



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

**“Caracterización del macizo rocoso ubicado en el sector
Ingamullo II, km 11, proyecto: reconstrucción de la carretera
Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

MICHAEL JESÚS JIMÉNEZ LITUMA

Director:

ING. ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA – ECUADOR

2022

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico principalmente a mis padres Víctor e Inés, quienes con su esfuerzo y paciencia me han permitido llegar a cumplir un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

A mis hermanos Alfonso y Milagros por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento.

A mi familia en especial a mi tía Gladys y primos Carlos, Andrea, Bryan porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona, y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos, por siempre apoyarme, por extenderme su mano en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Víctor e Inés y hermanos Alfonso y Milagros por su apoyo incondicional, porque siempre me guiaron con fe y buenos consejos para culminar mi etapa universitaria.

De igual manera, quiero agradecer a mi tutor Ing. Patricio Feijoo y profesores Ing. Leonardo Núñez y Eduardo Luna por compartir su conocimiento, tiempo y constante apoyo durante la investigación de mi proyecto.

A la Universidad del Azuay, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general del trabajo de titulación	2
Objetivos específicos	2
CAPÍTULO 1	3
MARCO TEÓRICO	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Mecánica de rocas	4
1.2.1. Pruebas de laboratorio.....	6
1.2.1.1. Prueba de compresión Axial.....	6
1.2.1.2. Prueba de Carga Puntual.....	7
1.2.2. Resistencia a la Tensión Indirecta.....	8
1.3. Rocas	9
1.3.1. Clasificación.....	10
1.3.1.1. Según su origen.....	10
1.4. Propiedades de las rocas	12
1.5. Resistencia a la Compresión Simple de Rocas.....	15
1.5.1. Características de las rocas para operaciones mineras.....	16
1.6. Resistividad de las rocas.....	18
1.7. Macizo rocoso	19

1.7.1.	Matriz Rocosa	19
1.7.1.1.	Identificación Litológica.....	20
1.7.1.2.	Meteorización de la matriz rocosa.....	20
1.7.1.3.	Resistencia	21
1.7.1.4.	Descripción de las discontinuidades.....	22
1.8.	Caracterización Geológica.....	23
1.8.1.	Geología general	23
1.8.2.	Geología local	24
1.9.	Climatología	25
1.10.	Relieve	26
1.11.	Hidrología	26
CAPÍTULO 2.....	27	
METODOLOGÍA	27	
2.1.	Modalidad de la investigación.....	27
2.1.1.	Modalidad cuantitativa.....	27
2.2.	Alcance de la investigación.....	27
2.2.1.	Estudios descriptivos.....	27
2.3.	Tipos de investigación.....	28
2.3.1.	Bibliográfico documental.....	28
2.3.2.	Investigación de campo.....	28
2.3.3.	Procedimiento de campo	28
2.3.3.1.	Fase I: Información.....	28
2.3.3.2.	Fase II: Fase de campo.....	28
2.3.3.3.	Fase III: Ensayos de laboratorio y procesamiento de información	29
2.3.3.4.	Fase IV: Interpretación de resultados	32
2.4.	Población y muestra	32

2.4.1. Selección de la muestra.....	33
2.5. Técnicas e instrumentos	33
2.5.1. Observación directa.....	33
2.5.2. Instrumentos	33
2.6. Análisis de la información y técnicas de recolección de datos	34
2.7. Información del sector de estudio.....	34
CAPÍTULO 3.....	35
EXPERIMENTACIÓN	35
3.1. Análisis de resultados	35
3.1.1. Determinación de la clasificación geo mecánica	35
3.1.2. Toma de muestras	35
3.1.3. Resistencia a compresión simple de la roca.....	35
3.1.4. Determinación del RQD.....	37
3.1.5. Espaciamiento medio de las discontinuidades	38
3.1.6. Condiciones de las discontinuidades.....	41
3.1.7. Condiciones hidrológicas	42
3.1.8. Parámetros de clasificación y puntajes correspondientes	42
3.1.9. Determinación de RMR	45
3.1.10. Determinación de tipo de soporte requerido	45
3.2. Discusión de resultados	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
Conclusiones	49
Recomendaciones.....	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Curva Esfuerzo deformación de ensayos de compresión en rocas.....	7
Figura 1.2 Resistencia a la Tensión Indirecta. a) Configuración de la carga, b) Rotura del ensayo.....	8
Figura 1.3 Valores de las propiedades mecánicas y de resistencia de algunas rocas .	9
Figura 1.4 Rocas Ígneas	10
Figura 1.5 Rocas Sedimentarias detrítica de tipo conglomerado.....	11
Figura 1.6 Rocas Metamórficas tipo foliada.....	12
Figura 1.7 Esquema de los parámetros de las discontinuidades	23
Figura 1.8 Geología local.....	25
Figura 2.1 Proceso utilizado para evaluar el RQD.....	29
Figura 2.2 Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad	31
Figura 2.3 Fases simplificadas del proyecto	32
Figura 2.4 Ubicación de la zona de estudio	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de la roca en base a la resistencia a la compresión según la ISRM.....	16
Tabla 1.2. Métodos para determinar la resistencia a la compresión simple.....	17
Tabla 1.3. Meteorización de la matriz rocosa	21
Tabla 1.4. Meteorización de la matriz rocosa	22
Tabla 3.1. Muestra 1 de roca	36
Tabla 3.2. Muestra 2 de roca	36
Tabla 3.3. Muestra 3 de roca	36
Tabla 3.4. Muestra 4 de roca	36
Tabla 3.5. Muestra 5 de roca	37
Tabla 3.6. Determinación del RQD.....	37
Tabla 3.7. Espaciamiento entre discontinuidades	40
Tabla 3.8. Parámetros de clasificación.....	43
Tabla 3.9. Determinación de RMR	45
Tabla 3.10. Determinación del tipo de soporte	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Talud.....	57
Anexo 2. Recolección de muestras y análisis de campo.....	57
Anexo 3. Muestras	58
Anexo 4. Muestras	58
Anexo 5. Medición del Buzamiento	60
Anexo 6. Medición de la dirección de buzamiento.....	60
Anexo 7. Medición del Rumbo	61
Anexo 8. Detalles de equipo	62
Anexo 9. Equipo para pruebas de laboratorio.....	62
Anexo 10. Ensayo de la muestra 1	63
Anexo 11. Ensayo de la muestra 2.....	63
Anexo 12. Ensayo de la muestra 3	64
Anexo 13. Ensayo de la muestra 4.....	64
Anexo 14. Ensayo de la muestra.....	65

**“CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO UBICADO EN EL
SECTOR INGAMULLO II, KM 11, PROYECTO: RECONSTRUCCIÓN
DE LA CARRETERA GUALACEO - LIMÓN, TRAMO: GUALACEO - PLAN
DE MILAGRO”**

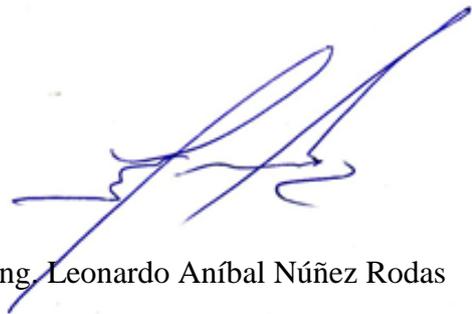
RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito caracterizar el macizo rocoso ubicado en el sector Ingamullo II - km 11; para ello, la metodología consistió en preparar probetas y/o muestras de material obtenido en campo con el fin de analizar variables in situ como las condiciones de los afloramientos y determinar las propiedades del macizo rocoso. Los ensayos efectuados fueron: clasificación geomecánica, resistencia a la compresión simple, RQD (índice de calidad de roca) y condiciones de las discontinuidades presentes. Los resultados muestran que el estado del macizo rocoso está conformado por una roca metamórfica sólida, con una resistencia a la compresión promedio de 31,74 MPa, su índice RQD oscila entre 80 y 90%, lo que describe según su tipología como un macizo de buena calidad.

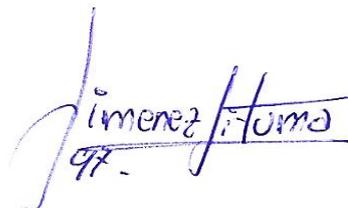
Palabras Clave: macizo rocoso, resistencia a la compresión simple, estabilidad, RQD.



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle
Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Michael Jesús Jiménez Lituma

Autor

**“CHARACTERIZATION OF THE ROCK MASSIF LOCATED IN THE
INGAMULLO II SECTOR, KM 11, PROJECT: RECONSTRUCTION OF
THE GUALACEO-LIMON INDANZA HIGHWAY, SECTION: GUALACEO-
PLAN DE MILAGRO”**

ABSTRACT

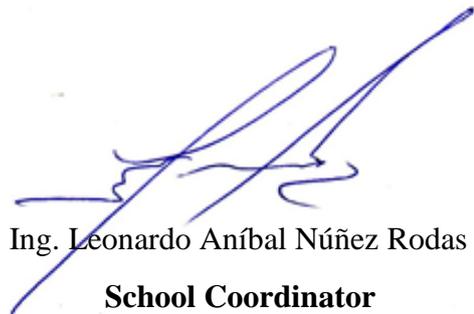
The purpose of this research was to characterize the rock massif located in the Ingamullo II - km 11 sector. The methodology of this research consisted of preparing test specimens and/or samples of material obtained in the field in order to analyze in situ variables, outcrop conditions, and to determine the properties of the rock massif. The tests carried out were: geo-mechanical classification, simple compressive strength, RQD (rock quality index) and discontinuity conditions. The results show that the state of the rock massif is mostly solid metamorphic rock, with an average compressive strength of 31.74 MPa, its RQD index ranges between 80 and 90%, which describes a good quality rock massif according to its typology.

Keywords: rock massif, compressive strength, stability, RQD.



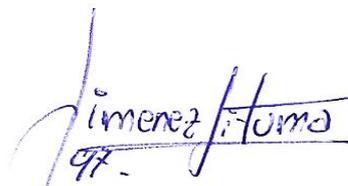
Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Director of the Degree Project



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

School Coordinator

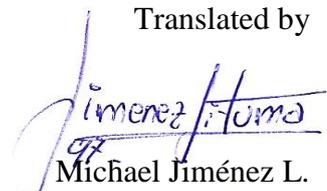


Michael Jesús Jiménez Lituma

Author



Translated by



Michael Jiménez L.

Michael Jesús Jiménez Lituma

Trabajo de titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Octubre, 2022

**“CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO UBICADO EN EL
SECTOR INGAMULLO II, KM 11, PROYECTO: RECONSTRUCCIÓN DE
LA CARRETERA GUALACEO-LIMÓN INDANZA, TRAMO: GUALACEO-
PLAN DE MILAGRO”**

INTRODUCCIÓN

La clasificación del macizo rocoso juega un papel importante en la evaluación de la resistencia y la deformación de los macizos rocosos y en la evaluación de la estabilidad de los taludes rocosos. También sirven como índice del cizallamiento de las rocas, dragado y explotación de canteras (Tovar , 2020). Durante los últimos 50 años, se ha realizado un gran esfuerzo en todo el mundo para crear un sistema adecuado para poder clasificar un macizo rocoso, que permita una evaluación preliminar de la viabilidad, el crecimiento y la estabilidad de las estructuras para proyectos de ingeniería y sobre todo que sea confiable. El Rock Stress Classification System puede considerarse como el primer sistema empírico de clasificación del macizo rocoso; muchos investigadores también han intentado correlacionar varios sistemas de clasificación analizando la relación entre el índice de masa rocosa y los sistemas Q (Fernández et al., 2018).

Otro aspecto a considerar en la estimación del macizo rocoso es la construcción de estructuras subterráneas como centrales eléctricas, sistemas de almacenamiento de petróleo y gas, lugares de almacenamiento de desechos nucleares y túneles, así como proyectos de infraestructura (Vega , 2015). El primer paso en el diseño y análisis de la estabilidad de estas estructuras es utilizar métodos de modelado numérico y analítico, estos métodos utilizan las propiedades mecánicas, el módulo de deformación y la resistencia del macizo rocoso como parámetros de entrada para determinar cada una de sus propiedades mecánicas.

Las pruebas de campo es la metodología más común para obtener los parámetros, entre las que se mencionan, la clasificación geomecánica de las rocas, resistencia a

compresión simple, determinación del índice RQD, distancia media de disección, condiciones hidrológicas siempre y cuando se considere el tipo de medio a alcanzar (Meléndez & Arroyo , 2020). Estas pruebas son costosas y consumen mucho tiempo, especialmente cuando se realizan en proyectos de infraestructura. Por lo tanto, los métodos empíricos (indirectos) son la opción más fácil, rápida y sencilla para estimar los parámetros antes mencionados. A lo largo de los años de desarrollo de la ingeniería de rocas, se han propuesto y utilizado ampliamente muchos métodos empíricos en el desarrollo y la estimación de parámetros físicos para el análisis de rocas, que han contribuido directamente no solo al aprendizaje, sino también al campo de la ingeniería.

Objetivo general del trabajo de titulación

- Caracterizar el macizo rocoso ubicado en el sector Ingamullo II - km 11, proyecto: reconstrucción de la carretera Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro

Objetivos específicos

- Fundamentar teóricamente las variables de estudio por medio de una revisión exhaustiva de bibliografía con el propósito de analizar las implicaciones del tema de estudio.
- Desarrollar un análisis de campo por medio de la extracción de muestras del macizo rocoso con el propósito de identificar las propiedades físico mecánicas del suelo.
- Determinar el estado del macizo rocoso del proyecto de reconstrucción de la carretera Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Primero se realizó el estudio de la literatura con el objetivo de analizar un estudio geomecánico que determine el tipo de apoyo adecuado para taludes en un proyecto de la vía Trujillo – Otuzco. Esta investigación surgió ante la necesidad de definir el estado del macizo rocoso del proyecto para la reconstrucción de la carretera Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro. El estudio se enfocó en analizar diferentes tramos de la vía para discernir sus factores naturales como: geológicos, suelo, estratigrafía, desequilibrio y meteorización de las rocas, así como la geomorfología, comportamiento mecánico y climático. La metodología seleccionada, ha posibilitado la formación de un amplio marco teórico vinculado para la clasificación geomecánica de Bieniawski, los criterios de ruptura de Peacock-Coulomb y Hoek & Brown, el índice de resistencia geológica y la cuña de ruptura. Como lo menciona (Meléndez & Arroyo, 2020), la obtención de información in situ requiere el empleo de técnicas como la observación directa y técnicas de entrevista, a través de una guía de descripción geológica, de observación de campo y laboratorio. Adicionalmente el mencionado estudio derivó en la necesidad de un mejoramiento porque la roca constituyente es de baja resistencia y, por tanto, puede ser inestable, siendo necesario la implementación de un método de sostenimiento conformado por malla y hormigón lanzado.

Por su parte (López & Betancur , 2019) evaluaron la importancia de las propiedades geomecánicas de las rocas para la estabilidad de una excavación, para la seguridad del personal y de los procesos a desarrollarse. En este contexto, fue analizado la mina la Maruja ubicada en Marmato, Caldas; desarrollando una clasificación geomecánica mediante el empleo del método RMR, paralelamente se ejecutó el análisis cinético de las cuñas con el propósito de evaluar la estabilidad y establecer recomendaciones de mantenimiento en función de los problemas encontrados. A través de la comparación de la clasificación obtenida con las interacciones entre rocas y fluidos los autores indicaron que debe existir algún elemento que incide en el impacto significativo en la calidad del macizo rocoso (López & Betancur , 2019).

Otro caso de estudio desarrollado por (Díaz , Llana , & Vilcapoma, 2021) sobre la evaluación de las características geomecánicas del macizo rocoso utilizó el modelo de

Bieniawski para el sistema de fortificación del nivel 0 propuesto en la mina artesanal Paucartambo en Pasto, Perú, lo primero fue estimar las características geomecánicas del macizo rocoso en base a la estimación de las propiedades físicas y mecánicas, permitiendo generar una propuesta orientada hacia un sistema de fortificación en la mina. La metodología general de investigación se caracterizó con base en un modelo científico, aplicado, explicativo-correlacional y cuasi-experimental. La población de estudio contemplo a todas y cada una de las galerías, y el muestreo fue limitado de manera poco confiable; por lo cual se denominó un modelo probabilístico de selección por conveniencia. La conclusión de todo el proyecto denotó que la geomecánica está en el rango de 61 a 80 puntos, describiéndola como una roca de buena calidad, dando el ángulo de cohesión del macizo rocoso KPa 300-400, debido a la fricción oscila entre los 35° a 45° (Diaz et al., 2021).

1.2.Mecánica de rocas

En el área de la ingeniería, la mecánica de las rocas es la rama que se ocupa de las propiedades mecánicas de las rocas y de la aplicación de estos conocimientos para tratar los problemas de ingeniería (Ramírez & Alejano, 2004). En el libro “Aplicación de la Mecánica de Rocas en Minería de Superficie y Subterránea” describe que “Las estructuras subterráneas en roca hacen referencia a cualquier abertura o sistema de aberturas excavadas o naturales en el subsuelo que se apoyan prácticamente sólo en el pilar de la pared y no en ningún soporte colocado dentro de las aberturas” (Government of India, 2014).

Según (Brady & Brown, 1995) el problema de mecánica de rocas que se plantea en todo diseño estructural es la predicción del comportamiento de la estructura bajo las cargas que se le imponen durante su operación funcional prescrita. La mecánica de rocas se ocupa de la aplicación de los principios de la mecánica ingenieril hacia el diseño de las estructuras rocosas generadas por la actividad minera. La disciplina está estrechamente relacionada con las principales corrientes de la mecánica clásica y la mecánica del medio continuo, pero varios factores específicos la identifican como un campo distinto y coherente de la ingeniería.

Una definición ampliamente aceptada de la mecánica de las rocas es la ofrecida por primera vez por el Comité Nacional de Mecánica de las Rocas de Estados Unidos en

1964, y modificada posteriormente en 1974: “La mecánica de las rocas es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de las rocas y las masas rocosas, es la rama de la mecánica que se ocupa de la respuesta de las rocas y las masas rocosas a los campos de fuerza de su entorno físico” (Departamento de Ingeniería en Minas, 2017).

De acuerdo con lo mencionado en el libro “Aplicación de la mecánica de rocas en la minería de superficie y subterránea” (2014) para el diseño y la evaluación de la estabilidad, es necesario determinar: a) las tensiones y/o deformaciones en la estructura resultantes de la carga externa o del cuerpo; b) la capacidad de la estructura para soportar las tensiones o deformaciones.

Las dificultades para diseñar una estructura en roca son las siguientes:

- No se conoce el estado de tensión de la roca del subsuelo debido al peso de la roca superpuesta y a las fuerzas tectónicas.
- No se dispone de información sobre las propiedades mecánicas de las rocas in situ antes de la excavación subterránea.
- El problema que se plantea en relación con el cálculo de la tensión y la deformación en diversas partes de la estructura de la roca.

Los factores que hay que tener en cuenta al diseñar una estructura en roca son:

- El diseño de la estructura debe ser tal que se mantenga durante un largo periodo de tiempo, todos los factores de seguridad deben mantenerse con valores altos.
- El diseño debe ser tal que la estructura pueda realizarse en un tiempo mínimo.
- La tensión in situ debe realizarse en la fase inicial, de modo que pueda evitarse la modificación en una fase posterior.
- Por razones económicas, es necesario explotar todo el yacimiento manteniendo el tamaño y el número de pilares y barreras al mínimo.

1.2.1. Pruebas de laboratorio

Los ensayos de laboratorio son fundamentales para determinar el comportamiento de las rocas, es decir, permiten definir la resistencia y la deformación de las rocas bajo una determinada carga. Cada una de estas cargas pueden controlarse por diseño o condiciones denotadas con el punto de poner a prueba una determinada muestra. Los principales ensayos son: compresión simple, compresión triaxial y tensión.

1.2.1.1. Prueba de compresión axial

En este tipo de ensayos se efectúa lo que se conoce como compresión axial que clasifica las rocas según su resistencia. Para (Oyanguren & Alejano, 2004), un factor importante en el cálculo de los criterios de fractura de rocas corresponde a Mohr-Coulomb y Hock & Brown, y se utiliza para estimar la resistencia de columnas en labores de minería. Para realizar esta prueba, es necesario obtener una muestra de roca intacta de bloques obtenidos en pozos, minas o en el sitio sin la ayuda de explosivos, ya que pueden producir nuevas grietas resultando así en la pérdida de resistencia de la roca.

Las restricciones que se aplican durante esta prueba son:

$$\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

Las muestras ensayadas deben ser generalmente cilíndricas con una relación $L/D = 2,5$ a 3 y $D > 54$ mm.

El diámetro tiene que ser de al menos 10 veces mayor que el tamaño de grano más grande de todas las rocas ensayadas, para efectuar un ensayo efectivo se deben tomar en cuenta las siguientes particularidades

- Ninguna discontinuidad debe atravesar la muestra.
- Las superficies sobre las que se van a colocar las placas de presión deben ser planas con una precisión de 0,02 mm.
- La velocidad de carga debe ser de 0,5 a 1 MPa/s.

Durante el proceso se registra una curva que indica la relación tensión-deformación. En las etapas iniciales, la curva exhibe una trayectoria ascendente hasta que se alcanza

la resistencia máxima, después de lo cual se pierde la resistencia. En la siguiente figura se representa este comportamiento.

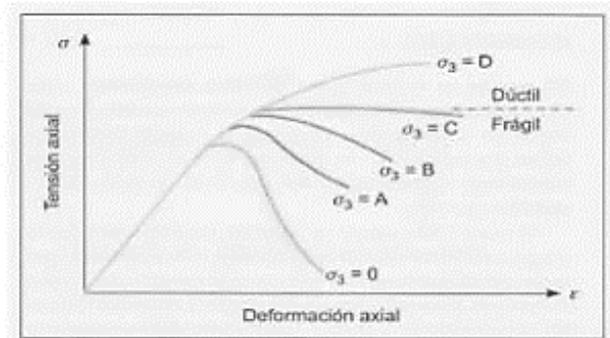


Figura 1.1 Curva Esfuerzo deformación de ensayos de compresión en rocas.

Fuente: (Ascuña, 2015)

Si bien este es un ensayo donde, teóricamente, la carga debería ser uniaxial en todos los puntos, existe la pertinencia de observar que el rozamiento entre la probeta y la placa no permite la expansión en los extremos de la probeta, resultando un esfuerzo cortante en estas regiones lo que da origen a un estado triaxial (Hernández & Santamarta, 2015).

La falla de la muestra ocurre cuando se alcanza la resistencia máxima, pero se han probado experimentalmente grietas entre el 50% y el 95% de la resistencia a la compresión. Para determinar las deformaciones, se montan galgas extensiométricas, dos axiales y dos laterales, en la superficie de la muestra, gracias a los datos obtenidos por el medidor, es posible determinar el módulo de Young y la relación de Poisson.

1.2.1.2. Prueba de carga puntual

En caso de que no sea posible obtener una muestra de roca con características estándar para realizar un ensayo de compresión, se recomienda sustituirla por un ensayo de carga puntual o un ensayo de Franklin. Este ensayo se caracteriza porque se realiza in situ y para un gran número de muestras (Quevedo & Reyes, 2019). Los fragmentos de roca deben tener un diámetro de 50 mm y ser 1,5 veces mayor al diámetro. Consiste en colocar entre dos extremos cónicos de metal que transportan cargas desde una prensa hasta que alcanzan el punto de falla para lograr el índice de carga puntual (I_s):

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (1)$$

Donde:

P: carga en el momento de ruptura

D: diámetro de probeta

1.2.2. Resistencia a la tensión indirecta

Otro método para determinar la resistencia de una roca intacta es la prueba de tracción indirecta. El efecto de tracción se produce al comprimir una pieza de prueba aproximadamente igual a su radio. Como lo muestra la siguiente figura, la dirección de la fractura es la misma que el sentido de aplicación de la carga, por lo que el esfuerzo de tracción es perpendicular.

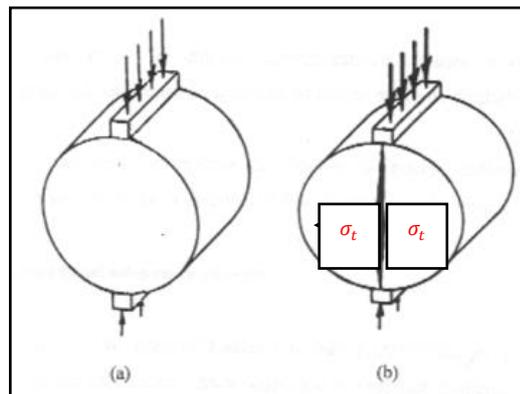


Figura 1.2 Resistencia a la Tensión Indirecta. a) Configuración de la carga, b) Rotura del ensayo.

Fuente: (Garrote, 2006)

La fuerza que se acumula a lo largo del diámetro y conduce a la falla se puede conocer como:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D l} \quad (2)$$

Donde:

P: carga de compresión

D: diámetro

L: longitud de la probeta

La siguiente figura muestra distintos valores al respecto de las propiedades mecánicas y de resistencia de algunas rocas:

Tipo de roca		Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Porosidad (%)	Densidad (ton/m ³)	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción
Ígneas	Andesita	12,0-35	0,23-0,32	75-320	5,0-11,0	10,0-15	2,3-2,75	28	45
	Anortosita	...	...	40-210	...	...	...	...	...
	Basalto	20-100	0,14-0,3	100-350	6,0-12,0	0,1-2	2,75-3	20-60	48-55
	Dacita	8,0-18	0,09-0,2	80-160	3,0-8,0	0,5-5	2,4-2,6	...	...
	Diabasa	30-90	0,28	120-320	54	0,1-0,7	2,7-3	88-117	40-50
	Diorita	2,0-17	...	100-190	8,0-30	...	2,6-2,9	15	50-55
	Gabro	60-100	0,12-0,25	150-280	5,0-8,0	0,1-0,2	2,8-3,1	30	35
	Granito	10,0-70	0,1-0,4	95-230	4,0-7,0	0,5-1,5	2,6-2,9	15-50	45-58
	Granodiorita	10,0-70	0,12-0,25	75-135	...	0,5-1,5	2,6-2,9	...	...
	Riolita	10,0-20	0,1-0,2	85-160	5,0-9,0	4,0-6,0	2,4-2,6	...	...
Sedimentarias	Carbón	...	...	16-26	...	10	2,5-2,7	...	...
	Arcilita	...	...	2,0-10	...	...	...	...	...
	Conglomerado	...	...	70-100	...	...	...	...	...
	Creta coralina	...	...	3,0-18	...	...	...	...	...
	Dolomia	20,0-50	0,2-0,34	60-100	2,5-6,0	0,2-5,0	2,2-2,7	22-60	25-35
	Caliza	15-90	0,12-0,33	50-125	1,5-6,0	5,0-20	1,5-2,2	5,0-40	35-50
	Lutita	3,0-22	0,25-0,29	45-95	1,5-10	2,0-15	2,2-2,4	3,0-35	...
	Arenisca	15-17	0,1-0,4	75-120	5,0-20	5,0-25	2,0-2,5	8,0-35	30-50
	Cuarzoarenita	...	...	70-175	...	...	...	...	...
	Limolita	53-75	0,25	10-100	2,7	...	...	...	...
Metamórficas	Anfibolita	13-92	...	75-125	22	...	...	...	...
	Gneis	20-80	0,08-0,4	80-250	4,0-7,0	0,5-1,5	2,5-3,0	15-40	30-40
	Pizarra	5,0-30	...	120-190	7,0-20	0,1-1,0	2,65	10,0-50	25-30
	Esquisto	6,0-39	0,01-0,31	36-172	2,0-5,0	3	2,4-2,7	25	...
	Esquisto verde	...	...	65-85	...	...	...	...	...
	Micaesquisto	...	...	20-100	...	...	...	...	...
	Mármol	60-90	0,1-0,4	60-230	5,0-8,0	0,3-2,0	2,6-2,7	15-35	35-45
	Milonita	...	...	65-120	...	...	...	...	...
	Filita	...	...	21-80	...	...	...	...	...
	Cuarcita	22-100	0,08-0,24	75-280	10,0-30	0,1-0,5	2,6-2,7	25-70	40-55
Serpentinita	...	...	65-135	...	...	...	...	...

Figura 1.3 Valores de las propiedades mecánicas y de resistencia de algunas rocas

Fuente: (Hernández & Santamarta, 2015)

1.3.Rocas

Las rocas son agregados naturales duros y densos de partículas minerales con fuertes enlaces cohesivos permanentes, que generalmente se consideran un sistema continuo. Para (Friedman, 2018) una roca se define como una unión inorgánica de uno o más minerales producidos naturalmente a partir de procesos geológicos endógenos o exógenos, éstos pueden clasificarse en base a varias tipologías como es el caso de las que se enlistan a continuación.

1.3.1. Clasificación

1.3.1.1. Según su origen

Rocas ígneas conductivas o volcánicas

Las rocas ígneas intrusivas o plutónicas son aquellas que se forman en las regiones más profundas de la corteza, bajo una presión que no permite la salida de gases, y en las que se forman cristales de gran tamaño. Las rocas volcánicas ígneas o efusivas se forman a partir del magma que ha fluido sobre la superficie terrestre a través de zonas débiles o que ha sido expulsado de los volcanes (Cornejo , 2011).



Figura 1.4 Rocas Ígneas

Fuente: (GEOBAX, 2017)

Según (Llambías, 2001) las rocas ígneas juegan un papel importante en la composición y estructura de la litosfera. Son en gran parte responsables de promover la estratificación de la litosfera, y en particular la de la corteza continental, también están involucrados en la transferencia del calor de la Tierra. De hecho, el ascenso del magma, debido a su menor densidad que las rocas involucradas, transfiere a la superficie no solo material de baja densidad relativa, sino también una importante masa térmica, la eficiencia de ascenso del magma depende principalmente, de la permeabilidad de la litosfera y de la viscosidad efectiva del magma. Los magmas máficos o básicos, los cuales poseen una proporción de sílice de entre el 45 y el 53%, por su baja viscosidad, son los más propicios para alcanzar la superficie. El ascenso de los magmas silicatados, debido a su alta viscosidad, es mucho más complejo, requiere un mayor presupuesto

energético y por tanto compite con los magmas máficos en condiciones muy desfavorables.

Rocas sedimentarias

Según (Orozco et al., 2014) las rocas sedimentarias pueden estar formadas por la acumulación de sedimentos y partículas resultantes de la meteorización de otras rocas, ya sean ígneas, metamórficas o no, o por la acumulación de material de origen biológico, o por la precipitación de sustancias químicas o bioquímicas, o por combinación de todos estos elementos.



Figura 1.5 Rocas Sedimentarias detrítica de tipo conglomerado

Fuente: (GEOBAX, 2017)

Las rocas sedimentarias pueden contener datos sobre los mares antiguos, su extensión, su ascenso o descenso en los continentes, el tiempo y el grado de elevación del continente y el tiempo de formación de las cadenas montañosas. La vida pasada se puede estudiar a través de fósiles conservados en estratos, algunos tipos de fósiles se encuentran solo en estratos formados en un momento dado, indicando la edad relativa de los estratos en los que se incluyen y así dar información sobre si estos depósitos contienen hidrocarburos. Las rocas sedimentarias son de gran interés, ya que contienen los procesos de producción, almacenamiento y captura de hidrocarburos (Robledo , 2012).

Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son aquellas que están sujetas a cambios de presión y temperatura, generalmente a profundidades relativamente grandes de la superficie, y que, en estado sólido, sufren cambios en mineralogía y composición debido a diversos cambios físicos y químicos en presión y temperatura (Orozco et al., 2014).

Saber qué tipo de roca en un determinado lugar y los procesos bajo los cuales se formó es muy importante, porque las rocas son como las cajas negras de los aviones, ya que brindan información sobre los procesos geológicos de nuestro planeta. Estudiando los minerales que las componen, podemos descubrir los procesos que tienen lugar en la Tierra, un análisis de las rocas, sus componentes, sus procesos de formación y todo lo relacionado con ellas nos da una idea de lo que fueron estos procesos y cómo podrían ser en el futuro (Barrientos , 2013).



Figura 1.6 Rocas Metamórficas tipo foliada

Fuente: (GEOBAX, 2017)

1.4. Propiedades de las rocas

Las rocas son agregados naturales duros y densos de partículas minerales con fuertes enlaces cohesivos permanentes, que generalmente se consideran un sistema continuo. Las proporciones, composición granular, textura y origen de la roca sirven para su clasificación geológica. La roca siempre ha sido utilizada en construcciones civiles, constituidas por una superestructura y una subestructura (o cimentación), que transmiten cargas de la estructura al subsuelo. Para el diseño y construcción de infraestructuras o cimentaciones, es fundamental conocer las propiedades de los

materiales utilizados, ya que las dimensiones de las cimentaciones están directamente relacionadas con las propiedades de la roca y del suelo, por lo tanto, este conocimiento es vital para cualquier construcción (Vallejo , 2002).

A principios de la década de 1970, el Imperial College de Londres desarrolló un equipo hidráulico portátil para medir la resistencia de las rocas bajo el nombre de carga puntual (I_s), un parámetro que está completamente correlacionado con la resistencia a la compresión uniaxial simple. Este ensayo se puede realizar en fragmentos de roca irregulares o regulares, ya sea en probetas cilíndricas aplicadas diametral y axialmente, o en probetas en forma de paralelogramo (Calle & Suarez , 2020), para cualquier elección de tamaño de roca, en un núcleo de 50 mm de diámetro,

La resistencia se calcula con la siguiente expresión:

$$I_s = \frac{P*1000}{D_e^2} \quad (3)$$

Donde

I_s = Índice de carga puntual, sin corregir (MPa)

P = Carga de rotura (kN)

D_e = Distancia entre las puntas cónicas de carga (mm)

Clasificar el macizo rocoso puede darse por medio de la aplicación dos parámetros: el índice de resistencia a la carga puntual (I_s) e índice de espaciamiento de fracturas (IF). El índice de carga puntual proporciona una evaluación útil de la resistencia mecánica, particularmente de una compresión axial de rocas sólidas sin daño, que debe corregirse de acuerdo con las dimensiones reales de las muestras a analizar. Algunos autores han propuesto métodos de correlación entre el índice de carga puntual (I_s) y la resistencia mecánica a la compresión (σ) de las rocas (Durmeková et al., 2014).

Entre las propiedades físicas más comunes tenemos:

Peso específico

El peso específico se define como el peso por unidad de volumen

$$Pe (\gamma) = \frac{W}{V} \quad (4)$$

Dónde:

W: Peso

V= Volumen

Densidad

La densidad se define como la relación entre la masa de una muestra de roca en su estado natural o en seco y el volumen que ocupa.

$$\rho_p = \frac{m_p}{v_p} \quad (5)$$

Dónde:

ρ = densidad.

m = masa de la muestra de roca.

v = volumen.

La densidad se puede medir en gr/cm^3 o kg/m^3 .

Porosidad

La porosidad es definida como la razón entre el volumen de la parte vacía o poros y el volumen de la parte sólida (roca); se refiere a la capacidad de almacenar un fluido y se expresa en porcentaje.

$$n = \frac{V_p}{V} * 100 (\%) \quad (6)$$

Dónde:

n= porosidad.

V_p = volumen de poros.

V= volumen total.

Absorción

La absorción se refiere a como el agua llena los vacíos o poros de una muestra de roca sumergida en líquido. Los valores de absorción se determinan en porcentaje y se calcula entre la razón del peso del agua absorbida y el peso de la muestra seca.

$$C_{abs} = \frac{W_{aire} - W_{sec}}{W_{sec}} * 100(\%) \quad (7)$$

Dónde:

C_{abs} = coeficiente de absorción.

W_{aire} = peso natural de la muestra.

W_{seco} = peso en seco.

Contenido de humedad

Según (Ramírez, 2004) la humedad de una muestra se define como la razón entre la masa de agua contenida en la roca y la masa de muestra seca; se expresa netamente en porcentaje.

$$C.H. = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{W_{seco}} * 100 (\%) \quad (8)$$

W_{sat} = peso saturado.

W_{seco} = peso seco.

1.5. Resistencia a la Compresión Simple de Rocas

La resistencia a la compresión simple o uniaxial (RCS) de una roca es la tensión medida sobre la roca de forma técnica. La resistencia a compresión simple de las rocas es el criterio de falla y es el parámetro más común para definir el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso. Obtener esto en el laboratorio requiere de muestras cuidadosamente preparadas y un tiempo considerable para obtener los resultados, lo que puede ser costoso (Burbano & García, 2016)

Según (Ceballos & Restrepo, 2016) esta calificación o parámetro se debe a la necesidad de utilizar la clasificación del macizo rocoso. Estas clasificaciones se

conocen como clasificaciones geomecánicas y se derivan por naturaleza de la diferencia entre las propiedades de la roca y la masa de la roca, con diversos grados de fracturamiento y meteorización. Las clasificaciones geomecánicas son sistemas para evaluar el comportamiento de terrenos rocosos, se basan en una evaluación numérica de las propiedades y características específicas de la roca en un lugar determinado, y luego en la obtención de una evaluación final correspondiente a la suma de las evaluaciones parciales. Las diversas clasificaciones tienen en cuenta un parámetro fundamental para determinar la resistencia a la compresión simple.

La resistencia a la compresión simple es una medida de la resistencia de la matriz rocosa, que representa el esfuerzo de compresión axial máximo que una muestra de material puede soportar antes de fracturarse.

Tabla 1.1. Clasificación de la roca en base a la resistencia a la compresión según la ISRM

Descripción	Resistencia a la Compresión (MPa)
Extremadamente blanda	Menor a 1
Muy blanda	1-5
Blanda	5-25
Moderadamente blanda	25-50
Dura	50-100
Muy Dura	100-250
Extremadamente dura	250

Fuente: (Veloz , 2018)

1.5.1. Características de las rocas para operaciones mineras

De acuerdo a (Ramírez & Monge, 2004) las características mayormente influyentes se enlistan a continuación:

Una resistencia a la compresión axial de una roca:

- Indica la resistencia de una roca bajo un esfuerzo de compresión axial y determina si la roca es lo suficientemente fuerte o débil con respecto a una carga aplicada.

Deformación de la roca antes de la falla

- Esto indicará si el deslizamiento natural del material puede ocurrir dentro del rango esperado y a niveles de tensión menores que el nivel requerido

para causar la falla; en casos extremos, esto puede indicar la posibilidad de esponjamiento del macizo rocoso.

Falla de roca

- La naturaleza de la falla del material por rotura o deslizamiento tiene un efecto decisivo en el factor de seguridad utilizado o calculado para el trabajo de diseño, así como las precauciones a tomar durante la operación.

Densidad, simetría y simetría de la formación

- El origen de la formación de rocas determina en gran medida si la masa de una roca en la naturaleza es típicamente isotrópica o anisotrópica. Desde un punto de vista mecánico, es necesario saber qué tipo de macizo rocoso está presente en el área de trabajo.

Continuidad de la roca

- Las propiedades del macizo rocoso son de gran importancia. Ya sea que una roca este dividida en bloques grandes o en fragmentos más pequeños, la consistencia será más importante que las propiedades de la roca.

Tabla 1.2. Métodos para determinar la resistencia a la compresión simple

Aplicación	Método	Obtención de resistencia
Campo	Índices manuales Ensayo Organoléptico	Estimación subjetiva
	Esclerómetro o martillo de Schmidt	Estimación objetiva
Campo y Laboratorio	Compresión Puntual	Correlación
Laboratorio	Ensayo de Tracción Brasileña	Correlación
	Ensayo de compresión axial	Medicación directa

Fuente: (Ceballos & Restrepo , 2016)

1.6. Resistividad de las rocas

La resistividad eléctrica de rocas y minerales es una propiedad extremadamente variable y depende de muchos factores. La resistividad de rocas cristalinas como: granulitas, granitos, dioritas, entre otras características, tomadas in situ, suelen estar determinadas por su fractura y el agua presente en la fisura. De manera similar, la porosidad, el grado de saturación y la naturaleza de los electrolitos que llenan los poros determinan la resistividad de rocas como la arenisca y la caliza.

En general, las rocas compactas son malas conductoras de la electricidad, pero las áreas de rocas fragmentadas a veces pueden tener baja resistividad, incluso algunos suelos, al igual que los calcáreos, margosos y otros, tienen baja resistividad (Ramírez, 2004).

A una roca, como conductor de la corriente eléctrica se la puede considerar como un agregado que consta de un sólido mineral, de líquidos y gases.

En la resistividad del agregado, influyen los siguientes factores (Veloz , 2018):

- La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca (su esqueleto).
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- La humedad de la roca.
- La porosidad de la roca.
- La textura de la roca, la forma y distribución de sus poros.
- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral.

Especialmente la resistencia eléctrica en muestras secas es muy alta en comparación con los valores obtenidos a partir de cualquier contenido de agua. Las rocas ígneas y metamórficas suelen tener valores de resistividad elevados. La resistividad de estas rocas depende en gran medida de su grado de fractura y del porcentaje de agua que llena las grietas del suelo. Las rocas sedimentarias suelen ser más porosas y tienen un mayor contenido de agua, lo que suele conducir a valores de resistividad más bajos (Paúl, 2021).

Para la determinación de la resistividad en el campo se usa la siguiente relación:

$$p = R * \frac{A}{L} \quad (9)$$

Donde:

ρ = Resistividad en ohm· metro Ωm .

R = Resistencia que presenta la roca en ohmios Ω .

A = Sección de la roca en metros cuadrados m^2 .

L = Longitud de la roca en metros m .

1.7. Macizo rocoso

Un macizo rocoso es un agregado formado por una matriz rocosa y discontinuidades, que tienen un carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y suelen ser anisotrópicos. Es por esto que, la descripción y clasificación físico-mecánica es de gran importancia, ya que las obras, especialmente los túneles sobre los que se desarrollan, requieren de una serie de estudios y ensayos para conocer las características del material, sobre el que se prevén obras de construcción. Estos estudios permiten el desarrollo de planes para asegurar la consistencia de las obras de acuerdo a las diferentes características y propiedades físicas.

El estudio del macizo rocoso fue de gran importancia durante la construcción de importantes túneles en Europa y Estados Unidos. La necesidad de investigación para estos trabajos fue tan grande que finalmente dieron lugar a los métodos de clasificación de macizos rocosos que se utilizan hoy en día para cualquier tipo de intervención de ingeniería en macizos rocosos. Al planificar y ejecutar obras subterráneas (túneles), es necesario traducir de alguna manera la realidad de la naturaleza en cantidades, y luego correlacionar estas cantidades y operar con ellas para calcular y determinar las dimensiones de las partes del trabajo de ingeniería que es necesario realizar (Jiménez , 2012).

1.7.1. Matriz rocosa

Según (Rincón, 2016) la matriz rocosa son bloques de roca entre material rocoso discontinuo o discontinuidades, se caracteriza por su densidad, su deformabilidad, resistencia, ubicación geográfica y litología única o diversa.

Los siguientes son los aspectos descriptivos de la matriz rocosa en el área:

- Identificación litológica.
- Meteorización o alteración.
- Resistencia a compresión simple.
- Discontinuidad
- Cualquier plano de origen mecánico o sedimentario en un macizo rocoso, con una resistencia a la tracción nula o muy baja.

1.7.1.1. Identificación litológica

Dado que todas las rocas de un depósito son sedimentarias, este aspecto se reduce a identificar qué tipo de roca sedimentaria es, y esto se hace identificando las propiedades de las rocas sedimentarias, como tamaño y tamaño de grano, color, textura, composición. dureza de las rocas sedimentarias (Solé , 2002).

1.7.1.2. Meteorización de la matriz rocosa

El grado de meteorización de una roca es una observación importante porque tiene un efecto definido sobre sus propiedades mecánicas. A medida que avanza el proceso de meteorización, la porosidad, la permeabilidad y la deformabilidad del material rocoso aumentan, mientras que su resistencia disminuye. La definición del estado o grado de cambio de la matriz de la roca se puede hacer de forma sistemática, los diferentes tipos de rocas se ven afectados de manera desproporcionada por los procesos de meteorización, cuanto mayor sea el período de exposición a los agentes atmosféricos, más intenso será el proceso de meteorización (Solé , 2002).

Tabla 1.3. Meteorización de la matriz rocosa

Código	Término	Descripción	Grado
F	Fresca	No presente señales visibles de meteorización	I
SW	Ligeramente meteorizada	Presenta decoloración de material y superficies de discontinuidad	II
MW	Moderadamente meteorizada	Menos de la mitad de material rocoso está descompuesto y desintegrado en el suelo	III
HW	Altamente meteorizada	Más de la mitad de material rocoso está descompuesto y desintegrado en el suelo	IV
CW	Completamente meteorizada	Todo el material rocoso está descompuesto	V
RS	Suelo residual	Todo el material esta convertido en el suelo	VI

Fuente: (Vallejo , 2002)

1.7.1.3. Resistencia

La fuerza de la matriz rocosa en el afloramiento se puede estimar utilizando índices de campo a partir de datos proporcionados por pruebas de campo simples. Los índices de campo permiten estimar el grado de resistencia de la roca, sus criterios de identificación se describen en la tabla a continuación y deben aplicarse a la roca después de la limpieza de la capa superficial de meteorización.

Tabla 1.4. Meteorización de la matriz rocosa

Clase	Descripción	Identificación de Campo	Aproximación al rango
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña	0,25 - 1
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con punta de martillo	1-5
R2	Roca Blanca	Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas	5-25
R3	Roca moderadamente dura	Puede fracturarse con un golpe fuerte de martillo	25-50
R4	Roda dura	Se requiere más de un golpe de martillo para fracturarle	50-100
R5	Roca muy dura	Se requiere muchos golpes de martillo para fracturarla	100-250
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo solo saltan esquirlas	>250

Fuente: (Vallejo , 2002)

1.7.1.4. Descripción de las discontinuidades

Según (Vallejo, 2002) la resistencia, deformación y disolución del macizo rocoso tienen un cierto efecto sobre las propiedades hidráulicas y el comportamiento. La resistencia al corte de la discontinuidad es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de rocas duras fracturadas, y su estimación requiere definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.

Para cada familia de disección, los siguientes parámetros deben ser descritos y medidos en el campo:

- Orientación
- Espaciado
- Continuidad y persistencia
- Rugosidad Resistencia de las paredes
- Abertura
- Relleno

- Filtraciones

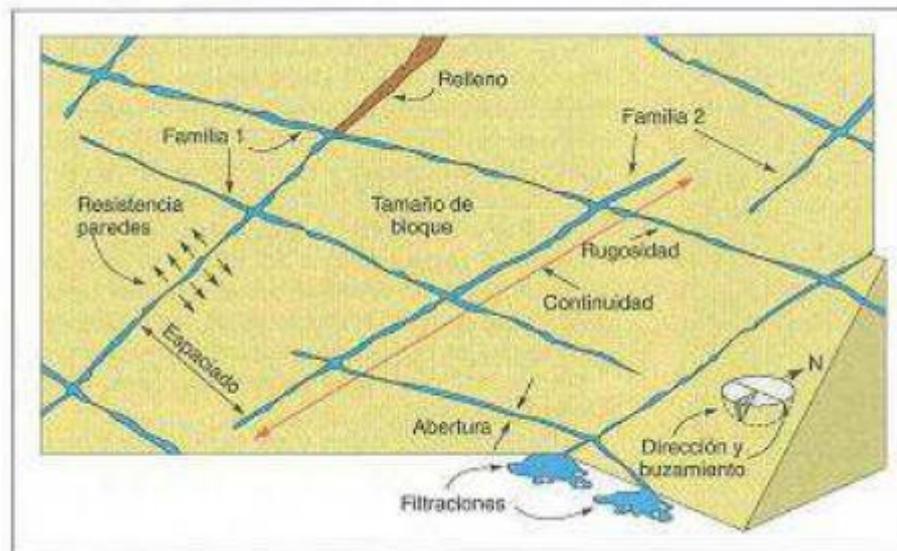


Figura 1.7 Esquema de los parámetros de las discontinuidades

Fuente: (Hudson , 1989)

1.8. Caracterización geológica

1.8.1. Geología general

(Valencia, 2018) en su investigación citó que el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, 2017, afirma que “La subducción de la placa Nazca bajo la sudamericana ha generado en el Ecuador tres zonas morfo estructurales coincidentes con las regiones del territorio continental: Costa, Sierra y Oriente. La Costa corresponde a una plataforma ante arco, la Sierra está formada por las Cordilleras Occidental y Real, mientras el Oriente lo conforman el levantamiento Napo y la cuenca Amazónica”.

Además, el mismo instituto menciona que son varios cinturones paralelos de rocas metamórficas de bajo grado (pizarras, esquistos) a alto grado (gneis), de edad paleozoica a pre-cretácica, con orientación norte noreste a sur suroeste (NNE-SSO), los que componen la cordillera Real. Estas características corresponden a un complejo plegado y comprimido controlado por fallas o suturas regionales (Valencia, 2018).

1.8.2. Geología local

Según el “Mapa geológico del Ecuador, Azogues” y el “Mapa geológico del Ecuador, Gualaceo” (Valencia, 2018) en el área de estudio intervienen las siguientes formaciones y series:

Serie Paute. - Constituyen las rocas más antiguas (formaciones Yungilla, Piñón y otras desconocidas) metamorfizadas. Es una serie compuesta de esquistos verdes, filitas negras y meta-volcánicos (Valencia, 2018).

Formación Yunguilla. - La argelita negra, meteorizada o pasando a arcillas cafés, oscuras o negras es la litología predominante. Otro denominador común en varios niveles es la silificación, encontrándose depósitos de caliza y concreciones carbonatadas en toda la secuencia. Areniscas y capas guijarrosas fosilíferas se observan en varias localidades, así como lavas andesíticas (Valencia, 2018).

Formación Biblián. - Esta formación descansa en discordancia sobre la formación Yunguilla, donde el depósito basal es de guijarro medianamente grueso, a menudo con guijarros de la formación Yunguilla (Valencia, 2018).

Formación Loyola. - Tiene contacto cerca del margen y de forma gradual con la formación con la Biblián subyacente en el centro. En el lado Este, un conglomerado basal, sobrepasa a la formación Biblián para descansar en la formación Yunguilla (Bristow1973). “Los depósitos superiores de aproximadamente 250 metros de espesor, consisten casi íntegramente de lutitas de colores: gris oscuro y amarillo claro, meteorizadas y rojizas, con una flora variada, pero sin diagnóstico. El yeso abunda en casi todos los niveles y se observan calizas cristalinas de dos metros de largo por 50 centímetros de espesor” (Valencia, 2018).

Formación Azogues. - Integrada por areniscas tobáceas gruesas, de color café, pero los depósitos de limonita y arcilla generalmente no tienen más de un metro de espesor. Un conglomerado basal bien desarrollado puede encontrarse donde la formación ha sobrepasado las subyacentes (Valencia, 2018).

Formación Tarqui. - “Las rocas constituyentes son plásticas ácidas, aunque ocasionalmente se observen lavas. En ciertos lugares por alteración hidrotermal se ha alterado completamente la roca original a caolín” (Valencia, 2018).

Volcánicos de Llacao. - Consisten predominantemente en aglomerados en una matriz de vidrio blanco desvitrificado, pero hay evidencia de tobas blancas estratificadas. Los volcánicos son notoriamente inestables (Valencia, 2018).

Tonalita. - Roca ígnea plutónica, se caracteriza por la abundancia de minerales félsicos (cuarzo y plagioclasa) y minerales máficos (biotita y anfíbol).

Terrazas. - Se reconocieron cinco niveles de terrazas principales alrededor de la cuenca, los tres primeros se componen característicamente de rocas gruesas, son considerados como depósitos fluvio-glaciares que provienen del flanco Este de la Cordillera Occidental (Valencia, 2018).

Coluvión. - Muchos valles tienen sus laderas cubiertas con una capa de material coluvial, mucho de este material probablemente se originó como talud durante el pleistoceno, pero su formación continua hasta ahora.

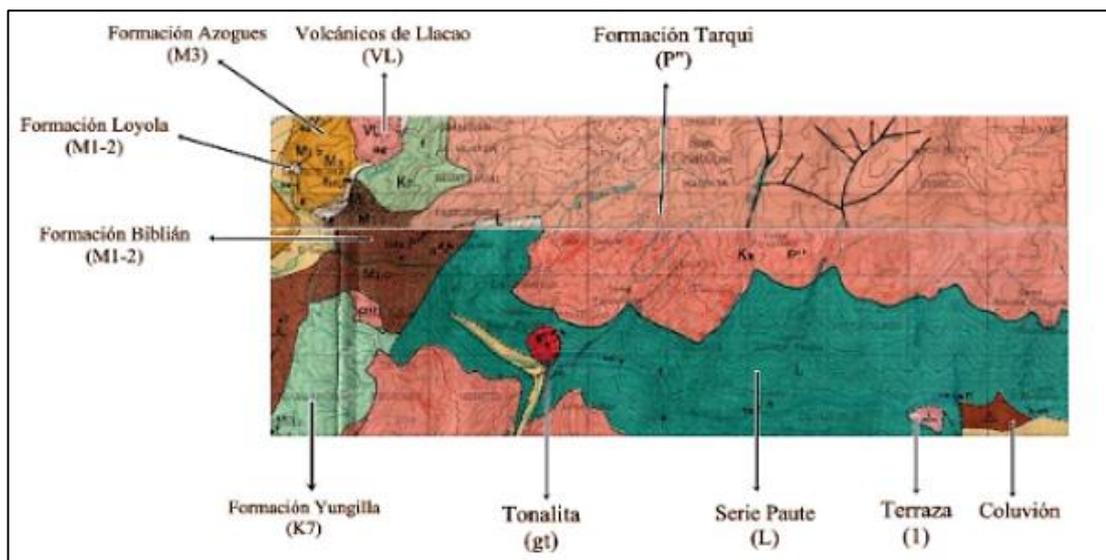


Figura 1.8 Geología local

Fuente: (Valencia, 2018)

1.9. Climatología

La zona del proyecto tiene una elevada humedad, con niveles de precipitación entre 1800 a 2500 mm. En lo referente a la temperatura tiende a aumentar conforme se descende en altura, es decir, es inversa con respecto a la altitud (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020).

Según la Ficha Informativa de Proyecto “Proyecto Carretera Gualaceo – Plan de Milagro – Limón Indanza “emitido por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOPE), la temperatura media anual presenta valores de alrededor de 5° C en los páramos y 17° C en las partes bajas de la Subcuenca del río San Francisco, de 8° C para las partes altas de la subcuenca del río Ishpingo y 20° C para su parte baja. La temperatura de la subcuenca del río Yungantza es de alrededor de 22° C. La humedad en la zona alcanza un valor promedio anual de 87%, pues los registros oscilan entre los valores mínimos de 84% hasta valores máximos de 90% (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020).

1.10. Relieve

El relieve se caracteriza por ser irregular, principalmente en la parte central y oriental, y es moderado al llegar en la depresión andina de Gualaceo, con un encajonamiento de fuertes pendientes localizado a lo largo del río San Francisco (Valencia, 2018).

“El relieve es del tipo terraza montañoso” (Valencia, 2018). En esta región se puede encontrar formas de denudación como son las colusiones de colmatación, tal es el caso de los valles aluviales.

1.11. Hidrología

El proyecto corresponde a la del río San Francisco, que tiene su origen en el sector del cerro Curiquingue, con el nombre de Culebrillas, a una altura de 3679 m.s.n.m. y pertenece al Sistema Hidrográfico Gualaceo Paute (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020).

El trayecto del río va en dirección noreste, recoge las aguas de drenajes intermedios como son: las quebradas Ashnayacu, Churucus, Chaucan y Ocerro por su margen izquierdo; y por su margen derecho las quebradas Maylas, Leones, Chorro Blanco, Palmas, Calvario y Uchucay (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020).

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

En el siguiente apartado se enlistan el enfoque, método, nivel de investigación y desde luego las técnicas para recolección de información; con el propósito de establecer la consecución de los objetivos planteados en la presente investigación.

2.1.Modalidad de la investigación

El tratamiento de información se caracterizó por abordar únicamente datos numéricos a lo largo de todo el desarrollo de la investigación. Dicha metodología fue necesaria con el propósito de estudiar y caracterizar el macizo rocoso a fin de establecer las características intrínsecas del lugar de estudio.

2.1.1.Modalidad cuantitativa

Las investigaciones de carácter cuantitativo se caracterizan por describir una serie de respuestas con base en el análisis de datos únicamente numéricos para validar una hipótesis o verificar una idea totalmente detallada (Sampieri, 2008). Para el abordaje de este punto tan particular se efectuaron una serie de ensayos que buscaron caracterizar el macizo rocoso para detallar sus propiedades intrínsecas.

2.2.Alcance de la investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se empleó el alcance descriptivo para exponer la información recopilada.

2.2.1.Estudios descriptivos

Es necesario recordar que las investigaciones de carácter descriptivo permiten detallar de manera simple, pero eficiente los resultados obtenidos a lo largo de todo el proyecto. De esta manera se pudieron expresar los resultados obtenidos sobre el macizo rocoso.

2.3. Tipos de investigación

2.3.1. Bibliográfico documental

Es necesario sustentar toda la información emitida en el presente trabajo de investigación, por tal motivo, fue estrictamente necesario recopilar información de fuentes que otorguen el valor agregado a la investigación. Las indagaciones de carácter bibliográfico se connotan como un modelo que involucra rastrear información de libros, revistas, papers, libros; todos y cada uno de ellos de fuentes bibliográficas totalmente reconocibles e institucionalmente importantes (Sampieri, 2008).

2.3.2. Investigación de campo

Se puede aseverar que esta tipología de investigación consiste en la recolección de datos desde la fuente de la problemática y objeto de estudio, es decir del sitio en el cual ocurren los hechos. Es menester acotar que bajo ninguna circunstancia se debe estar en contacto directo con las variables de estudio; es estrictamente necesario que la información sea detallada en la manera en la cual fue encontrada. En este punto en especial se recopiló información sobre aspectos geológicos y geomecánicos de la zona de estudio; Ingamullo II - km 11, proyecto: reconstrucción de la carretera Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro.

2.3.3. Procedimiento de campo

2.3.3.1. Fase I: Información

En este punto en particular, fue necesario establecer toda la información de la zona de estudio; como por ejemplo el tipo de depósito y sus características geológicas, propiedades de la roca y sobre todo los parámetros del macizo rocoso. Otro punto importante fue la categorización de ciertos mapas para complementar el estudio.

2.3.3.2. Fase II: Fase de campo

En esta fase, el objeto de estudio fue analizado estructuralmente y discontinuamente, con los parámetros RQD, distancias, posiciones, orientación de discontinuidades, y

presencia de agua propuesto por Bieniawski. Se tomaron en cuenta los insumos necesarios para la clasificación geomecánica de los cuerpos rocosos, además, se recogieron datos de rebote de Schmidt Hammer (Esclerómetro) de forma sistemática, teniendo en cuenta diez mediciones por articulación, para estimar la resistencia a la compresión simple (RCS).

2.3.3.3. Fase III: Ensayos de laboratorio y procesamiento de información

Los ensayos dispuestos fueron los siguientes:

- **Ensayo de propiedades físicas**

Determinación del índice RQD

La determinación de este índice fue necesaria para los cálculos, ya que este parámetro se utiliza para la caracterización geomecánica RMR y la caracterización de la Q de Barton. El método utilizado para los cálculos se basa en el mapeo de diaclasas o discontinuidades en un paramento rocoso, ya que el método de testigos es un modelo difícil dadas las características y condiciones del macizo, sin mencionar el costo de perforación. Este método consiste esencialmente en estimar el espaciamiento combinado y el número de familias observadas en el área. Intenta imitar el cálculo tradicional de RQD en núcleos de roca, pero se aplica a una línea base o regla colocada contra una pared excavada, como se muestra en la imagen a continuación:

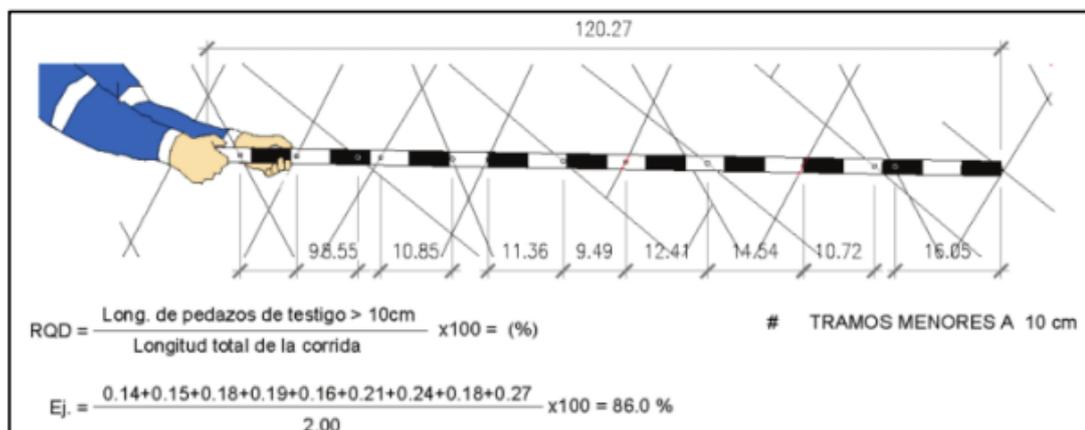


Figura 2.1 Proceso utilizado para evaluar el RQD

Fuente: (Ceballos & Restrepo , 2016)

Determinación del espaciamiento y condición de las discontinuidades

La determinación de las condiciones de campo requiere de ciertas herramientas, tales como: cinta métrica, transportador o regla, compás, peine Barton, bolígrafo. Cada una de estas herramientas sería de gran utilidad para representar el macizo rocoso.

➤ **Resistencia a la compresión simple**

La resistencia a la compresión simple o uniaxial (RCS) de una roca es la tensión medida técnicamente en la roca. La resistencia a la compresión simple de las rocas es el parámetro más común utilizado para determinar los criterios de falla y el comportamiento geomecánico de un cuerpo rocoso. Obtenerlos en pruebas de laboratorio requiere de muestras cuidadosamente preparadas y mucho tiempo, lo que puede resultar costoso. Esta calificación o parámetro surge de la necesidad de utilizar la clasificación de rocas. Estas clasificaciones se denominan clasificaciones geomecánicas y dan como resultado una distinción entre el estado natural de la roca y las propiedades de la masa, que está fracturada y meteorizada en diversos grados (Burbano & García , 2016).

Las clasificaciones geomecánicas son sistemas para evaluar el comportamiento de los terrenos rocosos. Se basan en la valoración numérica de las propiedades y características específicas de la roca en un lugar determinado y la valoración final resultante de la suma de las valoraciones parciales. Las diversas clasificaciones tienen en cuenta un parámetro fundamental a saber que es la resistencia a la compresión simple, el cual es una medida de la resistencia de la matriz rocosa que indica el esfuerzo de compresión axial máxima que una muestra de material puede soportar antes de fracturarse. Esta prueba determina la resistencia a la compresión de una muestra de roca cilíndrica de dos a tres veces su diámetro, estas muestras generalmente se recolectan de núcleos de perforación (Feijoo & Padrón , 2020).

➤ **Corte directo**

La resistencia al corte es un factor esencial a considerar cuando se estudian las propiedades mecánicas de las discontinuidades. Los factores más importantes que afectan el comportamiento del desequilibrio bajo esfuerzo cortante son:

- Esfuerzos normales al plano de corte
- Rugosidad de las superficies de contacto
- Grado de alteración y resistencia de los labios de la discontinuidad
- Velocidad del movimiento de corte
- Orientación del desplazamiento

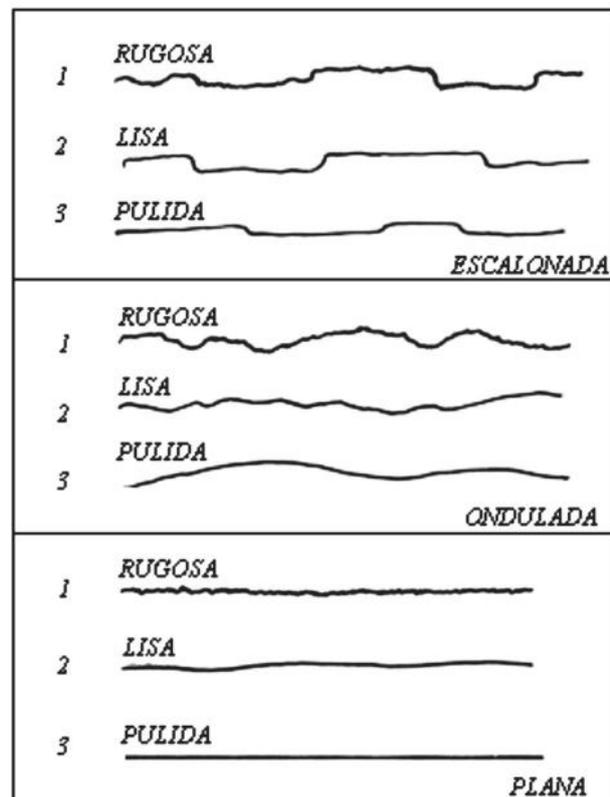


Figura 2.2 Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad

Fuente: (Camacho et al., 2009)

2.3.3.4. Fase IV: Interpretación de resultados

Esta fase implicó procesar los datos recopilados primero en la fase de campo y durante los ensayos, luego analizarlos y finalmente recopilar los resultados para crear una discusión. Después de procesar los datos registrados con un martillo Schmidt, se determinó la resistencia a la compresión axial. Se profundizó en la caracterización de disequilibrio, desarrollando el análisis de campos base y minerales de diferentes formas; este análisis incluye una explicación de las tendencias estructurales para cada uno de los parámetros anteriores. Además, se realizó la clasificación geomecánica utilizando el método RMR de Bieniawski.

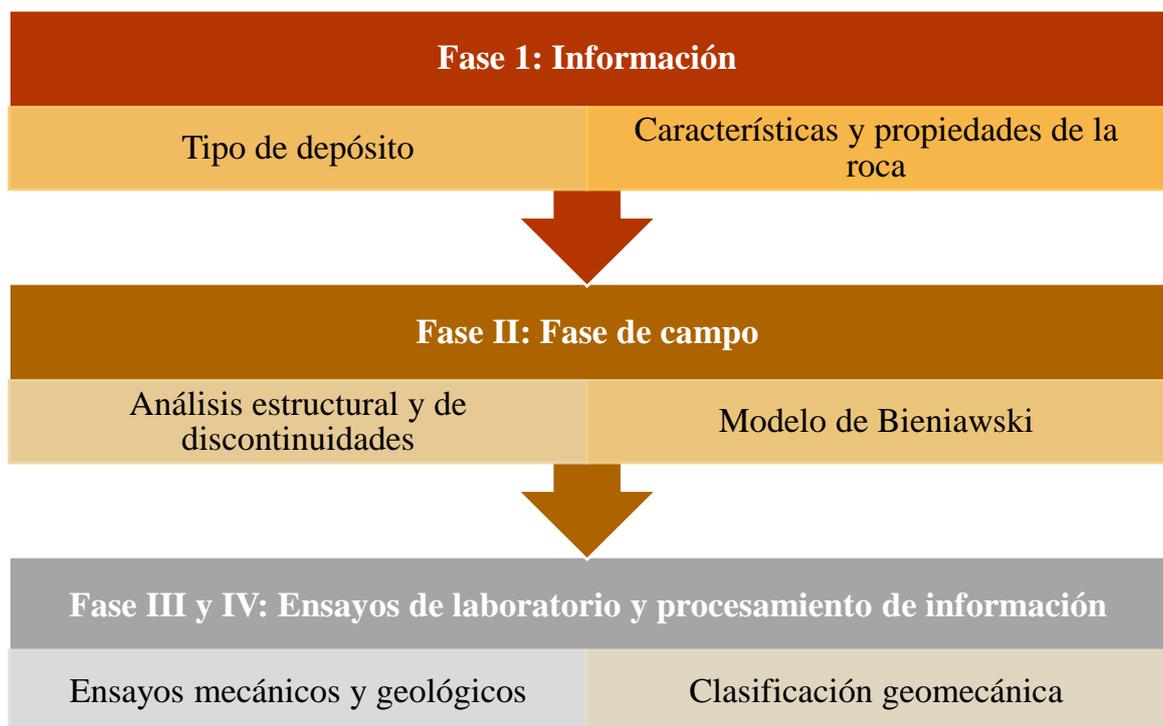


Figura 2.3 Fases simplificadas del proyecto

Fuente: Elaboración propia

2.4. Población y muestra

La población y de igual manera la muestra consistió del macizo rocoso del sector Ingamullo II - km 11, proyecto: reconstrucción de la carretera Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro.

2.4.1. Selección de la muestra

Para el mapeo de taludes, el muestreo se clasificó como muestreo aleatorio estratificado, porque el muestreo se realiza de acuerdo con la naturaleza de los cambios hidrotermales en los modelos geológicos del macizo rocoso. La distribución de muestras es proporcional al área de cada tipo de cambio hidrotermal. El registro geomecánico se realizó en todas las perforaciones con diamantinas, el muestreo no probabilístico se usa en la recolección de muestras de roca para pruebas de laboratorio, ya que las muestras se envían al laboratorio para confirmar los datos sobre roca intacta obtenidos por otros métodos en el campo.

2.5. Técnicas e instrumentos

2.5.1. Observación directa

La observación in situ recopiló los datos necesarios para el levantamiento de información, como, por ejemplo: presencia de filtraciones de agua, erosión y los tipos de soportes encontrados en el área de estudio para identificar la naturaleza, cambio y estado actual del macizo rocoso, así como las características físicas y aspectos generales del área Ingamullo II - km 11, proyecto: reconstrucción de la carretera Gualaceo-Limón Indanza, tramo: Gualaceo-Plan de Milagro.

2.5.2. Instrumentos

Fichas de toma de datos para la determinación de la calidad de roca; algunos de los parámetros que fueron elaborados se enlistan a continuación:

- Resistencia de la muestra
- Presencia de agua
- Determinación del RQD
- Espaciado entre discontinuidades
- Descripción del espaciado
- Persistencia de las discontinuidades
- Descripción de persistencias
- Apertura de fracturas
- Clasificación de rugosidad
- Meteorización de las discontinuidades

- Cálculo del RMR para el macizo rocoso
- Número de familias diaclasas
- Rugosidad de las superficies de las discontinuidades
- Factor reductor del esfuerzo
- Coeficiente reductor: presencia de agua

2.6. Análisis de la información y técnicas de recolección de datos

Los datos fueron recogidos en el lugar de estudio con base en cada uno de los ensayos efectuados a lo largo del presente trabajo de investigación. En la presente tesis se realizó un análisis cuantitativo de los datos, usando los datos por medio del programa Excel para el abordaje de la información.

2.7. Información de la zona de estudio

Provincia: Azuay, cantón: Gualaceo, coordenadas: 2°55'52.8"S 78°43'01.8"W

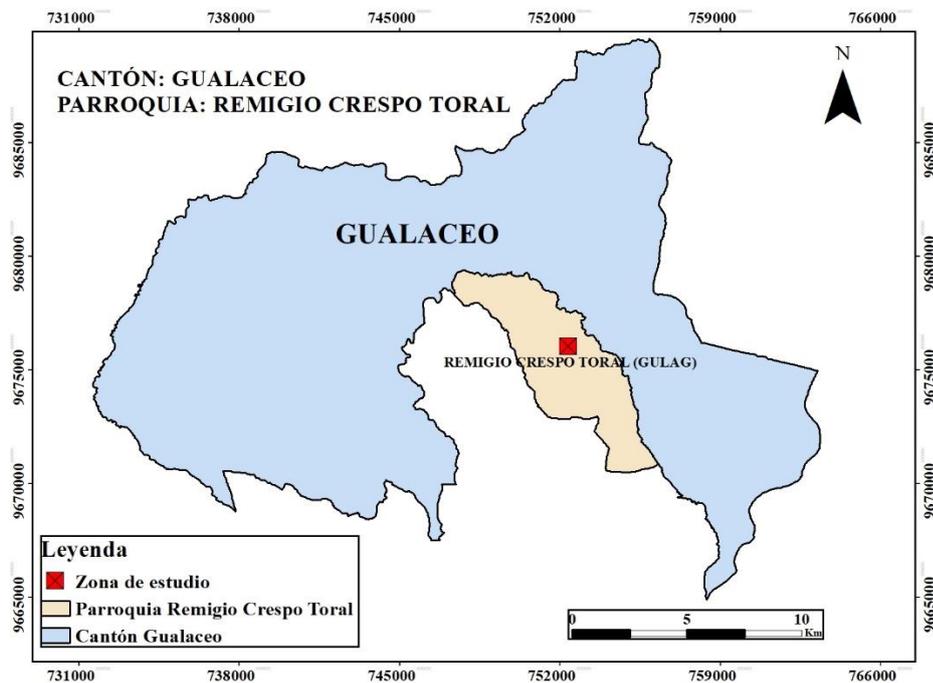


Figura 2.4 Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

3.1. Análisis de resultados

En este capítulo denominado como experimentación, se exponen los resultados de forma explícita de cada una de las actividades o procedimientos realizados con el fin de llegar a la consecución de los objetivos planteados. Es menester acotar cada resultado obtenido se expone por medio de un modelo descriptivo de datos.

3.1.1. Determinación de la clasificación geo mecánica

Es importante detallar que el macizo rocoso según los mapas geológicos concernientes a la zona de estudio se encuentra compuesto de roca metamórfica. Es por este aspecto que fue necesario detallar y clasificar la información por medio de muestras.

3.1.2. Toma de muestras

Se recolectaron 10 muestra en la zona por medio de un trabajo de campo. Del total de muestras únicamente 5 de ellas cubrieron las características para su ingreso en el laboratorio, estas poseían condiciones óptimas de tratamiento y una excelente base de apoyo para realizar las pruebas de compresión.

3.1.3. Resistencia a compresión simple de la roca

Para realizar las pruebas de compresión simple se utilizó el equipo Humboldt para determinar los valores de las 5 muestras y realizar los respectivos cálculos y obtener un promedio de cada muestra analizada. El primer paso en este procedimiento fue tomar las medidas de las bases de la muestra para obtener un área de aplicación. Como segundo paso en la lista fue necesario colocar cada una de las muestras en el equipo de ensayo, una vez identificados los resultados es necesario efectuar un promedio entre cada uno de las probetas.

Tabla 3.1. Muestra 1 de roca

Muestra 1		
11	3.5	cm
12	9.2	cm
A=	32.2	cm ²
RCU=	1099	kg
	34.13	kg/cm ²
	33,47	MPa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2. Muestra 2 de roca

Muestra 2		
	4.4	cm
	4.6	cm
A=	20.24	cm ²
RCU=	5781	kg
	285.62	kg/cm ²
	28.009	MPa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3. Muestra 3 de roca

Muestra 3		
	1.8	cm
	10	cm
A=	18	cm ²
RCU=	7331	kg
	407.28	kg/cm ²
	39.94	MPa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Muestra 4 de roca

Muestra 4		
	2.8	cm
	10.2	cm
A=	28.56	cm ²
RCU=	10084	kg
	353.08	kg/cm ²
	34.62	MPa

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Muestra 5 de roca

Muestra 5		
	3.9	cm
	6.6	cm
A=	25.74	cm ²
RCU=	13514	kg
	525.02	kg/cm ²
	51.48	MPa

Fuente: Elaboración propia

Nota: El promedio fue de 31.47 MPa de resistencia a la compresión uniaxial

3.1.4. Determinación del RQD

La designación de la calidad de roca se determinó contando el número de juntas o discontinuidades presentes en un metro cúbico de roca obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.6. Determinación del RQD

N°	RQD		
1	17	22	12
2	9	23	11
3	12	24	16
4	14	25	19
5	22	26	14
6	13	27	19
7	11	28	10
8	7	29	9
9	16	30	10
10	21	31	22
11	14	32	16
12	18	33	21
13	26	34	8
14	10	35	12
15	18	36	11
16	25	37	14
17	13	38	20
18	15	39	12
19	24	40	30
20	4	41	26
21	6	42	17
		43	13

44	12
45	30
46	6
47	10
48	16
49	15
50	15
51	17
52	16
53	11
54	17
55	18
56	19
57	16
58	17
59	16
60	12
61	3
62	15
63	12
64	6
65	8
66	4

67	7
68	12
69	3
70	4
71	8
72	9
73	3
74	8
75	5
76	13
77	8
78	12
79	17
80	12
81	10
82	12
83	6
84	8
85	10
86	12
87	15
88	16
Total	1178

Fuente: Elaboración propia

Como siguiente paso, es necesario sumar los valores de la tabla mayores e iguales a 10 centímetros, dando un resultado de 1039.

$$RQD(\%) = \frac{1039}{1178} \times 100$$

$$RQD(\%) = 88.20\%$$

3.1.5. Espaciamiento medio de las discontinuidades

Para la evaluación de este punto fue necesario ir tomando las medidas por medio de un flexómetro, la distancia que existe entre la separación entre junta y junta para luego de todos los valores obtenidos determinar el promedio. Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 3.7. Espaciamiento entre discontinuidades

N°	Espaciamiento (cm)				
1	6	41	20	84	10
2	5	42	15	85	9
3	8	43	3	86	20
4	4	44	1	87	28
5	9	45	24	88	3
6	10	46	16	89	4
7	5	47	12	90	13
8	2	48	5	91	6
9	2	49	17	92	20
10	2.5	50	16	93	30
11	8	51	7	94	10
12	10	52	16	95	8
13	12	53	25	96	10
14	4	54	39	97	3
15	8	55	40	98	3
16	9	56	36	99	4
17	8	57	49	100	8
18	5	58	20	101	30
19	4	59	56	102	36
20	4	60	25	103	23
21	6	61	60	104	28
22	18	62	15	105	40
23	16	63	26	106	10
24	14	64	10	107	7
25	10	65	8	108	13
26	16	66	9	109	10
27	15	67	7	110	10
28	10	68	13	111	9
29	8	69	10	112	26
30	6	70	12	113	50
31	9	71	30	114	13
32	5	72	27	115	30
33	12	73	20	116	80
34	18	74	24	117	20
35	17	75	13	118	30
36	46	76	12	119	10
37	19	77	10	120	10
38	8	78	6	121	10
39	20	79	10	122	9
40	11	80	60	123	7
		81	20	124	8
		82	7	125	14
		83	8	126	20

127	10
128	20
129	16
130	23
131	22
132	27
133	28
134	40
135	16
136	30
137	36
138	44
139	52
140	38
141	43
142	12
143	6
144	14
145	4
146	18
147	16
148	6
149	36
150	15
151	18
152	42
153	12
154	4
155	5
156	8
157	5
158	10
159	20
160	9
161	3
162	2
163	3
164	4
165	4
166	7
167	8
168	6
169	5
170	4
171	6

172	7
173	3
174	8
175	6
176	10
177	16
178	4
179	6
180	20
181	15
182	5
183	7
184	6
185	4
186	4
187	1
188	2
189	10
190	9
191	7
192	6
193	18
194	16
195	13
196	13
197	12
198	4
199	4
200	4
201	8
202	6
203	25
204	10
205	24
206	11
207	20
208	35
209	18
210	14
211	5
212	5
213	8
214	7
215	25
216	21

217	25
218	30
219	20
220	10
221	8
222	10
223	6
224	7
225	8
226	48
227	90
228	12
229	10
230	16
231	9
232	25
233	25
234	38
235	49
236	50
237	28
238	10
239	8
240	7
241	6
242	5
243	10
244	20
245	12
246	10
247	40
248	22
249	24
250	28
251	13
252	26
253	23
254	35
255	40
256	26
257	10
258	30
259	44
260	8
261	20

262	28	292	18	322	1
263	30	293	16	323	2
264	36	294	3	324	2
265	22	295	25	325	19
266	15	296	13	326	13
267	24	297	10	327	16
268	23	298	8	328	6
269	33	299	4	329	4
270	30	300	13	330	10
271	19	301	7	331	10
272	63	302	10	332	16
273	32	303	12	333	17
274	10	304	8	334	10
275	7	305	95	335	19
276	5	306	20	336	18
277	11	307	13	337	13
278	35	308	28	338	14
279	38	309	140	339	25
280	32	310	40	340	10
281	10	311	30	341	16
282	13	312	20	342	18
283	14	313	16	343	20
284	17	314	12	344	16
285	9	315	10	345	10
286	7	316	6	346	20
287	16	317	9	347	15
288	18	318	10	348	50
289	23	319	5	349	10
290	89	320	2	350	30
291	50	321	1	Prom.	17.26

Fuente: Elaboración propia

3.1.6. Condiciones de las discontinuidades

En este punto se analizó cada una de las discontinuidades tomando en cuenta la separación de las juntas, su continuidad, su rugosidad, condición mecánica de las caras y si existe o no la presencia de material de relleno entre las discontinuidades. Obteniendo los siguientes resultados:

- La separación de las aberturas va de 1 mm a 5 mm
- Superficies de caras duras y resbalosa
- Las diaclasas en su gran mayoría de son de forma continua

3.1.7. Condiciones hidrológicas

Al respecto de las condiciones hidrológicas se toma en valor más alto ya que es un talud.

3.1.8. Parámetros de clasificación y puntajes correspondientes

Con base en los resultados obtenidos de los parámetros procedemos a detallar una tabla para obtener su puntaje y sumar cada uno de los datos.

Tabla 3.8. Parámetros de clasificación

Parámetros		Rango de Valores						
Resistencia del Material Intacto	Resistencia Compresión Uniaxial	>200 MPa	100 a 200 MPa	60 a 100 MPa	26 a 60 MPa	10 a 26 MPa	3 a 10 MPa	1 a 3 MPa
		Puntaje	15	12	7	4	2	1	0
RQD		90 a 100 %	75 a 90 %	50 a 75 %	25 a 50 %	< 26 %		
Puntaje		20	17	13	8	3		
Espaciamiento de Juntas		> 3 m	1 a 3 m	0,3 a 1 m	50 a 300 mm	< 50 mm		
Puntaje		30	26	20	10	5		
Condiciones de Diaclasa		Superficies muy rugosas, sin continuidad, sin separación. Paredes de rocas duras.	Superficies algo rugosas, separación < 1 mm. Paredes de roca dura.	Superficies algo rugosas, separación < 1 mm. Paredes de roca suave.	Superficies pulidas o relleno < 5 mm, espesor o fisuras abiertas 1 a 5 mm fisuras continuas.	Relleno blando < 5 mm o fisuras abiertas < 5 mm fisuras continuas.		
Puntaje		25	20	12	5	0		

Condiciones Hidrológicas	Caudal de Agua en 10 m de túnel		ninguna	< 25 litros/min	25 a 125 litros/min	25 a 125 litros/min	25 a 125 litros/min
	Relación	Presión de agua o en la fisura	0	0 a 0.2	0.2 a 0.5	< 0.5	
		Esfuerzo principal o mayor					
	Situación general		Totalmente seco	Solo humedad (agua de intersticios)	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua	
Puntaje			10	7	4	0	

Fuente: (Feijoo, 1997)

3.1.9. Determinación de RMR

Con el total obtenido se ubicó en la tabla para determinar a qué rango pertenece cada valor obtenido dando como resultado clase número cuatro lo que le confiere el estado de roca pobre.

Tabla 3.9. Determinación de RMR

RMR	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	< 20
CLASE No	I	II	III	IV	V
DESCRIPCIÓN	Roca muy buena	Roca buena	Roca discreta	Roca pobre	Roca muy pobre

Fuente: (Feijoo, 1997)

3.1.10. Determinación de tipo de soporte requerido

Tabla 3.10. Determinación del tipo de soporte

Clase de macizo rocoso		ADEME	
	Pernos (diámetro. 20 mm)	Hormigón Lanzado	Marcos de Acero
RMR: 81-100	No necesita ademe excepto algunos pernos para refuerzo local	No	No
RMR: 61-80	Pernos locales en el techo de 3 m de largo y espaciamiento de 2.5 m con malla ocasional	50 mm en el techo donde fuera necesario	No
RMR: 41-60	Pernos sistemáticos de 4 m de largo de largo, espaciamiento de 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla en el techo	50-100 mm en el techo, 30 mm en las paredes	No
RMR: 21-40	Pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla	100-150 mm en el techo y 100 mm en las paredes	Marcos ligeros separados 1.5 m, donde haga falta

RMR: 0-20	Pernos sistemáticos de 5 a 6 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 m en el techo y las paredes con malla	150-200 mm en el techo, 150 mm en las paredes y 50 mm en el frente	Marcos medianos a pesados espaciamiento de 0.75 m con estacas y jaula de ardilla donde se necesite
-----------	---	--	--

Fuente: (Feijoo, 1997)

3.2. Discusión de resultados

En relación a la caracterización del macizo rocoso, de acuerdo a lo expuesto por (Guamán & Mendieta, 2013), es indispensable recordar que mayoritariamente todo conjunto de roca se compone de dos formaciones cuyo contacto es vertical y fracturado, que se da como resultado de los efectos de la actividad tectónica y voladuras. Mientras que las argilitas en su estado general están estratificadas con una estructura laminar y un sitio ligeramente meteorizado, que posteriormente se convierte en un material degradable.

Por otro lado, las familias de disequilibrios y/o discontinuidades presentes en el macizo rocoso afectan el comportamiento y la calidad general de la roca; por lo que, la principal forma de pérdida de estabilidad es la formación de cuñas, así como las propiedades mecánicas que corresponden a las rocas de alta resistencia y el macizo rocoso se fragmenta en bloques irregulares; factor que dificulta la toma de muestras.

Por lo tanto, la extracción de muestras tiene que ser precisa y óptima. Este es uno de los principales aspectos que se consideró para la presente investigación. Es por ello que, en campo se tomaron 10 muestras, y de éstas solamente se procesaron las 5 mejores muestras porque cumplían con todos requerimientos necesarios para el proceso de ensayo. Por otro lado, se evidencia en el recorrido que el macizo rocoso está constituido por roca metamórfica; misma que se caracteriza por un modelo de roca sólida que mantiene las características del suelo sobre una base clara y totalmente definida (Torres & Molina, 2004).

El primer ensayo que se llevó a cabo en laboratorio fue con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas del macizo rocoso, este ensayo se denomina como: resistencia a la compresión simple. Este ensayo se realizó para las 5 muestras que

fueron previamente seleccionadas. Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes: 33 MPa, 47 MPa, 28,009 MPa, 39,94 MPa, 34,62 MPa y 51,48 MPa respectivamente. Sin embargo, estos resultados no muestran variaciones representativas porque son parte de las características de la roca metamórfica. Por lo tanto, es indispensable conocer su valoración, así como el esfuerzo de compresión axial máxima de cada una de las muestras.

Según (Román, 2019), existen 6 formas de caracterizar la resistencia de la roca cuando está ya fue sometida a cargas axiales. Tomando como referencia que las denominaciones deben oscilar desde R6 a R0 con su respectivo límite de resistencia uniaxial, es por ello que, para este estudio se conoció que las muestras 1 a 4 presentan una resistencia R3 (moderadamente resistente) con una resistencia uniaxial oscilante de 25-50 MPa. Mientras que, la última muestra se encuentra dentro de categoría R4 con una resistencia uniaxial que oscila desde los 50 a 100 MPa. En este sentido, es importante acotar que la resistencia a la compresión simple se mide con un valor comprendido entre los 10 y 2000 kg/cm², el cual es un medio para determinar la resistencia de una roca. No obstante, también es posible representar el tipo de roca a través de su petrografía (Roman , 2019). Por lo que, teniendo en cuenta que la fuerza es difícil de determinar, se desarrolló una prueba menos compleja llamada Is50, que es económica y arroja datos aproximados.

Para el parámetro de calidad de roca se obtuvo el índice RQD, en campo se analizó cuantas fisuras y discontinuidades se presentan por cada metro cúbico. El índice de calidad de la roca (RQD) es uno de los parámetros geomecánicos claves desarrollado por Deere en 1963, el cual permite identificar el grado de unión del macizo rocoso a través de núcleos de perforación. Sin embargo, en los últimos años, el índice RQD se ha visto modificado por otros factores que estaban presentes en el macizo rocoso, pero que no se tenían en cuenta como los taludes.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 3.6 de la determinación de RQD se presentan 1178 datos de discontinuidades, pero, para procesar la información se debe utilizar solo las discontinuidades que superen los 10 cm, de esta manera para el cálculo del índice RQD solo se utilizarán 1039. Con estos valores se obtiene que el índice RQD es de 88,20%. De acuerdo con (Bongiorno, 2017), en el índice de calidad existen 5 rangos: muy mala calidad, mala, regular, buena y excelente. De esta manera se concluye que el porcentaje obtenido en la investigación fue de alrededor del 90%;

lo que evidencia que su estado es bueno con base en Barton para los ensayos realizados en campo.

No obstante, otro punto de igual impacto fue detallar las condiciones de las discontinuidades puesto que la separación entre las aberturas fue de 1 a 5 mm, presentando caras duras y resbalosas; así también, la mayoría de las diaclasas son de forma continua. Según (Carrillo et al., 2002), al momento de analizar las discontinuidades se debe considerar que la orientación de las principales discontinuidades respecto al eje de la prensa tiene una relación inversa con la estabilidad del estribo; esto se debe a que la discontinuidad mejor caracterizada, así como la falta de afloramientos y la ausencia de núcleos de perforación orientados, son sub-paralelas o diagonales. Por ende, se concluye que para las pruebas de laboratorio según a la tipología de roca se cataloga como pobre, misma que presenta una resistencia al material de 4; es decir que, su resistencia oscila de los 26 a los 60 MPa con un espaciado entre juntas de 50 a 300 mm con fisuras continuas, sin mencionar los problemas de escasez de agua.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La fundamentación teórica de todas y cada una de las variables de estudio constituyó parte importante de esta investigación, es a partir de ésta que se aborda al macizo rocoso como parte del área de la mecánica de las rocas en donde fue necesario detallar sus características entre ellas, la resistencia a la compresión simple, la resistividad y desde luego la matriz rocosa.
- El análisis de campo se efectuó con base en un trabajo in situ, pues fue absolutamente necesario extraer ciertas muestras para la toma de datos y la caracterización rocosa. Dicho trabajo de campo permitió efectuar una serie de ensayos; tales como: una clasificación geomecánica, resistencia a la compresión simple, determinación del índice de calidad de la roca RQD, así como las discontinuidades dentro del macizo rocoso. Y, por último, pero no menos importante el tipo de soporte que deberá ser parte del macizo debido a sus características físicas.
- El estado del macizo rocoso denota estar mayormente conformado por roca de tipo metamórfica sólida, con una resistencia a la compresión de 31,74 MPa en promedio lo que le da una categoría R3 (moderadamente resistente). El índice RQD oscila entre el rango de 80 a 90% lo que describe su tipología dentro de un aspecto bueno al respecto de su calidad. De igual manera se analizaron las discontinuidades, mismas que mostraron separación entre las aberturas fue de 1 a 5 mm, presentaron caras duras y resbalosas; la mayoría de las diaclasas son de forma continua lo que le da una clasificación de tipo pobre Clase IV y debe emplearse para su soporte pernos sistemáticos de 4 a 5 m de largo, espaciamiento de 1 a 1.5 a 2 m en el techo y las paredes con malla.

Recomendaciones

- Al momento de fundamentar teóricamente las variables de estudio es necesario que la información recabada sea de origen primario desde fuentes totalmente confiables; por lo cual se recomienda que toda información sea extraída de documentos de índole académica o indexados.
- Con el propósito de constituir a este trabajo como uno de realce académico y/o con el objetivo de replicar lo investigado es necesario incrementar en al menos dos muestras adicionales para determinar las propiedades del macizo rocoso. Es necesario poseer una gran cantidad de datos para contrastar debidamente los hallazgos.
- Al momento del ensayo es necesario y/o fundamental que cada actividad sea efectuada de la manera más imparcial posible, pues la idea es detallar y caracterizar los hallazgos, más no hacer inferencias no fundamentadas.
- Los parámetros que intervienen en las clasificaciones RMR, Q índice de Barton deben ser determinados con claridad; en el caso de existir dudas sobre la valoración de las discontinuidades o del macizo estas deben ser aclaradas en el campo y no cuando se hace el trabajo de oficina.
- Tomar en cuenta las consideraciones y resultados abordados en este trabajo como referente en la implementación y utilización por las diferentes empresas e instituciones vinculadas con el proyecto.
- Considerar las evaluaciones de las características geomecánicas con el empleo de otras tecnologías y técnicas de investigación aprovechando el beneficio tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hernández, L., & Santamarta, J. (2015). *Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/653671.pdf>
- Ascuña, M. (26 de Octubre de 2015). *Resistencia y deformabilidad de roca*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/MIRIANASCUAQUIROGA/resistencia-y-deformabilidad-de-roca>
- Barrientos , V. (2013). *Geología*. Universidad de A Coruña. Obtenido de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/113/pdfs/GEOLOGIA%202012%20UNIDAD%20III.pdf
- Bongiorno, F. (2017). *Indice de calidad de la roca RQD, clasiicación de los macizos rocosos se Bartón, Bieniawski y Hoek y Brown*. UNiversidad de los Andes .
- Brady , B., & Brown , E. (1995). *Rock Mechanics*. Springer Science. Obtenido de https://miningandblasting.files.wordpress.com/2009/09/rock-mechanics_for-underground-mining.pdf
- Burbano , D., & García , T. (2016). *Estimación empírica de la resistencia a compresión simple a partir del ensayo de carga puntual en rocas anisótropas (esquistos y pizarras)*. Quito-Ecuador: Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/862>
- Calle , E., & Suarez , J. (2020). *LA RESISTIVIDAD DE ROCAS Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE EN MINA*. Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología. Obtenido de <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/download/296/526>
- Camacho , J., Reyes , O., Nieto , A., Montejo , S., & Morantes , F. (2009). RESISTENCIA AL CORTE EN DISCONTINUIDADES CON DIFERENTES GRADOS DE RUGOSIDAD. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 55-70. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v19n1/v19n1a04.pdf>

- Carrillo , L., Rodríguez , A., & Zúñiga , H. (2002). *CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA Y ANÁLISIS ESTABILIDAD DE TALUDES DEL MACIZO ROCOSO CORIS, CARTAGO, COSTA RICA*. Costa Rica: Escuela Centroamericana de Geología.
- Ceballos , M., & Restrepo , I. (2016). *Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49647009001.pdf>
- Cornejo , S. (2011). *Estudio geológico y recursos económicos en la zona Mamacocha distrito de San Antonio de Esquilache - Puno*. Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de <http://tesis.unap.edu.pe/handle/UNAP/12260>
- Departamento de Ingeniería en Minas. (2017). *Fundamento de Geomecánica*. Obtenido de https://www.academia.edu/38041370/CAP%C3%8DTULO_I_INTRODUCCION_1_QU%C3%89_ES_LA_MECANICA_DE_ROCAS
- Díaz , J., Llana , E., & Vilcapoma , L. (2021). *Característica geomecánica de la masa rocosa mediante la cartilla de Bieniawski para la propuesta de un sistema de fortificación*. Huancayo-Perú: Universidad Continental. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10347/1/IV_FIN_110_TE_Diaz_Vicente_Vilcapoma_2021.pdf
- Durmeková, T., Frankovská, J., & Kopecký, M. (2014). *Correlation between point load index and uniaxial compressive strength for soft and* , Univerzita Komenského v Bratislave.
- Feijoo , E., & Padrón , J. (2020). *ROCK RESISTIVITY AND ITS RELATION TO UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH IN A MINE*. Universidad del Azuay. Obtenido de <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/296>
- Feijoo, C. E. (1997). *Manual de mecánica de rocas y estabilidad de tuneles y taludes*. Biblioteca Hernán Malo González. Recuperado el 2022, de <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/65547>
- Fernández , J., Pérez , H., & Mulone , D. (2018). *Correlación entre el índice RMR de Bieniawski y el índice Q de Barton en formaciones sedimentarias de grano*

- fino*. España: Universidad del País Vasco. Obtenido de <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/5854/6840>
- Friedman , G. (2018). *Petrography, an Introduction to the Study of Rocks in Thin Sections*. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.5408/0022-1368-3.1.34?scroll=top&needAccess=true>
- Garrote, E. (2006). *Ensayo de tracción Indirecta*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf>
- GEOBAX. (23 de Julio de 2017). *Rocas ígneas*. Obtenido de <https://geobax.com/rocas-igneas/>
- Government of India. (2014). *Application of Rock MEchanics in surface and underground Mining*. India . Obtenido de <https://ibm.gov.in/writereaddata/files/09022014171840Rock%20mechanics.pdf>
- Guamán , E., & Mendieta , A. (2013). *Evaluación geomecánica del macizo rocosa en la catera de materiales de construcción "Las Victoria"*. Cuenca-Ecuador: UNiversidad de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/4312/3/Tesina.pdf>
- Hudson , C. (1989). *Craig's Soil Mechanics*. London. doi:<https://doi.org/10.4324/9780203494103>
- Jiménez , Y. (2012). *SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO*. Universidad Gran Colombia. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/268442439.pdf>
- Llambías , E. (2001). *Geología de los cuerpos ígneos*. Tucumán: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Obtenido de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-125.pdf>
- López , C., & Betancur , B. (2019). *CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO EN EL NIVEL VEINTIUNO DE LA MINA LA MARUJA (DISTRITO MINERO DE MARMATO, CALDAS)*

PARA ESTIMAR LAS RECOMENDACIONES DE ESTABILIDAD Y SOPORTE EN LA EXCAVACIÓN Y SU CORRELACIÓN CON LAS ALTERACIONES. Medellín-Colombia: Universidad EAFIT.

- Meléndez , R., & Arroyo , J. (2020). *Estudio geomecánico para determinar el tipo de sostenimiento adecuado de los taludes en la carretera Trujillo-Otuzco km10+000 al km15+000.* Universidad Cesar Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/50649>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2020). *Proyecto Carretera Gualaceo – Plan de Milagro – Limón Indanza.* Azuay. Obtenido de https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/LITERAL_K_PROYECTO_175200000.21.4343.pdf
- Orozco , P., Bedoya , J., & Jiménez , J. (2014). *Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada.* Boletín de Ciencias de la Tierra. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302014000200001
- Oyanguren, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas : fundamentos e ingeniería de taludes.* España: Red DESIR. Obtenido de <https://oa.upm.es/14183/>
- Paúl, G. (2021). *Estimación de la resistencia uniaxial a partir de ensayos PLT y martillo de Schmidt en rocas cercanas a la antigua cascada de San Rafael, ubicada en el límite provincial Napo-Sucumbíos.* Quito: UCE.
- Quevedo , L., & Reyes , J. (2019). *Construcción de la Máquina de Franklin, pruebas y correlación con ensayos de laboratorio en compresión de Rocas.* Cuenca-Ecuador: Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8954/1/14599.pdf>
- Ramírez , P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamento e ingeniería de taludes.* Obtenido de https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf

- Ramírez , P., & Monge , L. (2004). *Mecánica de Rocas; Fundamentos e ingeniería de Taludes*. Obtenido de https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf
- Ramírez, P. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e Ingeniería de taludes*.
- Rincón , B. (2016). *CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DEL ÁREA DEL CONTRATO 01-068-96 “COOPERATIVA COOPROCARBON SUGAMUXI” MUNICIPIO DE GÁMEZA BOYACÁ*. Colombia: UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/217560616.pdf>
- Robledo , J. (2012). *ANÁLISIS DE BARRENAS Y LOS FLUIDOS DE CONTROL APLICADOS A LA OPTIMIZACIÓN DE LA PERFORACIÓN DE POZOS*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2211/1/tesis.pdf>
- Roman , D. (2019). *Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión simple Uniaxial en Rocas*. Cuenca: Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8926/1/14574.pdf>
- Sampieri, R. (2008). *Metodología de la Investigación*. México.
- Solé , M. (2002). *Estudio petrológico y estructural de las rocas metamórficas u graníticas del Sector N-oriental del Macizo del Montseny*. España.
- Torres , A., & Molina , J. (2004). *Petrología Metamórfica*. Universida de Granada. Obtenido de <https://www.ugr.es/~petgquim/descargas/CPM.pdf>
- Tovar , J. (2020). *Evaluación geomecánica del macizo rocoso aplicando el SMR para el diseño del banco en U.E.A. Encanto Blanco LYOF, Chongos Alto*. Huancayo: Universidad Continental. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8743/4/IV_FIN_110_TE_Alvarez_Tovar_2020.pdf
- Valencia, F. (2018). *Caracterización geológica, geomorfológica y de riesgos del sector La Josefina y sus zonas aledañas*. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8638>

- Vallejo , L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
Obtenido de https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf
- Vega , J. (2015). *Monitore y evaluación técnico económica de los resultados de la voladura de rocas de una operación minera subterránea en Sudáfrica*. Lima-Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de https://web.archive.org/web/20180505003734id_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3946/3/vega_hj.pdf
- Veloz , J. (2018). *Estudio geológico para determinar la estabilidad de la vía Macas Riobamba Proaño hasta 9 de Octubre* . Riobamba : ESPOCH.

ANEXOS



Anexo 1.- Talud



Anexo 2.- Recolección de muestras y análisis de campo



Anexo 3.- Muestras



Anexo 4.- Muestras



Anexo 5.- Medición del Buzamiento



Anexo 6.- Medición de la dirección de buzamiento



Anexo 7.-. Medición del Rumbo



Anexo 8.- Detalles de equipo



Anexo 9.- Equipo para pruebas de laboratorio



Anexo 10.- Ensayo de la muestra 1



Anexo 11.- Ensayo de la muestra 2



Anexo 12.- Ensayo de la muestra 3



Anexo 13.- Ensayo de la muestra 4



Anexo 14.- Ensayo de la muestra