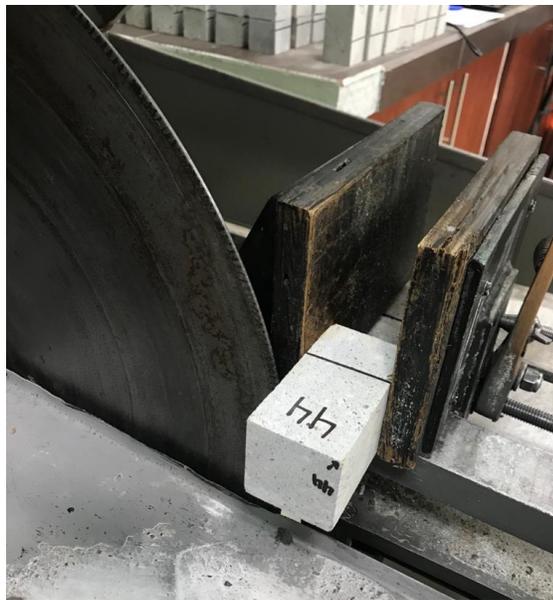


Figura 2.10. Inicio del corte de la probeta.

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del corte se obtuvieron dos probetas de diferentes dimensiones, la primera con mediciones de 5x5x5 cm aproximadamente, que posteriormente fue utilizada para realizar el ensayo de carga puntual y la segunda probeta con dimensiones aproximadas 5x5x4,3 cm que se la utilizo para el ensayo de compresión simple.



Figura 2.11. Resultado del corte de la probeta.  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos con respecto al tiempo en el proceso de corte se adjuntan a continuación en una tabla de Excel (ver tabla 2.2). Estos valores son muy importantes para poder realizar posteriormente la correlación que se va a proponer en la tesis.

Tabla 2.2. Tiempo de Corte de las Probetas.

<b>DESCRIPCION</b>	<b>TIEMPO (minutos)</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>TIEMPO (minutos)</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>TIEMPO (minutos)</b>
<b>Probeta 1</b>	23.26	<b>Probeta 21</b>	24.04	<b>Probeta 41</b>	24.06
<b>Probeta 2</b>	23.42	<b>Probeta 22</b>	24.06	<b>Probeta 42</b>	23.48
<b>Probeta 3</b>	23.34	<b>Probeta 23</b>	23.51	<b>Probeta 43</b>	24.28
<b>Probeta 4</b>	23.03	<b>Probeta 24</b>	24.1	<b>Probeta 44</b>	23.12
<b>Probeta 5</b>	23.25	<b>Probeta 25</b>	23.58	<b>Probeta 45</b>	24.15
<b>Probeta 6</b>	22.55	<b>Probeta 26</b>	23.25	<b>Probeta 46</b>	24.32
<b>Probeta 7</b>	23.34	<b>Probeta 27</b>	23.23	<b>Probeta 47</b>	24.33
<b>Probeta 8</b>	24.23	<b>Probeta 28</b>	23.19	<b>Probeta 48</b>	23.49
<b>Probeta 9</b>	24.13	<b>Probeta 29</b>	24.13	<b>Probeta 49</b>	24.51
<b>Probeta 10</b>	24.14	<b>Probeta 30</b>	23.31	<b>Probeta 50</b>	24.22
<b>Probeta 11</b>	25.11	<b>Probeta 31</b>	23.13	<b>Probeta 51</b>	23.44
<b>Probeta 12</b>	25.17	<b>Probeta 32</b>	23.59	<b>Probeta 52</b>	24.37
<b>Probeta 13</b>	24.3	<b>Probeta 33</b>	24.04	<b>Probeta 53</b>	24.28
<b>Probeta 14</b>	25.02	<b>Probeta 34</b>	24.17	<b>Probeta 54</b>	24.29
<b>Probeta 15</b>	23.47	<b>Probeta 35</b>	23.54	<b>Probeta 55</b>	24.02
<b>Probeta 16</b>	23.48	<b>Probeta 36</b>	23.51	<b>Probeta 56</b>	24.29
<b>Probeta 17</b>	22.41	<b>Probeta 37</b>	22.44	<b>Probeta 57</b>	23.46
<b>Probeta 18</b>	23.42	<b>Probeta 38</b>	23.57	<b>Probeta 58</b>	23.43
<b>Probeta 19</b>	23.26	<b>Probeta 39</b>	23.38	<b>Probeta 59</b>	24.09
<b>Probeta 20</b>	23.57	<b>Probeta 40</b>	23.25	<b>Probeta 60</b>	24.21

Fuente: Elaboración propia.

## 2.3 Ejecución del Índice de Point Load Test

### 2.3.1 Acoplamiento de las puntas cónicas

Para realizar el ensayo del Índice de Point Load Test fue necesario contar con una prensa hidráulica y la construcción de unas puntas cónicas con ciertas características (ver figura 2.12), que posteriormente fueron adjuntadas a la prensa existente en el laboratorio de civil como se muestra a continuación (Figura 2.13).

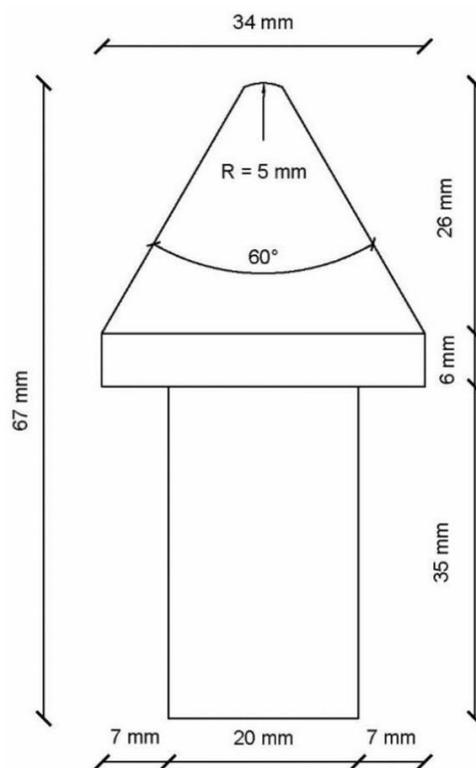


Figura 2.12. Plano con medidas para las puntas cónicas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.13 Puntas cónicas acopladas a la prensa Humboldt.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.2 Comprobación de las probetas

Una vez acopladas las puntas cónicas a la prensa Humboldt se procede a la medición de las probetas que quedaron, como resultado del corte, de la máquina con disco diamantado (Covintong's). Se utilizó probetas de 5x5x5 cm aproximadamente y se analizó la relación entre el eje "Y" y "X" dando un resultado entre 1 a 1,4.

La carga de una muestra de forma irregular debe tener una relación entre el largo del núcleo ( $L = X$ ) y el diámetro ( $D = Y$ ) como se muestra en la Figura 2.14.

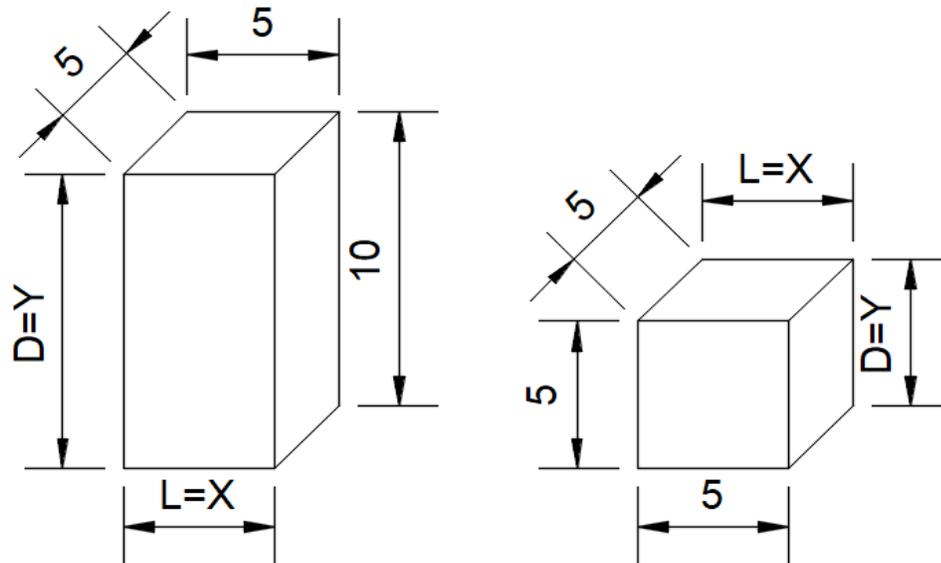


Figura 2.14. Mediciones de las probetas en centímetros con su relación “ $D = Y$ ” y “ $L = X$ ”.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.3 Ruptura de probetas

Establecidas ya de manera correcta las probetas y basándonos en lo mencionado anteriormente, se procedió a la marcación del punto intermedio entre la parte superior y la parte inferior de la muestra (ver figura 2.15) con el fin de poder ubicar correctamente la probeta entre las puntas cónicas (ver figura 2.16). Después se realizó la ejecución de su ruptura en la prensa Humboldt, acoplada con las puntas cónicas, empleando una fuerza en kN hasta que se rompió la probeta como se muestra (Figura 2.17).



Figura 2.15 Marcación del punto intermedio en la parte superior e inferior de la probeta antes de la ruptura.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.16. Ubicación correcta de la probeta entre las puntas cónicas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.17 Resultado de ruptura de la probeta.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.4 Descripción de la tabla de las probetas después de la rotura

Después de haber realizado la ruptura de las 60 probetas con dimensiones aproximadas de 5x5x5 cm en la prensa Humboldt, con el acoplamiento de las puntas cónicas, tenemos como resultado una tabla con las respectivas fuerzas empleadas en cada una de las probetas hasta su ruptura como se puede ver en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Dimensiones de las probetas en centímetros con sus respectivas fuerzas para determinar el Índice de Point Load Test.

ÍNDICE DE POINT LOAD TEST														
Descripción	Centímetros			Fuerza	Descripción	Centímetros			Fuerza	Descripción	Centímetros			Fuerza
	X	Y	Z	kN		X	Y	Z	kN		X	Y	Z	kN
PROBETA 1	5.1	5.1	4.9	24	PROBETA 21	5.05	5.15	4.9	26	PROBETA 41	4.95	5	4.9	25
PROBETA 2	5	5.1	4.85	32	PROBETA 22	5	5	5	28	PROBETA 42	4.95	5	4.9	28
PROBETA 3	5	5.1	5	29	PROBETA 23	4.9	4.9	4.8	24	PROBETA 43	4.9	5.05	4.9	27
PROBETA 4	5	5.15	4.85	26	PROBETA 24	4.95	5.1	4.95	31	PROBETA 44	4.95	5	4.95	26
PROBETA 5	5	5	5	22	PROBETA 25	5	5	4.9	31	PROBETA 45	5	5.1	4.95	26
PROBETA 6	5	5.1	4.9	27	PROBETA 26	5	5.1	4.8	29	PROBETA 46	4.95	5	4.9	27
PROBETA 7	5.05	5.1	4.9	29	PROBETA 27	5	5	4.9	27	PROBETA 47	4.95	5	4.85	26
PROBETA 8	5	5.2	4.9	28	PROBETA 28	5	5	4.85	24	PROBETA 48	5	5.2	4.85	27
PROBETA 9	4.95	5.25	4.9	28	PROBETA 29	5	5	4.85	28	PROBETA 49	5	5.1	4.85	28
PROBETA 10	5	5.3	4.9	27	PROBETA 30	5	5.05	4.95	26	PROBETA 50	4.95	5	4.85	21
PROBETA 11	4.9	5.05	4.9	29	PROBETA 31	4.95	5	4.9	28	PROBETA 51	5	5	4.85	28
PROBETA 12	5	5.05	5	29	PROBETA 32	4.95	5	4.85	27	PROBETA 52	4.9	4.95	4.9	29
PROBETA 13	5	5	4.9	27	PROBETA 33	5	5.05	4.9	26	PROBETA 53	4.95	5	4.9	28
PROBETA 14	4.95	5.05	4.9	26	PROBETA 34	5.05	5.05	5	26	PROBETA 54	4.9	5	4.9	25
PROBETA 15	5	5	4.9	28	PROBETA 35	4.95	5	4.85	29	PROBETA 55	5	5.05	4.9	28
PROBETA 16	5	5.05	4.9	26	PROBETA 36	5.05	5.1	4.95	27	PROBETA 56	5	5	5	26
PROBETA 17	4.85	5	4.85	24	PROBETA 37	4.9	5	4.9	26	PROBETA 57	5	5.1	4.9	22
PROBETA 18	4.95	5	4.9	28	PROBETA 38	5	5	4.85	27	PROBETA 58	4.95	5.05	4.9	27
PROBETA 19	5	5.05	5	30	PROBETA 39	4.95	5	4.9	30	PROBETA 59	4.95	5.1	4.9	27
PROBETA 20	5	5	4.9	25	PROBETA 40	4.95	5.05	4.9	28	PROBETA 60	4.95	5.15	4.9	28

Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Determinación de la resistencia a la compresión simple

Para la determinación de la resistencia a la compresión simple, se trabajó con una máquina de compresión “Humboldt”, modelo CM-2500-DIR con capacidad de 250.000 libras. Como es importante saber los componentes de la máquina a utilizar, se procederá a describir cada una de las partes de la máquina de compresión “Humboldt” (ver figura 2.18) que se utilizará para la ruptura de las probetas de andesita.



Figura 2.18. Ilustración de los componentes de la Máquina de Compresión “Humboldt”.

Fuente: Elaboración propia.

Los números mencionados anteriormente de la Máquina de Compresión “Humboldt” son:

1. Indicador digital DIR.
2. Bomba hidráulica silenciosa y de uso continuo.
3. Placas para cilindros de seis pulgadas (150 mm).
4. Rejilla de seguridad.

## 5. Interruptor de encendido y apagado.

### 2.4.1 Ruptura de las probetas

Para ejecutar la ruptura de las probetas, primero hay que tomar en cuenta las dimensiones de la probeta que fueron indicadas anteriormente como resultado del corte de las probetas, dando como resultado dimensiones aproximadas de 5x5x4,3 cm.

Cabe mencionar que las 60 probetas con las que se trabajó, tenían dimensiones diferentes, debido que, al momento de cortar, su composición mineralógica y su anisotropía influyeron para obtener estas variaciones.

Según, Feijoo, P. (1997) nos dice que al tener ya identificadas las probetas con las que se van a trabajar para la ruptura, se deben determinar las medidas de los ejes “X” y “Y” con el fin de que la división de estos sea la siguiente:  $\frac{Y}{X} = 1 a 1,4$ . como se muestra (Figura 2.19).

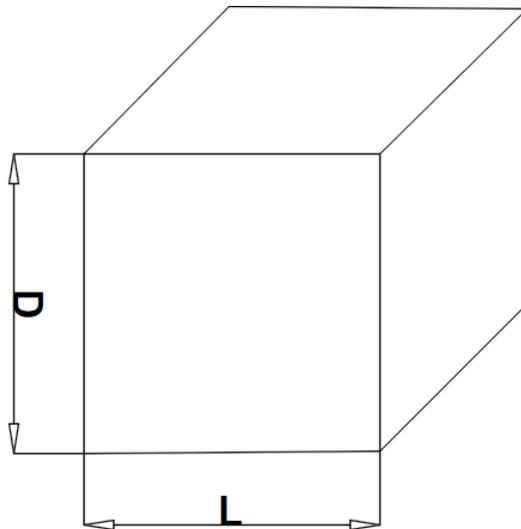


Figura 2.19. Relación de diámetro y largo de la probeta (D/L).

Fuente: Elaboración propia.

Después de establecer la posición exacta de la probeta (ver figura 2.20) y basándonos en la fórmula mencionada anteriormente, se procedió a la ejecución de la ruptura de la misma en la máquina de compresión “Humboldt” como se muestra (Figura 2.21 y 2.22).



Figura 2.20. Posicionamiento de la probeta.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.21. Inicio de ruptura de la probeta.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.22. Resultado de ruptura de la probeta.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.4.2 Descripción de la tabla de las probetas ejercidas a compresión simple

Después de realizar la ruptura de las 60 probetas se obtuvieron, datos arrojados por la máquina de compresión, indicando la fuerza ejercida sobre la probeta, para poder romperla y los resultados se presentaron en unidades de kN como se puede observar en la Tabla 2.4 adjuntada a continuación:

Tabla 2.4. Dimensiones de las probetas en centímetros con sus respectivas fuerzas a la compresión simple.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE														
Descripción	Centímetros			Fuerza	Descripción	Centímetros			Fuerza	Descripción	Centímetros			Fuerza
	X	Y	Z	kN		X	Y	Z	kN		X	Y	Z	kN
PROBETA 1	4.9	5.1	4.3	201	PROBETA 21	4.9	5.05	4.3	212	PROBETA 41	4.95	5	4.6	234
PROBETA 2	4.85	5.1	4.35	197	PROBETA 22	5	5	4.35	244	PROBETA 42	4.9	5	4.45	290
PROBETA 3	5	5	4.3	225	PROBETA 23	4.8	4.9	4.4	197	PROBETA 43	4.9	4.9	4.25	130
PROBETA 4	4.85	5	4.2	187	PROBETA 24	4.95	5.1	4.5	180	PROBETA 44	4.95	5	4.3	232
PROBETA 5	5	5	4.4	193	PROBETA 25	4.9	5	4.45	199	PROBETA 45	5	5.1	4.5	178
PROBETA 6	4.9	5	4.35	181	PROBETA 26	4.8	5.1	4.4	215	PROBETA 46	4.9	5	4.6	214
PROBETA 7	4.9	5.1	4.3	198	PROBETA 27	4.9	5	4.35	231	PROBETA 47	4.85	4.95	4.35	162
PROBETA 8	4.9	5	4.15	163	PROBETA 28	4.85	5	4.4	166	PROBETA 48	4.85	5	4.3	229
PROBETA 9	4.9	4.95	4.25	174	PROBETA 29	4.85	5	4.35	239	PROBETA 49	4.85	5	4.3	203
PROBETA 10	4.9	5	4.1	139	PROBETA 30	4.95	5	4.5	285	PROBETA 50	4.85	5	4.45	170
PROBETA 11	4.9	5.05	4.55	211	PROBETA 31	4.9	4.95	4.35	224	PROBETA 51	4.85	5	4.5	181
PROBETA 12	5	5	4.35	221	PROBETA 32	4.85	4.95	4.4	213	PROBETA 52	4.9	4.95	4.6	209
PROBETA 13	4.9	5	4.4	212	PROBETA 33	4.9	5.05	4.35	197	PROBETA 53	4.95	5	4.55	208
PROBETA 14	4.9	4.95	4.45	225	PROBETA 34	5	5.05	4.35	264	PROBETA 54	4.9	4.9	4.4	228
PROBETA 15	4.9	5	4.45	177	PROBETA 35	4.85	4.95	4.3	180	PROBETA 55	4.9	5	4.3	145
PROBETA 16	4.9	5	4.45	178	PROBETA 36	4.95	5.05	4.35	155	PROBETA 56	5	5	4.3	267
PROBETA 17	4.85	4.85	4.4	265	PROBETA 37	4.9	4.9	4.35	170	PROBETA 57	4.9	5	4.35	195
PROBETA 18	4.9	4.95	4.3	195	PROBETA 38	4.85	5	4.3	234	PROBETA 58	4.9	4.95	4.35	287
PROBETA 19	5	5.05	4.4	187	PROBETA 39	4.9	4.95	4.4	176	PROBETA 59	4.9	4.95	4.3	141
PROBETA 20	4.9	5	4.3	227	PROBETA 40	4.9	4.95	4.3	213	PROBETA 60	4.9	4.95	4.25	134

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se dará a conocer el análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los procesos detallados anteriormente, para poder llegar a una correlación entre el corte de rocas y el Índice de Point Load Test  $I_s$  <sup>(50)</sup>.

En primer lugar, se presentará los tiempos de corte generados por el disco diamantado “Covington’s” y a partir de ellos fueron calculadas las velocidades.

Como segundo punto, se indicarán los resultados de la máquina de compresión simple “Humboldt” acoplada con las puntas cónicas detalladas anteriormente, obteniendo la fuerza de ruptura de las probetas, que ayudara para la elaboración del  $I_s$  <sup>(50)</sup> y para posteriormente realizar la correlación propuesta.

Por último, se demostrará la correlación entre el corte de rocas y el Índice de Point Load Test  $I_s$  <sup>(50)</sup> con su respectiva ecuación lineal e interpretación de resultados.

#### 3.1 Análisis de resultados de corte en rocas

De las muestras obtenidas de la zona del “Cojitambo” con las respectivas dimensiones, mencionadas al comienzo del trabajo, se procedió al corte respectivo de cada una de ellas en la máquina de disco diamantado (Covington’s), obteniendo un tiempo de corte (en minutos) satisfactorio en consideración a sus dimensiones en centímetros, a partir del tiempo se obtuvo la velocidad de corte mediante una relación en milímetros/minutos como se puede observar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados del Corte de las probetas del Cojitambo.

<b>Máquina de Disco Diamantado (Covington's)</b>					
	<b>centímetros</b>			<b>minutos</b>	<b>mm/min</b>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>	<b>TIEMPO</b>	<b>VELOCIDAD</b>
<b>Probeta 1</b>	5.1	9.7	4.9	23.26	2.193

<b>Probeta 2</b>	5.1	9.75	4.85	23.42	2.178
<b>Probeta 3</b>	5	9.9	5	23.34	2.142
<b>Probeta 4</b>	4.85	9.8	5	23.03	2.106
<b>Probeta 5</b>	5	9.8	5	23.25	2.151
<b>Probeta 6</b>	4.9	9.8	5	22.55	2.173
<b>Probeta 7</b>	5.1	9.7	4.9	23.34	2.185
<b>Probeta 8</b>	5	9.75	4.9	24.23	2.064
<b>Probeta 9</b>	4.95	9.9	4.9	24.13	2.051
<b>Probeta 10</b>	4.9	9.8	5	24.14	2.030
<b>Probeta 11</b>	4.9	9.85	5.05	25.11	1.951
<b>Probeta 12</b>	5	9.8	5	25.17	1.986
<b>Probeta 13</b>	4.9	9.8	5	24.3	2.016
<b>Probeta 14</b>	4.95	9.85	4.9	25.02	1.978
<b>Probeta 15</b>	5	9.8	4.9	23.47	2.130
<b>Probeta 16</b>	4.9	9.8	5	23.48	2.087
<b>Probeta 17</b>	4.85	9.8	4.85	22.41	2.164
<b>Probeta 18</b>	4.9	9.75	4.95	23.42	2.092
<b>Probeta 19</b>	5	9.85	5.05	23.26	2.150
<b>Probeta 20</b>	5	9.75	4.9	23.57	2.121
<b>Probeta 21</b>	5.05	9.85	4.9	24.04	2.101
<b>Probeta 22</b>	5	9.75	5	24.06	2.078
<b>Probeta 23</b>	4.9	9.7	4.8	23.51	2.084
<b>Probeta 24</b>	5.1	9.85	4.95	24.1	2.116
<b>Probeta 25</b>	5	9.8	4.9	23.58	2.120
<b>Probeta 26</b>	4.8	9.75	5.1	23.25	2.065
<b>Probeta 27</b>	4.9	9.8	5	23.23	2.109
<b>Probeta 28</b>	4.85	9.8	5	23.19	2.091
<b>Probeta 29</b>	5	9.8	4.85	24.13	2.072
<b>Probeta 30</b>	5	9.9	4.95	23.31	2.145
<b>Probeta 31</b>	4.9	9.8	4.95	23.13	2.118
<b>Probeta 32</b>	4.95	9.85	4.85	23.59	2.098
<b>Probeta 33</b>	4.9	9.8	5.05	24.04	2.038
<b>Probeta 34</b>	5	9.8	5.05	24.17	2.069
<b>Probeta 35</b>	4.85	9.75	4.95	23.54	2.060
<b>Probeta 36</b>	4.95	9.8	5.05	23.51	2.105
<b>Probeta 37</b>	4.9	9.75	4.9	22.44	2.184
<b>Probeta 38</b>	4.85	9.7	5	23.57	2.058
<b>Probeta 39</b>	4.95	9.85	4.9	23.38	2.117
<b>Probeta 40</b>	4.9	9.8	4.95	23.25	2.108
<b>Probeta 41</b>	4.95	9.95	5	24.06	2.057
<b>Probeta 42</b>	4.9	9.8	5	23.48	2.087

<b>Probeta 43</b>	4.9	9.75	4.9	24.28	2.018
<b>Probeta 44</b>	4.95	9.7	5	23.12	2.141
<b>Probeta 45</b>	5	9.8	5.1	24.15	2.070
<b>Probeta 46</b>	5	9.95	4.9	24.32	2.056
<b>Probeta 47</b>	4.95	9.75	4.85	24.33	2.035
<b>Probeta 48</b>	4.85	9.9	5	23.49	2.065
<b>Probeta 49</b>	5	9.8	4.85	24.51	2.040
<b>Probeta 50</b>	5	9.85	4.85	24.22	2.064
<b>Probeta 51</b>	5	9.9	4.85	23.44	2.133
<b>Probeta 52</b>	4.9	9.85	4.95	24.37	2.011
<b>Probeta 53</b>	4.95	9.8	5	24.28	2.039
<b>Probeta 54</b>	4.9	9.8	4.9	24.29	2.017
<b>Probeta 55</b>	5	9.8	4.9	24.02	2.082
<b>Probeta 56</b>	5	9.7	5	24.29	2.058
<b>Probeta 57</b>	5	9.85	4.9	23.46	2.131
<b>Probeta 58</b>	4.9	9.85	4.95	23.43	2.091
<b>Probeta 59</b>	4.95	9.8	4.9	24.09	2.055
<b>Probeta 60</b>	4.95	9.75	4.9	24.21	2.045

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Análisis de resultados del Índice de Point Load Test

Antes de la ejecución del Índice de Point Load Test, se midieron las probetas resultantes del corte, de la máquina Covington's, con medidas aproximadas de 5x5x5 centímetros que fueron utilizadas para la ruptura por medio de puntas cónicas, estos ejemplares deben cumplir con una relación  $(\frac{y}{x} = \frac{D}{L}) = 1$  a 1,4 como se lo había mencionado anteriormente en el capítulo 2.

Posteriormente se realizaron los cálculos del  $De^2$  de cada una de las probetas con la siguiente fórmula presentada a continuación:

$$De^2 = \frac{4 \times \text{Área}}{\pi} \quad (9)$$

También se realizaron cálculos del  $Is$  de todas las muestras mediante la siguiente fórmula:

$$Is = \frac{P}{De^2 \times 10,2 \times 9,81 \frac{m}{s^2}} \quad (10)$$

Donde,

P = es la fuerza necesaria para romper la muestra.

De<sup>2</sup> = es el diámetro equivalente de la probeta.

Y por último se realizaron los cálculos del Is<sub>(50)</sub> de las mismas probetas mencionadas anteriormente con la siguiente fórmula:

$$I_{S(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \times I_s \quad (11)$$

Obteniendo de esta manera los cálculos necesarios como se muestra en la tabla 3.2. que son fundamentales para la correlación que se va a llegar a proponer.

Cabe recalcar que en la tabla 3.2 la velocidad adjuntada esta ordenada de mayor a menor y el Is<sub>(50)</sub> de menor a mayor para poder realizar de esta manera la gráfica de correlación.

Tabla 3.2. Resultado de cálculos de la ruptura de las probetas en el ensayo del Índice de Point Load Test.

<b>Máquina Humboldt acoplado con puntas cónicas.</b>										
DESCRIPCIÓN	centímetros				kN		Is	Is <sub>(50)</sub>	mm/min	
	X	Y	Z	Y/X	FUERZA	De <sup>2</sup>			VELOCIDAD	Is <sub>(50)</sub>
<b>PROBETA 1</b>	5.1	5.1	4.9	1.00	24	31.82	8	2.70	2.19	2.41
<b>PROBETA 2</b>	5	5.1	4.85	1.02	32	31.49	10	3.64	2.19	2.45
<b>PROBETA 3</b>	5	5.1	5	1.02	29	32.47	9	3.20	2.18	2.47
<b>PROBETA 4</b>	5	5.15	4.85	1.03	26	31.80	8	2.94	2.18	2.70
<b>PROBETA 5</b>	5	5	5	1.00	22	31.83	7	2.45	2.17	2.76
<b>PROBETA 6</b>	5	5.1	4.9	1.02	27	31.82	8	3.04	2.16	2.76
<b>PROBETA 7</b>	5.05	5.1	4.9	1.01	29	31.82	9	3.26	2.15	2.82
<b>PROBETA 8</b>	5	5.2	4.9	1.04	28	32.44	9	3.11	2.15	2.84
<b>PROBETA 9</b>	4.95	5.25	4.9	1.06	28	32.75	9	3.10	2.15	2.84
<b>PROBETA 10</b>	5	5.3	4.9	1.06	27	33.07	8	2.97	2.14	2.84
<b>PROBETA 11</b>	4.9	5.05	4.9	1.03	29	31.51	9	3.28	2.14	2.88
<b>PROBETA 12</b>	5	5.05	5	1.01	29	32.15	9	3.21	2.13	2.89
<b>PROBETA 13</b>	5	5	4.9	1.00	27	31.19	9	3.07	2.13	2.90
<b>PROBETA 14</b>	4.95	5.05	4.9	1.02	26	31.51	8	2.94	2.13	2.91
<b>PROBETA 15</b>	5	5	4.9	1.00	28	31.19	9	3.18	2.12	2.91

<b>PROBETA 16</b>	5	5.05	4.9	1.01	26	31.51	8	2.94	2.12	2.93
<b>PROBETA 17</b>	4.85	5	4.85	1.03	24	30.88	8	2.76	2.12	2.94
<b>PROBETA 18</b>	4.95	5	4.9	1.01	28	31.19	9	3.18	2.12	2.94
<b>PROBETA 19</b>	5	5.05	5	1.01	30	32.15	9	3.32	2.12	2.94
<b>PROBETA 20</b>	5	5	4.9	1.00	25	31.19	8	2.84	2.11	2.94
<b>PROBETA 21</b>	5.05	5.15	4.9	1.02	26	32.13	8	2.91	2.11	2.96
<b>PROBETA 22</b>	5	5	5	1.00	28	31.83	9	3.12	2.11	2.97
<b>PROBETA 23</b>	4.9	4.9	4.8	1.00	24	29.95	8	2.82	2.11	2.99
<b>PROBETA 24</b>	4.95	5.1	4.95	1.03	31	32.14	10	3.45	2.10	3.01
<b>PROBETA 25</b>	5	5	4.9	1.00	31	31.19	10	3.52	2.10	3.03
<b>PROBETA 26</b>	5	5.1	4.8	1.02	29	31.17	9	3.33	2.09	3.04
<b>PROBETA 27</b>	5	5	4.9	1.00	27	31.19	9	3.07	2.09	3.04
<b>PROBETA 28</b>	5	5	4.85	1.00	24	30.88	8	2.76	2.09	3.05
<b>PROBETA 29</b>	5	5	4.85	1.00	28	30.88	9	3.22	2.09	3.05
<b>PROBETA 30</b>	5	5.05	4.95	1.01	26	31.83	8	2.91	2.09	3.07
<b>PROBETA 31</b>	4.95	5	4.9	1.01	28	31.19	9	3.18	2.08	3.07
<b>PROBETA 32</b>	4.95	5	4.85	1.01	27	30.88	9	3.10	2.08	3.07
<b>PROBETA 33</b>	5	5.05	4.9	1.01	26	31.51	8	2.94	2.08	3.10
<b>PROBETA 34</b>	5.05	5.05	5	1.00	26	32.15	8	2.88	2.07	3.10
<b>PROBETA 35</b>	4.95	5	4.85	1.01	29	30.88	9	3.33	2.07	3.10
<b>PROBETA 36</b>	5.05	5.1	4.95	1.01	27	32.14	8	3.01	2.07	3.11
<b>PROBETA 37</b>	4.9	5	4.9	1.02	26	31.19	8	2.96	2.06	3.12
<b>PROBETA 38</b>	5	5	4.85	1.00	27	30.88	9	3.10	2.06	3.13
<b>PROBETA 39</b>	4.95	5	4.9	1.01	30	31.19	10	3.41	2.06	3.17
<b>PROBETA 40</b>	4.95	5.05	4.9	1.02	28	31.51	9	3.17	2.06	3.17
<b>PROBETA 41</b>	4.95	5	4.9	1.01	25	31.19	8	2.84	2.06	3.18
<b>PROBETA 42</b>	4.95	5	4.9	1.01	28	31.19	9	3.18	2.06	3.18
<b>PROBETA 43</b>	4.9	5.05	4.9	1.03	27	31.51	9	3.05	2.06	3.18
<b>PROBETA 44</b>	4.95	5	4.95	1.01	26	31.51	8	2.93	2.06	3.18
<b>PROBETA 45</b>	5	5.1	4.95	1.02	26	32.14	8	2.89	2.06	3.18
<b>PROBETA 46</b>	4.95	5	4.9	1.01	27	31.19	9	3.07	2.05	3.18
<b>PROBETA 47</b>	4.95	5	4.85	1.01	26	30.88	8	2.99	2.05	3.20
<b>PROBETA 48</b>	5	5.2	4.85	1.04	27	32.11	8	3.03	2.04	3.21
<b>PROBETA 49</b>	5	5.1	4.85	1.02	28	31.49	9	3.18	2.04	3.22
<b>PROBETA 50</b>	4.95	5	4.85	1.01	21	30.88	7	2.41	2.04	3.22
<b>PROBETA 51</b>	5	5	4.85	1.00	28	30.88	9	3.22	2.04	3.26
<b>PROBETA 52</b>	4.9	4.95	4.9	1.01	29	30.88	9	3.31	2.03	3.28
<b>PROBETA 53</b>	4.95	5	4.9	1.01	28	31.19	9	3.18	2.03	3.31
<b>PROBETA 54</b>	4.9	5	4.9	1.02	25	31.19	8	2.84	2.02	3.32
<b>PROBETA 55</b>	5	5.05	4.9	1.01	28	31.51	9	3.17	2.02	3.33
<b>PROBETA 56</b>	5	5	5	1.00	26	31.83	8	2.90	2.02	3.33

<b>PROBETA 57</b>	5	5.1	4.9	1.02	22	31.82	7	2.47	2.01	3.41
<b>PROBETA 58</b>	4.95	5.05	4.9	1.02	27	31.51	9	3.05	1.99	3.45
<b>PROBETA 59</b>	4.95	5.1	4.9	1.03	27	31.82	8	3.04	1.98	3.52
<b>PROBETA 60</b>	4.95	5.15	4.9	1.04	28	32.13	9	3.13	1.95	3.64

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Propuesta de correlación

Para la elaboración de la correlación entre la velocidad del corte de rocas y el Índice de Point Load Test, nos basaremos en los datos de la tabla 3.2, situando la velocidad de corte en el eje de las abscisas y el  $I_s(50)$  en el eje de las ordenadas brindándonos así la siguiente distribución de puntos como se puede ver en la figura 3.1.

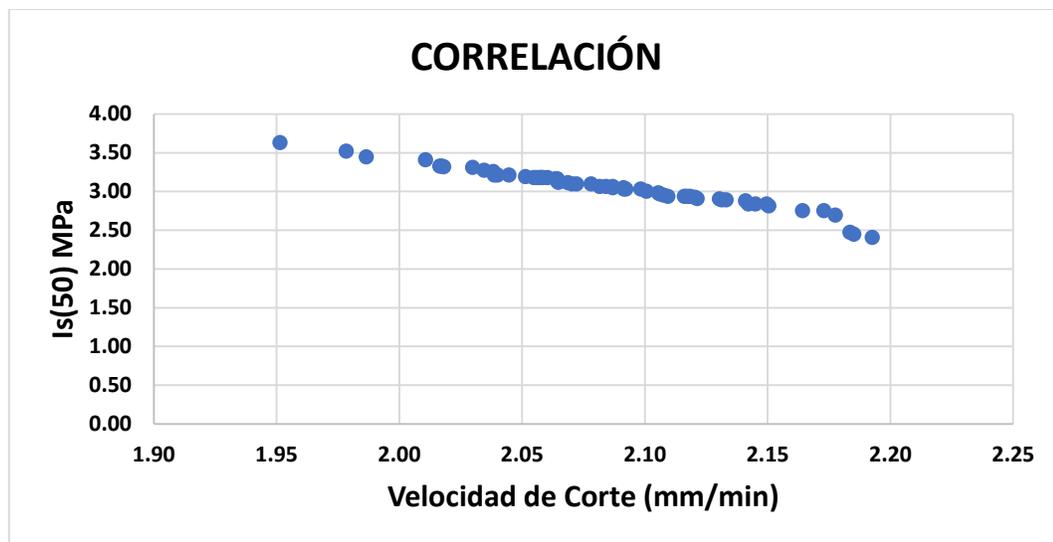


Figura 3.1. Gráfico de correlación entre el  $I_s(50)$  y la Velocidad de Corte.

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.1 Método de mínimos cuadrados

Consecutivamente se realizó el proceso de linealización, mediante el método de mínimos cuadrados. El mismo se basa en trazar una recta entre los puntos dados, brindándonos así una función continua aproximada a los datos proporcionados, esta función viene

representada por el coeficiente  $R^2$ , este coeficiente mientras más cercano sea 1 mejor será la ecuación brindada como se puede observar en la figura 3.2.

La recta tiene una tendencia decreciente, lo que significa que a medida que la roca sea más débil o menos fuerte, la velocidad de corte aumentará y se puede decir que esta relación es inversamente proporcional, por ello queda comprobado que la correlación es exitosa.

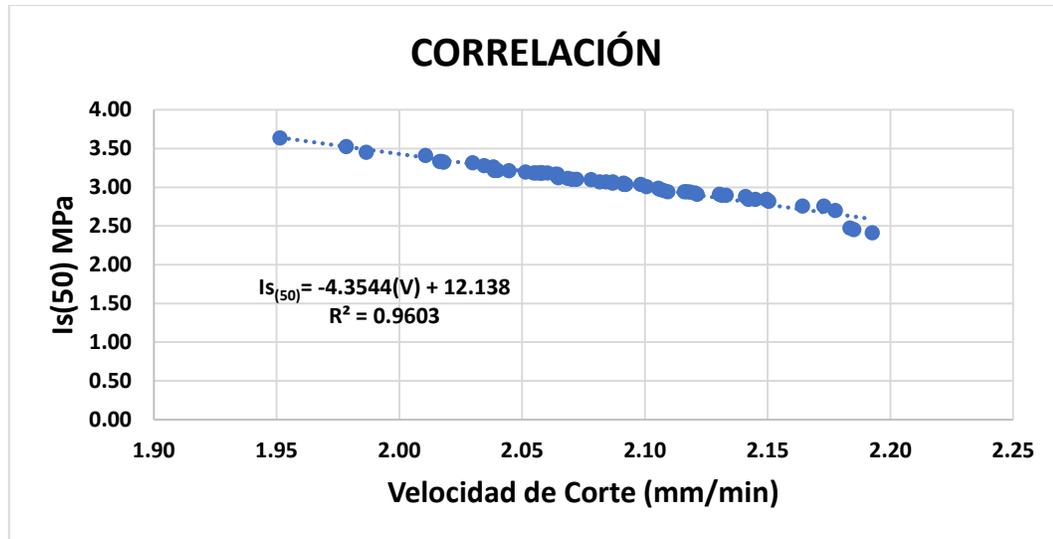


Figura 3.2. Proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados.

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar el proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados podemos observar que  $R^2 = 0.9603$  está muy próximo a 1, esto quiere decir que la correlación realizada es muy buena y la ecuación lineal es la siguiente:

$$IS_{(50)} = -4,3544 \left( \frac{X}{Tiempo} \right) + 12,138 \quad (12)$$

Donde,

X = dimensión de la probeta (mm).

Tiempo = es el tiempo transcurrido al cortar la probeta (min).

### 3.3.2 Correlación entre la compresión simple y la velocidad de corte

Se realizó una nueva evaluación para corroborar que la correlación entre el  $I_s$  (50) y la velocidad de corte es realmente efectiva. Para ello se elaboró una correlación entre la compresión simple y la velocidad de corte.

Según Ramírez & Moge, (2004) lo primero que se debe realizar es pasar las fuerzas (kN) obtenidas por la ruptura de las probetas a esfuerzos (MPa), después dividir para 2,5 debido a que al realizar este tipo de ensayos, se los debería hacer con probetas cuya altura sea 2,5 veces mayor a su diámetro, dicho esto, se procedió obtener los cálculos (ver tabla 3.3) para elaborar una gráfica a través de la distribución de puntos, la cual permite realizar un proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados con su respectiva ecuación lineal y su  $R^2$  como se puede ver en las figuras 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3. Resultado de cálculos de la ruptura de las probetas en compresión simple.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE								
DESCRIPCIÓN	centímetros			MPa	mm/min		mm/min	
	X	Y	Z	ESFUERZO	VELOCIDAD	$I_s$	VELOCIDAD	$I_s$
PROBETA 1	4.9	5.1	4.3	38	2.19	1.66	2.19	1.11
PROBETA 2	4.85	5.1	4.35	37	2.18	1.63	2.19	1.14
PROBETA 3	5	5	4.3	42	2.14	1.84	2.18	1.18
PROBETA 4	4.85	5	4.2	37	2.11	1.61	2.18	1.21
PROBETA 5	5	5	4.4	35	2.15	1.54	2.17	1.22
PROBETA 6	4.9	5	4.35	34	2.17	1.49	2.16	1.26
PROBETA 7	4.9	5.1	4.3	38	2.19	1.64	2.15	1.36
PROBETA 8	4.9	5	4.15	32	2.06	1.41	2.15	1.37
PROBETA 9	4.9	4.95	4.25	33	2.05	1.47	2.15	1.38
PROBETA 10	4.9	5	4.1	28	2.03	1.22	2.14	1.38
PROBETA 11	4.9	5.05	4.55	38	1.95	1.66	2.14	1.41
PROBETA 12	5	5	4.35	41	1.99	1.79	2.13	1.41
PROBETA 13	4.9	5	4.4	39	2.02	1.73	2.13	1.41
PROBETA 14	4.9	4.95	4.45	41	1.98	1.82	2.13	1.43
PROBETA 15	4.9	5	4.45	32	2.13	1.43	2.12	1.44
PROBETA 16	4.9	5	4.45	33	2.09	1.44	2.12	1.44
PROBETA 17	4.85	4.85	4.4	50	2.16	2.21	2.12	1.46
PROBETA 18	4.9	4.95	4.3	37	2.09	1.63	2.12	1.47
PROBETA 19	5	5.05	4.4	34	2.15	1.49	2.12	1.49
PROBETA 20	4.9	5	4.3	43	2.12	1.89	2.11	1.49

<b>PROBETA 21</b>	4.9	5.05	4.3	40	2.10	1.76	2.11	1.52
<b>PROBETA 22</b>	5	5	4.35	45	2.08	1.97	2.11	1.54
<b>PROBETA 23</b>	4.8	4.9	4.4	37	2.08	1.65	2.11	1.60
<b>PROBETA 24</b>	4.95	5.1	4.5	32	2.12	1.41	2.10	1.61
<b>PROBETA 25</b>	4.9	5	4.45	37	2.12	1.60	2.10	1.61
<b>PROBETA 26</b>	4.8	5.1	4.4	41	2.06	1.78	2.09	1.62
<b>PROBETA 27</b>	4.9	5	4.35	43	2.11	1.91	2.09	1.62
<b>PROBETA 28</b>	4.85	5	4.4	31	2.09	1.37	2.09	1.63
<b>PROBETA 29</b>	4.85	5	4.35	45	2.07	1.99	2.09	1.63
<b>PROBETA 30</b>	4.95	5	4.5	51	2.15	2.25	2.09	1.64
<b>PROBETA 31</b>	4.9	4.95	4.35	42	2.12	1.85	2.08	1.64
<b>PROBETA 32</b>	4.85	4.95	4.4	40	2.10	1.76	2.08	1.65
<b>PROBETA 33</b>	4.9	5.05	4.35	37	2.04	1.62	2.08	1.66
<b>PROBETA 34</b>	5	5.05	4.35	49	2.07	2.13	2.07	1.66
<b>PROBETA 35</b>	4.85	4.95	4.3	35	2.06	1.52	2.07	1.67
<b>PROBETA 36</b>	4.95	5.05	4.35	29	2.11	1.26	2.07	1.71
<b>PROBETA 37</b>	4.9	4.9	4.35	32	2.18	1.41	2.06	1.73
<b>PROBETA 38</b>	4.85	5	4.3	45	2.06	1.97	2.06	1.76
<b>PROBETA 39</b>	4.9	4.95	4.4	33	2.12	1.44	2.06	1.76
<b>PROBETA 40</b>	4.9	4.95	4.3	40	2.11	1.78	2.06	1.78
<b>PROBETA 41</b>	4.95	5	4.6	41	2.06	1.81	2.06	1.78
<b>PROBETA 42</b>	4.9	5	4.45	53	2.09	2.34	2.06	1.79
<b>PROBETA 43</b>	4.9	4.9	4.25	25	2.02	1.11	2.06	1.81
<b>PROBETA 44</b>	4.95	5	4.3	44	2.14	1.92	2.06	1.82
<b>PROBETA 45</b>	5	5.1	4.5	32	2.07	1.38	2.06	1.84
<b>PROBETA 46</b>	4.9	5	4.6	38	2.06	1.67	2.05	1.85
<b>PROBETA 47</b>	4.85	4.95	4.35	31	2.03	1.36	2.05	1.87
<b>PROBETA 48</b>	4.85	5	4.3	44	2.06	1.93	2.04	1.89
<b>PROBETA 49</b>	4.85	5	4.3	39	2.04	1.71	2.04	1.91
<b>PROBETA 50</b>	4.85	5	4.45	32	2.06	1.38	2.04	1.92
<b>PROBETA 51</b>	4.85	5	4.5	33	2.13	1.46	2.04	1.93
<b>PROBETA 52</b>	4.9	4.95	4.6	37	2.01	1.64	2.03	1.97
<b>PROBETA 53</b>	4.95	5	4.55	37	2.04	1.62	2.03	1.97
<b>PROBETA 54</b>	4.9	4.9	4.4	42	2.02	1.87	2.02	1.99
<b>PROBETA 55</b>	4.9	5	4.3	28	2.08	1.21	2.02	2.13
<b>PROBETA 56</b>	5	5	4.3	50	2.06	2.18	2.02	2.18
<b>PROBETA 57</b>	4.9	5	4.35	37	2.13	1.61	2.01	2.21
<b>PROBETA 58</b>	4.9	4.95	4.35	54	2.09	2.38	1.99	2.25
<b>PROBETA 59</b>	4.9	4.95	4.3	27	2.05	1.18	1.98	2.34
<b>PROBETA 60</b>	4.9	4.95	4.25	26	2.04	1.14	1.95	2.38

Fuente: Elaboración propia.

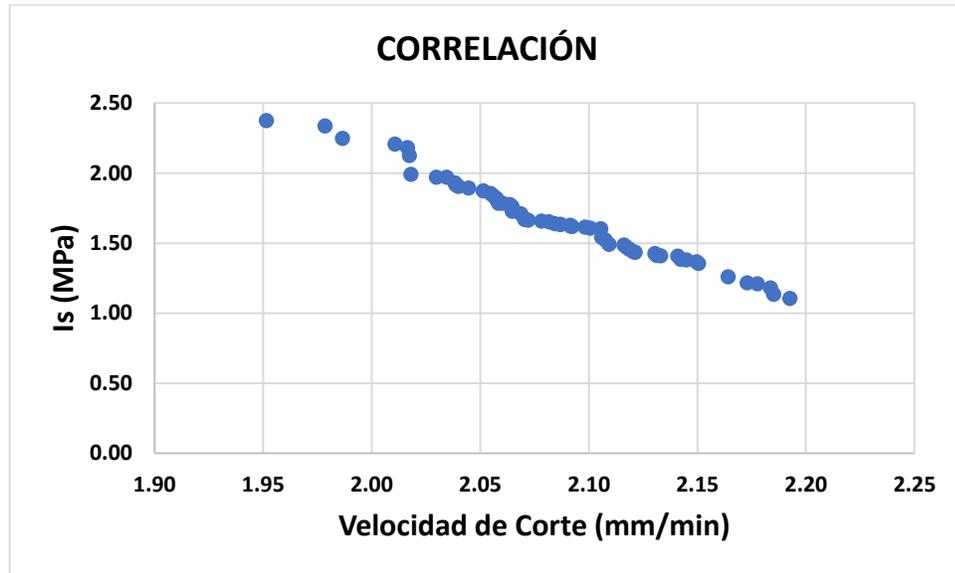


Figura 3.3. Gráfico de correlación entre el Is y la Velocidad de Corte.

Fuente: Elaboración propia.

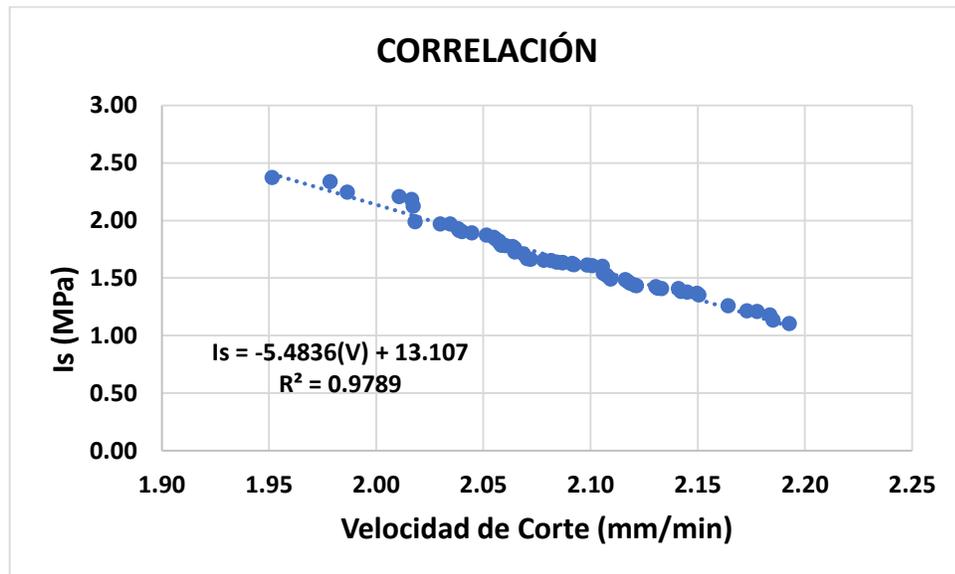


Figura 3.4. Proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados.

Fuente: Elaboración propia.

Inmediatamente luego de efectuar el proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados, se observa que  $R^2 = 0.9789$  que de la misma forma está muy cercano a 1 como en la correlación anterior, obteniendo la siguiente ecuación lineal:

$$I_s = -5,4836 \left( \frac{X}{Tiempo} \right) + 13,107 \quad (13)$$

Con esto se puede corroborar que la correlación entre la Velocidad del Corte de Rocas y el Índice de Point Load Test es óptima debido a que los dos  $R^2$  están muy próximos a 1.

### 3.3.3 Resultado final de la correlación

Posteriormente se realizó una nueva ecuación, basándonos en las ecuaciones (12) y (13) de la compresión simple e Índice de Point Load Test, en relación a la velocidad de corte (ver figura 3.5) con el fin de facilitar el trabajo de los mineros y economizar sus gastos.

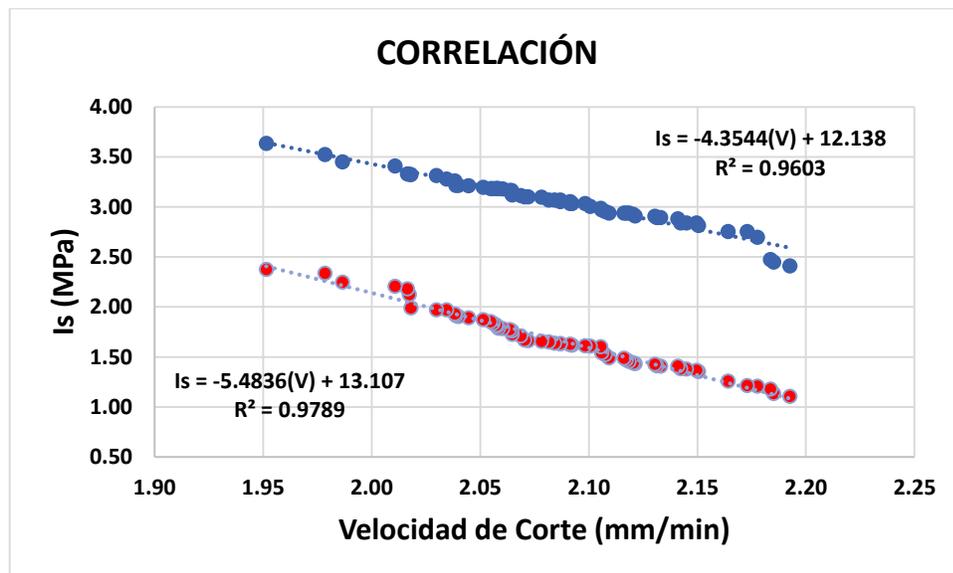


Figura 3.5 Correlaciones de Compresión Simple e Índice de Point Load Test con la Velocidad de Corte.

Fuente: Elaboración propia.

Al ver estas dos ecuaciones (ver figura 3.5) se ha elaborado una nueva ecuación realizando una corrección, para ello se obtuvo la media entre las dos pendientes y se restó 0,3 del valor de 12,138. Para tener así la corrección de la fórmula obtenida en el Índice de Point Load Test en relación a la obtenida en el ensayo de compresión simple como se puede ver a continuación:

$$Is = -4,919 \left( \frac{X}{Tiempo} \right) + 11,838 \quad (14)$$

### 3.4 Interpretación y análisis de resultados

Como primer punto, en el Corte de Rocas, la velocidad es obtenida a partir del eje “X” en milímetros, dividido para el tiempo de corte en minutos, esto se debió a que el corte que realizó la máquina de disco diamantado fue en el eje “X” de la probeta. Como se puede observar en la tabla 3.1 las velocidades no son las mismas, debido a la distribución de los minerales, la forma en la que solidificaron y su anisotropía.

Segundo punto, antes de la ruptura de las probetas, entre las puntas cónicas se debe verificar que la relación entre “Y” y “X” se encuentra en un rango de 1 a 1,4, esto se evidencio en la tabla 3.2 donde todas las probetas cumplen con este requisito. Posteriormente se realizó el cálculo para la obtención del  $Is_{(50)}$  que es fundamental, para la correlación con la velocidad de corte de las probetas, obteniendo así una gráfica de distribución de puntos correlacionados. A partir de estos puntos se elaboró una recta por el proceso de linealización mediante el método de mínimos cuadrados, obteniendo así la ecuación lineal  $Is_{(50)} = - 4,3544(V) + 12,138$  esperada con un porcentaje de efectividad del 96,03%.

Como tercer punto, se realizó una correlación entre la compresión simple y la velocidad de corte de las probetas, para verificar que tan óptima es la ecuación lineal obtenida en la correlación entre el Índice de Point Load Test y la velocidad de corte. En este proceso se obtuvo un  $Is$  de compresión simple, mediante las fuerzas de ruptura en kN que se transformaron en MPa, además a los esfuerzos se los dividieron para 2,5 debido que para realizar este tipo de ensayos es necesario utilizar probetas donde su altura sea 2,5 veces mayor a su diámetro y las probetas que se utilizaron para este efecto no cumplían con dicha relación, por lo que fueron corregidas, como se puede observar en la tabla 3.3. Los cálculos fueron realizados basándonos en esta teoría, y consecutivamente se realizó una gráfica de dispersión de puntos con su respectiva curva, a través del método de mínimos cuadrados, obteniendo una correlación con un porcentaje muy favorable del 97,89% con

esto queda comprobado que la ecuación obtenida en la correlación del Índice de Point Load Test  $I_s(50)$  con la Velocidad de Corte es óptima.

Por último, se elaboró una corrección de la ecuación planteada en la correlación del Índice de Point Load Test  $I_s(50)$  con relación a la obtenida en la de Compresión Simple, con el fin de facilitar el trabajo de los mineros, en encontrar con exactitud el esfuerzo de ruptura de cualquier roca para saber su resistencia y evitar gastos económicos.

## CONCLUSIONES

Basado en los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye que:

1. La correlación obtenida entre la velocidad de corte y el Índice de Point Load Test  $I_s_{(50)}$  es exitosa, debido a que una correlación, es aceptada cuando un  $R^2$  oscila entre 0,6 a 1. Como se puede observar en la figura 3.2, donde la correlación alcanzada fue  $R^2 = 0,9603$ , con esto se puede decir que aparte de ser aprobada la correlación también es muy eficiente.
2. Con esta investigación se presentó una alternativa muy favorable para el desarrollo continuo de las labores mineras, solucionando el problema de enviar varias muestras al laboratorio para determinar la resistencia del material. De esta manera es posible economizar dicho proceso.
3. Los equipos utilizados en esta tesis fueron los apropiados e idóneos para cada uno de los procesos realizados. Esto se pudo reflejar en los resultados obtenidos, lo que ha garantizado que los equipos utilizados son idóneos para encontrar el Índice de Point Load Test  $I_s_{(50)}$ , la resistencia a la compresión simple y velocidad de corte.
4. Con esta investigación práctica, al tener una efectividad muy alta. Las empresas mineras pueden optar por este proceso detallado en la presente investigación, donde se garantiza una explotación minera segura y rápida, debido a los resultados tan certeros, y el continuo desarrollo de actividades.
5. Ya que el estudio fue realizado en la zona del Cañar-Cojitambo y observando que los resultados fueron idóneos, con respecto a la resistencia de la roca andesita, se podría utilizar esta investigación para la explotación de dicho material, el cual es utilizado para adoquines de calzadas, senderos, bordillos, revestimientos decorativos para viviendas, edificios y camineras de la ciudad de Cuenca y zonas aledañas.
6. Al elaborar la correlación entre la compresión simple y la velocidad de corte, ayudo a corroborar la efectividad de los resultados de la correlación entre  $I_s_{(50)}$  y la velocidad de corte, que fueron determinantes para esta investigación.

## RECOMENDACIONES

1. Si el corte en las probetas se realiza con una máquina cortadora de disco diamantado Covington's, se recomienda utilizar un radio de disco con dimensiones de 30 cm, además el uso de una relación de agua-aceite con proporciones 10:1, con la finalidad de una refrigeración correcta del disco al momento del corte.
2. Se recomienda que las muestras a utilizarse sean escrupulosamente preparadas y pulidas (5 x 5 x 10 cm) para de esta forma, garantizar que el tiempo de corte sea óptimo.
3. Al realizar el corte en las probetas, para la obtención de la velocidad, se debe ubicar la probeta perpendicularmente al disco, evitando que la velocidad presente variaciones significantes en los resultados.
4. Mientras mayor sea el número de muestras para la ejecución de los procesos de: corte, compresión simple y ruptura de carga puntual de las rocas, los resultados tendrán una mayor efectividad.
5. Antes de realizar la ejecución de ruptura de las probetas en la máquina de compresión simple, se recomienda poner las probetas en unas mordazas que se ajusten a sus dimensiones de las probetas para que, al momento de ejecutar la compresión con las placas, estas realicen la ruptura de manera paralela a las mordazas, con el fin de que las fuerzas estén totalmente distribuidas en toda la probeta, para obtener de esta manera unos resultados certeros.
6. Ser muy exacto en la ubicación de la probeta entre las puntas cónicas, debido a que, si no están centradas, podría existir una mala recopilación de datos de los esfuerzos de ruptura en el Índice de Point Load Test, por lo que se recomienda marcar un punto céntrico tanto en la cara superior como en la cara inferior de la probeta.
7. En el caso de utilizar la ecuación lineal de la correlación propuesta en esta tesis entre el  $I_s_{(50)}$  y la velocidad de corte de las rocas, es necesario el uso de la misma máquina cortadora de disco diamantado Covington's para hallar su velocidad de corte en las probetas con dimensiones 5 x 5 x 10 cm, debido a que una alteración de estos influye bastante en su respuesta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alamo, G. T. (1994). *GEOMORFOLOGICO*. Madrid: Ediciones Akal.
- ASTM, D. (2016). Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications1. *ASTM International*.
- Besoain, E. (1970). *MINERALOGIA DE SUELOS*. Turrialba: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.
- Bristow, C. R., & Guevara, S. (1980). *Hoja Geologica Azogues, escala 1:100000*. Retrieved from file:///C:/Users/HP/Downloads/12.-%20Hoja%20geol%C3%B3gica%20Azogues%20-%20escala%201%20100.000.pdf
- Burbano, D., & Garcia, T. (2016, Diciembre 23). Estimacion empirica de la resistencia a compresion simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisotropas (esquistos y pizarras). *Investigacion y Desarrollo*, 13-16.
- CEC. (2019). *LAPIDARY & GLASS MACHINERY*. Retrieved from <https://covington-engineering.com/content/pdf/Covington-Catalog.pdf>
- Cordero, & Vazquez, P. D. (2019, Enero). *Manual de practicas de laboratorio de Mecanica de Rocas. (Parte I)*. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/16473/Material%20did%C3%A1ctico.pdf?sequence=3>
- Feijoo, P. (1997). *Manual de mecanica de rocas y estabilidad de tuneles y taludes*. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Ferrer, M., & Vallejo, L. G. (2007). *Manual de campo para la descripcion y caracterizacion de macizos rocosos en afloramientos*. Madrid.
- Godoy, M. T. (2005). *TEXTO UNIVERSITARIO DE PETROLOGÍA*. Puno.
- Gonzalez, L., & Vallejo. (2002). *Libro Ingenieria Geologica*. Retrieved from file:///C:/Users/HP/Downloads/Lab\_1\_Ensayos\_carga\_puntual\_uniaxial\_y\_triaxial.pdf
- Gonzalez, M. (2001). *El terreno*. Barcelona: Edicions UPC.
- Lopez, N., Ruiz, V. M., Romero, O., Fernandez, J., Somoza, J. J., Benitez, V., & Gil, M. (2008). *Biologia y Geologia*. EDITEX.
- Navarrete, M., Alonso, E., Martinez, W., Lara, C., Bedolla, A., Chavez, H., . . . Arteaga, J. (2013, Septiembre 26). Caracterizacion de propiedades fisico-mecanicas de rocas igneas utilizadas en obras de infraestructura. *Revista ALCONPAT*, 133-143.
- Pohjanpera , P., Toivo, W., & Johansson, E. (2005, Octubre). *Point Load Test Results From Olkiluoto Area Borehole Cores*. Retrieved from [http://www.posiva.fi/files/276/WR2005-59\\_web.pdf](http://www.posiva.fi/files/276/WR2005-59_web.pdf)

- Ramírez, P., & Monge, L. A. (2004, Septiembre 9). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid.
- Ramírez, P., de la Cuadra, L., Lain, R., & Grijalbo, E. (1984). *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. Madrid.
- Rodríguez, A. A. (2004). *Geografía general*. Guadalajara: EDITORIAL IMPRESORA APOLO, S.A. DE C.V.
- Suárez del Río, L. M., Rodríguez, A., Calleja, L., & Ruiz de Argandoña, V. G. (1998, Enero 15). El corte de rocas ornamentales con discos diamantados: influencia de los factores propios del sistema de corte. *Materiales de Construcción*, 53-59.
- Tarbut, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra; Una introducción a la Geología Física*. Madrid: PEARSON EDUCACION S. A.
- UPM. (2007, Noviembre). *Explotaciones de Roca Ornamental. Diseño de explotaciones y selección de maquinaria y equipos*. Retrieved from [http://oa.upm.es/21840/1/071120\\_L3\\_ROCA\\_ORNAMENTAL.pdf](http://oa.upm.es/21840/1/071120_L3_ROCA_ORNAMENTAL.pdf)
- Vogt, D. (2016, Noviembre). A review of rock cutting for underground mining: past, present, and future. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 1011-1026.

## ANEXOS

Anexo 1. Ubicación de la probeta en la máquina de disco diamantado Covington's.



Anexo 2. Material rocoso (andesita) del Cojitambo.



Anexo 3. Probetas marcadas antes del proceso de corte.



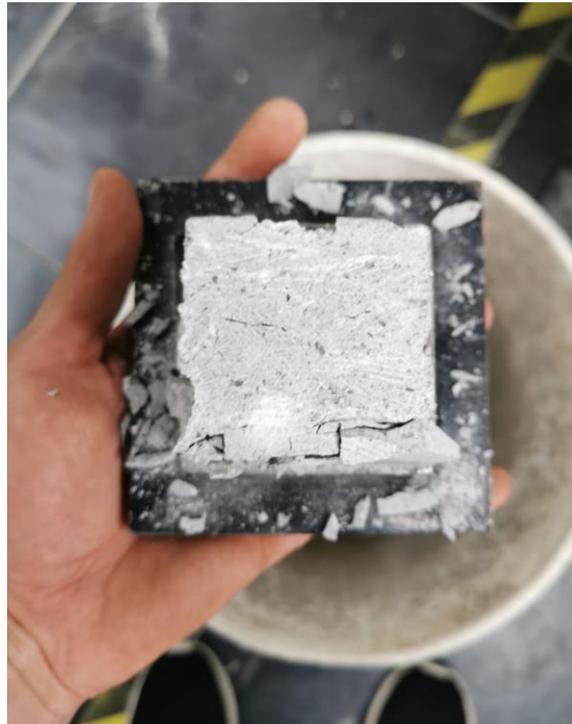
Anexo 4. Placa con descripción del modelo de la máquina de compresión Humboldt.



Anexo 5. Resultado de ruptura de la probeta entre las puntas cónicas.



Anexo 6. Vista superior de ruptura de la probeta en compresión simple.



Anexo 7. Distribución de puntos  $I_s$  en relación a la Velocidad de Corte.

