



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

**“Aplicabilidad del esclerómetro o martillo de Schmidt a la
determinación de la resistencia a la compresión simple en
rocas”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

LUIS RICARDO AUCAY MALDONADO

JONNATHAN DAVID ORDOÑEZ ORDOÑEZ

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

Cuenca, Ecuador

2019

DEDICATORIA

A nuestras familias que, con sus consejos y amor, nos ayudaron afrontar los retos que se han presentado a lo largo de la vida, a nuestros padres que siempre estuvieron brindándonos su confianza, apoyo y amor incondicional, por darnos la educación que hoy nos ha permitido llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, mostrar nuestro agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo Calle, director de tesis, ya que sin su orientación y apoyo esta tesis no hubiera sido posible.

Nuestro agradecimiento a la Universidad del Azuay, quien nos brindó los conocimientos para nuestra formación personal y profesional, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación por parte de los autores y los docentes que han sido un soporte fundamental en todo momento durante todo el periodo de estudio.

El agradecimiento al Instituto al Fomento del Talento Humano (IFTH), que brindó el apoyo por medio del programa de becas, quién el autor Ricardo Aucay M. es becario, del componente reparación de derechos.

De la misma manera agradecer a las diversas empresas e instituciones, por permitirnos ser parte de los proyectos mineros, quienes brindaron las mejores bases en prácticas internacionales mineras, y por la gran calidad humana que han demostrado con su amistad.

El agradecimiento por la confianza y apoyo brindado por parte de la Facultad de Ciencia y Tecnología, que sin duda en el trayecto brindó su apoyo para representar al Universidad del Azuay en ámbitos internacionales.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
 INTRODUCCIÓN.....	 1
 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	 3
1.1. Metodología del muestreo y el análisis	3
1.1.1. Aplicación de la mecánica de rocas en minería	5
1.1.2. Características de las rocas.....	7
1.1.2.1. Densidad	9
1.1.2.2. Humedad	10
1.1.2.3. Porosidad	10
1.1.2.4. Grado de saturación.....	11
1.1.2.5. Velocidad de propagación	11
1.1.2.6. Permeabilidad	13
1.2. Caracterización del esclerómetro o martillo de Schmidt.....	13
1.2.1. Tipos de martillo	14
1.2.2. Descripción y principio de funcionamiento	15
1.3. Caracterización del sistema de muestreo.....	16
1.3.1. Geomecánica de Macizos Rocosos	16
1.3.2. Propiedades Mecánicas	17
1.4. Clasificación del macizo rocoso	19
1.4.1. Clasificación de Terzaghi	20
1.4.2. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD)	21
1.4.3. Clasificación de la estructura de la roca (RSR)	22
1.4.4. Clasificación Geomecánica.....	24
1.4.5. Índice de calidad del macizo rocoso, Q	26

CAPÍTULO II: TOMA DE MUESTRAS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO...28

2.1. Metodología de la investigación: desarrollo de toma de muestras.....	28
2.2. Tipo y método para el análisis de la resistencia a la compresión de la roca en diferentes macizos rocosos.....	30
2.3. Ensayo de compresión por medio de la máquina universal	39

CAPÍTULO III: ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MATEMÁTICO.....44

3.1. Análisis estadístico de muestras.	44
3.1.1. Estudio de contraste de hipótesis, principio de comparabilidad	46
3.1.2. Ejecución experimental.	48
3.2. Análisis y modelamiento: estimación por mínimos cuadrados y regresión logarítmica.....	53
3.3. Análisis de Resultados.....	56

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES59

Conclusiones	59
Recomendaciones.....	60

BIBLIOGRAFÍA61

ANEXOS63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes (Lozano, 2012).	15
Figura 1.2. Principio de funcionamiento del martillo (Lozano, 2012).....	15
Figura 1.3. Comportamiento de rocas a compresión. (Alejano, Arzúa, & Veiga).....	19
Figura 1.4. Procedimiento para designar y calcular el RQD (After Deer, 1989).	21
Figura 2.1. Deformación de la roca sometida a compresión. (Alejano, Arzúa, & Veiga)	34
Figura 3.1. Mapeo geotécnico - geológico	47
Figura 3.2. Muestra Tاهال.....	54
Figura 3.3. Muestra Josefina.	55
Figura 3.4. Muestra Luis Cordero.	55
Figura 3.5. Muestra Cojitambo.	56
Figura 3.6. Conjunto de datos de muestras representativas.	57
Figura 3.7. Correlación Rebotes - Resistencia a la compresión uniaxial.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. División de los métodos mineros principales. (Ramírez Oyanquren & Alejano, 2004).....	7
Tabla 1.2. Densidad y velocidad de propagación de ondas de compresión de algunos minerales (AFTES, 2003)	10
Tabla 1.3. Rango de la estructura de la roca: Parámetro A: Geología.....	23
Tabla 1.4. Rango de la estructura de la roca: Parámetro B: Geología Joint pattern, direction of drive	23
Tabla 1.5. Rango de la estructura de la roca: Parámetro C: Agua subterránea, Condiciones de las juntas.	24
Tabla 1.6. Clasificación cuantitativa del macizo rocoso. (Ramírez Oyanquren & Alejano, 2004).....	27
Tabla 2.1. Autores y descripción de métodos de aplicación de los ensayos con el martillo de Schmidt. (Suárez Burgoa, 2014).....	31
Tabla 2.2. Clasificación de la resistencia según la ISRM (MPa). (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).....	31
Tabla 2.3. Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial.	36
Tabla 2.4. Valores de la constante m_i de la roca intacta para distintos tipos de roca (los valores entre paréntesis corresponden a estimaciones)	37
Tabla 2.5. Valores típicos medidos con martillo de Schmidt. (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2009).....	39
Tabla 3.1. Resultados R obtenidos de muestreo en el Tawal.	48
Tabla 3.2. Resultados R obtenidos de muestreo en la Josefina.	49
Tabla 3.3. Resultados R obtenidos de muestreo en Luis Cordero.....	50
Tabla 3.4. Resultados R obtenidos de muestreo en Cojitambo.	51
Tabla 3.5. Resultados R obtenidos de muestreo en Jadán.	52
Tabla 3.6. Resultados de análisis estadístico.....	53

ÍNDICE DE ANEXOS

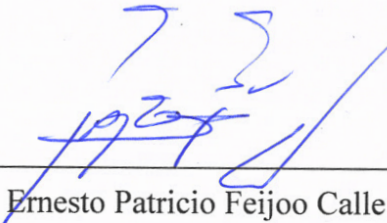
Anexo A. Simbología para mapeo geotécnico - geológico.	63
Anexo B. Hoja geológica 73, Azogues.....	66
Anexo C. . Mapeo geotécnico - geológico. Tahual	67
Anexo D. Mapeo geotécnico - geológico. Josefina.....	68
Anexo E. Mapeo geotécnico - geológico. Luis Cordero.	69
Anexo F. Mapeo geotécnico - geológico. Cojitambo	70
Anexo G. Mapeo geotécnico - geológico. Jadán.....	71

“APLICABILIDAD DEL ESCLERÓMETRO O MARTILLO DE SCHMIDT A LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN ROCAS”

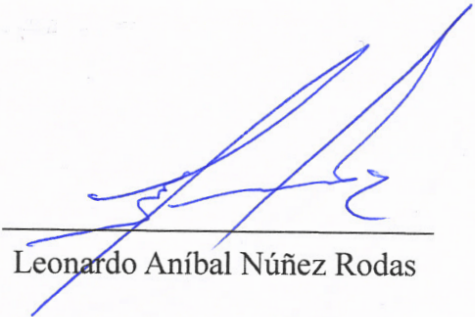
RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue la implementación de ensayos no destructivos en el análisis de la roca en minería. Se plantea usar el esclerómetro o Martillo de Schmidt, con el fin de mejorar y optimizar, tiempo y dinero, ya que los procesos en laboratorio generan inconvenientes al desarrollarlos, en minas que se encuentran en zonas alejadas de las poblaciones. La ventaja que ofrece esta propuesta, respecto a la medición de la compresión de rocas en los laboratorios, es la disminución de tiempos y procesos, ésta determinación consiste; en el análisis y evaluación de los ensayos. Con este modelo se demuestra que, a partir de las pruebas realizadas in situ, con el esclerómetro Tipo L, proporciona un valor que se correlaciona, llegando a la obtención de la resistencia a la compresión de la roca.

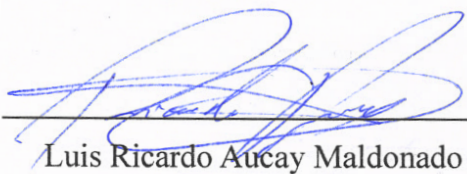
Palabras clave: compresión simple, esclerómetro, minería, rocas.



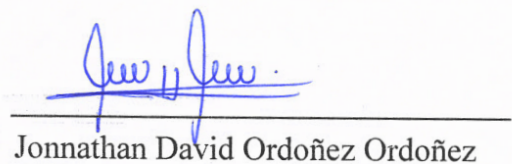
Director del trabajo de titulación



Coordinador de Escuela



Autor



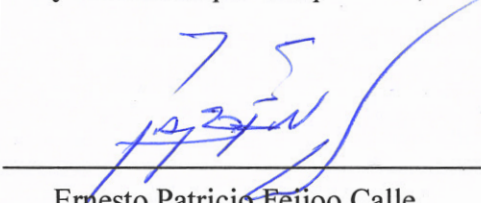
Autor

“APPLICABILITY OF SCLEROMETER OR HAMMER OF SCHMIDT TO DETERMINATION OF RESISTANCE TO SIMPLE COMPRESSION IN ROCKS”

ABSTRACT

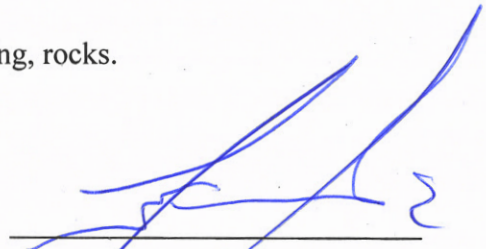
The objective of this research was to implement non-destructive tests in rock analysis in mining. The use of Schmidt's sledgehammer or hammer was proposed for the improvement and optimization of time and money. This was due to the fact that the laboratory processes generated problems in their development in mines that were located in areas far from the towns. The advantages offered by this proposal regarding the measure of rock compression in laboratories were the reduction of time and processes. This determination consisted in the analysis and evaluation of the performed tests. It was demonstrated that this model provided a value that was correlated from the tests carried out in situ with the Type L sclerometer, reaching the compressive strength of the rock.

Keywords: simple compression, sclerometer, mining, rocks.



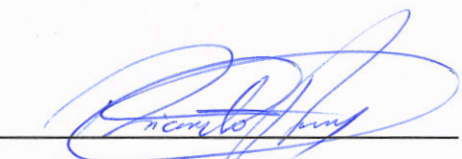
Ernesto Patricio Feijoo Calle

Thesis Director



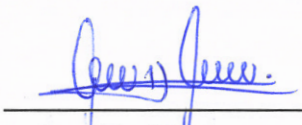
Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Faculty Coordinator



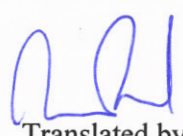
Luis Ricardo Aucay Maldonado

Author



Jonnathan David Ordoñez Ordoñez

Author



Translated by
Ing. Paul Arpi

Aucay Maldonado Luis Ricardo – Jonnathan David Ordoñez Ordoñez

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Enero, 2019

“Aplicabilidad del esclerómetro o martillo de Schmidt a la determinación de la resistencia a la compresión simple en rocas”

INTRODUCCIÓN

El martillo de Schmidt o también llamado esclerómetro es utilizado principalmente para ensayos no destructivos en materiales como el concreto, particularmente en elementos sujetos a flexión.

En la presente investigación se propone la implementación de ensayos no destructivos en el análisis geotécnico de la roca en minería. Existen varios martillos de Schmidt o esclerómetros, según la energía que éste proporciona a la superficie de ensayo pueden ser: (a) tipo L, (b) tipo M, (c) tipo N y (d) tipo P, siendo el tipo L el recomendado por la norma ISRM (1981) por su baja energía (0,74 Nm).

La norma ASTM D 5873-95 establece que se deben tomar 16 lecturas sobre la misma discontinuidad, tomando en cuenta la inclinación del martillo respecto al plano horizontal y los puntos de muestra deberán ser separados por una distancia equivalente a 1,5 cm.

A este procedimiento, se propone usarlo en roca, para la utilización en la industria minera, especialmente en las labores de geotécnia que se realizan en subterráneo y cielo abierto con el fin de mejorar y optimizar los procesos requeridos.

El uso del martillo de Schmidt o esclerómetro in situ, se apoya en la determinación de la resistencia a la compresión del material rocoso, ya que los resultados del esclerómetro dan como referencia los valores de la resistencia de la calidad del hormigón; razón por la cual se va a aplicar este método en las rocas, como una alternativa apropiada para optimizar tiempo y recursos, los cuales son factores de gran importancia en el análisis de factibilidad del proyecto minero.

Esta propuesta consiste en establecer una relación entre parámetros y obtener resultados que permitan generar seguridad y confiabilidad en los valores para aplicarlos posteriormente en la metodología de fortificación minera. Actualmente la problemática fundamental de los Ingenieros en Minas es la necesidad de aplicar los ensayos técnicos in situ. Pero es indispensable conocer las limitaciones y propiedades de los métodos para poder establecer una solución al problema.

La ventaja que ofrece esta propuesta, respecto a la medición de la compresión de rocas en los laboratorios, es la optimización de tiempo y procesos en laboratorio como la resistencia a la compresión simple, que consiste en la extracción de núcleos de roca, evitando así un costo, ahorro en tiempo y mano de obra, ya que la norma internacional ISO 1920-4:2005 "*Testing of Concrete-Part 4-Strength of hardened concrete*", bajo el título general Prueba de hormigón, involucra una serie de desventajas como: demora en la obtención de resultados, costos elevados del análisis de laboratorio y el tiempo perdido en llevar las muestras, debido a que no es aplicable a la industria minera y usualmente las minas se encuentra en lugares lejanos. Esto justifica la razón de ejecutar este tipo de propuestas en el campo.

Determinar una relación que permita establecer la resistencia a la compresión de la roca mediante la utilización del esclerómetro y establecer una correlación con los valores obtenidos de la compresión simple con pruebas de laboratorio, justifica el empleo del esclerómetro como un método alternativo.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Metodología del muestreo y el análisis

La problemática de la Ingeniería Mecánica en todos los diseños estructurales, es la predicción del comportamiento de la estructura bajo las cargas actuantes o durante su vida útil. La temática de la ingeniería de mecánica de rocas, como una práctica aplicada a la Ingeniería de Minas, es concerniente a las aplicaciones de los principios de la ingeniería mecánica al diseño de las estructuras de roca generadas por la actividad minera. Esta disciplina está estrechamente relacionada con las corrientes principales de la mecánica clásica y de la mecánica de materiales, pero hay varios factores específicos que la identifican como un campo distinto y coherente de la ingeniería.

El problema del cual partimos desde el punto de vista ingenieril para los diseños en minería, tanto a cielo abierto o sean subterráneos, es la predicción del comportamiento mecánico del macizo rocoso que este se encuentre sujeto. (J.M Rodríguez; L. Gonzales, 2002)

Se define roca como un agregado sólido, formado por uno o varios minerales, que se encuentra ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre. En la naturaleza las rocas aparecen muy comúnmente atravesadas por distintos caracteres geológicos estructurales y discontinuidades de variado origen geológico, como la estratificación, esquistosidad, pliegues, fallas y juntas o diaclasas. Al conjunto de estas discontinuidades que atraviesan la roca se le suele denominar estructura del macizo rocoso.

Los macizos rocosos se pueden definir como la forma en la que se presenta las rocas en el medio natural, definido por la roca y la estructura con la que se presente, planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues u otro conjunto de discontinuidades que atraviesan la roca. Son por tanto discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas y/o anisótropas.

En mecánica de rocas los macizos donde se trabaja, deben ser; ensayados, analizados y estos resultados serán utilizados de la mejor manera posible para los fines deseados.

Siendo el principal objeto de estudio y material de trabajo, consiste en una serie de bloques o elementos de roca intacta y una estructura formada por múltiples discontinuidades, comúnmente agrupadas en familias, y otros caracteres estructurales, que tanto, la roca como las discontinuidades influyen en el comportamiento, su situación y obras que se realicen en ellos. (J.M Rodríguez; L. Gonzales, 2002).

Dentro de los conceptos generales de Mecánica de Rocas, aplicada a las prácticas mineras y la ingeniería civil, se le confiere como una disciplina diferente y coherente del campo de estudio de las ingenierías. Dando una definición comúnmente aceptada de la mecánica de rocas propuesta en 1974 por el comité americano de esta disciplina es:

“Mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada que estudia el comportamiento mecánico de las rocas y de los macizos rocosos. Sería pues la rama de la ingeniería dedicada al estudio de la respuesta de las rocas y macizos rocosos al campo de fuerzas que actúan en su entorno” (J.M Rodríguez; L. Gonzales, 2002).

Como se define a la Mecánica de Rocas, es de fundamental importancia para la Ingeniería de Minas por que el acto de crear excavaciones para minar cambia los campos de fuerza del ambiente físico de la roca. El estudio de la respuesta de la roca a estos cambios requiere de la aplicación de técnicas analíticas específicamente desarrolladas para dicho propósito, los cuales ahora forman parte de la temática. La mecánica de rocas forma parte de la amplia temática de la geomecánica que se enfoca a la respuesta mecánica de todos los materiales geológicos, incluyendo los suelos.

La erudita sociedad de geomecánica en Australia, “*Australian Geomechanics Society*”, define a la geomecánica como “la aplicación de los principios geológicos y de la ingeniería del comportamiento de los suelos, del agua subterránea y al uso de estos principios a la ingeniería civil, ingeniería de minas e ingeniería ambiental en el sentido más amplio”. Esta definición de geomecánica es casi sinónimo del término ingeniería geotécnica, la cual es definida como “la aplicación de la ciencia de mecánica de suelos, mecánica de rocas, ingeniería geológica y de otras disciplinas relacionadas a la construcción en ingeniería civil, las industrias de extracción y a la preservación y mejora del ambiente” (Anon, 1999).

1.1.1. Aplicación de la mecánica de rocas en minería

La aplicación de los principios de la mecánica de rocas a la ingeniería de minas se basa en premisas simples y tal vez evidentes (Brady y Brown, 1985).

- El primer postulado sería suponer que cualquier macizo rocoso se le puede asignar un conjunto de propiedades mecánicas, que se pueden medir a través de ensayos estándar.
- El segundo principio sería aseverar que las actividades realizadas en minería originan una estructura en la roca, que se puede analizar a partir de los principios de la mecánica clásica.
- El tercer postulado es la capacidad de predecir y controlar el comportamiento de macizo rocoso, en el que se están realizando las operaciones mineras, y que este pueda asegurar o incrementar la rentabilidad económica, es decir una eficiencia máxima del 100% mediada en productividad, o directamente en rentabilidad económica.

Tanto en minería subterránea como en la minería a cielo abierto implican una serie de operaciones que comprenden excavaciones, las mismas cumplen una tarea específica, como es el caso en subterráneo del acceso principal, las galerías de nivel y de transporte, chimeneas de ventilación, infraestructura de acceso y servicios de la explotación, o en cielo abierto excavaciones superficiales, como son el hueco minero que contendrá las infraestructuras de servicio, labores de preparación y operaciones de arranque, cuyo diseño y análisis de estabilidad es objeto de estudio de la mecánica de rocas. (J.M Rodríguez; L. Gonzales, 2002).

Dentro de la infraestructura de la mina se encontrarán excavaciones secundarias, tanto para servicios y operaciones directamente relacionadas con la extracción de mineral como son los transversales de acceso y de reconocimiento, galerías de avance, piques o chimeneas de paso de mineral, excavaciones realizadas para la preparación. Se debe tomar en cuenta que el tercer tipo de excavaciones es la fuente del mineral, donde se realizan las labores de arranque, a tratarse de diferentes frentes se debe considerar la geometría, la calidad y antecedentes geológicos-geotécnicos, que se ha planificado previamente para que sea explotado por medio del método seleccionado.

El problema ingenieril, cuando se pretende realizar diferentes tipos de excavaciones, nace porque se modifican los campos de fuerza en el entorno físico de las rocas, motivo por el que se trata de resolver y dar una predicción del comportamiento mecánico del macizo rocoso. (Brady y Brown, 1985).

Siendo la mecánica de rocas capaz de analizar la estabilidad y diseñar cada una de estas excavaciones de acuerdo al requerimiento operativo deseados por una determinación previa del método de explotación seleccionado. Para ello es indispensable la identificación de la técnica a emplear, estos pueden ser con sostenimiento y sin sostenimiento, cada una se adaptará al método minero a un yacimiento particular. (J.M Rodríguez; L. Gonzales, 2002).

Durante la operatividad de la mina, la mecánica de rocas, independiente del método de explotación, deberá satisfacer cuatro objetivos:

Asegurar la estabilidad general de la mina, entendiéndose como tal a masa de mineral y excavaciones realizadas, el resto del mineral y la roca de caja adyacente.

- a) Proteger las principales excavaciones de servicios a lo largo de su vida operativa.
- b) Ofrecer acceso sencillo a los lugares de trabajo en el entorno de los tajos.
- c) Preservar la condición de explotabilidad de las reservas no explotadas.

Durante las etapas de factibilidad y diseño preliminar de un proyecto, cuando se obtiene muy poca información detallada sobre el macizo rocoso y sus características, las mismas estarán disponibles por medio del uso de un esquema de clasificación como una lista de verificación para asegurar que toda la información relevante ha sido considerada. Con el objetivo de construir una imagen de la composición y características de un macizo rocoso para proporcionar estimaciones iniciales de las propiedades de resistencia y deformación del macizo rocoso.

El método seleccionado dependerá de varios factores que se trabajan en constante armonía, determinado a partir de factores como: tamaño, forma, disposición geométrica, distribución y ley mineral, y aspectos geotécnicos, factor que incluye las propiedades geomecánicas del mineral y de la roca de caja, la estructura del macizo rocoso que nos permite clasificar el macizo cuantitativamente, campo de tensión natural y la presencia y

distribución de agua subterránea. Motivo por el que cada una de estas técnicas básica en la práctica se refleja en varios métodos mineros, expuestos en la Tabla 1.1, mismo que serán adaptados a las condiciones de un yacimiento en particular, siendo cada explotación única debido a las características que presente el yacimiento.

Tabla 1.1. División de los métodos mineros principales.

Explotación con sostenimiento		Explotación por hundimiento (sin sostenimiento)
Sostenimiento Natural	Sostenimiento Artificial	
Cámaras y pilares Grandes cámaras vacías Subniveles	Cámaras almacén Corte y relleno (ascendente o descendente) Explotaciones entibadas *	Tajo largo Huecos y pilares hundidos Bloque hundido Subniveles hundidos

Fuente: (Ramírez Oyanquren & Alejano, 2004)

Se debe tener presente que el uso de una clasificación de macizos rocoso no se debe y no puede reemplazar los procedimientos de diseño. Sin embargo, los procedimientos de diseño requerirán de acceso a información detallada sobre tensiones in situ de la roca, propiedades del macizo y una secuencia de excavación planificada. Mismas que no estarán disponibles en una etapa temprana del proyecto, por ello, es necesario que a medida de la información se encuentre disponibles debe actualizarse y utilizarse junto con los análisis específicos in situ.

1.1.2. Características de las rocas

Las rocas como un sólido, puede ser caracterizadas mediante una serie de propiedades básicas que nos ayudarán a comprender mejor su comportamiento. (*Hoek in Rock Engineering, 2002*).

Dentro de la geomecánica se denomina rocas, “conjunto de agregados mono o poli mineral que constituyen la litosfera y que se presentan consolidados, cementados, aglomerados o de cualquier otra forma de modo que dan lugar a un material de cierta resistencia.” (Ramírez Oyanquren & Alejano, 2004).

Según su génesis, las rocas se dividen en tres grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Para fines geomecánicos se agrupa de acuerdo a su comportamiento mecánico en los siguientes grupos (Goodman, 1980):

- Rocas cristalinas, consisten en cristales imbricados de silicatos, carbonatos, sulfatos u otras sales. Los cristales están generalmente separados por microfisuras, las cuales se pueden encontrar también dentro de ellos mismo, por ejemplo: granito, basalto, gneiss, caliza, dolomita, mármol, sal común, etc.
- Rocas clásticas, consisten en granos o conjuntos de minerales de otras rocas unidos mediante un cemento. Sus propiedades mecánicas dependen fundamentalmente de las características de dicho cemento. Si éste es resistente y rigidamente los granos, la roca también lo es y se comporta de manera frágil. Por el contrario, si el cemento es poco resistente la roca es friable, por ejemplo: areniscas con varios cementos.
- Rocas de grano muy fino, los componentes fundamentales son el limo y arcilla. Estas partículas se encuentran más o menos cementadas según el proceso geológico, sobre todo de compactación, que hayan sufrido. En las rocas sedimentarias las propiedades mecánicas están también relacionadas con la porosidad y con el tamaño del grano, por ejemplo: argilitas, limolitas, margas, etc.
- Rocas orgánicas, las principales rocas son los carbones. Las antracitas y las hullas son, en general, relativamente resistentes, pero suelen tener fisuras. Los lignitos son carbones menos resistentes que los anteriores, por ejemplo: lignito, hulla, antracita, pizarras bituminosas, etc.

Las características y propiedades de las rocas son el resultado de su composición mineralógica, historia geológica, formacional, deformacional y ambiental. Varias de estas características y propiedades físicas se reflejan en comportamientos mecánicos debido a las fuerzas que actúan sobre las rocas, comportamientos que quedan definidos por la resistencia del material; como por ejemplo en el comportamiento de un grano sano, se comporta de forma elástica y frágil frente a elevadas cargas, una margita o una lutita pueden presentar un comportamiento dúctil ante esfuerzos moderados o bajos. (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Es motivo por el que se distinguen características básicas de las rocas, como una serie de propiedades básicas que nos permiten caracterizar desde la forma más común: la densidad, humedad, porosidad, grado de saturación y permeabilidad.

1.1.2.1. Densidad

La densidad de acuerdo como se encuentra la roca, puede distinguirse la densidad natural y la densidad seca, siendo la relación entre la masa de una muestra de roca en su estado natural, o sea, con un cierto contenido de humedad, y el volumen que ocupa.

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

Donde:

ρ = densidad natural.

m = masa de muestra.

v = volumen de la muestra.

Para que la muestra de la roca se la denomine seca, esta deberá ser secada en una estufa a una temperatura de 110° C.

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_s}$$

ρ_s = densidad seca.

m_s = masa seca.

v_s = volumen seco.

Se puede observar en la Tabla 1.2 algunos de las densidades de los minerales expuestos en la misma tabla y la velocidad de propagación, que será analizada posteriormente. (Ramírez Oyanquren & Alejano, 2004).

Tabla 1.2. Densidad y velocidad de propagación de ondas de compresión de algunos minerales

Minerales	Densidad (kg/m ³)	V _p (m/s)
Anfiboles	2980 - 3200	7200
Augita	3200 - 3400	7200
Biotita	2900	5130
Calcita	2710	6660
Dolomita	2870	7900
Magnetita	5170 - 5180	7410
Moscovita	2830	5810
Oligoclasa	2640 - 2670	6260
Olivino	3250 -3400	8400
Ortosa	2570	5690
Cuarzo	22650	6050

Fuente: (AFTES, 2003)

1.1.2.2. Humedad

La humedad de una muestra se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua contenida en la roca que se evapora a 110 (grados) de temperatura y la masa de la muestra seca:

$$H = \frac{m_H}{m_s} * 100$$

Donde:

H = porcentaje de humedad.

mH = masa de agua contenida en la muestra.

ms = masa de la roca seca.

1.1.2.3. Porosidad

La porosidad de una roca es la fracción del volumen total de la roca ocupada por su espacio poroso, y representa el porcentaje del espacio total que puede ser ocupado por líquidos o gases. Esta propiedad determina la propiedad de acumulación de las rocas y, generalmente, se expresa como porcentaje o fracción de la unidad del volumen total:

$$n = \frac{V_p}{V} * 100$$

Donde:

n = porosidad.

Vp = volumen de poros.

En algunas rocas, como las areniscas, los poros se pueden ver a simple vista, en otras solo son visibles con microscopio, como, por ejemplo, granito.

1.1.2.4. Grado de saturación

Grado de saturación es el porcentaje de poros ocupado por el agua, se expresa de la siguiente manera:

$$S_r = \frac{V_H}{V_p} * 100$$

Donde:

Sr = Grado de saturación.

VH = Volumen ocupado por el agua.

Vp = Volumen total de poros.

Cuando la roca está seca Sr = 0 y cuando está saturada Sr = 100.

1.1.2.5. Velocidad de propagación

Velocidad de propagación de ondas ultrasónicas, esta medida de velocidad propagación de ondas ultrasónicas de compresión (P) y cizalladura (S) en una roca proporciona información sobre su porosidad y micro fracturación; también detecta la alteración de la matriz rocosa poli cristalina. (*Hoek in Rock Engineering, 2002*).

Para comprender la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas, debemos conocer los principios, siendo imprescindible que lo que se propaga es la energía de la oscilación, no las partículas del medio. Estas solo oscilan en torno a su posición de equilibrio, por lo tanto, la energía se propaga a través de las partículas individuales de la materia. El número

de oscilaciones o vibraciones de las partículas son respecto al tiempo es la frecuencia la cual nos indica si se trata de un sonido perceptible por el oído humano o de ultrasonido. En el sonido perceptible el número de oscilaciones se encuentra en un rango entre 16 a 20,000 ciclos/segundos, mientras que al tratarse de ultrasonido el rango es superior a los 20,000 ciclos/segundos. Siendo así, que los 20,000 ciclos/segundos son el límite entre lo perceptible y el ultrasonido.

En el caso de la inspección de rocas, la velocidad de propagación de una onda P es función de las constantes elásticas y de la densidad de la roca, siendo independiente de la fuerza que ha producido la perturbación y de su duración:

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Donde:

v_p es la velocidad de propagación.

E es el módulo elástico de la roca.

μ es el coeficiente de Poisson de la roca.

ρ es la densidad de la roca.

El índice de continuidad de una roca se calcula dividiendo el valor teórico de la velocidad que, de acuerdo con su composición mineralógica, deberían tener las ondas P por la velocidad real:

$$IC = \frac{V_p}{V_{P.T.}} * 100$$

Donde:

IC es el índice de continuidad.

V_p es la velocidad real de las ondas P.

$V_{P.T.}$ es la velocidad teórica de las ondas P según la composición mineralógica de la roca.

Cuanto mayor es la fracturación o la porosidad de una roca, menor es su índice de continuidad, ya que la velocidad de las ondas P se ven afectadas negativamente.

La velocidad teórica de propagación se calcula mediante:

$$\frac{1}{V_{P.T.}} = \sum \frac{C_i}{V_{p_i}}$$

Donde:

C_i son las concentraciones en tanto por uno de los minerales contenidos en la roca.

V_{p_i} son las velocidades de las ondas P en cada uno de los minerales (Tabla 1.2).

1.1.2.6. Permeabilidad

Permeabilidad (k) es la capacidad de una roca para permitir el flujo de fluidos, por lo que determina la velocidad a la que se desplaza el fluido que contiene por unidad de tiempo. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través del material, una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. Para ser permeable un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez estos poros deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos a través del material, por lo tanto, hay una relación general entre la porosidad y la permeabilidad.

Donde k es la constante de permeabilidad (empírica) dada en cm^2 .

1.2. Caracterización del esclerómetro o martillo de Schmidt

Las características principales, el funcionamiento y procedimiento de utilización del Martillo de Schmidt (esclerómetro) se basa según la norma ASTM D5873-05 y las recomendaciones de la ISRM (1978c) y su versión revisada (Aydin, 2009), para estimar en el campo o en laboratorio la resistencia a compresión simple de la roca ensayada a partir de la medida del rebote proporcionada por el martillo. (Lozano, 2012).

La principal función radica en un principio para estimar la resistencia a compresión simple del concreto. El martillo de Schmidt se ha modificado según las necesidades que se han ido presentando en el campo profesional, dando lugar a varios modelos, alguno de los cuales resulta apropiado para estimar la resistencia a compresión simple de la roca (RCS). (Lozano, 2012).

Su uso es muy frecuente dada la manejabilidad del aparato, pudiendo aplicarse en roca in situ. El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada.

La medida del rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico debido a Miller (1965) que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano ensayado. (Lozano, 2012).

1.2.1. Tipos de martillo

En la práctica común se utilizan dos tipos de martillo, el tipo L con una energía de impacto de 0.735 Nm y el tipo N con una energía de impacto de 2.207 Nm. Los rebotes medidos con estos martillos se denotan con los símbolos RL y RN, respectivamente.

Ambos martillos proporcionan buenos resultados para valores de compresión simple de la roca o la discontinuidad ensayada dentro del rango 20 - 150 MPa.

Previamente al año 2009, la sociedad internacional de mecánica de rocas (ISRM) recomendaba únicamente el martillo de tipo L; ahora los dos están permitidos. El martillo tipo N se usaba mayoritariamente para concreto. Sin embargo, es menos sensible a las irregularidades de la superficie ensayada y sería por tanto preferible para la realización de ensayos de campo y el martillo de tipo L se usa generalmente para rocas. (Aydin, 2009).

Poole & Farmer en su método proponen según la disposición del martillo de Schmidt, horizontal y vertical hacia abajo, las Ecuaciones , siendo e_{σ} el error estándar que se comete al estimar cualquier valor.

$$\text{(Horizontal)} \quad R_L = 1,180 + 0,717R_N; e_{\sigma} = 3,3$$

$$\text{(Vertical)} \quad R_L = 1,838 + 0,813R_N; e_{\sigma} = 2,9$$

Estas correlaciones fueron realizadas en paredes de macizos rocosos de Turquía, las rocas ensayadas fueron: andesitas, diabasas, peridotitas, gabros, granitos, tufas, brechas, mármoles, calizas y travertinas. Sin embargo, de acuerdo a las correlaciones expuestas se recomienda correlaciones de acuerdo al tipo de roca con el que se esté trabajando. (Suárez Burgoa, 2014)

1.2.2. Descripción y principio de funcionamiento

El martillo de Schmidt Figura 1.1 y 1.2 es un dispositivo mecánico usado para realizar ensayos no destructivos en materiales como el concreto o roca.



Figura 1.1. Sección longitudinal a través del martillo mostrando sus componentes

Fuente: (Lozano, 2012).

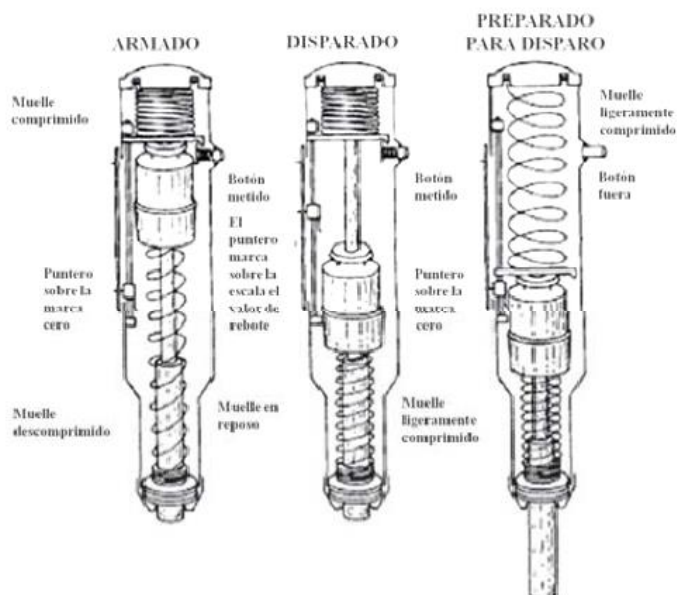


Figura 1.2. Principio de funcionamiento del martillo

Fuente: (Lozano, 2012)

1.3. Caracterización del sistema de muestreo

1.3.1. Geomecánica de Macizos Rocosos

La caracterización global del macizo rocoso constituye la fase final del proceso descriptivo y debe proporcionar las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo en su conjunto. A partir de estos resultados se aplican las clasificaciones geomecánicas, que proporcionan información sobre la calidad y resistencia del macizo, así como datos cuantitativos para su aplicación a diferentes fines constructivos (túneles, taludes, etc.). Esta última fase requiere una mayor experiencia y debe integrar el conocimiento de la geología regional y del emplazamiento. Los resultados de la caracterización geomecánica de afloramientos rocosos pueden presentarse en forma de cartografías de detalle y en perfiles geológico-geotécnicos.

Las rocas: son agregados naturales compuestos de partículas de uno más minerales, con fuertes uniones cohesivas permanentes, que constituyen masas geológicamente independientes y cartografiables.

Las rocas difieren del resto de materiales utilizados en ingeniería en el hecho de que suelen presentar fracturas y otro tipo de discontinuidades estructurales que hacen el material discontinuo por lo que resulta preciso diferenciar claramente la roca intacta del macizo rocoso.

La roca intacta es el bloque ubicado entre las discontinuidades y podría ser representada por una muestra de mano o trozo de testigo que se utiliza para ensayos de laboratorio.

Matriz Rocosa: es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de roca “intacta” que quedan entre ellas, se caracteriza por su peso específico, deformabilidad y resistencia.

Discontinuidad: es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario en un macizo rocoso, generalmente con una resistencia a la tracción muy baja o nula. La presencia de discontinuidades implica un comportamiento no continuo del macizo rocoso.

Macizo Rocos: es el conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. La presencia de discontinuidades (planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues) le da al macizo rocoso un carácter heterogéneo o anisótropo y un comportamiento no continuo.

Los macizos rocosos tienen una caracterización geotécnica la cual consiste en el conjunto de caracteres de origen estructural que están en el mismo, junto con las características particulares e interrelaciones.

Los macizos rocosos son:

- Discontinuos.
- Heterogéneos.
- Anisótropos.
- Inelásticos.
- Los efectos escala les afecta.

1.3.2. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas definen la capacidad del material para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo. Esencialmente, estas fuerzas son de compresión, tensión (o extensión), flexión y de impacto.

Estas propiedades son de índice cualitativo, permiten predecir el comportamiento mecánico de los macizos rocosos y son directamente aplicables dentro del diseño ingenieril. Las propiedades mecánicas más importantes son:

- Deformabilidad.
- Resistencia.
- Permeabilidad.

Cuando una muestra de roca sólida es sometida a grandes esfuerzos lo más seguro es que la roca sea fallada; estas fallas dependen del estado de esfuerzos, del tipo del material y de la geometría de la muestra. También, la historia de los esfuerzos del espécimen puede ser de gran importancia. Las técnicas sugeridas para determinar la deformabilidad, resistencia y las constantes elásticas son dadas por la ISRM (Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas). Los datos que se obtienen de núcleos de roca son aplicados para evaluar el comportamiento mecánico de una roca in-situ. Estos núcleos permiten las mediciones directas de los parámetros de resistencia y de las propiedades elásticas estáticas.

Diversas pruebas de laboratorio han sido desarrolladas para determinar la resistencia de las formaciones de rocas. El tipo de prueba seleccionada para medir una característica particular de la roca deberá simular lo más cerca posible las condiciones encontradas en el yacimiento. Sin embargo, la manipulación de los diferentes factores que influyen en el valor final de resistencia experimental y la experiencia en su manipulación conlleva a que el laboratorio maneje una tolerancia de error de 20 %. Se ha demostrado que ninguna técnica actual es capaz de medir in-situ la resistencia de una roca. Por lo tanto, se requiere de pruebas de laboratorio estándar, basadas en corazones, que pueden proporcionar esos datos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que dichos datos no reproducen exactamente las propiedades in situ a gran escala, porque estas propiedades son influenciadas por diaclasas, fallas, heterogeneidades, planos de debilidad y otros factores.

Las pruebas de laboratorio usualmente consisten en experimentos apropiados para la naturaleza de la roca y con estas pruebas se determina información importante como esfuerzos y deformaciones. El hecho de tener que realizar una prueba para obtener el valor de resistencia de una muestra de roca implica contar con la muestra, llevar a cabo la prueba e interpretar los resultados, lo que finalmente conlleva a gastos que se buscan reducir al contar con una nueva forma de estimar estos valores, de aquí la importancia que se le da al trabajo obtenido y al aporte que brinda en el área.

Resistencia a la tensión (T_o): Máximo esfuerzo que soporta el material ante la rotura por tracción, medida a través de la prueba de resistencia a la tensión o brazilian test, que consiste en la compresión en el punto de soporte de una muestra cilíndrica, aplicando una carga lineal o complexional a través del diámetro de la muestra de roca. (Corzo Rueda & Rincón Pabón, 2004)

Resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS): Resistencia a la compresión uniaxial, consiste en el momento que ocurre la falla de una roca por un esfuerzo dado, es decir el máximo esfuerzo que soporta una roca sometida a un esfuerzo de compresión uniaxial. (Corzo Rueda & Rincón Pabón, 2004).

Uno de los métodos de determinación de esta propiedad es el ensayo de compresión uniaxial que consiste en someter a carga un cilindro recto de muestra de roca con una presión de confinamiento igual a cero hasta que esta falle.

Resistencia a la compresión con confinamiento (CCS): La Resistencia Triaxial llamada comúnmente, es el máximo esfuerzo que soporta una muestra de roca en confinamiento hasta que esta falle. Usualmente en los métodos de determinación de esta propiedad, se incrementa la carga axial y de confinamiento en simultáneo hasta lograr el esfuerzo hidrostático recomendado, para luego aumentar la carga axial, sin que la presión de confinamiento aumente, sino mantenerla constante hasta que la falla ocurra. (Corzo Rueda & Rincón Pabón, 2004).

Para el caso de estudio es importante conocer que la presión de confinamiento está dada por el medio, como un factor influyente en el valor de la resistencia. Siendo así si, que, si no existe confinamiento lateral, se nombrará como compresión simple y si existe confinamiento lateral, se habla de compresión triaxial como se lo ha expuesto.

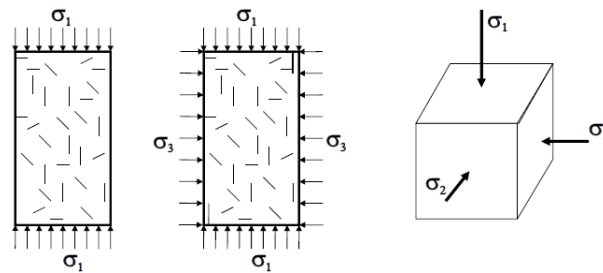


Figura 1.3. Comportamiento de rocas a compresión.

Fuente: (Alejano, Arzúa, & Veiga)

1.4. Clasificación del macizo rocoso

Los esquemas de clasificación de los macizos rocoso se han desarrollado durante más de 100 años desde que Ritter (1879) intentó formalizar un enfoque empírico para el diseño de túneles, en particular para la determinación de los requerimientos de soporte.

La mayoría de los esquemas de clasificación de múltiples parámetros (Wickham et al, 1972, Bieniawski, 1973, 1989, y Barton et al, 1974) se desarrollaron a partir de historias de casos de ingeniería civil en los que se incluyeron los componentes de geología e ingeniería del macizo rocoso. En minería en el desarrollo de niveles subterráneos profundos, meteorización de rocas y la influencia del agua por lo general no son significativos y pueden ser ignorados dependiendo de la etapa de desarrollo del proyecto, especialmente en las primeras etapas.

1.4.1. Clasificación de Terzaghi

Dentro de las referencias más antiguas al uso de la clasificación del macizo rocoso se encuentra los postulados de Terzaghi (1964). Las descripciones del macizo rocoso que incluye llaman la atención el comportamiento masivo, principalmente en situaciones donde la gravedad constituye la fuerza motriz dominante.

Descripciones de Terzaghi citas desde su artículo son:

Roca intacta, no contiene fisuras, ni grietas. Por lo tanto, si se fractura a través de una fuerza externa. Conocida como condiciones de desprendimiento.

También se puede encontrar roca dura o intacta en condiciones de estallido que implica el desprendimiento espontáneo y violento de las losas de roca de los lados o el techo.

Roca estratificada, consiste en estratos individuales con poca o ninguna resistencia con la separación a lo largo de los límites entre los estratos.

Los estratos pueden o no estar debilitados por las articulaciones transversales. En tal roca, la condición de desprendimiento es bastante común.

Roca moderadamente fracturada, contiene juntas y grietas en el techo, pero las juntas en los bloques están íntimamente entrelazadas que las paredes verticales no requieren soporte lateral. En rocas de este tipo, puede encontrarse condiciones de desprendimiento y estallido.

Bloques y rocas marinas, están formadas por fragmentos de rocas químicamente intactas o casi intactas que están completamente separadas unas de otras, o interconectadas de manera imperfecta. En tal roca, las paredes verticales pueden requerir soporte lateral.

Roca triturada, roca químicamente intacta tiene el carácter de trituración continua. Si la mayoría o todos los fragmentos son tan pequeños como granos de arena fina y no ha habido re cementación, la capa freática exhibe las propiedades de una arena con agua.

Roca de escurrimiento lento, avanza hacia el túnel sin aumento perceptible del volumen. Un requisito previo para la compresión es un alto porcentaje de partículas microscópicas y submicroscópicas de minerales micáceos o minerales de arcilla con una baja capacidad de hinchamiento.

Roca hinchada, avanza hacia el túnel principalmente a causa de la expansión. la capacidad de hincharse parece estar limitada a aquellas rocas que contiene minerales arcillosos como la montmorillonita, con una alta capacidad de hinchamiento.

1.4.2. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD)

El índice de designación de la calidad de la roca (RQD) fue desarrollado por Deere (*Deere et al, 1967*) proporcionando una estimación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso a partir de registros de los núcleos de perforación. Se lo define como el porcentaje de piezas de roca intacta en 100 mm de longitud total del núcleo. Dentro de las especificaciones que nos presenta Deere, el núcleo debe ser al menos de tamaño NW (54,7 mm o 2,15 in de diámetro) y debe perforarse con un barril de núcleo de doble tubo. Se podrá observar los procedimientos de medición en la Figura 1.4.

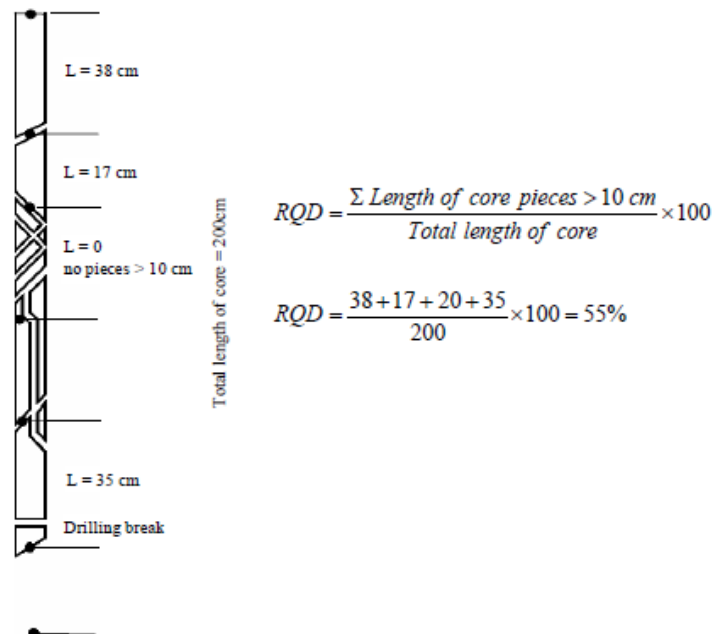


Figura 1.4. Procedimiento para designar y calcular el RQD

Fuente: (*After Deere, 1989*).

Palmström (1982) sugirió que, cuando no hay núcleo disponible pero las trazas de discontinuidad son visibles en las superficies expuestas, el RQD se puede estimar a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen. La relación sugerida para los macizos rocosos es:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

Donde J_v es la suma del número de fracturas por unidad de longitud para todos los conjuntos de fracturas (discontinuidad) conocido como el recuento de fracturas volumétricas.

RQD es un parámetro dependiente de la dirección y su valor puede cambiar significativamente, dependiendo de la orientación del pozo perforado. Pretende presentar la calidad del macizo rocoso in situ. Cabe recalcar que se debe tener cuidado en la identificación y determinación de las fracturas, tanto en el pozo de perforación o en el mapeo de la superficie expuesta, debido a que se pueden presentar fracturas por explosión que no deben incluirse al estimar J_v .

1.4.3. Clasificación de la estructura de la roca (RSR)

Wickham (1972) describe un método cuantitativo para describir la calidad de un macizo rocoso y para seleccionar el soporte adecuado en base a su Clasificación de la Estructura de la Roca (RSR). Dentro de la historia de los casos de estudio en donde fue utilizado este método fueron para túneles relativamente pequeños, soportados por conjuntos de acero, aunque históricamente es uno de los primeros en hacer referencia al soporte de shotcrete.

Siendo un método limitado se cree necesario el analizar el sistema RSR con cierto detalle, la importancia del sistema RSR, es que introdujo el concepto de calificación de cada uno de los componentes enumerados a continuación para llegar a un valor numérico de $RSR = A + B + C$.

- Parámetro A, Geología: evaluación general de la estructura geológica sobre la base de:
 - Origen del tipo de roca (ígneas, metamórficas, sedimentarias).
 - Dureza de la roca (dura, media, suave, descompuesta).
 - Estructura geológica (masiva, ligeramente fallada/plegada, moderadamente fallada/plegada, intensamente fallada/plegada).
- Parámetro B, Geometría: Efecto del patrón de discontinuidad con respecto a la dirección del túnel sobre las siguientes bases:
 - Separación de las juntas.
 - Orientación de las juntas (Dip y Azimut).
 - Dirección del túnel.

- Parámetro C, Efecto del flujo de agua subterránea y la condición de la junta sobre la base:
 - Calidad total del macizo rocoso sobre la base A y B combinados.
 - Condición de la junta (buena, regular, mal).
 - Cantidad de entrada de agua (en galones por minuto por 100 ft de túnel).

Tres tablas del artículo de Wickham (1972) se reproducen en las Tablas 1.3, 1.4 y 1.5. Estas tablas se pueden utilizar para evaluar la calificación de cada uno de estos parámetros para llegar al valor RSR (RSR máximo = 100).

Tabla 1.3. Rango de la estructura de la roca: Parámetro A: Geología.

	Basic Rock Type				Geological Structure			
	Hard	Medium	Soft	Decomposed				
Igneous	1	2	3	4	Slightly	Moderately	Intensively	
Metamorphic	1	2	3	4	Folded or	Folded or	Folded or	
Sedimentary	2	3	4	4	Massive	Faulted	Faulted	Faulted
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

Fuente: (Hoek, Kaiser, & Bawden, 1993)

Tabla 1.4. Rango de la estructura de la roca: Parámetro B: *Geología Joint pattern, direction of drive*

	Strike / to Axis					Strike to Axis		
	Direction of Drive					Direction of Drive		
	Both	With Dip		Against Dip		Either direction		
	Dip of Prominent Joints a					Dip of Prominent Joints		
Average joint spacing	Flat	Dipping	Vertical	Dipping	Vertical	Flat	Dipping	Vertical
1. Very closely jointes, < 2 in	9	11	13	10	12	9	9	7
2. Closely jointed, 2 - 6 in	13	16	19	15	17	14	14	11
3. Moderately jointed, 6 - 12 in	23	24	28	19	22	23	23	19
4. Moderate to blocky, - 1 - 2ft	30	32	36	25	28	30	28	24
5. Blocky to massive. 2 - 4 ft	36	38	40	33	35	36	24	28
6. Massive, > 4 ft	40	43	45	37	40	40	38	34

Fuente: (Hoek, Kaiser, & Bawden, 1993)

Tabla 1.5. Rango de la estructura de la roca: Parámetro C: Agua subterránea, Condiciones de las juntas.

Anticipated water inflow gpm/1000 ft of tunnel	Sum of Parameters A + B					
	13 - 44			45 - 75		
	Joint Condition b			Joint Condition b		
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight, < 200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate, 200 - 1000 gpm	15	22	7	21	16	12
Heavy, > 1000 gpm	10	8	6	18	14	10
a Dip: flat 0 - 20°; and vertical: 50 - 90°						
b Joint condition: good = tight or cemented; fair = slightly weathered; poor = severely weathered, altered or open						

Fuente: (Hoek, Kaiser, & Bawden, 1993)

1.4.4. Clasificación Geomecánica

Bieniawski (1976) realiza la publicación de los detalles de la clasificación del macizo rocoso llamado “*Geomechanics Classification or the Rock Mass Rating*” (RMR), sistema que al pasar los años se han realizado cambios significativos en las calificaciones asignadas a diferentes parámetros. Por tal motivo, las discusiones siguientes se basan en la versión de 1989 (Bieniawski, 1989) en la que trata sobre la estimación de las fuerzas del macizo rocoso. En que se propone seis parámetros para clasificar a un macizo rocoso usando el sistema RMR:

1. Resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso
2. Designación de la calidad de la roca (RQD)
3. Espaciamiento de las discontinuidades
4. Condiciones de las discontinuidades
5. Condiciones del agua subterránea
6. Orientación de las discontinuidades

La aplicación de este sistema implica, que el macizo rocoso se divide en regiones estructurales, clasificando cada una por separado. Estos límites que se generan, generalmente coinciden con una característica estructural importante, como una falla o un cambio de litología. En los casos, en que los cambios significativos dentro del mismo tipo de roca sucedan, se puede requerir la división del macizo rocoso en varias regiones estructurales más pequeñas.

El sistema RMR proporciona una calificación para cada uno de los seis parámetros, en la que, estas calificaciones se suman para dar un valor RMR, que permitirá de acuerdo un conjunto de directrices la selección del soporte para túneles en roca.

Las pautas expuestas por Bieniawski (1989) son para un túnel en forma de herradura de 10 m, construido con métodos de perforación y voladura, en un macizo rocoso sometido a una tensión vertical < 25 MPa (equivalente a una profundidad debajo de superficie de 900 m).

El sistema de clasificación del macizo rocoso (RMR) de Bieniawski se ha sometido a modificaciones que se basaron en las experiencias de casos de ingeniería civil. En consecuencia, la industria minera tomó al sistema RMR como conservador planteando varias modificaciones para hacer que la clasificación sea más relevante para las aplicaciones mineras.

Dentro de las modificaciones, Laubscher (1977, 1984), Laubscher y Taylor (1976) y Laubscher y Page (1990) han descrito un sistema de clasificación del macizo rocoso modificado para la minería (MRMR), según los define Bieniawski este sistema MRMR toma el valor RMR básico y lo ajusta para tener en cuenta las tensiones in situ e inducidas, los cambios de tensión y los efectos de explosiones y la intemperie. Con ello se incorpora un conjunto de recomendaciones de soporte que está asociado al valor MRMR resultante. Originalmente, las excavaciones por bloques en minas de asbesto en África formaron la base para las modificaciones, y posteriormente se agregaron a la base de datos análisis de casos de todo el mundo.

Cummings et al (1982) y Kendorski et al (1983) también modificaron la clasificación RMR de Bieniawski para producir el sistema MBR (RMR básico modificado) para la minería. Este sistema fue desarrollado para operaciones excavaciones por bloques en Estados Unidos. Este sistema implica el uso de diferentes clasificaciones para los parámetros originales utilizados para determinar el valor de RMR y el posterior ajuste del valor de MBR resultante para permitir daños por explosión, tensiones inducidas, características estructurales, distancia desde el frente de desarrollo y el tamaño del bloque.

De igual manera las recomendaciones para el soporte se presentan para desviaciones aisladas o de desarrollo, así como para el soporte final de intersecciones y desviaciones.

1.4.5. Índice de calidad del macizo rocoso, Q

Índice Q “*Rock Mass Quality*” Barton, N. et al (1974) del Instituto Geotécnico Noruego, deduce a partir del análisis de 200 excavaciones subterráneas en macizos rocosos de diferentes características litológicas y estructurales. El valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica de 0.001 a un máximo de 1000, Definiendo la calidad del macizo rocoso de la siguiente manera:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Basados en los 6 parámetros siguientes:

- RQD “*Rock Quality Designation*”
- J_n Número de familias juntas.
- J_r Rugosidad de las juntas.
- J_a Meteorización de las juntas.
- J_w Coeficiente reductor que tiene en cuenta la presencia de agua
- SRF “*Stress Reduction Factor*”, factor dependiente principalmente de las tensiones existentes en el macizo rocoso

El valor de los parámetros J_r y J_a dependen también de la presencia de relleno y del tamaño de las juntas. El índice Q tiene un alto grado de fiabilidad, ya que está basado en un elevado número de casos que comprenden muy diversos tamaños de túneles, tipos de excavación, profundidades y calidades de macizos rocosos. Se recomienda esta clasificación debido a que no se presenta la falta de sensibilidad a los parámetros individuales, debido a que estos aparecen como multiplicadores o divisores, y al amplio rango de parámetros y casos extremos quedan bien reflejados.

Para la determinación debemos recurrir al Anexo 1 en que se presentan toda la simbología utilizada en los mapeos geotécnicos – geológicos con el fin de establecer parámetros para determinar los valores respectivos, como es el caso de diferentes cocientes presentados anteriormente, cada uno permite establecer una determinante;

RQD/Jn que representa el tamaño de los bloques, es una medida cruda con los valores extremos (100/0.5 y 10/20) que difieren en un factor de 400. Si el cociente se interpreta en cm, los tamaños de partículas extremos de 200 a 0.5 cm se consideran aproximaciones bastantes realistas.

Jr/Ja permite estimar la resistencia al corte entre bloques, representando las características de rugosidad y fricción de las paredes de la junta o los materiales de relleno. Este es ponderado a favor de uniones brutas y sin alteraciones en contacto directo.

Jw/SRF indica el estado de tensiones en el macizo rocoso. Puede considerarse como un parámetro de estrés total.

Esta clasificación proporciona y permite orientar con mayor seguridad los ensayos por medio del martillo de Schmidt, siendo necesario contrastarse con otros procedimientos, debido al grado de subjetividad en todas las clasificaciones geomecánicas. Es por este motivo que se observa en la Tabla 1.6 el contraste entre diferentes métodos y la interpretación dada por Ramírez Oyanquren y Alejano (2004).

Tabla 1.6. Clasificación cuantitativa del macizo rocoso.

Clase	Descripción	RMR	Q
0	Excepcionalmente buena	---	100 - 1000
1	Muy buena	81 - 100	40 - 100
2	Buena	61 - 80	10 - 40
3	Media	41 - 60	4 - 10
4	Mala	21 - 40	1 - 4
5	Muy mala	0 - 20	0,1 - 1
6	Excepcionalmente mala	---	0,001 - 0,1

Fuente: (Ramírez Oyanquren & Alejano, 2004)

CAPÍTULO II

TOMA DE MUESTRAS Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

2.1. Metodología de la investigación: desarrollo de toma de muestras

La base de cualquier trabajo es la planificación de las actividades a realizar. Para cumplir con el objetivo disponemos de una serie de herramientas, unas para aplicar en campo y otras en laboratorio.

Para el desarrollo de una propuesta con el esclerómetro en diferentes tipos de rocas, todas estas de características diferentes, se busca la mejor configuración para la obtención de datos, generando mallas de muestreo que optimicen los parámetros técnicos, y que garanticen que los datos obtenidos puedan ser calculados, es decir analizar estadísticamente que los datos tomados presenten un buen ajuste a los parámetros teóricos.

Para la toma de muestras se determinó localidades que nos permitieron aplicar el esclerómetro in situ respetando la norma planteada por el manual de uso del mismo, y así poder resolver problemas de vital importancia en labores mineras como son el tiempo y costos.

Las áreas escogidas para ser estudiadas fueron:

- Cojitambo, ubicado en la provincia de Cañar a 11 km de la ciudad de Azogues, presentando una morfología de tipo multiforme, perteneciente a la Formación Biblián (Mioceno Inferior) piroclástica y lavas andesíticas.
- Luis Cordero ubicado en la provincia de Cañar a 7.2 km de Azogues, presentando una andesita porfídica, dentro de la Formación Tarqui.
- Tahual y Josefina que pertenece a la serie Paute, Meta – volcánicos de San Francisco, en la provincia del Azuay.
- Jadán, parroquia rural del cantón Gualaceo de la provincia del Azuay, presencia de granodiorita y andesitas, de la serie Paute.

Adjunto se encontrará la hoja geológica de Azogues, hoja 73 a escala 1:100000 en el Anexo 2.

Para la aplicación del esclerómetro in situ para la determinación a la compresión simple en rocas, se siguió la metodología planteada por el Ing. Ernest Schmidt (1940), la cual consiste en que se deben aplicar el esclerómetro de manera perpendicular a la cara superficial de la roca, esta cara debe ser lo más plana y menos rugosa posible para conseguir esto debemos aplicar la piedra diamantina, se selecciona la malla de muestreo y se procede a aplicar el esclerómetro y anotar sus datos para luego ser analizados.

La aplicación del esclerómetro en estas zonas se la realizó mediante una malla de muestreo de 20 puntos en un área de 1 m², (áreas aleatorias dentro del macizo siendo 3 como mínimas para ser tomadas las muestras), las áreas deben contar con condiciones idóneas, debe existir poco fracturamiento, buena estabilidad y cohesión, de preferencia las áreas en las que se realizaron los ensayos contaban con caras planas o poco rugosas, meteorización leve, no se realizó en zonas donde se presenta una alteración moderada y que existía presencia de agua.

Es necesario extraer un fragmento de roca en cada una de las áreas donde se realizó los ensayos con el esclerómetro, ya que estas deben ser analizadas en el laboratorio, esta muestra debe ser de consistencia buena, contando con la mayoría de las características del macizo rocoso en el que estamos elaborando las pruebas in situ. Esto se realizará por observación visual de la caracterización de la muestra sea representativa en promedio válido del tipo de roca, minerales, tamaños de grano y forma, separaciones y defectos tales como poros y fisuras, se puede emplear otros métodos tales como mediciones de velocidad ultrasónicas.

Para que la muestra sea analizada en el laboratorio se debe cumplir la normativa ASTM Designación: D 2938 – 95, Método de ensayo estándar para Resistencia de Compresión No confinada de Especímenes de Núcleo de Roca Intacta¹, misma que nos permite integrar el valor de la resistencia a la compresión a varias fórmulas de diseño o propiedades para la selección de técnicas de excavación adecuadas empleando un criterio apropiado para aplicaciones de ingeniería.

La normativa nos deja claro que las resistencias obtenidas en laboratorio de los núcleos de roca no reflejan de manera exacta las propiedades in situ de un macizo rocoso por las influencias geológicas y geomecánicas. Por lo tanto, la roca será tratada delicada y para que los datos sean fiables, después de ser cortada debe ser pulida en los extremos para

que queden planos, se pone el espécimen en el marco de carga y si, se requiere, se calienta a la temperatura del ensayo deseada. Se aumenta de manera continua la carga axial en el espécimen hasta que la roca se fracture y este valor es RUC.

2.2. Tipo y método para el análisis de la resistencia a la compresión de la roca en diferentes macizos rocosos.

El ensayo con los martillos tipo Schmidt (*SHT: Schmidt Hammer Test*), método de prueba no destructivo, se representa una medida de la elasticidad a la colisión entre dos cuerpos con la raíz cuadrada de la relación de la altura de rebote h entre la altura de caída de la masa H . A dicha variable se la denomina coeficiente de restitución, estos valores son variables entre el 0% a 100%, donde las colisiones perfectas tienen un R_r de 100% y las colisiones inelásticas totales, un valor de 0%.

$$R_r = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

Donde:

R_r Coeficiente de restitución.

H Altura de caída de la masa.

h Altura de rebote.

Para determinar la resistencia a la compresión por medio del martillo de Schmidt es necesario utilizar procesos confiables, ya que estos deben corroborar que los datos obtenidos por este medio de los ensayos son fiables, siendo necesario analizar algunos de los métodos descritos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Autores y descripción de métodos de aplicación de los ensayos con el martillo de Schmidt.

Autor(es)	Descripción
Young R.P., Fowell R.J.	Malla reticular
ISRM	Registro de 20 valores de impacto, promedio 10 más altos.
Soiltest	Registrar 15 valores y promedio de 10 más altos, máxima desviación debe ser menor a 2,5-
Poole R.W., Farmer I.W.	Seleccionar el valor más alto de una serie de cinco valores continuos en un punto. Promediar los máximos de tres grupos de ensayos realizados en tres puntos separados.
USBR	Realizar 10 lecturas puntos diversos, descartar 5 valores y promediar 5.
ASTM D5873	Registrar valores en 10 lugares representativos, un ensayo por punto, descartar valores que difieran en 7 unidades del promedio.
ASTM C805	Registrar valores en 10 lugares representativos, un ensayo por punto, descartar valores que difieran en 6 unidades del promedio.

Fuente: (Suárez Burgoa, 2014)

Analizando los métodos existentes se seleccionó el más utilizado por comunidad científica y con mayor grado confiabilidad en sus resultados, el ISRM, este consiste en registrar 20 valores de impactos de los cuales el promedio de 10 de los valores más altos se usa. Además, se tomará en cuenta que dependen de varios factores geológicos y estructurales que influyen representativamente en los resultados.

Tabla 2.2. Clasificación de la resistencia según la ISRM (MPa).

Descripción	Resistencia a la comprensión
Extremadamente blanda	< 1 MPa
Muy blanda	1-5 MPa
Blanda	5-25 MPa
Moderadamente blanda	25-50 MPa
Dura	50-100 MPa
Muy dura	100-250 MPa
Extremadamente dura	250 MPa

Fuente: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

La aplicación del martillo de Schmidt en el proceso de la determinación a la resistencia a la compresión simple, es importante conocer varios criterios que nos permitan correlacionar los resultados tomados en campo. Varios de estos criterios son meramente empíricos, dando a confusiones en las interpretaciones que han sido publicadas por varios autores

El profesor Hoek explica con la mayor claridad el criterio expuesto por él, que comprende todo el rango de tipos de macizo rocoso, el mismo, que se ha encontrado funciona bien en la práctica. El criterio de falla generalizado de Hoek-Brown para macizos rocosos fracturados está definido por:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \times (m_b \times \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s)^a$$

Donde:

σ_1 y σ_3 Son los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, respectivamente.

m_b Es el valor de la constante m de Hoek-Brown para el macizo rocoso.

s y a Son constantes que dependen de las características del macizo rocoso

σ_{ci} Es la resistencia a la compresión uniaxial de los trozos o bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso.

Para los bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso, mismo que son objeto de estudio en el presente, la ecuación (arriba) se simplifica a:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \times (m_b \times \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1)^{0.5}$$

Donde m_b es un valor deducido de la constante de la roca intacta m_i que vendrá dada por:

$$m_b = m_i \times \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

D es un factor que depende del grado de perturbación al que haya sido sometido el macizo rocoso debido a los daños originados por voladura y relajación tensional. Este parámetro variará entre 0 para macizos rocosos in situ intactos, hasta 1 para macizos rocosos muy perturbados.

GSI (*Geological Strength Index*) estima la reducción de la resistencia del macizo para diferentes condiciones geológicas, se basa en las descripciones de la calidad del macizo rocoso en lugar de formular datos de entrada cuantitativos como en los sistemas RMR, Q y RMi. El GSI solo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas.

La relación entre los esfuerzos principales efectivos está definida por dos constantes, la resistencia a la compresión no confinada σ_{ci} y una constante m_i , dentro del criterio se recomienda el análisis estadístico de los resultados obtenidos de una serie de ensayos efectuados sobre testigos o muestras cuidadosamente preparados para ensayos triaxiales.

Dentro del comportamiento de las rocas a compresión, cuando las tensiones son diferentes en las tres direcciones principales se habla realmente de ensayos triaxiales. Estas tensiones se miden en unidades de presión ($F/s = N/m^2 = Pa$) y dado las magnitudes normales con las que se trabaja en mecánica de rocas, es recomendable trabajar en MPa.

Las rocas tras someterse a compresión tienen a deformarse como se podrá observar en las Figura 2.1, la misma que es una magnitud adimensional, esta deformación en pruebas de laboratorio se suele medir la deformación unitaria axial o longitudinal denominada:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$$

y la deformación unitaria radial o transversal:

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta R}{R}$$

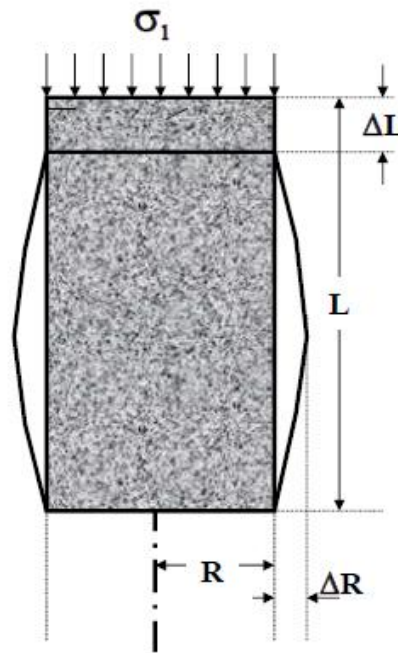


Figura 2.1. Deformación de la roca sometida a compresión.

Fuente: (Alejano, Arzúa, & Veiga)

Para la determinación de los valores, el rango de valores del esfuerzo principal menor, utilizado en los ensayos, es crítico para la determinación de valores confiables de estas dos constantes. En el caso de que sea posible realizar pruebas en laboratorio, se pueden utilizar las Tablas 2.3 y 2.4 para estimar los valores σ_{ci} y m_i . En el caso de la determinación de la resistencia a la compresión simple in situ por medio de martillo de Schmidt se consideran estos valores, debido a que se puede sobreestimar la resistencia in situ del macizo rocoso, según Martin & Chandler (1994) al ensayar rocas muy duras y frágiles, las pruebas de laboratorio solo reflejan en el orden del 70% de la resistencia in situ con la resistencia medida en laboratorio, debido al daño resultante del micro fracturamiento de la roca inicia y se desarrolla intensidades críticas en niveles de esfuerzo más bajo en el campo que en las pruebas de laboratorio, realizadas éstas últimas con razones de carga más altas y sobre especímenes más pequeños.

Razón por la que el índice de rebote, que es un indicativo hasta cierta profundidad limitada desde la superficie, dando resultados del comportamiento de la roca en campo ya que las razones de carga serán distribuidas ordenadamente en niveles de esfuerzo más bajo y con mayor cantidad de pruebas. Por ello, la heterogeneidad en la sección

transversal no se indicará mediante número de rebote, la estimación de la resistencia no se puede considerar muy precisa, pero se debe tomar en cuenta las ventajas y desventajas de la prueba con el martillo de Schmidt.

En los casos de estudio con rocas anisotrópicas y foliadas como las pizarras, esquistos y filitas, cuyo comportamiento es dominado por planos de debilidad, clivaje o esquistosidad, los cuales son muy poco espaciados, presentan dificultades al momento de la determinación de su resistencia en compresión no confinada.

Tabla 2.3. Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial.

Clase (a)	Calificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (MPa)	Índice de carga puntual (MPa)	Estimación en terreno de la resistencia	Ejemplos
R6	Extremadamente Resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales en la roca	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy Resistente	100 -250	4 -10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	Resistente	50 -100	2- 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, areniscas, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente Resistente	25 - 50	1 - 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarras, limolitas.
R2	Débil	5 -25	(b)	Un golpe con la punta del martillo geológico deja una indentación superficial. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy Débil	1 -5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente Débil	0.25 -1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

(a) Clases según Brown (1981).

(b) Para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 MPa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.

Fuente: (Alejano, Arzúa, & Veiga)

Tabla 2.4. Valores de la constante m_i de la roca intacta para distintos tipos de roca (los valores entre paréntesis corresponden a estimaciones)

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
			<----- Grauwaca -----> (18)			
	No clásticas	Orgánicas	<----- Creta -----> 7 <---- Carbón ----> (8 - 21)			
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza micrítica 8	
		Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13	
METAMORFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 - 8	Filitas (10)	Pizarras 9
IGNEAS	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
			Diorita (28)		Andesita 19	
		Oscuras	Gabbro 27	Dolerita (19)		
			Norita 22		Basalto (17)	
	Extrusivas Piroclásticas		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)	

Fuente: (Alejano, Arzúa, & Veiga)

Los autores no pueden ofrecer ninguna guía exacta sobre la elección de σ_{ci} , sin embargo, proponen que el valor máximo se debería usar para los macizos rocosos duros, aquellos que no presenten ni alteraciones ni meteorización, siendo el caso de las pizarras de buena calidad. Los valores mínimos serán usados para los macizos rocosos de mala calidad y tectónicamente alterados, como son las filitas grafiticas analizados por Salcedo (1983).

Dado el caso de estudio para el análisis de resistencia a la compresión uniaxial de las rocas, empleando ensayos con el martillo tipo Schmidt (SHT: Schmidt Hammer Test) se sugiere escoger tres o más áreas con una previa clasificación del macizo rocoso para determinar la calidad de la roca y el macizo en todas la superficie seleccionadas para realizar los ensayos, tomando en cuenta que en ciertos casos de forma aleatoria se escogieron zonas con mayor debilidad o con roca más sana, se tomará en cuenta el punto de vista estadístico los resultados de las pruebas realizadas no serán representativos de la población.

Después de aplicar el esclerómetro en las áreas seleccionadas, se realizará una clasificación de la calidad del macizo rocoso por medio de la clasificación de Barton et al. (1974), en esta clasificación se catalogan según el denominado índice de calidad Q.

Se hizo un ensayo SHT en cada área para obtener un valor de R (# de rebotes) por punto, en que se obtuvo un mínimo de 60 ensayos por macizo rocoso seleccionado, los datos obtenidos son analizados estadísticamente con valores representativos y comparados con los resultados obtenidos en la prensa y con la clasificación de macizos rocosos del Q de Barton.

La Tabla 2.5 muestra valores típicos medidos en diferentes tipos de roca con un martillo Schmidt tipo L (RL).

Tabla 2.5. Valores típicos medidos con martillo de Schmidt.

Tipo de roca	RL
Andesita	28-52
Arenisca	30-47
Basalto	35-58
Caliza	16-59
Creta	39
Cuarcita	36-59
Diabasa	40-60
Dolomía	40-60
Esquisto	29-41
Gabro	49
Gneiss	48
Limolita	45-56
Lutita	15
Marga	18-39
Mármol	31-47
Peridotita	45
Prasinita	41
Sal	23
Serpentina	45
Toba	13-40
Yeso	30-44

Fuente: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2009).

2.3. Ensayo de compresión por medio de la máquina universal

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal de las rocas, el concreto u otros materiales, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm² y con alguna frecuencia lb/pulg² (psi). La equivalencia que hay entre los dos es que 1 psi es igual a 0.07 kg/cm². Aunque hoy en día se la expresa en MPa de acuerdo con el sistema internacional de unidades.

El ensayo de compresión es meramente lo contrario del de tensión con respecto a la dirección o el sentido del esfuerzo aplicado. Las razones generales para la elección de uno u otro tipo de ensayo se establecieron. Asimismo, un número de principios generales se desarrolló a través de la sección sobre el ensayo de tensión sobre los cuales son igualmente aplicables al ensayo de compresión. Existen, sin embargo, varias limitaciones especiales del ensayo de compresión a las cuales se debe dirigir la atención:

- La dificultad de aplicar una carga verdaderamente concéntrica o axial.
- El carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga tensiva,

Existe siempre una tendencia al establecimiento de esfuerzos flexionantes y a que el efecto de las irregularidades de alineación accidentales dentro de la probeta se acentúa a medida que la carga prosigue.

La fricción entre los puentes de la máquina de ensayo o las placas de apoyo y las superficies de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de esta. Esto puede alterar considerablemente los resultados que se obtendrían si tal condición de ensayo no estuviera presente.

Las áreas seccionales, relativamente mayores de la probeta para ensayo de compresión para obtener un grado apropiado de estabilidad de la pieza.

Esto se traduce en la necesidad de una máquina de ensayo de capacidad relativamente grande o probetas tan pequeñas y, por lo tanto, tan cortas que resulta difícil obtener de ellas mediciones de deformación de precisión adecuada. Se supone que se desean las características simples del material y no la acción de los miembros estructurales.

El ensayo más reconocido universalmente para ejecutar pruebas de resistencia mecánica a la compresión simple es el ensayo de probetas cilíndricas por medio de la máquina (máquina universal), para las cuales se construyen cilindros de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura (relación diámetro: altura 1:2).

Los procedimientos relativos a este ensayo se encuentran especificados en las normas NTC 550 y 673 que hacen referencia a la confección de cilindros y al ensayo de resistencia compresión.

Una vez que la muestra de concreto u otros materiales ha sido correctamente seleccionada y extraída de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma NTC 454, de manera que sea representativa de toda la masa, se procede de la siguiente manera:

La resistencia a la compresión se mide con una prensa que aplica carga sobre la superficie del cilindro (Norma NTC 673). Generalmente esta superficie es áspera y no plana, lo cual puede conducir a concentraciones de esfuerzo que reducen considerablemente la resistencia real del material. Una falta de planicie de 0.25mm puede reducir a un tercio la resistencia. Para remediar esta situación, normalmente se hace un refrentado o cabeceado de las tapas del cilindro con materiales como yeso o mezclas compuestas de azufre, tal como se especifica en la norma NTC 504. La resistencia a la compresión, se acostumbra a dar en términos de esfuerzo o sea fuerza por unidad de área, en kg/cm² o en MPa.

Proceso para realizar la prueba a la resistencia por medio de los cilindros.

Los cilindros para las pruebas de aceptación deben tener una relación de tamaño proporcional 2:1 (es decir una medida de 5cm de base por 10 cm de altura), las probetas más pequeñas tienden a ser más fáciles de elaborar y manipular en campo y en laboratorio.

Con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente los cilindros se cabecean con mortero azufre (ASTM C617) o con almohadillas (ASTM C1231).

El diámetro del cilindro se debe medir en dos sitios en ángulos rectos entre sí a media altura de la probeta y deben promediarse para calcular el área de la sección. Si los diámetros medidos difieren en más de 2% no se debe someter a prueba el cilindro.

Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro en más de 0.5% y en los extremos deben hallarse planos dentro de un margen de 0.002 pulgadas con respecto a la horizontalidad de los planos. Este valor es aplicado más en la teoría ya que en la práctica es difícil alcanzar y evaluar las medidas planteadas por esta norma.

Una vez efectuado los pasos anteriores se procede a introducir el cilindro dentro de la máquina y a efectuar la carga la cual nos dará el resultado, el mismo que consiste en aplicar una fuerza axial F a una muestra, probeta cilíndrica o cuadrada de área A , llevándola hasta la rotura mediante una prensa. La resistencia se define por:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

Según la norma UNE 1990, para realizar los ensayos las probetas deben cumplir con los siguientes requisitos:

Dimensiones:

Relación altura/ancho (diámetro) de 2.5 a 3.0

Ancho (diámetro), mayor de 10 veces el tamaño máximo de grano de la roca

Ancho (diámetro) no inferior a 50 mm

Las probetas se elaborarán mediante perforación, corte y pulido o cualquier otro método apropiado, de modo que:

La superficie lateral de la probeta debe ser lisa y estar libre de irregularidades.

Las bases deben ser planas y formar un ángulo recto con el eje de la probeta.

Se debe evitar el empleo de materiales de recubrimiento como igualadores para conseguir el paralelismo requerido de las superficies de las bases de la probeta de ensayo. Si fuera necesario desviarse de esta regla debido a las características propias del material a ensayar, habrá que indicarlo en el protocolo de ensayo.

Motivo por el que, los requerimientos en cuanto a la muestra a ensayar son difíciles de cumplir y en algunas ocasiones resultan imposibles, se realizará varios ensayos con un mismo tipo de roca.

Evidentemente, para dar lugar a dicha propuesta se debe partir de ciertos valores como son la resistencia a compresión simple de la roca, juntos con otros valores, que conjunto dan lugar al estudio del macizo rocoso.

La estimación de los parámetros de Mohr-Coulomb del macizo a partir del criterio de rotura de Hoek-Brown, siendo el criterio de rotura es la superficie definida por sus tensiones principales σ_1 , σ_2 y σ_3 , o mayor intermedia y menor, respectivamente, definiendo el lugar geométrico de los estados tensionales en el momento en el que se produce la rotura de la roca, y la familiarización con parámetros de cohesión y fricción

que con aquellos propios del criterio de rotura de Hoek-Brown, se convierte en necesario los ángulos de fricción y cohesión correspondientes a cada macizo rocoso para cada gama de tensiones. (Ramírez Oyanquiren & Alejano, 2004)

CAPÍTULO III

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y MATEMÁTICO

3.1. Análisis estadístico de muestras.

Una vez aplicado el esclerómetro in situ en las zonas seleccionadas (5 zonas, 3 áreas en cada zona), obtuvimos un total de 299 rebotes (ensayos), estos van a ser comparados y analizados estadísticamente con los resultados obtenidos en el laboratorio por la prensa universal.

En cada zona se obtuvo 60 rebotes (ensayos) los cuales fueron analizados con el método estadístico, tan solo se estudia una de las múltiples muestras que se obtuvieron de la población de referencia. Las diferentes técnicas de la estadística inferencial se fundamentan en que esta variabilidad inherente al proceso de muestreo sigue leyes conocidas y puede ser cuantificada y sus resultados son fiables.

Siendo una variable cuantitativa, la media “m” y la desviación estándar “s” observadas en los ensayos realizados son la mejor estimación que dispone de los verdaderos valores de los parámetros poblacionales, por lo tanto, el parámetro de resistencia a la compresión simple puede diferir a diversos resultados, se necesita una medida de la precisión de esta estimación, lo que se hizo mediante el cálculo del llamado intervalo de confianza (IC).

Para obtener una confianza de aproximadamente 95% en la estimación, se trabaja con un valor α del 5%, que corresponde a un valor Z (distribución normal tipificada) de 1.96.

IC: de una media (variable cuantitativa): $m \pm (Z \times ESM)$

Siendo $ESM = s\sqrt{n}$

IC: de una proporción (variable cualitativa): $p \pm (Z \times ESP)$

Siendo $ESM = \sqrt{\frac{p(1-P)}{n}}$

m Media observada en la muestra;

s Desviación estándar observada en la muestra;

n Número de individuos de la muestra;

ESM Error estándar de la media;

ESP Error estándar de la proporción;

Z Valor de la variable normal tipificada correspondiente al valor α para un nivel de confianza $(1-\alpha)$.

Este cálculo se basa en la distribución normal. El valor de Z para un IC del 95% es 1.96. Para muestras de tamaño inferior a 30 individuos, este valor debe sustituirse por el de la distribución de la t de Student-Fisher para $(n-1)$ grados de libertad. (Jiménez)

Las variables cualitativas no presentan una distribución normal. Las fórmulas se basan en una aproximación a la normalidad, aplicable cuando los productos $n \cdot p$ y $n \cdot (1-p)$ son mayores de 5. (Jiménez)

Es importante determinar el número de ensayos que son necesarios a incluir en la determinación de la media la población total de la zona seleccionada, asumiendo la aleatoriedad de los ensayos, se debe tener en cuenta la posibilidad de existencia de otras fuentes de error, errores sistemáticos o sesgos. Incluso en el caso de un número excesivo de ensayos encarece el estudio, tanto desde la parte económica como el de recursos humanos físicos necesarios. Mientras que un estudio con un tamaño insuficiente estimará un parámetro con poca precisión.

Cabe recalcar que este estudio nos sirve para demostrar y corroborar la hipótesis planteada de la aplicabilidad del esclerómetro para determinar la compresión simple en rocas, una vez comprobado los resultados el número de muestras serán proporcionales.

Por lo tanto, descartar las lecturas que difieren del promedio de diez lecturas, en más de 6 unidades y determinar el promedio de las lecturas remanentes. Si más de dos lecturas difieren del promedio en 6 unidades, se debe descartar el conjunto completo de lecturas, del área de ensayo. Es decir que el rango de lecturas no debe exceder de 12 para una precisión de la desviación estándar en un solo operador, y que las muestras escogidas sean analítica y matemáticamente confiables.

3.1.1. Estudio de contraste de hipótesis, principio de comparabilidad

En los estudios analíticos, además de principio de representatividad, debe cumplirse el de comparabilidad de los grupos analizados in situ. Estos estudios se basan en que los grupos son comparables por todos los factores pronósticos y en que se ha obtenido la información de la misma forma en todos ellos, de manera que las diferencias en los resultados observados puedan atribuirse al factor que se está estudiando.

La función del grupo control es proporcionar una estimación del valor de la variable de respuesta en ausencia del factor de estudio. En otras palabras, debe permitirse aislar el efecto del factor de estudio debido a otros factores, por lo que grupo control debe ser comparable al de estudio en todas aquellas variables que puedan influir sobre la respuesta o su medición.

El proceso de formación de los grupos depende del tipo de estudio. En los diseños observables se realiza una comparación en función de la existencia o no del valor. En los estudios experimentales los valores son encontrados por diferentes métodos y en diferentes grupos, para comparar por un proceso aleatorio.

Dado el caso de un estudio experimental, el grupo de comparabilidad se lo toma a los datos obtenidos de las pruebas de compresión realizadas en laboratorio y la clasificación a la que se le da al macizo rocoso estudiado, en función de la calidad cualitativa que se designe de acuerdo un levantamiento de campo a través del siguiente formato, Figura 3.1 el mismo que nos permite encontrar un factor de estudio que permite aislar previamente las muestras de acuerdo a este resultado para su posterior estudio experimental y de laboratorio.

La prueba de resistencia a la compresión simple o resistencia a la compresión uniaxial se desarrolló mediante el uso de una prensa hidráulica Humbolt modelo PC-160 con capacidad de carga de aplastamiento de hasta 50000 kilogramos de fuerza. Esta prensa se encuentra en las instalaciones de la Universidad del Azuay, laboratorio de la facultad de Ciencia y Tecnología.

MAPEO GEOTECNICO - GEOLOGICO																																																																			
Levantamiento de Campo																																																																			
Localidad:				N° de registro:																																																															
Orientación:				Realizado por:																																																															
Inclinación:				Fecha:																																																															
Condiciones del Macizo Rocoso																																																																			
Resistencia de la Roca	R6	R5	R4	R3	R2	R1	< R0																																																												
Rango	15	12	7	4	2	1	0																																																												
Meteorización	Sana	Leve	Moderada	Alta	Descompuesta																																																														
Alteración	Sana	Leve	Moderada	Alta	Intensa																																																														
Rango	6	5	3	1	0																																																														
Num. Fracturas /m3	< 8	8 a 12	13 a 19	20 a 27	> 27																																																														
Espaciamiento c/d	> 2m	0,6 a 2m	0,6 a 0,2m	0,2 a 0,06m	<0,06m																																																														
Rango	Excelente	Buena	Regular	Pobre	Muy pobre																																																														
Condiciones de Discontinuidades Observadas																																																																			
Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 -10 m	10 - 20 m	> 20 m																																																														
Rango	6	4	2	1	0																																																														
Presencia de Agua (* Aguas Subterráneas)																																																																			
Lts/min	ninguno	< 10	10 a 25	26 a 125		> 125																																																													
Rango	Seco	Húmedo	Mojado	Presión moderada		Problemas de agua																																																													
Calculo RQD																																																																			
RQD = 115 - 3,3(X + Y + Z)																																																																			
Sector	X		Y		Z		RQD																																																												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Indice Q de Barton</th> <th colspan="2">GSI</th> <th colspan="2">Roca:</th> </tr> <tr> <th>Parámetros</th> <th>Sector</th> <th></th> <th>Sector</th> <th>Tipo I:</th> <th>> 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RQD</td> <td></td> <td>A</td> <td></td> <td>Tipo II:</td> <td>1,00 a 3,00</td> </tr> <tr> <td>Jn</td> <td></td> <td>M</td> <td></td> <td>Tipo III:</td> <td>0,1 a 1</td> </tr> <tr> <td>Jr</td> <td></td> <td>B</td> <td></td> <td>Tipo IV:</td> <td>0,01 a 0,1</td> </tr> <tr> <td>Ja</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Tipo V:</td> <td>< 0,01</td> </tr> <tr> <td>Jw</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SRF</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Q</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>R. Tipo</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								Indice Q de Barton		GSI		Roca:		Parámetros	Sector		Sector	Tipo I:	> 3	RQD		A		Tipo II:	1,00 a 3,00	Jn		M		Tipo III:	0,1 a 1	Jr		B		Tipo IV:	0,01 a 0,1	Ja				Tipo V:	< 0,01	Jw						SRF						Q						R. Tipo					
Indice Q de Barton		GSI		Roca:																																																															
Parámetros	Sector		Sector	Tipo I:	> 3																																																														
RQD		A		Tipo II:	1,00 a 3,00																																																														
Jn		M		Tipo III:	0,1 a 1																																																														
Jr		B		Tipo IV:	0,01 a 0,1																																																														
Ja				Tipo V:	< 0,01																																																														
Jw																																																																			
SRF																																																																			
Q																																																																			
R. Tipo																																																																			
$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$																																																																			
OBSERVACIONES:																																																																			

Figura 3.1. Mapeo geotécnico – geológico

Fuente: (Hoek, Kaiser, & Bawden, 1993), (Hudson J. A., 1989)

3.1.2. Ejecución experimental.

A continuación, se muestran los valores obtenidos en el campo, se extrajo una muestra representativa para lograr determinar la resistencia a la compresión simple de cada una de las zonas en las pruebas de laboratorio, interpretando sus valores de acuerdo al mapeo previo de la roca. En las Tablas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran los resultados de los ensayos realizados sobre roca, la roca se encontraba en estado seco al ambiente, esto no garantiza un contenido de humedad del 0%, por tanto, es probable que se presenten efectos de la humedad natural sobre los valores R. Sin embargo, las pruebas realizadas en laboratorio se realizaron cumpliendo cada uno de los parámetros establecidos por la norma aplicada, con el objetivo de obtener los mejores resultados para garantizar la comparabilidad de los valores, que garantizan las ventajas del método no destructivo.

Tabla 3.1. Resultados R obtenidos de muestreo en el Tاهال.

TAHUAL					
R1	Obs.	R2	Obs.	R3	Obs.
18		18	F5	20	F5
24		18		20	F5
30		20		20	F5
32		28		20	
32		28		22	
34		30		28	
36	J	30		28	F4
40		30		28	F5
42		32	C5	30	F3
44	J	34		30	
44		36	F5	32	F3
45		36		32	
45		36		32	
46		36	F5	38	
46		38		40	
46		38		42	
50		40		42	
52		40		42	
56	J	42		44	
56	F4	42	F5	46	

En esta tabla se muestra el total de las muestras tomadas in situ, siendo R el resultado de los rebotes en cada zona de estudio, donde R1, R2, R3 corresponden a cada una de las

áreas aleatorias donde se realizó las pruebas, como se mencionó anteriormente en cada zona son 3 áreas las que se muestrea para poder validar los datos, los mismos que se pueden observar en los Anexos 3, 4, 5, 6 y 7.

In situ se puede observar gracias mapeo geotécnico-geológico parámetros geomecánicos que son de gran importancia al evaluar una roca, por ejemplo, en las muestras realizadas en el Tuhual se observó que la roca es buena ya que posee bajo fracturamiento, estuvo seca, sin alteración y leve meteorización.

Estas características se obtienen mediante la simbología presentada en las tablas, donde F corresponde a las condiciones de fracturamiento en la sección, J corresponde a las juntas y C corresponde a la competencia del macizo rocoso, todos estos parámetros son evaluados del 1 al 5 siendo 5 las mejores condiciones y 1 las peores condiciones. Se recomienda para la interpretación revisar el Anexo 1. Simbología para mapeo geotécnico-geológico.

Tabla 3.2. Resultados R obtenidos de muestreo en la Josefina.

JOSEFINA					
R1	Obs.	R2	Obs.	R3	Obs.
10	F3	28		32	J
40		32		32	
12	F3	40		52	
24	F5	48		44	
40		34	J	40	
38		18		40	
34		42		36	
20	F5	32		44	
34		40		42	
30		40		44	
40		40		48	
16		28	J	36	J
14		36		48	
40		12	F4	46	
24	F5	20	J	40	
10	F3	30		34	J
42		14	F3	30	J
20	J	16	F3	32	
20	J	26	J	48	C5
42	C5	-		44	

En las muestras realizadas en la Josefina se observó; roca con meteorización moderada, sin alteración, fracturamiento leve, con buena resistencia, se recomienda realizar los ensayos de compresión simple de acuerdo al protocolo de propuesto.

Tabla 3.3. Resultados R obtenidos de muestreo en Luis Cordero.

LUIS CORDERO					
R1	Obs.	R2	Obs.	R3	Obs.
32	J	62		62	
64		60		56	F5
56		63		68	
64		66		62	
64		64		64	
54	J	66		66	
66		64		66	
54		68		52	J
60		64		68	
62		60		64	
58		64		68	
52		68		62	
56	J	64		62	
62		67		62	
64		64		50	J
62		64		62	
50	J	58	F5	64	
56		64		64	
60		64		62	
56		62		64	

En las muestras realizadas en Luis Cordero se observó; roca con meteorización leve, sin alteración, fracturamiento leve, con buena resistencia y buena cohesión de la roca, se recomienda realizar los ensayos de compresión simple de acuerdo al protocolo de propuesto.

Tabla 3.4. Resultados R obtenidos de muestreo en Cojitambo.

COJITAMBO					
R1	Obs.	R2	Obs.	R3	Obs.
44		46		46	
48		46		44	F5
54	C5	50		44	
40		42		46	
40		43		52	
42		48		44	
30	F4	42		42	J
42		42		48	
42		46		46	
46		43		48	
50		41		52	
34	J	48		44	
45		50		48	
46		46		50	
47		50		56	
48		60	C5	48	
40		48		52	
46		52		48	
50		46		46	
42		62	C5	58	

En las muestras realizadas en Cojitambo se observó; roca con meteorización alta, alteración leve, fracturamiento leve, con buena resistencia y buena cohesión de la roca, se recomienda realizar los ensayos de compresión simple de acuerdo al protocolo de propuesto.

Tabla 3.5. Resultados R obtenidos de muestreo en Jadán.

JADAN					
R1	Obs.	R2	Obs.	R3	Obs.
32		34		30	
35		22	F3	26	
22	F3	32		32	
20	F3	30		34	
36		32		36	
20	F4	38		34	
28		22	F3	46	
24		40	Sil.	24	F4
37		22	F3	44	C3
36		60	C3	46	
34		20	F3	34	
28		50	C3	20	F3
24		32		46	C3
22	F3	34		46	C3
32		40		48	
36		32		36	
30		46	C3	20	F3
20	F3	36		22	F3
28		44		32	
30		24	F3	46	C3

En las muestras realizadas en Jadán se observó; roca con meteorización moderada, alteración leve, alto fracturamiento, mala cohesión de la roca, no se recomienda realizar los ensayos de compresión simple.

Expuesto los resultados y posterior a los ensayos realizados, la Tabla 3.5 muestra datos de una roca incompetente para realizar muestras en laboratorio, debido a su fracturamiento.

La dificultad de cumplir con los requerimientos de la muestra para realizar las pruebas de compresión en la prensa universal, resulta imposible obtener los de resistencia a la compresión simple, descartando a dichos puntos en la correlación.

Los resultados más frecuentes de R serán analizados y correlacionados con los datos en laboratorio, de acuerdo a cada zona muestreada. Estos datos se ajustan con un nivel de confianza de acuerdo a cada zona establecida los resultados de acuerdo a los parámetros de análisis se observarán en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados de análisis estadístico.

	Tahual	Josefina	Luis Cordero	Cojitambo	Jadán	Conjunto de datos
Nivel de confianza	77%	72%	67%	99%	76%	99%
Media	36,50	30,50	53,88	47,33	36	42,70
Desviación estandar	11,35	12,76	12,20	8,66	10,56	14,21
Mediana	37	31	57	46,5	35,5	43
Intervalo de confianza	36,475	30,475	53,850	47,308	35,975	42,681
	μ	μ	μ	μ	μ	μ
	36,525	30,525	53,900	47,358	36,025	42,723

Partiendo de los resultados obtenidos del análisis estadístico, se realizaron los análisis en laboratorio, en los que se obtuvo la siguiente información de acuerdo a cada zona estudiada, con respecto a la resistencia a la compresión simple. Esto nos permitirá determinar la relación existente entre la aplicación del martillo de Schmidt y las pruebas en laboratorio.

En general los criterios de rotura se refieren a la resistencia de pico, aunque también se pueden emplear en resistencia residual, debido a que es la relación entre las tensiones principales que permite predecir la resistencia de una roca sometida a un campo tensional.

3.2. Análisis y modelamiento: estimación por mínimos cuadrados y regresión logarítmica.

El análisis y modelamiento nos permitió estudiar la naturaleza de la relación entre las variables de estudio, resistencia a la compresión simple in situ mediante ensayos con el martillo de Schmidt y ensayos de resistencia en laboratorio. Una técnica previa de análisis numérico fue por mínimos cuadrados (optimización matemática) cuyo objetivo consiste en la obtención de la función que mejor se ajuste a los datos observados de las variables objeto de estudio.

Desde un punto de vista estadístico, un requisito implícito para que funcione el método de mínimos cuadrados es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria. El teorema de Gauss-Márkov prueba que los estimadores mínimos cuadráticos carecen de sesgo y que el muestreo de datos no tiene que ajustarse, por ejemplo, a

una distribución normal. También es importante que los datos a procesar estén bien escogidos, para que permitan visibilidad en las variables que han de ser resueltas, para dar más peso a un dato en particular.

Se podrá observar que, de acuerdo a las zonas de estudio, los datos al analizarlos mediante mínimos cuadrados no logran un coeficiente de determinación apropiado, teniendo en cuenta que, la curva logarítmica es también una recta, pero en lugar de estar referida a las variables originales X e Y, está referida a $\ln(x)$ y a Y.

La representación gráfica de cada una de las zonas muestreadas, donde el eje de la abscisa representado por R corresponde al número de rebotes y el eje de la ordenada representado por σ corresponde a la resistencia a la compresión simple en MPa de la roca. Permiten el análisis como una nube de puntos, fue preciso estudiar la ecuación característica que define al modelo:

$$Y_i = A \times X B_i \times E$$

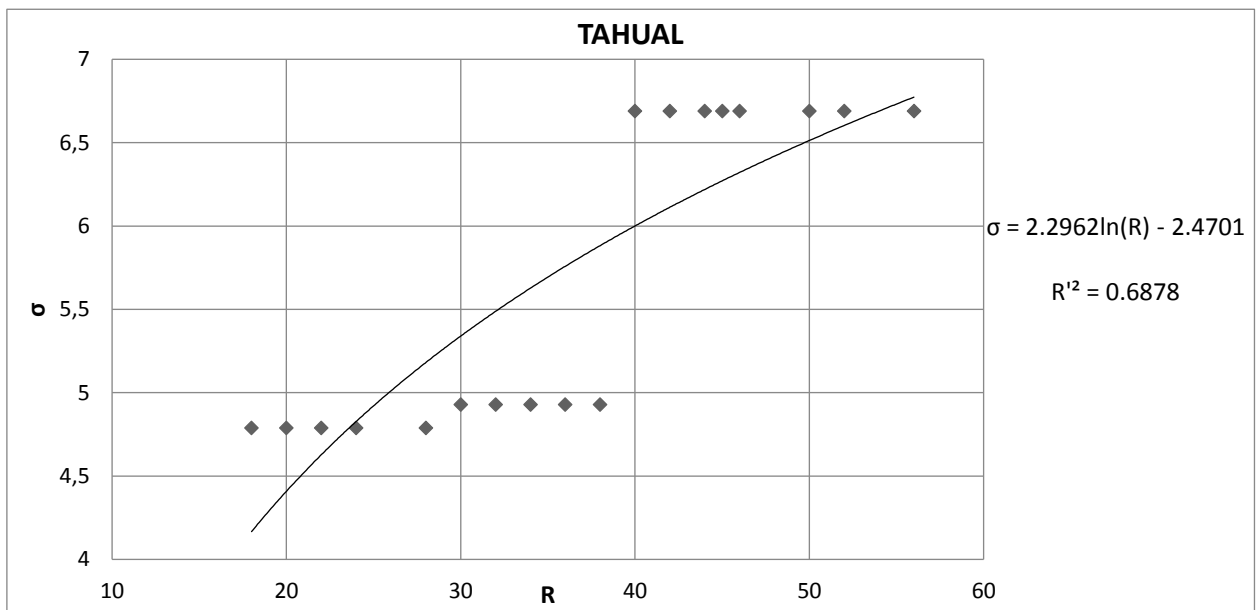


Figura 3.2. Muestra Tahual

$$\sigma = 2.2962 \ln(R) - 2.4701$$

$$R'^2 = 0.6878$$

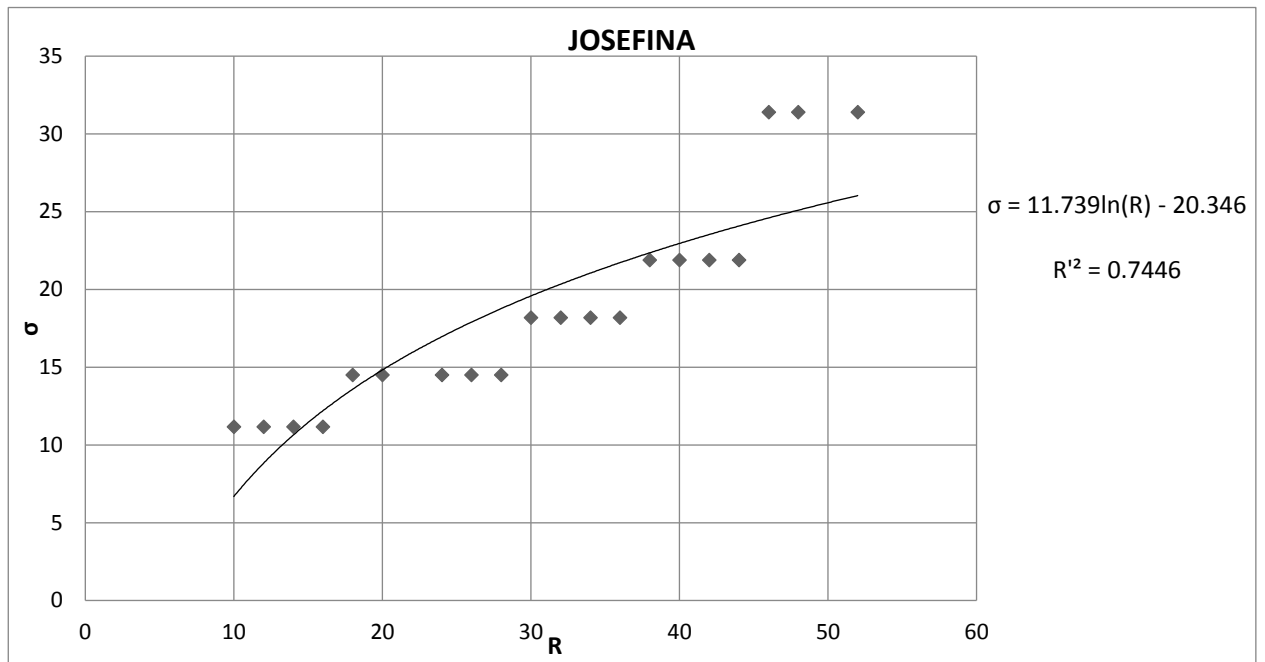


Figura 3.3. Muestra Josefina.

$$\sigma = 11.739 \ln(R) - 20.346$$

$$R'^2 = 0.7446$$

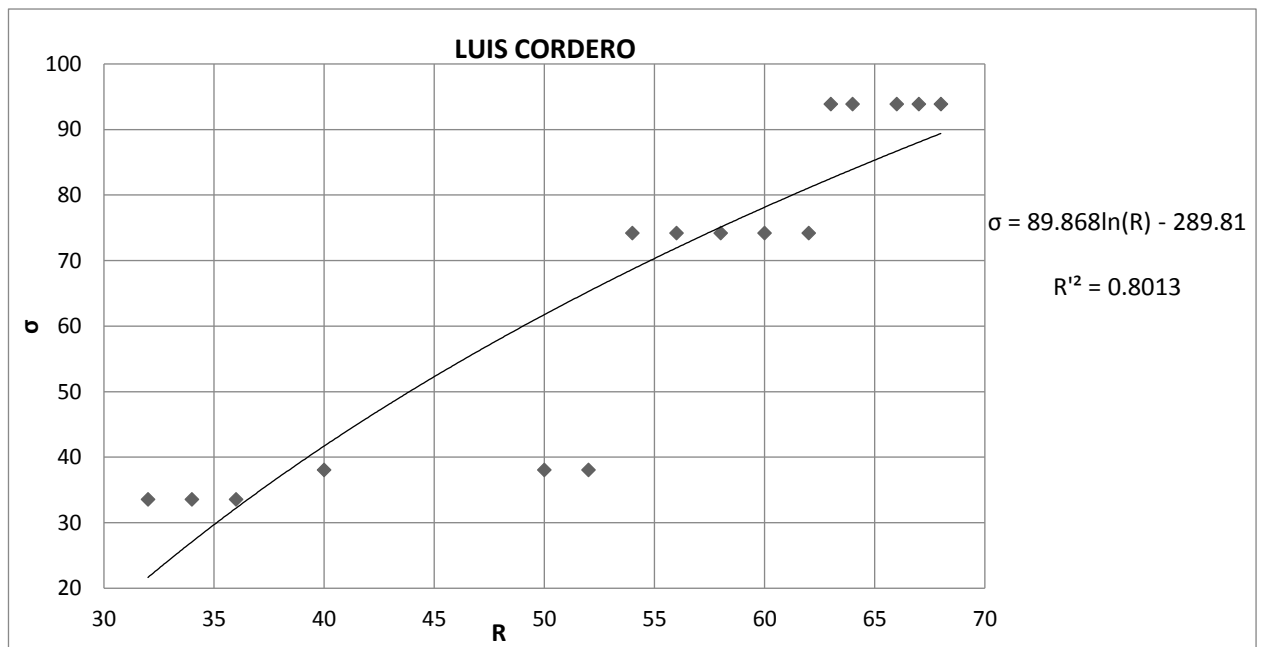


Figura 3.4. Muestra Luis Cordero.

$$\sigma = 89.868 \ln(R) - 289.81$$

$$R'^2 = 0.8013$$

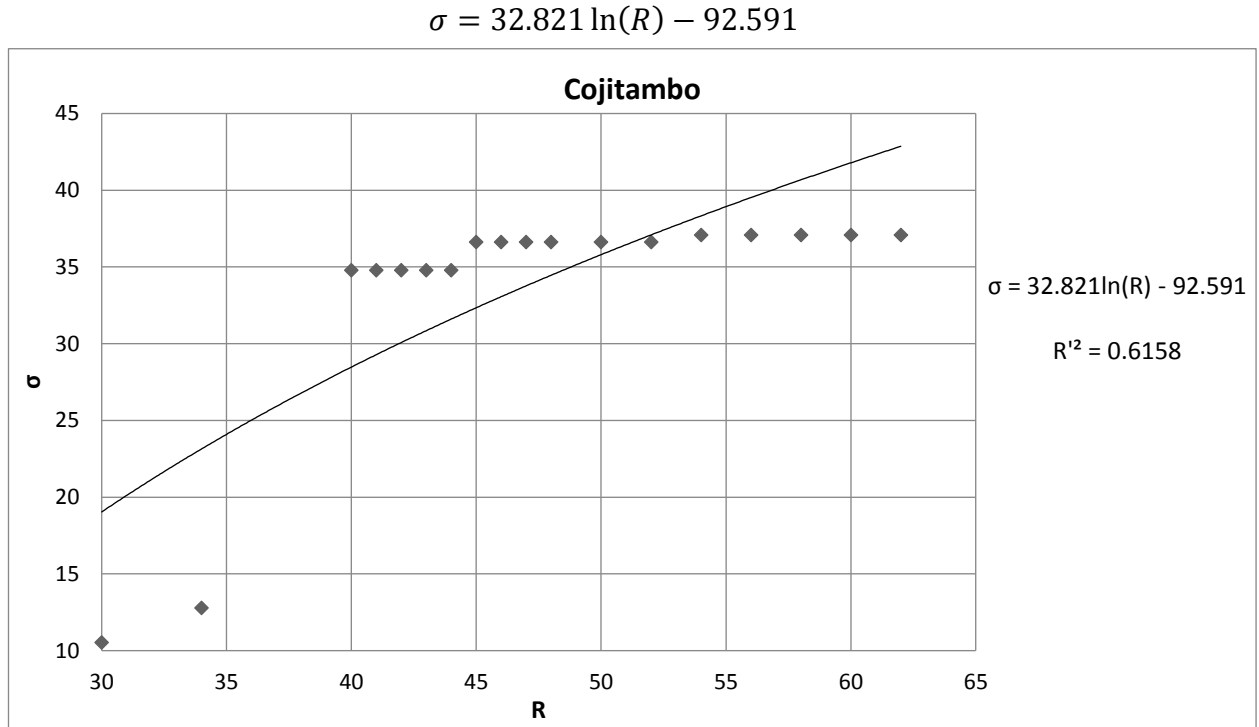


Figura 3.5. Muestra Cojitambo.

$$R'^2 = 0.6158$$

El coeficiente de determinación, se define como la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R'^2 cuadrado, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

3.3. Análisis de Resultados.

El análisis fue de las relaciones entre el número de rebotes dados por el martillo de Schmidt y los valores de laboratorio, es decir la resistencia a la compresión simple, teniendo en cuenta la orientación del esclerómetro respecto al plano de las rocas estudiadas.

Suponiendo que el número de rebotes R , que se obtendrá por la aplicación del equipo, el cual respondería a la resistencia a la compresión sería proporcional, se puede considerar como la medida de un vector aleatorio N -dimensional, supongamos que los valores $r_1, \dots, r_n$, corresponde a una función logarítmica de la variable x que depende de un vector de parámetros desconocido en principio de acuerdo a los resultado obtenido en laboratorio y los valores en campo que se ajustan a dicha función logarítmica.

Para poder precisar el modelamiento de la ecuación, se estudió los datos obtenidos en la que, al someter al modelamiento matemático genera una ecuación que describe la relación entre los predictores y la variable de respuesta, es decir el valor del martillo de Schmidt y los resultados de compresión obtenidos en laboratorio, permitiendo nuevas observaciones a través de la regresión logarítmica que nos da la función entre el valor de rebotes y la resistencia a la compresión uniaxial. A partir del conjunto de los datos expuestos en la Figura 3.6, se puede observar la relación existente entre los predicadores y variables analizadas.

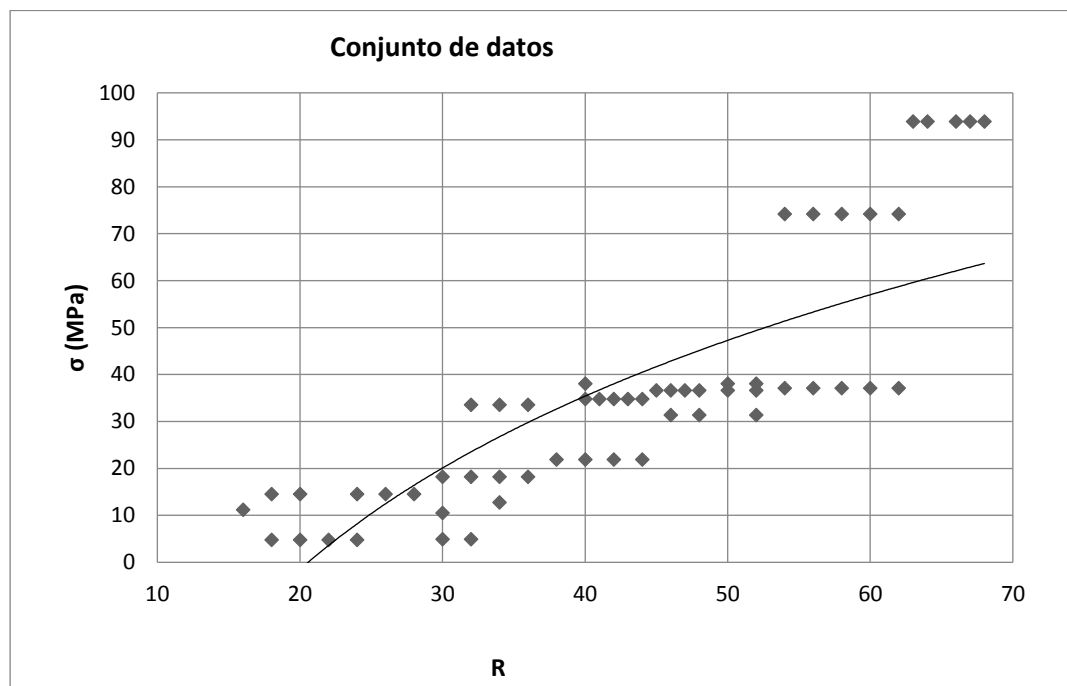


Figura 3.6. Conjunto de datos de muestras representativas.

$$\sigma = 53.248 \ln(R) - 161.03$$

$$R'^2 = 0.6174$$

El objetivo de la construcción de este modelo es demostrar que, a partir de las pruebas realizadas in situ con el martillo de Schmidt o esclerómetro, este proporcione un valor el cual se correlaciona con la resistencia a la compresión simple teórica, con el que se llegó a la obtención de la resistencia de la compresión de la roca expresada entre un rango mínimo y uno máximo.

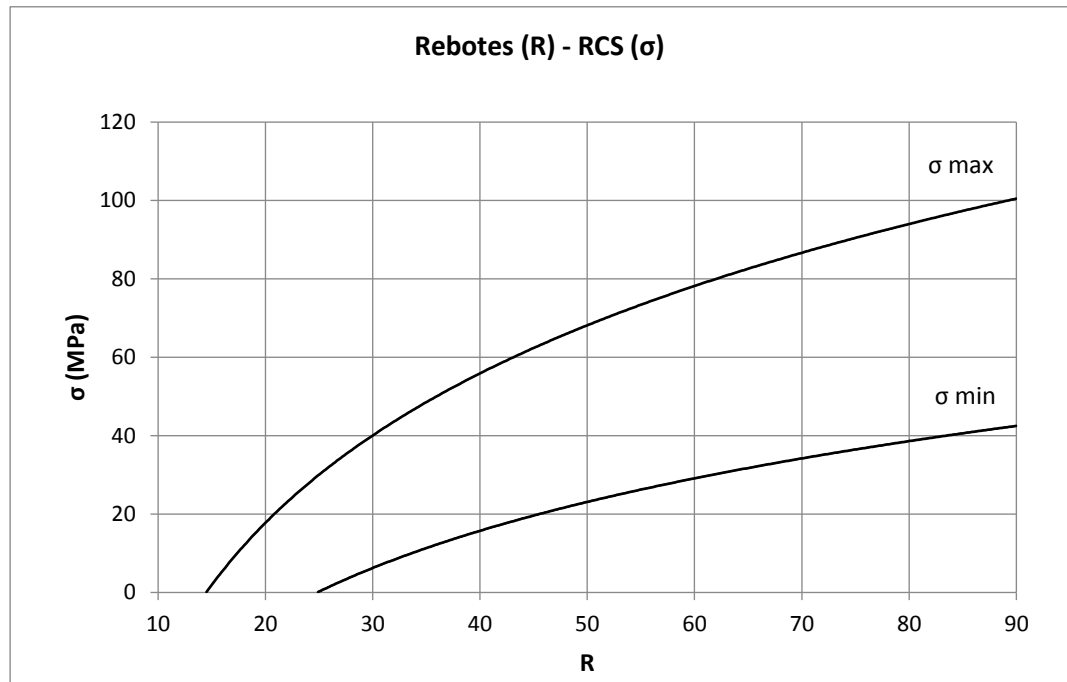


Figura 3.7. Correlación Rebotes - Resistencia a la compresión uniaxial.

Partiendo del conjunto de datos expuestos anteriormente se logró modelar una gráfica, Figura 3.7, la cual muestra dos curvas que indican los rangos de aplicabilidad máximos y mínimos de la compresión simple a la roca obtenida con el martillo de Schmidt.

De acuerdo a estos datos, se calculó las respectivas ecuaciones:

$$\sigma_{max} = 55 \ln(R) - 147 \quad (\text{Mpa})$$

$$\sigma_{min} = 33 \ln(R) - 106 \quad (\text{Mpa})$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Una vez evaluados los resultados que se han obtenido en las experiencias llevadas a cabo en diferentes puntos de muestra, reconocemos que el empleo del esclerómetro corresponde a un método científico usualmente no destructivo, siendo un método confiable para la determinación a la compresión simple en rocas.
- Esta investigación en general es especialmente necesaria en el caso de minería para el estudio geotécnico y comportamiento de la roca y macizo rocoso; pues las experiencias han demostrado que existen numerosas variables por resolver.
- La profundización en el conocimiento de los diferentes materiales rocosos, la evolución en el tiempo en la eficiencia del modelo propuesto y las características del diseño de fortificación constituida por distintos métodos, son algunos de los temas que deben ser abordados para que este sistema se ponga a punto y sea ampliamente utilizado a la hora de resolver problemas geotécnicos.
- Los ensayos con esclerómetro permiten conocer la evolución de la resistencia de la roca de una manera económica y en poco tiempo sin deteriorar la estructura (ya que este es un ensayo no destructivo aplicado directamente in situ en la roca).
- Nos brinda ciertas ventajas con respecto a los ensayos que se usan normalmente para conocer la resistencia a compresión de las rocas en laboratorio.
- En la Figura 3.7, se muestra la correlación existente, se interpretó mediante un modelo matemático los resultados obtenidos, los cuales indican que la aplicabilidad del esclerómetro in situ eficiente se encuentra dentro del rango de resistencia entre 10 MPa a 100 MPa.

Recomendaciones

- Para que la aplicación del esclerómetro sea confiable se debe considerar que este método, no es aplicable a todo tipo de roca, se recomienda aplicar en rocas que se encuentran de 10 MPa a 100 MPa de resistencia.
- Se debe evaluar de manera técnica los parámetros mecánicos de la roca, in situ al momento de realizar las pruebas.
- Cuando se tiene presencia de agua, se tomará en cuenta que los resultados pueden variar de acuerdo a la cantidad de agua que se encuentren en los poros de la roca
- Continuar con la profundización de la investigación del método propuesto, para despejar las diferentes interrogantes de estudio en geotécnica y su comportamiento del macizo rocosa.
- Se recomienda realizar procedimientos de seguridad de acuerdo al campo de aplicabilidad, sea el caso a cielo abierto o subterráneo, se deberá tomar en cuenta los riesgos potenciales.
- Registrar los datos, de manera sencilla y ordenada de acuerdo a cada zona de ensayos realizados, siguiendo el protocolo de ensayos expuesto con la finalidad de obtener exactitud en los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Alejano, L. R., Arzúa, J., & Veiga, M. (s.f.). Propiedades mecánicas de las rocas. Recuperado el Octubre de 2018, de https://www.researchgate.net/profile/Javier_Arzu/publication/324538563_Tema_2_-_Propiedades_mecanicas_de_las_rocas/data/5ad480cdaca272fdaf7baa76/Tema-2-PROPIEDADES-MECANICAS-DE-LAS-ROCAS.pdf
- Anónimo. (s.f.). Manual 1. Conociendo a la Roca. 31. Recuperado el 2018
- Atlas Copco Rock Drills AB. (2007). Mining Methods in Underground Mining. *Second*, 144 pp. Obtenido de www.atlascopco.com
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). *The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches* (págs. 1-54). Springer-Verlag .
- Brown , E. T. (1981). *Rock characterization, testing and monitoring - isrm suggested methods*. Pergamon, Oxford.
- Farmer, I. W. (1968). *Engineering Properties of Rocks. Capítulo 3*. (C. A. Canoba, & H. R. Fraga, Trads.) Londres: E & F.N. SPON Ltd.
- Galvis Carreño, L. V., Ocho, C. A., Arguello Fuentes, H., Carvajal Jiménez, J. M., & Calderón Carrillo, Z. H. (julio - diciembre de 2011). Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial. *7(14)*, 83-103. Ingeniería y Ciencia.
- Gómez Cadenas, J. J. (2005). El método de mínimos cuadrados. Curso de Estadística. Recuperado el 2018
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. (I. Capella, Ed.) Madrid: *Pearson Educación S.A.*
- Hernández Gutiérrez, L. E., Santamarta, J. C., Tomás, R., Cano, M., García Barba, J., & Cantero Mesa, I. E. (2013). Prácticas de Ingeniería del Terreno. Compresión simple de rocas. Canarias: Universidades de Alicante y de la Laguna. Recuperado el 2018, de <http://web.ua.es/es/ginter/>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Estimación de la Resistencia de Macizos Rocosos en la Práctica. (Anónimo, Trad.) La Serena, Chile: Primer taller geotécnico interdivisional, división Chuquicamata de Codelco - Chile. Recuperado el 2018
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (May de 1993). *Support of underground excavations in hard rock*. 225. Canada: *Mining Research Directorate and University Research Incentive Fund*.
- Hudson, J. A. (1989). *Rock mechanics principles in engineering practice*. Ciria, London: Butterworths.
- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. (October de 2003). *ISRM Suggestes Methods for rock stress estimation - Part 1: Strategy for rock stress estimation*. 40, 991-998. USA: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. doi:10.1016/j.ijrmms.2003.08.002
- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. (October de 2003). *ISRM Suggestes Methods for rock stress estimation - Part 3: hydraulic fracturing (HG) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)*. 40, 1011-1020. USA: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. doi:10.1016/j.ijrmms.2003.08.002

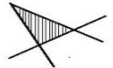
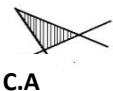
- ISRM. (1981). *Suggested method for determination of the Schmidt rebound harness*. In ISRM suggested Methods.
- Jiménez, J. (s.f.). Métodos estadísticos. Recuperado el 2018, de <https://www.sefh.es/bibliotecavirtual/erroresmedicacion/010.pdf>
- Lozano, A. (2012). Martillo de Schmidt (*Esclerómetro*). Recuperado el febrero de 2017, de Martillo Schmidt (Esclerómetro): www.academia.edu/12187503/MARTILLO_SCHMIDT_ESCLEROMETRO
- Montero Olarte, J. (2003). Minerales y Rocas. AS ROCAS. Recuperado el 2018
- Muñoz Fernandez, L. M., & Gonzales de Vallejo, L. I. (1987). Aplicación de las clasificaciones geomecánicas al estudio de excavaciones subterráneas. 71-76. Madrid, España: HENARES, REV. GEOL.
- NTG 41017 h11. (s.f.). Método de ensayo. Determinación del número de rebote en Concreto endurecido. Guatemala: COGUANOR NTG 41017 h11.
- Proceq SA. (2017). *Rock Schmidt Operating Instructions*. Switzerland. Recuperado el 2018
- Ramírez Oyanquren, P., & Alejano, M. L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid.
- Salcedo, D. A. (1983). Macizos Rocosos: Caracterización, Resistencia al Corte y Mecanismos de Rotura. Conferencia 25ava Aniversario Soc. Venezolana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Fundaciones, (págs. 143 - 172). Caracas.
- Sepúlveda, S. (s.f.). Resistencia de Macizos Rocosos. *CI52T*. Mecánica de Rocas en Obras de Ingeniería. Recuperado el 2018
- Sivakunga, N., Arulrajah, A., & Bo, M. W. (2011). *Laboratory Testing of Soils, Rocks and Aggregates*. J. Ross.
- Standard Test Method for Rebound Number of Herdened Concrete* (Designation: C 805-02 ed.). (s.f.). *United States: ASTM INTERNATIONAL*.
- Suárez Burgoa, L. O. (30 de enero de 2014). Estimación de la variabilidad mecánica de placas de roca por ensayos no-destructivos. *Ingeniería y Ciencia*, 10(19), 221-246.
- Throner, R. H. (2001). *Engineering Geology Field Manual. Volume II, Second. USA: U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation*.
- TORRES, A. L. (2007). Influencia de la optimización de la fragmentación. Tesis para optar el Título de Ingeniero de Minas . Lima-Perú : Pontificia Universidad Católica del Perú.
- V, Menendez; V, Daniel;. (2002). Estudio Geológico y Geotécnico de una área ubicada en la localidad de Carenero Estado de Miranda. Recuperado el febrero de 2017, de Estudio Geológico y Geotécnico de una área ubicada en la localidad de Carenero Estado de Miranda: http://bibliogeo.ing.ucv.ve/cgi-win/be_alex.cgi?Acceso=T041500004263/0&Nombrebd=bibliogeo&CorreoE
- VILLARREAL, Y. V. (2012). Optimización en los procesos de perforación y voladura. Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar el título. Quito: Universidad Central del Ecuador.

ANEXOS

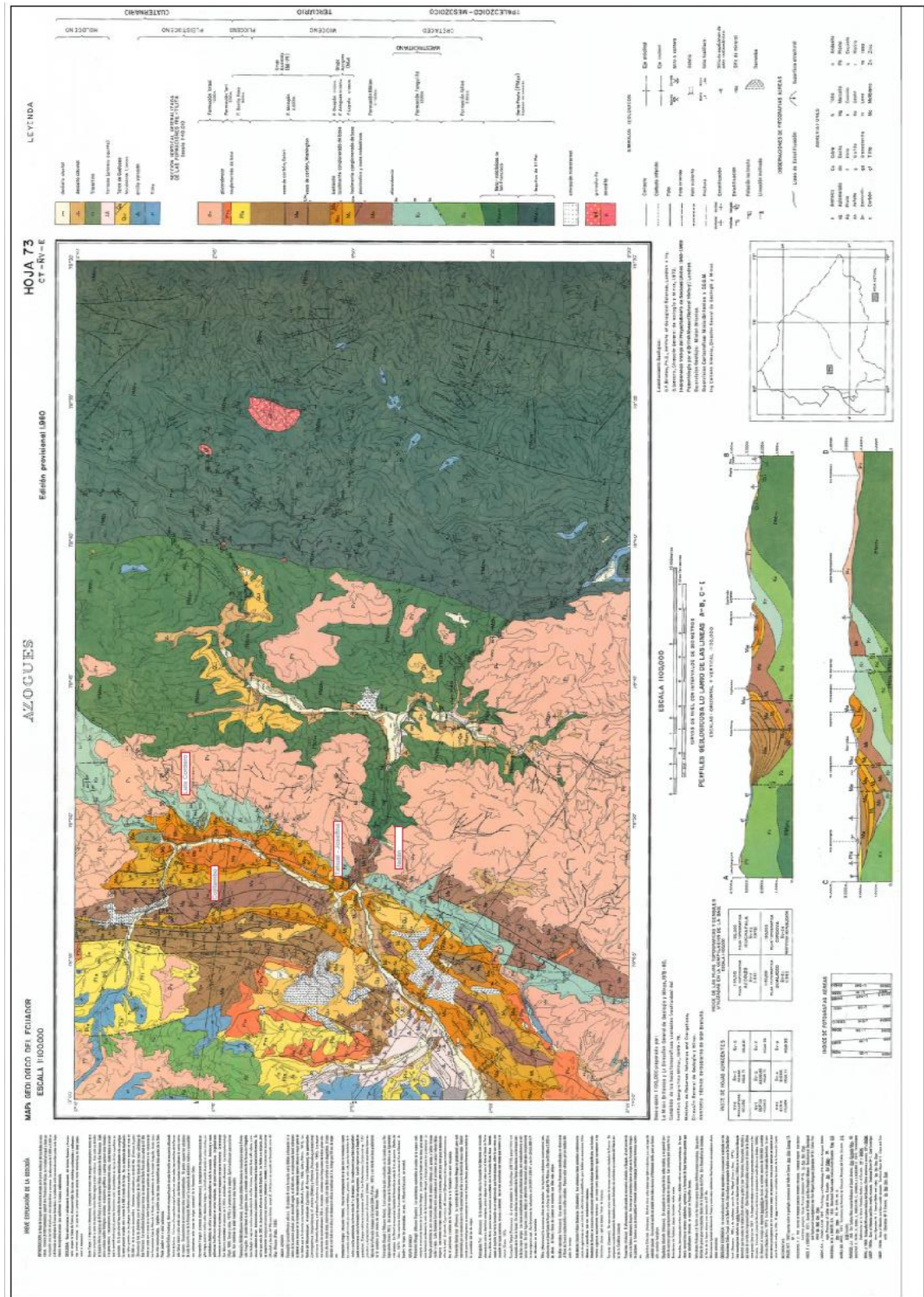
Anexo A. Simbología para mapeo geotécnico - geológico.

SIMBOLOGÍA PARA MAPEO GEOTÉCNICO-GEOLÓGICO			
Condiciones	Símbolo	Nombre	Descripción
Resistencia de la Roca	R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña
	R1	Roca muy blanda	Desmenuzable bajo golpes del martillo de geólogo, puede rayarse con una navaja. Se talla fácilmente con una navaja
	R2	Roca blanda	Puede rayarse con dificultad con la navaja, se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente con la punta del martillo
	R3	Roca moderadamente dura	No se puede rayar con una navaja la muestra en mano, se puede romper con un golpe firme del martillo de geólogo, al impacto la punta del martillo indenta hasta 5 mm.
	R4	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra, especímenes sostenidos en la mano se rompe con un simple golpe de martillo
	R5	Roca muy dura	Se necesita muchos golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.
	R6	Roca extremadamente dura	El martillo produce solamente descarrillado de la muestra, sonido metálico de golpe. Solo saltan esquirlas de roca.
Alteración para Macizo y alteración de la cara de las Juntas	A1	Intensa o Descompuesta	Zonas de cizallamiento, paredes con minerales blandos arcillosos de gran espesor
	A2	Alta	Paredes alteradas con arcilla y limo
	A3	Moderada	Paredes poco alteradas, sin minerales blandos sin arcilla ni roca desintegrada
	A4	Leve	Superficies sanas apenas descoloridas

	A5	Sana	Sellada, dura, impermeable, rellenas por cuarzo calcita
Meteorización del Macizo y meteorización de la cara de las juntas	M1	Descompuesta	
	M2	Alta	
	M3	Moderada	
	M4	Leve	
	M5	Sana	
Fracturamiento de la Roca en la sección	F1	Extremadamente Fracturada	> 27 Fracturas m3
	F2	Muy Fracturada	20 a 27 Fracturas m3
	F3	Medianamente Fracturada	13 a 19 Fracturas m3
	F4	Poco Fracturada	8 a 12 Fracturas m3
	F5	Masiva	< 8 Fracturas m3
Espaciamiento entre Juntas	E1	Muy Pobre	< 0,06m
	E2	Pobre	0,2 a 0,06m
	E3	Regular	0,6 a 0,2m
	E4	Bueno	0,6 a 2m
	E5	Excelente	> 2
Persistencia de Discontinuidades	P1	Altamente Persistente	>20m
	P2	Muy Persistente	10-20m
	P3	Medianamente Persistente	3-10m
	P4	Poco Persistente	1-3m
	P5	Levemente Persistente	<1m
Competencia del Macizo Rocoso	C1	Muy Poca Competencia	
	C2	Poca Competencia	
	C3	Regular Competencia	
	C4	Buena Competencia	
	C5	Muy Buena Competencia	
Composición del Relleno en las Fracturas	Arc.	Arcilloso	
	Are.	Arenoso	
	Limo.	Limoso	

	Milo.	Milonita	
	Cal.	Calcita	
	Qz.	Cuarzo	
	Sil.	Silisificación	
	S	Sulfuroso	
Agua Subterránea		Flujo	
		Goteo	
		Humedad	
Tipo de Relleno en la Junta	—	Sin Relleno	Sellada o abierta sin minerales blandos ni duros
	~~~~~	Relleno blando	Ejem: Arcilloso, limoso, arenoso
	xxxxxxxxx	Relleno duro	Ejem: Cuarzo, calcita, sulfuros.
Acuñamiento entre Juntas		Cuña	
Cuña Cerrada	 C.C.	Cuña Cerrada	
Cuña Abierta	 C.A.	Cuña Abierta	
Desprendimiento		Desprendimiento	
Diaclasa/Junta/Fractura	—	Junta	
Contacto Geomecánico	+ + + + + + +	Contacto Geomecánico	
Contacto Litológico	—	Contacto Litológico	
Falla	—	Falla	
Zona de Cizalla	~ ~ ~	Cizallamiento	
Contacto Geológico	- - . - -	Contacto Geológico	

Anexo B. Hoja geológica 73, Azogues.



## Anexo C. . Mapeo geotécnico - geológico. Tahual

MAPEO GEOTECNICO - GEOLOGICO									
Levantamiento de Campo									
Localidad: TAHUAL					N° de registró: TH-1				
Orientación: -					Realizado por: R.AUCAY -D. ORDOÑEZ				
Inclinación: -					Fecha: 22/8/2018				
Condiciones del Macizo Rocoso									
Resistencia de la Roca	R6	R5	R4	R3	R2	R1	< R0		
Rango	15	12	7	4	2	1	0		
Meteorización	Sana	Leve	Moderada	Alta	Descompuesta				
Alteración	Sana	Leve	Moderada	Alta	Intensa				
Rango	6	5	3	1	0				
Núm. Fracturas /m3	< 8	8 a 12	13 a 19	20 a 27	> 27				
Espaciamiento c/d	> 2m	0,6 a 2m	0,6 a 0,2m	0,2 a 0,06m	<0,06m				
Rango	Excelente	Buena	Regular	Pobre	Muy pobre				
Condiciones de Discontinuidades Observadas									
Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 -10 m	10 - 20 m	> 20 m				
Rango	6	4	2	1	0				
Presencia de Agua (* Aguas Subterráneas)									
Lts/min	ninguno	< 10	10 a 25	26 a 125		> 125			
Rango	Seco	Húmedo	Mojado	Presión moderada		Problemas de agua			
Calculo RQD									
RQD = 115 - 3,3(X + Y + Z)									
Sector	X	3	Y	3	Z	4	RQD	82	
Índice Q de Barton		GSI		Roca:					
Parámetros	Sector		Sector	Tipo I:	> 3				
RQD	80	A	75	Tipo II:	1,00 a 3,00				
Jn	3	M		Tipo III:	0,1 a 1				
Jr	1.5	B		Tipo IV:	0,01 a 0,1				
Ja	1				Tipo V:	< 0,01			
Jw	1	$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$							
SRF	1								
Q	40								
R. Tipo	I								
OBSERVACIONES:									

## Anexo D. Mapeo geotécnico - geológico. Josefina.

MAPEO GEOTECNICO - GEOLOGICO							
Levantamiento de Campo							
<b>Localidad:</b> JOSEFINA				<b>N° de registró:</b> JS-3			
<b>Orientación:</b> -				<b>Realizado por:</b> R. AUCAY-D. ORDONEZ			
<b>Inclinación:</b> -				<b>Fecha:</b> 23/8/2018			
Condiciones del Macizo Rocoso							
Resistencia de la Roca	R6	R5	R4	R3	R2	R1	< R0
<b>Rango</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
Meteorización	Sana	Leve	Modera da	Alta	Descompuesta		
Alteración	Sana	Leve	Modera da	Alta	Intensa		
<b>Rango</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
Num. Fracturas /m3	< 8	8 a 12	13 a 19	20 a 27	> 27		
Espaciamiento c/d	> 2m	0,6 a 2m	0,6 a 0,2m	0,2 a 0,06m	<0,06m		
<b>Rango</b>	<b>Excelente</b>	<b>Buena</b>	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy pobre</b>		
Condiciones de Discontinuidades Observadas							
Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 -10 m	10 - 20 m	> 20 m		
<b>Rango</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
Presencia de Agua (* Aguas Subterráneas)							
Lts/min	ninguno	< 10	10 a 25	26 a 125	> 125		
<b>Rango</b>	<b>Seco</b>	<b>Húmedo</b>	<b>Mojado</b>	<b>Presión moderada</b>	<b>Problemas de agua</b>		
Calculo RQD							
RQD = 115 - 3,3(X + Y + Z)							
Sector	X	4	Y	3	Z	4	RQD
							78.7
Índice Q de Barton		GSI		Roca:			
<b>Parámetros</b>	<b>Sector</b>		<b>Sector</b>	<b>Tipo I:</b>	> 3		
RQD	80	A	75	<b>Tipo II:</b>	1,00 a 3,00		
Jn	6	M		<b>Tipo III:</b>	0,1 a 1		
Jr	1.5	B		<b>Tipo IV:</b>	0,01 a 0,1		
Ja	2			<b>Tipo V:</b>	< 0,01		
Jw	1	$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$					
SRF	1						
<b>Q</b>	10						
<b>R. Tipo</b>	I						
OBSERVACIONES							

Anexo E. Mapeo geotécnico - geológico. Luis Cordero.

MAPEO GEOTECNICO - GEOLOGICO									
Levantamiento de Campo									
<b>Localidad:</b> LUIS CORDERO				<b>N° de registró:</b> LC - 1					
<b>Orientación:</b> -				<b>Realizado por:</b> R. AUCAY-D. ORDONEZ					
<b>Inclinación:</b> -				<b>Fecha:</b> 25/8/2018					
Condiciones del Macizo Rocoso									
Resistencia de la Roca	R6	R5	R4	R3	R2	R1	< R0		
<b>Rango</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
Meteorización	Sana	Leve	Moderada	Alta	Descompuesta				
Alteración	Sana	Leve	Moderada	Alta	Intensa				
<b>Rango</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>				
Núm. Fracturas /m3	< 8	8 a 12	13 a 19	20 a 27	> 27				
Espaciamiento c/d	> 2m	0,6 a 2m	0,6 a 0,2m	0,2 a 0,06m	<0,06m				
<b>Rango</b>	<b>Exce lente</b>	<b>Buena</b>	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy pobre</b>				
Condiciones de Discontinuidades Observadas									
Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 -10 m	10 - 20 m	> 20 m				
<b>Rango</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>				
Presencia de Agua (* Aguas Subterráneas)									
Lts/min	ningu no	< 10	10 a 25	26 a 125		> 125			
<b>Rango</b>	<b>Seco</b>	<b>Húmedo</b>	<b>Mojado</b>	<b>Presión moderada</b>		<b>Problemas de agua</b>			
Calculo RQD									
RQD = 115 - 3,3(X + Y + Z)									
Sector	X	2	Y	3	Z	2	RQD	91.9	
Índice Q de Barton		GSI		Roca:					
<b>Parámetros</b>	<b>Sector</b>		<b>Sector</b>	<b>Tipo I:</b>	> 3				
RQD	90	A	85	<b>Tipo II:</b>	1,00 a 3,00				
Jn	4	M		<b>Tipo III:</b>	0,1 a 1				
Jr	1	B		<b>Tipo IV:</b>	0,01 a 0,1				
Ja	1			<b>Tipo V:</b>	< 0,01				
Jw	1	$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$							
SRF	1								
<b>Q</b>	22.5								
<b>R. Tipo</b>	I								
OBSERVACIONES:									



## Anexo F. Mapeo geotécnico - geológico. Cojitambo

MAPEO GEOTECNICO - GEOLOGICO									
Levantamiento de Campo									
<b>Localidad:</b> COJITAMBO				<b>N° de registró:</b> COJ-4					
<b>Orientación:</b> -				<b>Realizado por:</b> R. AUCAY- D. ORDOÑEZ					
<b>Inclinación:</b> -				<b>Fecha:</b> 26/8/2018					
Condiciones del Macizo Rocoso									
Resistencia de la Roca	R6	R5	R4	R3	R2	R1	< R0		
<b>Rango</b>	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
Meteorización	Sana	Leve	Moderada	Alta	Descompuesta				
Alteración	Sana	Leve	Moderada	Alta	Intensa				
<b>Rango</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>				
Num. Fracturas /m3	< 8	8 a 12	13 a 19	20 a 27	> 27				
Espaciamiento c/d	> 2m	0,6 a 2m	0,6 a 0,2m	0,2 a 0,06m	<0,06m				
<b>Rango</b>	<b>Excelente</b>	<b>Buena</b>	<b>Regular</b>	<b>Pobre</b>	<b>Muy pobre</b>				
Condiciones de Discontinuidades Observadas									
Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 -10 m	10 - 20 m	> 20 m				
<b>Rango</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>				
Presencia de Agua (* Aguas Subterráneas)									
Lts/min	ninguno	< 10	10 a 25	26 a 125			> 125		
<b>Rango</b>	<b>Seco</b>	<b>Húmedo</b>	<b>Mojado</b>	<b>Presión moderada</b>			<b>Problemas de agua</b>		
Calculo RQD									
RQD = 115 - 3,3(X + Y + Z)									
Sector	X	4	Y	3	Z	2	RQD	85.3	
Índice Q de Barton		GSI		Roca:					
<b>Parámetros</b>	<b>Sector</b>		<b>Sector</b>	<b>Tipo I:</b>	> 3				
RQD	85	A	80	<b>Tipo II:</b>	1,00 a 3,00				
Jn	9	M		<b>Tipo III:</b>	0,1 a 1				
Jr	1.5	B		<b>Tipo IV:</b>	0,01 a 0,1				
Ja	2				<b>Tipo V:</b>	< 0,01			
Jw	1	$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$							
SRF	1								
<b>Q</b>	7.08								
<b>R. Tipo</b>	I								
OBSERVACIONES									



Anexo G. Mapeo geotécnico - geológico. Jadán.

MAPEO GEOTECNICO - GEOLOGICO								
Levantamiento de Campo								
<b>Localidad:</b> JADAN				<b>N° de registró:</b> JD-3				
<b>Orientación:</b> -				<b>Realizado por:</b> R. AUCAY-D. ORDONNEZ				
<b>Inclinación:</b> -				<b>Fecha:</b> 26/8/2018				
Condiciones del Macizo Rocoso								
Resistencia de la Roca	R6	R5	R4	R3	R2	R1	< R0	
<b>Rango</b>	15	12	7	4	2	1	0	
Meteorización	Sana	Leve	Moderada	Alta	Descompuesta			
Alteración	Sana	Leve	Moderada	Alta	Intensa			
<b>Rango</b>	6	5	3	1	0			
Núm. Fracturas /m3	< 8	8 a 12	13 a 19	20 a 27	> 27			
Espaciamiento c/d	> 2m	0,6 a 2m	0,6 a 0,2m	0,2 a 0,06m	<0,06m			
<b>Rango</b>	Excelente	Buena	Regular	Pobre	Muy pobre			
Condiciones de Discontinuidades Observadas								
Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
<b>Rango</b>	6	4	2	1	0			
Presencia de Agua (* Aguas Subterráneas)								
Lts/min	ninguno	< 10	10 a 25	26 a 125		> 125		
<b>Rango</b>	Seco	Húmedo	Mojado	Presión moderada		Problemas de agua		
Calculo RQD								
RQD = 115 - 3,3(X + Y + Z)								
Sector	X	5	Y	6	Z	8	RQD	52.3
Índice Q de Barton		GSI		Roca:				
<b>Parámetros</b>	<b>Sector</b>		<b>Sector</b>	<b>Tipo I:</b>	> 3			
RQD	50	A	45	<b>Tipo II:</b>	1,00 a 3,00			
Jn	12	M		<b>Tipo III:</b>	0,1 a 1			
Jr	1.5	B		<b>Tipo IV:</b>	0,01 a 0,1			
Ja	4			<b>Tipo V:</b>	< 0,01			
Jw	1	$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$						
SRF	1							
<b>Q</b>	1.56							
<b>R. Tipo</b>	II							
OBSERVACIONES: Roca con mala cohesión, fuerte fracturamiento.								