



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

**PROPUESTA DEL SISTEMA DE FORTIFICACIÓN A  
EMPLEAR EN EL TRAMO H-11 DEL TÚNEL DE LA  
CONCESIÓN “BOMBA DE PACCHAPAMBA”,  
PORTOVELO – EL ORO**

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

**Autor:  
FRANCIS XAVIER NOGUERA FLORES**

**Director:  
ERNESTO PATRICIO FEJOO CALLE**

**CUENCA – ECUADOR**

**2021**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de grado se lo dedico a mi familia, sobre todo a mis padres Enrique y Raquel por ser siempre el soporte de las riendas de mi vida, porque todo lo he logrado con su ayuda y esfuerzo. Ellos con todo su sacrificio han aportado en la culminación de mis estudios universitarios.

A mis hermanos Andrés y Daniel que siempre me apoyaron durante mis estudios e hicieron que nunca desista de mis sueños; realmente sin ellos no hubiera logrado nada de las metas que me he planteado.

Quiero hacer una mención especial a mi novia Ariana, por ser la persona que ha sabido estar en mis momentos más difíciles, en todos mis logros y derrotas, y por siempre brindarme todo el cariño y el amor.

Finalmente quiero dedicar este trabajo a la familia Hoyos Ruilova, por hacerme sentir como parte de su familia, y por todas las palabras de aliento para no decaer y siempre ir con paso firme.

¡Esto va para todos ustedes!

**Francis Noguera Flores.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primeramente a Dios, nuestro padre celestial y todopoderoso, por ser quien me supo guiar mi camino universitario hasta llegar a mi meta propuesta.

A mis padres Enrique y Raquel por ser mi pilar fundamental y nunca dejar que me rinda ante las adversidades.

A mis hermanos Andrés y Daniel, por siempre apoyarme y darme ese ejemplo de superación para yo proponerme muchas metas en la vida.

A mis profesores, por haberme brindado todas sus enseñanzas para mi aprendizaje, importante para el día de hoy convertirme en ingeniero y poder desarrollarme en el ámbito profesional.

A mis compañeros y amigos que nunca dejaron de alentarme.

Gracias de todo corazón a todos y cada uno de ustedes por hacer que esto se haga posible.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE</b> .....	iv
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	viii
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	2
1.1 FORTIFICACIÓN EN MINAS .....	2
1.1.1 TIPOS DE FORTIFICACIÓN.....	2
1.1.2 CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DEL TIPO DE FORTIFICACIÓN.....	4
1.2 GENERALIDADES DE LA MECÁNICA DE ROCAS.....	5
1.2.1 PARTICULARIDADES INHERENTES DE LA MECÁNICA DE ROCAS.....	6
1.3 CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS DE LOS MACISOS ROCOSOS.....	9
1.3.1 CLASIFICACIONES MÁS IMPORTANTES.....	11
1.3.2 EL SISTEMA RMR (ROCK MASS RATING).....	12

1.3.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (RCS).....	13
1.3.2.2 RQD.....	16
1.3.2.3 ESPACIADO ENTRE DISCONTINUIDADES O JUNTAS.....	18
1.3.2.4 ESTADO DE LAS JUNTAS.....	19
1.3.2.5 CONDICIONES HIDROLÓGICAS.....	20
1.3.2.6 ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES.....	21
1.3.3 ÍNDICE DE CALIDAD Q.....	26
<b>CAPÍTULO II.....</b>	
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>33</b>
2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	33
2.1.1 ÁREA Y TIPO DE MINERÍA.....	34
2.1.2. ACCESO Y COORDENADAS DE UBICACIÓN DE LA CONCESIÓN.....	34
2.2 GEOLOGÍA REGIONAL.....	36
2.3 GEOLOGÍA LOCAL.....	36
2.3.1 TOPOGRAFÍA DEL LUGAR.....	37
2.4 OBTENCIÓN DE DATOS Y MUESTRAS DE MACIZO ROCOSO .....	38
<b>CAPÍTULO III.....</b>	
<b>3. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 ANÁLISIS DE DATOS Y CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO .....	40
3.2 ANÁLISIS DE LOS POSIBLES SISTEMAS DE FORTIFICACIÓN .....	45
3.2.1 MALLAS DE ACERO.....	45
3.2.2 MARCOS DE MADERA.....	46

3.2.3 MARCOS METÁLICOS.....	48
3.3 FUNDAMENTACIÓN Y DISEÑO DE LA FORTIFICACIÓN .....	49
3.4 PROPUESTA FINAL DE FORTIFICACIÓN EN EL TRAMO DEL TUNEL H-11.....	50
<b>CONCLUSIONES</b> .....	56
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	57
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	58
<b>ANEXOS</b> .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Propósitos de estabilidad para elementos de soporte.....	3
Figura 1.2 Macizos rocosos de origen natural. ....	7
Figura 1.3 Rotura de una muestra cúbica de carbón de 60cm sometido a compresión. ....	8
Figura 1.4 Testigos de sondeo para determinación del RQD.....	11
Figura 1.5 Curva de Determinación del puntaje por RCS. ....	16
Figura 1.6 Curva de Determinación del puntaje del RQD .....	18
Figura 1.7 Variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de las juntas y de la RCS. ....	19
Figura 2.1 Mapa político de la provincia de El Oro.....	33
Figura 2.2 Ubicación de la Concesión Bomba de Pacchapamba .....	35
Figura 2.3 Geología local Distrito Zaruma- Portovelo. ....	37
Figura 2.4 Mapa Topográfico de la Concesión Bomba de Pacchapamba.....	38
Figura 2.5 Muestras de Roca para ensayo de Resistencia a la Compresion Simple .....	39
Figura 3.1 Muestra siendo sometida a RCS por la prensa hidráulica. ....	40
Figura 3.2 Fortificación con mallas de acero reforzadas. ....	46
Figura 3.3 Marcos de madera empleado en la bocamina de la concesión “Bomba de Pacchapamba” .....	47
Figura 3.4 Fortificación con marcos metálicos utilizados en Pequeña minería.....	48
Figura 3.5 Diseño vista frontal de los marcos de madera .....	51
Figura 3.6 Proyección de excavación vista superior .....	52
Figura 3.7 Proyección de excavación vista lateral .....	53
Figura 3.8 Axonometría del diseño de fortificación propuesto.....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Elementos de soporte según propósito de estabilidad.....	4
Tabla 1.2 Valoración de los aspecto del RMR a través de los años.....	13
Tabla 1.3 Estimación de las resistencias medias de ciertas rocas según Bieniawski.....	14
Tabla 1.4 Clasificación de Deere (1967) del espaciado de las juntas.....	19
Tabla 1.5 Condición de las discontinuidades.....	20
Tabla 1.6 Orientaciones relativas entre las juntas y el eje de cavidad.....	23
Tabla 1.7 Parámetros de clasificación de Bieniawski y sus valores.....	23
Tabla 1.8 Corrección por orientación de fracturas o fallas.....	24
Tabla 1.9 Clasificación Geomecánica CSIR.....	24
Tabla 1.10 Ábaco de determinación del factor de seguridad.5.....	25
Tabla 1.11 Ábaco de determinación del tiempo de autosostenimiento.....	26
Tabla 1.12 Valoración del RQD.....	27
Tabla 1.13 Número de familias de juntas Jn.....	27
Tabla 1.14 Índice de Rugosidad Jr.....	28
Tabla 1.15 Meteorización de las Juntas.....	29
Tabla 1.16 Presencia de agua en las Juntas.....	30
Tabla 1.17 Tensiones en la Excavación SRF.....	31
Tabla 2.1 Datos de la concesió Minera.....	34
Tabla 2.2 Coordenadas de la Concesión “Bomba de Pacchapamba”.....	34
Tabla 3.1 Resultados de las muestras sometidas a Compresión Simple.....	41
Tabla 3.2 Valores del RQD de Deere.....	42
Tabla 3.3 Determinación del valor del índice Q de Barton.....	43
Tabla 3.4 Resultados del índice RMR.....	44
Tabla 3.5 Análisis económico por cada 3 metros de avance.....	55
Tabla 3.6 Planificación económica para la fortificación del tramo del túnel.....	55

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1. Muestra No. 1.....	59
Anexo 2. Muestra No. 3.....	59
Anexo 3. Muestra No. 4.....	60
Anexo 4. Muestra No. 6.....	60
Anexo 5. Muestra No. 7.....	61
Anexo 6. Muestra No. 8.....	61
Anexo 7. Muestra No. 9.....	62
Anexo 8. Muestra No. 12.....	62
Anexo 9. Muestra No. 13.....	63
Anexo 10. Muestra No. 13.....	63
Anexo 11. Muestra No. 18.....	64
Anexo 12. Muestra No. 19.....	64
Anexo 13. Muestra sometida a ensayo de RCS.....	65
Anexo 14. Muestras preparadas para someter a ensayo de RCS.....	65
Anexo 15. Tramo del Túnel estudiado.....	66
Anexo 16. Recolección de Muestras de roca en la zona de estudio.....	66

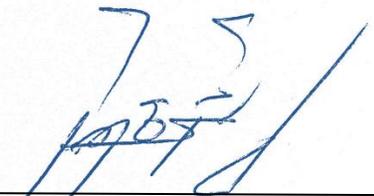
**PROPUESTA DEL SISTEMA DE FORTIFICACIÓN A EMPLEAR EN EL  
TRAMO H-11 DEL TÚNEL DE LA CONCESIÓN “BOMBA DE  
PACCHAPAMBA”, PORTOVELO – EL ORO**

**RESUMEN**

El siguiente proyecto consiste en la evaluación geo-mecánica del macizo rocoso mediante ensayos de resistencia a la compresión simple. Todo esto tiene como objetivo ayudar a proponer un Sistema de Fortificación adecuado para el tramo H-11 del túnel de la mina “Agua Dulce” ubicado en las parroquias Portovelo, cantón Portovelo, provincia de El Oro.

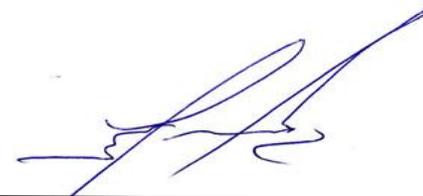
La investigación de la caracterización geo-mecánica del macizo rocoso, y la experimentación de la resistencia a la compresión simple, tienen como objetivo verificar si los resultados tienen similitud con la valoración cualitativa de grado de eficiencia de algunos sistemas de fortificación.

**Palabras clave:** Macizo Rocosos, Resistencia a la Compresión Simple, Caracterización Geo-mecánica, Sistema de Fortificación.



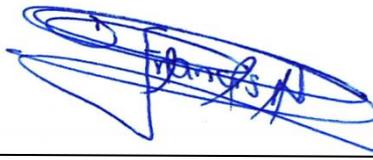
Ernesto Patricio Feijoo Calle

**Director del Trabajo de Titulación**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



Francis Noguera Flores

**Autor**

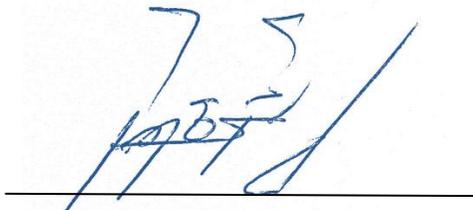
**PROPOSAL OF THE FORTIFICATION SYSTEM TO BE USED IN SECTION  
H-11 OF THE TUNNEL OF THE CONCESSION "BOMBA DE  
PACCHAPAMBA", PORTOVELO - EL ORO**

**ABSTRACT**

The next project consists of the geo-mechanical evaluation of the rock mass through tests of resistance to simple compression, shear stress and bending. All of this aims to help propose a suitable Fortification System for the H-11 section of the "Agua Dulce" mine tunnel located in the Portovelo city, Portovelo canton, El Oro province.

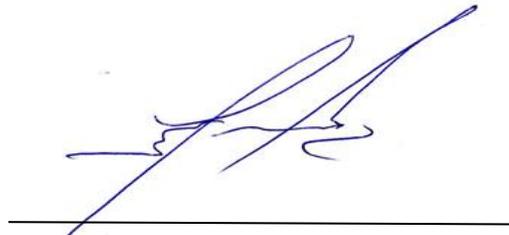
The investigation of the geo-mechanical characterization of the rocky massif, and the experimentation of the resistance to simple compression, bending and shear stress; their objective is to verify whether the results are similar to the qualitative assessment of the degree of efficiency of some fortification systems.

Keywords: Rock Massif, Simple Compressive Strength, Geomechanical Characterization, Fortification System.



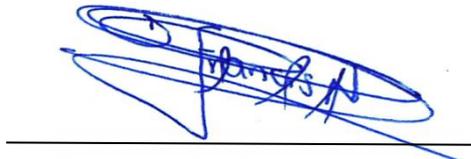
Ernesto Patricio Feijoo Calle

**Thesis Director**



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Faculty Coordinator**

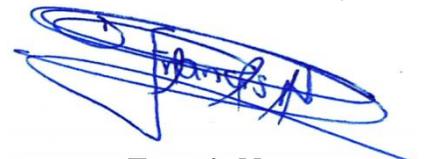


Francis Noguera Flores

**Autor**



**Translated by**



**Francis Noguera**

Francis Xavier Noguera Flores

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Enero, 2021

**PROPUESTA DEL SISTEMA DE FORTIFICACIÓN A EMPLEAR EN EL TRAMO H-11 DEL TÚNEL DE LA CONCESIÓN “BOMBA DE PACCHAPAMBA”, PORTOVELO – EL ORO**

**INTRODUCCIÓN**

El siguiente proyecto consiste en la evaluación geo-mecánica de un macizo rocoso mediante pruebas de resistencia a la compresión simple, con el fin de analizar la estabilidad del macizo y realizar un estudio de las posibles alternativas de sistemas de fortificación que se pueden aplicar en la zona de estudio.

Todo esto tiene como objetivo ayudar a proponer un Sistema de Fortificación adecuado para el tramo H-11 del túnel de la mina “Agua Dulce” ubicado en la parroquia Portovelo, cantón Portovelo, provincia de El Oro.

El proceso de sostenimiento y fortificación dentro de galerías mineras es un tema muy importante y delicado, por lo que es necesario utilizar un correcto sistema de fortificación para crear un ambiente seguro de trabajo, con criterios técnicos y responsables. Al mencionar los tipos de fortificaciones mineras cabe recalcar que existen factores que se deben conocer para realizar un correcto sostenimiento del mismo, uno de ellos es la resistencia de la roca a los diferentes esfuerzos, ya que mediante esos valores se puede proponer un sostenimiento para el tramo del túnel.

Cabe recalcar que, si el valor de los esfuerzos de la roca es muy bajo, puede ocasionar problemas dentro del sostenimiento de la bocamina.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1 Fortificación en minas**

La fortificación es el conjunto de procedimientos que permiten mantener estable las labores cuando su condición no es auto soportante en una mina subterránea. El reconocimiento y tratamiento oportuno del terreno peligroso mediante fortificación, es vital para evitar que se produzcan accidentes, pérdidas en la producción o daños en los equipos.

Según Vallejo (2012), al momento de llevar a cabo algún tipo de trabajo sobre un macizo rocoso, como por ejemplo una excavación minera, debemos tener en cuenta que se produce un desequilibrio en el campo de esfuerzos, generando un mayor grado de inestabilidad, todo esto ocasiona paredes vulnerables al contacto de varias fuerzas que pueden direccionarse hacia este espacio y producir grietas, provocando que se desprenda la roca o se deslicen los bloques sobre los planos preexistentes, ocasionando así algún tipo de accidente. Por esta razón, se debe recurrir a un método de fortificación, que garantice la contención de la masa rocosa.

Al realizar una labor minera, se retira una parte del macizo rocoso que se encuentra inestable cambiando las condiciones naturales de la roca y dejando grandes espacios, los cuales pueden tener un tiempo determinado de auto sostenimiento o se deberá realizar una fortificación inmediatamente. (Cancino, 2008, p.3).

##### **1.1.1 Tipos de fortificación**

La clasificación de la fortificación, de acuerdo al mecanismo de funcionamiento y sostenimiento es la siguiente:

- **Métodos pasivos (rígidos):** se deben instalar elementos estructurales en superficie, pueden ser arcos metálicos y/o de madera, se usa hormigón proyectado (shotcrete) o también mallas. Estos hacen que aumente su resistencia a la carga una vez que el macizo rocoso se encuentra en movimiento.
- **Métodos activos (flexibles):** se instalan elementos estructurales al interior del macizo rocoso, con el fin de cambiar su comportamiento y estabilizarlo. En este método se incluye a todos los tipos de pernos, los cuales desarrollan una fuerza de refuerzo frente al movimiento y la transfieren de vuelta al macizo rocoso.

Otro tipo de clasificación es según el propósito de estabilización del elemento de soporte, el cual puede:

- **Soportar:** a través de la aplicación de la fuerza sobre la superficie de la excavación, sostiene cargas y/o bloques de roca (ejemplo: arco metálico).
- **Reforzar:** se busca mantener e incrementar algunos parámetros de la roca gracias a la aplicación de pernos o cables que evitan el deslizamiento y/o separación de bloques de roca.
- **Retener:** se pretende preservar el grado de confinamiento que tienen algunos fragmentos de roca, evitando su posible caída (ejemplo: malla metálica o shotcrete).

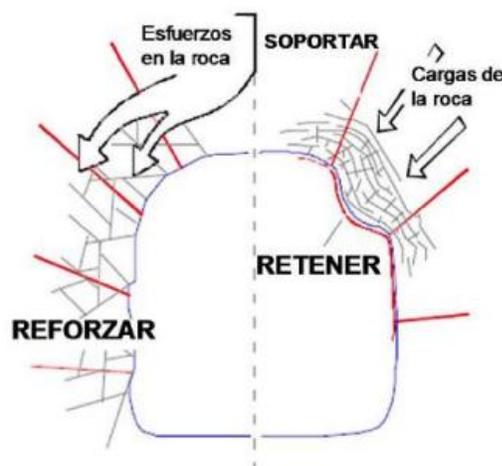


Figura 1.1 Propósitos de estabilidad para elementos de soporte.

Fuente: (Vallejos J, 2012).

En la tabla 1.1 se encuentra la clasificación según el propósito de estabilización del elemento de soporte.

Tabla 1.1 Elementos de soporte según propósito de estabilidad.

Reforzar	Soportar	Retener
Pernos	Arcos, alzaprima	Mallas
Cables	Relleno	Cintas de acero
//	//	Shotcrete

Fuente: Ramírez y Alejano, 2004

De las opciones presentadas en la tabla anterior, todas tienen un propósito según el tipo de situación y fortificación que se quiera emplear. Cabe recalcar que esto depende de las condiciones y necesidades que el macizo rocoso presente.

### 1.1.2 Criterios para la elección del tipo de fortificación

Existen varios criterios que se deben tomar a consideración al momento de seleccionar un sistema de fortificación adecuado, ya sea de manera permanente o de manera momentánea. (Chalco y Rodas, 2013, p.18).

Los criterios que se deben analizar son:

- Condiciones mecánicas y geo estructurales que se presentan en el macizo rocoso.
- Forma y dimensiones de la excavación minera.
- Vida de proyecto y uso de la excavación.
- Grado de estabilidad del macizo rocoso.
- Carga pronosticada.
- Presencia de agua y sus características.

Existen distintos sistemas de fortificación en las minas, estos comprenden sistemas rígidos, flexibles, protectores de roca y sistemas mixtos; todos estos son empleados con

el fin de sostener las galerías y alcanzar una estabilidad a lo largo del tiempo que dure las labores y la vida útil de la mina.

Se debe considerar la existencia de sistemas, los cuales no son considerados como fortificaciones, pero tienen como objetivo prevenir accidentes como por ejemplo la acción de desprender rocas sueltas desde zonas agrietadas, lo que provoca una remoción sistemática y controlada en todo momento. (Bañados, 2010, s.p)

Las exigencias principales son:

#### **Exigencias técnicas:**

- ✓ **Ser duraderas:** su tiempo de vida debe estar a la par con el tiempo que van a durar las labores.
- ✓ **Ser estables:** la fortificación debe mantener la forma en que se proyecta, aun cuando existan cargas que actúen sobre ella.
- ✓ **Ser resistentes:** la fortificación debe ser la adecuada para soportar la carga que va a actuar sobre la misma.

#### **Exigencias de producción:**

- ✓ Mayor facilidad al paso de aire posible.
- ✓ Ocupar el menor espacio posible en las labores.
- ✓ Presentar seguridad ante un peligro de incendio.
- ✓ Ofrecer facilidad en los procesos productivos.
- ✓ Debe estar hecha de elementos fáciles de conseguir y que se puedan instalar por medios fáciles o mecanizados. (SONAMI, 2016, p.32)

## **1.2 Generalidades de la Mecánica de Rocas**

El problema ingenieril del diseño estructural de excavaciones, ya sean en subterráneo o a cielo abierto, que trata de resolver la mecánica de rocas es la predicción del comportamiento mecánico del macizo rocoso en una determinada obra o explotación sujeta a las cargas que se le apliquen a lo largo de toda su vida operativa; contemplada

desde este punto de vista, la mecánica de rocas se debería llamar propiamente ingeniería de los macizos rocosos. (Ramírez y Alejano, 2004, p.3)

Una definición comúnmente aceptada de mecánica de rocas es la propuesta por el comité americano de esta disciplina que se detalla de la siguiente manera:

“Mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada que estudia el comportamiento geo-mecánico de las rocas y los macizos rocosos. Sería pues la rama de la ingeniería dedicada al estudio de la respuesta de las rocas y macizos rocosos al campo de fuerzas que actúan en su entorno”.

Esta disciplina es muy compleja dentro de la minería, ya que el hecho de realizar excavaciones modifica los campos de fuerza en el entorno físico de las rocas. La mecánica de rocas forma a su vez parte de la geotecnia o geo-mecánica, que estudia el comportamiento de todos los materiales de origen geológico por sí solos y en su interacción con estructuras de las que también forma parte la mecánica de suelos.

### **1.2.1 Particularidades inherentes a la mecánica de rocas**

Se señala a continuación las particularidades propias de la mecánica de rocas, las cuales justifican la aparición de esta disciplina, que requiere de una metodología muy compleja y por eso también la hace muy importante.

- **Materiales de origen natural**

Los materiales con los que se trabaja no pueden ser elegidos, sino deben ser: ensayados, analizados y utilizados en la mejor manera posible para los fines deseados. Debido a su origen natural, estos materiales no tienen por qué ser homogéneos y constantes en sus propiedades y comportamientos. Es por ello, que es muy importante en los estudios de mecánica de rocas la adecuada caracterización de los macizos rocosos, ya que este análisis permite interpretar el comportamiento de la roca.

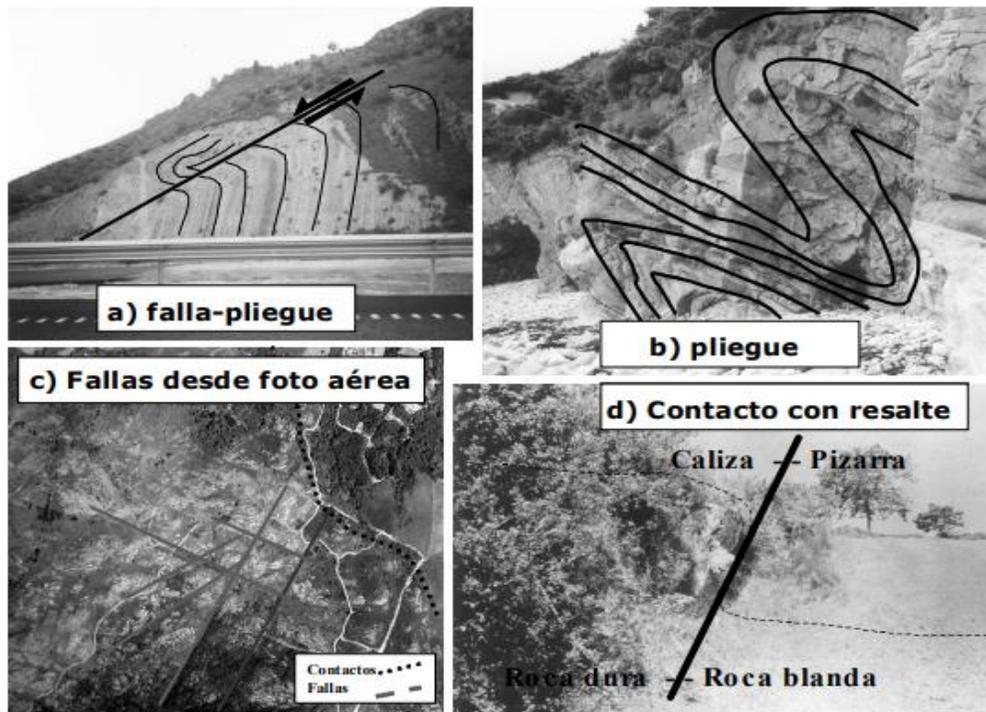


Figura 1.2 Macizos rocosos de origen natural.  
Fuente: Díaz, 2006.

- **Fractura de rocas**

La rotura de los materiales más comunes como el acero y hormigón se producen al estar sometidos a tracción. Sin embargo, los campos tensionales que actúan comúnmente en el ámbito de la mecánica de rocas son los esfuerzos a compresión. Un problema que se da en el caso de rocas sometidas a compresión es la fricción movilizada entre las superficies de las micro fracturas, donde se produce la iniciación de la fracturación, lo que provoca que la resistencia de la roca sea muy dependiente de la tensión de confinamiento. (Brady, 1985).

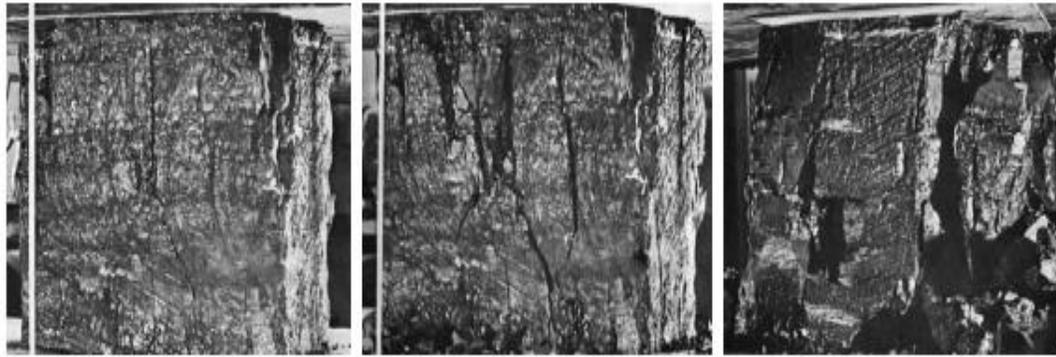


Figura 1.3 Rotura de una muestra cúbica de carbón de 60cm sometido a compresión.  
Fuente: Bieniawski, 1967.

- **Efectos de escala**

La respuesta de un macizo rocoso a una serie de cargas aplicadas muestra un pronunciado efecto de escala en función del volumen sobre el que actúan las cargas. Este efecto se debe en parte a la naturaleza discontinua del macizo rocoso, provocando que las propiedades de resistencia y deformación del macizo estén influenciadas tanto por las propiedades de la roca sana como por las de las diversas discontinuidades existentes, que varían según el tamaño del macizo rocoso que está afectado por la excavación. Así pues, las propiedades de los macizos rocosos no resultan sencillas. En particular la imposibilidad de la realización de ensayos a gran escala implica la necesidad de postular y verificar teorías para estimar las propiedades del macizo rocoso a partir de los elementos que lo constituyen. (Gere y Goodno, 2009).

- **Resistencia a la tracción**

Las muestras de roca ensayadas a tracción suelen romperse a niveles tensionales del orden de diez veces menores a cuando se ensaya a compresión simple. Además, la presencia de discontinuidades en los macizos rocosos hace que en la mayor parte de los casos no exista resistencia alguna a la tracción. Por tanto, los macizos rocosos no son capaces, en general, de resistir a la tracción. Todo esto implica que, cuando se identifique mediante análisis una zona del macizo sometida a tracción, esta zona se distenderá y las tensiones se distribuirán en el entorno de la misma. (Ramírez y Alejano, 2004,p.8).

- **Efecto de las aguas subterráneas**

El agua subterránea influye en el comportamiento de las rocas de dos maneras distintas. La primera tiene lugar en rocas porosas, y la segunda se da en macizos rocosos formados por materiales poco porosos. Se manifiesta en el agua sometida a presión dentro de las juntas que separan los bloques de roca, lo que reduce la presión efectiva entre ambos labios de la junta, y por lo tanto disminuye la resistencia al corte que origina la fricción.

Se podría expresar que un efecto más sutil de las aguas es la acción degradante en diferentes zonas del macizo rocoso, lo que hace que para ciertas rocas se produzca un deterioro muy significativo de las propiedades mecánicas. (Gere y Goodno, 2009).

- **Meteorización**

Según Agudelo (2012), la meteorización puede ser definida como la alteración físico-química de las rocas en superficie, debido a reacciones con soluciones atmosféricas líquidas o gaseosas. La importancia de la meteorización radica en su efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales a los que afecta, así como la influencia sobre las características friccionales de las superficies sobre las que actúa. Además, una roca sometida a un elevado grado de meteorización se va a convertir finalmente en un material poco cementado que se conoce como suelo.

### **1.3 Clasificaciones geo-mecánicas de los macizos rocosos**

Según Bieniawski Z. (2003), los sistemas de clasificación de los macizos rocosos tienen como objetivo evaluar sus características para determinar de forma cuantitativa su calidad.

El término macizo rocoso se refiere al conjunto de uno o varios tipos de roca atravesados por un plano de discontinuidad en donde se realiza alguna labor minera.

Las clasificaciones geo-mecánicas son procesos que se emplean de una forma generalizada, y nos ayudan a determinar una primera predicción del comportamiento de los macizos rocosos frente a excavaciones, principalmente en excavaciones subterráneas. Aunque también se pueden utilizar a cielo abierto. Su utilidad radica en la facilidad de aplicación y en los buenos resultados que se consiguen en la mayoría de los casos.

La caracterización de un macizo rocoso requiere del conocimiento de los siguientes parámetros:

- ✓ Resistencia y comportamiento de la roca.
- ✓ Familias de discontinuidades existentes.
- ✓ Espacio entre el plano de discontinuidad y fracturación del macizo.
- ✓ Características geo-mecánicas de las discontinuidades: continuidad, rugosidad, separación y resistencias de los labios, meteorización y relleno.
- ✓ Condiciones del agua en las juntas.
- ✓ Tensiones in situ, naturales o inducidas.
- ✓ Alteraciones producidas en el macizo rocoso por las excavaciones.

Los criterios de clasificación deben ser claros y consistentes para que no exista ninguna duda al momento de aplicarlos; las categorías que sean establecidas deben ser mutuamente excluyentes, de modo que no sea posible asignarle a un macizo rocoso dos categorías distintas. También debemos tomar en cuenta que lograríamos mayor objetividad si a la hora de definir la calidad de un macizo rocoso, obtenemos resultados de dos o más clasificaciones que se pueden correlacionar entre sí.

Las clasificaciones geo-mecánicas tienen su mayor relevancia en las fases de viabilidad de un proyecto, específicamente en zonas donde existen afloramientos rocosos que permiten una buena toma de datos geológicos y geo-mecánicos, y alcanzan en muchas ocasiones resultados exitosos a un bajo costo, lo cual es muy importante en dentro de un proyecto u obra. Es necesario tomar en cuenta todas las características y datos para tener un conocimiento y establecer el comportamiento del macizo con el fin de optar por una buena alternativa de sostenimiento. (Gutiérrez, 2017)

### 1.3.1 Clasificaciones más importantes

En la actualidad, existen dos clasificaciones muy utilizadas que son: la de Bieniawski (RMR), y la de Barton, Lien y Lunde (Q). Estas clasificaciones utilizan un parámetro, RQD (Rock Quality Designation), que constituye la base de la clasificación de Deere. Más adelante describiremos las tres clasificaciones.

#### Clasificación de Deere (1967)

En el año de 1967, Deere propuso un sistema de diseño de sostenimiento basado en el RQD, el cual es un parámetro que se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigo mayores a 10 cm recuperados en un sondeo. Esto permite determinar el grado de fracturación del macizo rocoso.



Figura 1.4 Testigos de sondeo para determinación del RQD.  
Fuente: Córdova D, 2016

### 1.3.2 Sistema RMR (Rock Mass Rating)

El sistema Rock Mass Rating se trata de un índice que evalúa la competencia y comportamiento del macizo rocoso, fue desarrollado por Bienawski a partir de la experiencia en obras realizadas en África del Sur. Su aplicación no tiene limitaciones, excepto en rocas expansivas donde no es aconsejable su uso.

Según Fernandez J. (2017), el sistema RMR de Bieniawski ha sido revisado en 5 diversas ocasiones. Inicialmente en 1973, y posteriormente en 1974, 1975, 1979 y 1989.

Para determinar el RMR debemos basarnos en 6 parámetros importantes que son:

- Rock Quality Designation.
- Resistencia de la roca intacta
- Separación de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Presencia de agua subterránea.
- Corrección por la orientación de discontinuidades.

Para cada uno de los seis parámetros se presentan valores en función de las condiciones de cada aspecto anteriormente mencionado. El valor del RMR se obtiene como suma de los valores asignados a los parámetros señalados, en donde se oscila un valor linealmente entre 0 y 100, variando según la calidad de la roca.

Los valores asignados a los parámetros y los propios parámetros han ido variando según la tabla a continuación:

Tabla 1.2 Valoración del aspecto del RMR a través de los años.

Parámetro	1973	1974	19975	1976	1979	1989
Resistencia de la roca íntacta	0 - 10	0 - 10	0 - 15	0 - 15	1 - 15	2 - 15
Rock Quality Designation (RQD)	3 - 16	3 - 20	3 - 20	3 - 20	3 - 20	3 - 20
Espaciado entre juntas (Js)	5 - 30	5 - 30	5 - 30	5 - 30	5 - 20	5 - 20
Separación de juntas	1 - 5					
Continuidad de juntas	0 - 5					
Acciones Climáticas	1 - 9					
Estados de las juntas (Jc)	.	0 - 15	0 - 25	0 - 30	0 - 30	0 - 30
Agua subterránea	2 - 10	2 - 10	0 - 10	0 - 15	0 - 15	0 - 15
Corrección por Orientación de Discontinuidades	3 - 15	3 - 15	0 - (-12)	0 - (-12)	0 - (-12)	0 - (-12)

Fuente: Fernández J. (2017).

Un alto valor de RMR demostrará que el macizo rocoso evaluado es de buena calidad, caso contrario se debe optar por algún tipo de fortificación para el mismo. (Feijoo, 1996).

### 1.3.2.1 Resistencia a la compresión simple (RCS).

La resistencia a la compresión simple es el ensayo que nos permite determinar la resistencia mecánica de las rocas.

En la siguiente tabla se presenta una estimación de la resistencia de ciertas rocas según Bieniawski, en el año de 1973, en donde utilizó una báscula de plataforma equipada con un marco de carga activado.

Tabla 1.3 Estimación de las resistencias medias de ciertas rocas según Bieniawski.

Tipo de roca	Resistencia a compresión simple (MPa)		
	Mínima	Máxima	Media
Creta	1	2	1,5
Sal	15	29	22
Carbón	13	41	31
Limolita	25	38	32
Esquisto	31	70	43
Pizarra	33	150	70
Lutita	36	172	95
Arenisca	40	179	95
Marga	52	152	99
Mármol	60	140	112
Caliza	69	180	121
Dolomía	83	165	127
Andesita	127	138	128
Granito	153	233	188
Gneis	159	256	195
Basalto	168	359	252
Cuarcita	200	304	252
Dolerita	227	319	280
Gabro	290	326	298
Taconita	425	475	450
Sílice	587	683	635

Fuente: Agudelo L. (2019).

Comúnmente se utiliza la prueba de  $Is(50)$  (Resistencia a la carga puntual homologada a 50mm) o Point Load Test, puesto que si el valor del  $Is(50)$  es menor a 1 MPa, es recomendable utilizar el valor de la resistencia a la compresión simple. (Feijoo, 1997).

Berríos (2015, p.4) afirma que existe correlación entre los resultados promedios de la resistencia a la compresión simple con los valores de  $Is(50)$ .

Este ensayo permite determinar en el laboratorio la resistencia uniaxial no confinada de la roca, o RCS ( $\sigma_C$ ). Es un ensayo para clasificar a la roca por su resistencia.

El ensayo debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Razón largo/ancho de la probeta debe ser de 2,5 a 3.
- Los extremos deben ser paralelos y pulidos, sin la presencia de grietas.
- Ancho de la muestra debe ser 10 veces mayor al tamaño medio del grano.

El ensayo trata de la aplicación de una fuerza axial al cilindro de roca o probeta, hasta que esta produzca una rotura, de esta manera obtenemos 3 valores que son: ( $\sigma_1$ ), ( $\sigma_2$ ) y

( $\sigma_3$ ). Con los datos anteriormente mencionados podremos obtener el valor final de la Resistencia a la Compresión Simple ( $\sigma_C$ ).

El procedimiento para realizar el Point Load Test es el siguiente:

1. Tener una idea general de la roca en cuanto a su litología y estructuras.
2. Identificar las muestras.
3. Medir las dimensiones de la muestra para validar si satisface las condiciones del ensayo.
4. Se debe recubrir la muestra con una membrana para que al momento de que la roca falle, no salten fragmentos que generen daños.
5. Se sitúa el testigo de forma que el pistón de la maquina quede paralelo a las caras transversales de la muestra.
6. Se mide la presión a la cual está siendo sometida la muestra mediante un manómetro conectado directamente a la prensa hidráulica, la presión debe ser medida a cada instante para obtener el dato del momento de falla, ya que después la aguja que marca el valor volverá al punto de partida.
7. Un ayudante será el encargado de ir aumentando progresivamente la presión en la prensa hidráulica.
8. Una vez llegado el momento de falla, se retira el testigo y se analizan las condiciones y modo de ruptura.

Para llegar a la exactitud en el puntaje, se utiliza la curva representada en la figura 1.5 denominada Curva de Determinación del puntaje por RCS.

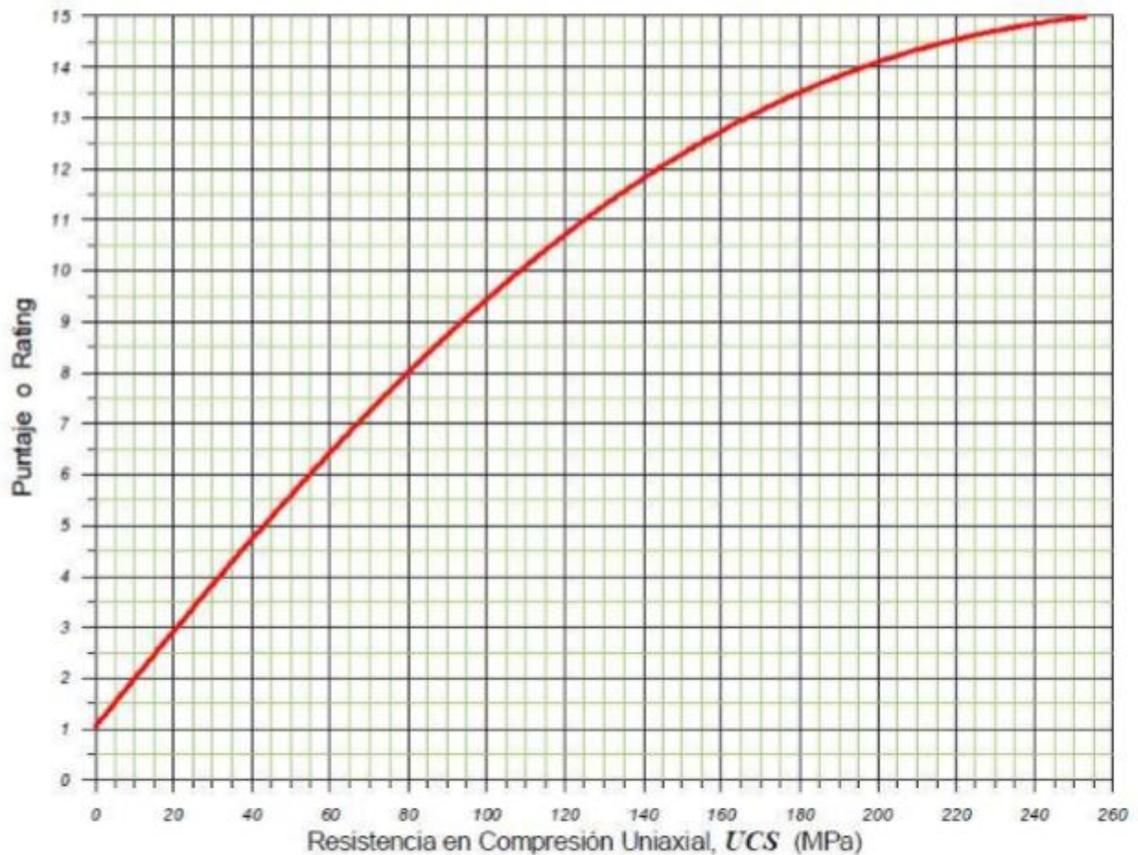


Figura 1.5 Curva de Determinación del puntaje por RCS.

Fuente: (E.T.S.E.C.C.P.B. – U.P.C), 2017.

### 1.3.2.2 RQD (Rock Quality Designation)

El índice RQD fue desarrollado en 1964 por D.U Deere y se considera un índice cuantitativo para el macizo rocoso, su parámetro está basado en la recuperación de sondeos para realizar su respectivo análisis.

Se determina midiendo el porcentaje de recuperación de testigos que miden más de 100 mm de longitud. Los testigos que no estén duros o firmes no deben contarse, aunque midan más de 100 mm de longitud. El índice RQD fue introducido para usarse con diámetros de testigos de 54,7 mm. Se trata de uno de los principales indicadores para las zonas donde hay la existencia de roca de baja calidad. (Llanos, 2017).

En la actualidad, el índice RQD se utiliza como un parámetro estándar en el registro de testigos de perforación y es un elemento básico de los principales sistemas de clasificación de masa (clasificación geo-mecánica de Bienawski (RMR) y el sistema Q).

El índice RQD se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\text{RQD (\%)} = \frac{S}{L} \times 100 \quad (1).$$

Siendo “RQD” la designación de la calidad de la roca, que resulta ser un porcentaje. La sigla “S” es la suma de la longitud de los testigos superiores a 10 cm, se expresa en m; y “L” es la longitud total del sondeo en metros.

Para aplicar esta fórmula los testigos deben tener un diámetro mínimo de 5 mm.

Cuando no se cumple con las especificaciones anteriormente descritas se puede obtener el dato del RQD mediante el número de juntas o discontinuidades que están presentes en  $1 \text{ m}^3$  de roca, la cual es denominada con el símbolo  $J_v$ , cuando  $J_v$  es mayor a 4.5 se utiliza la siguiente fórmula.

$$\text{RQD} = 115 - 3.3 * J_v. \quad (2).$$

En el caso de que  $J_v$  sea menor a 4.5 existe la siguiente relación:

$$\text{RQD} = 100\% \quad (3).$$

Todo esto significa que, si existen de 1 a 4 juntas en  $1 \text{ m}^3$  de roca, el valor de RQD es igual a 100, en el caso de que existan 35 juntas o más, el RQD será de 0. Por lo tanto, el cálculo del RQD se realiza entre valores de 5 y 34. (Feijoo, 1996).

Para alcanzar un puntaje más exacto del RQD se utiliza la curva de la figura 1.6:



Figura 1.6 Curva de Determinación del puntaje del RQD.

Fuente: (E.T.S.E.C.C.P.B. – U.P.C), 2017.

### 1.3.2.3 Espaciado entre discontinuidades o juntas

Al hablar de juntas nos referimos a las discontinuidades estructurales: fallas, diaclasas, planos de estratificación, etc., y su espaciado es la distancia media entre los planos de discontinuidad de cada familia.

La resistencia del macizo rocoso se va reduciendo al aumentar el número de juntas, es decir, cuando disminuye el espaciado de cada familia. Existen muchas clasificaciones del espaciado de las juntas. La utilizada por Bieniawski fue propuesta por Deere en 1967, en donde se puede determinar el espaciado existente entre las discontinuidades durante el levantamiento del estado de fracturación del macizo rocoso. (Feijoo, 1996).

Tabla 1.4 Clasificación de Deere (1967) del espaciado de las juntas.

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	>3 m	Sólido
Ancho	1-3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0,3-1 m	En bloques
Cerrado	50-300 mm	Fracturado
Muy cerrado	<50 mm	Machacado

Fuente: Deere et al. (1967).

En la figura 1.7 tenemos la variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de las juntas y de la RCS.

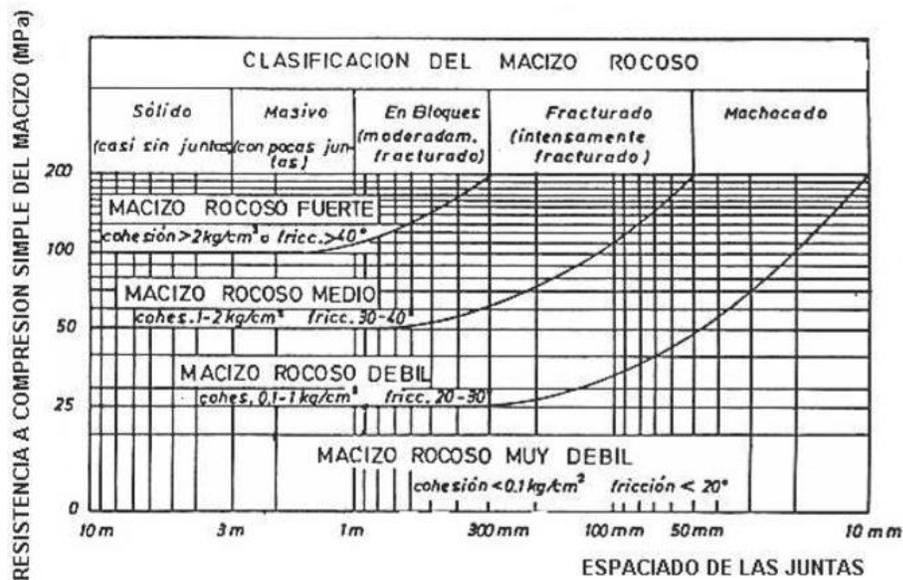


Figura 1.7 Variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de las juntas y de la RCS.

Fuente: Bieniawski, 1976.

### 1.3.2.4 Estado de las juntas

Existen discontinuidades que se encuentran presentes en la roca, las cuales desfavorecen la resistencia, permeabilidad y durabilidad del macizo rocoso. Es de suma importancia evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, ya que con estas logramos definir la matriz estructural del macizo rocoso.

La influencia en el comportamiento del macizo, exige evaluar la génesis de sus rellenos, la cantidad de agua, los revestimientos en las paredes por materiales solubles, la abertura, rugosidad, persistencia de las discontinuidades, y el número de familias. (Escobar, 2017).

Se consideran los siguientes parámetros para determinar el estado de las juntas:

- Separación de las juntas.
- Continuidad.
- Rugosidad.
- Condición mecánica de las caras (duras y suaves).
- Presencia de material relleno de la misma.

Tabla 1.5 Condición de las discontinuidades.

CONTINUIDAD (ISRM) Valor	MUY BAJA <1 m	BAJA 1 - 3 m	MEDIA 3 - 10m	ALTA 10 - 20 m	MUY ALTA > 20 m
	6	4	2	1	0
RUGOSIDAD (ISRM) Valor	Mur rugosa JRC= 20	Rugosa JRC= 14	Algo rugosa JRC= 7	Lisa JRC= E	Pulida JRC = 0
	6	5	3	1	0
RELLENO Y ABERTURA Valor	Junta cerrada y sin relleno	seca. Relleno 1mm	Abierta Relleno 1 - 5 mm	Pared y relleno blando 5 - 10	Triturado de Falla >10 mm
	10	8	5	3	0
METEORIZACIÓN de los bordes Valor	Grado 1 sana	Grado 2	Grado 3 moderado	Grado 4	Grado 5 completa
	4	3	2	1	0

Fuente: Bieniawski, 1989.

### 1.3.2.5 Condiciones hidrológicas

El flujo de agua a través de macizos rocosos se produce principalmente por las discontinuidades, es decir, por la permeabilidad secundaria.

El flujo de agua depende de las características topográficas y geológicas del macizo rocoso.

La permeabilidad del macizo rocoso suele ser superior a la de la roca intacta, debido a que el flujo se produce principalmente a largo de las discontinuidades, fisuras, canales de disolución, etc.

Según Feijoo (1996) se debe tomar en consideración la influencia del régimen de agua en el macizo rocoso, ya que influye en la estabilidad. Indicando que es recomendable hacer una evaluación cualitativa del estado hidrológico.

En un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, por lo que el flujo de agua debe estimarse en litros/min, cada 10 m de túnel. La descripción utilizada es la siguiente:

- Completamente seco.
- Húmedo.
- Agua a presión moderada.
- Agua a presión fuerte.

Todos los parámetros mencionados tendrán que ser evaluados de acuerdo a sus respectivas características y así poder determinar el valor aproximado del RMR.

### **1.3.2.6 Orientación de las discontinuidades**

La orientación de las discontinuidades respecto al eje de la estructura subterránea es un factor de suma importancia para determinar el sostenimiento necesario. La correcta orientación de las discontinuidades puede hacer que descienda las necesidades de entibación.

Al obtener el subtotal del puntaje de los primeros cinco parámetros, se realizan correcciones debido a la presencia de fracturas o fallas, basándonos en la tabla de evaluación del efecto de orientación de fracturas o fallas.

Se debe considerar la posición geométrica de las fracturas o falla, es decir, rumbo, dirección de buzamiento y ángulo de buzamiento.

Estas se dividen en tres categorías:

- Rumbo de la fractura o falla perpendicular al eje de excavación.
- Rumbo paralelo al eje de excavación.
- Ángulo de buzamiento menor a  $20^\circ$  independiente del rumbo.

Si en nuestro caso la posición geométrica de las fracturas o fallas correspondería a la primera categoría, tendremos que analizar posteriormente dos nuevas opciones:

- Dirección de buzamiento en sentido de la excavación.
- Dirección de buzamiento en contra de la excavación.

En donde el valor del ángulo de buzamiento determinará la categoría perteneciente del problema. El ángulo de buzamiento puede estar entre  $20^\circ$  y  $45^\circ$ , y entre  $45^\circ$  a  $90^\circ$ .

Si la posición geométrica de las fracturas o falla se encuentra en la segunda categoría, se tomará en cuenta el ángulo de buzamiento y estableceremos su categoría.

Si el macizo rocoso tiene una fractura o falla con un ángulo menor a  $20^\circ$  se determinará que es desfavorable. (Feijoo, 1996).

La clasificación de Bieniawski con respecto a orientaciones relativas entre las discontinuidades y el eje de la cavidad, se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 1.6 Orientaciones relativas entre las juntas y el eje de cavidad.

RUMBO PERPENDICULAR AL EJE DEL TÚNEL				RUMBO PARALELO AL EJE DEL TÚNEL		BUZAMIENTO 0°-20° (Independiente del rumbo)
DIRECCIÓN SEGÚN BUZAMIENTO		DIRECCIÓN CONTRA BUZAMIENTO		Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	
Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	Buzamiento 45°-90°	Buzamiento 20°-45°	
Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Regular	Desfavorable

Fuente: Bieniawski, 1989.

Después de haber definido todos los parámetros de la clasificación de Bieniawski, se determinará la categoría del macizo rocoso, el mismo que, se parte de un valor primario de calidad que es igual a la suma de los 5 primeros parámetros.

La siguiente tabla presenta los valores y parámetros de clasificación:

Tabla 1.7 Parámetros de clasificación de Bieniawski y sus valores.

PARAMETROS		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca intacta	Bajo carga puntual	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para estos valores es preferible la resistencia a compresión simple		
		A compresión simple	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	VALOR	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%			
	VALOR	20	17	13	8	3			
3	ESPACIADO DE LAS JUNTAS	>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm			
	VALOR	20	15	10	8	5			
4	CONDICION DE LAS JUNTAS	Muy rugosas, sin continuidad, cerradas, roca labios sana.	Ligeramente rugosa separación <1 mm, roca labios ligeramente meteorizada.	Ligeramente rugosa separación <1 mm, roca labios muy meteorizada.	Espejo o falla o relleno de espesor <5 mm, o juntas abiertas 1-5 mm, juntas continuas.	Relleno blando de espesor >5 mm, o juntas abiertas >5 mm, juntas continuas.			
		VALOR	30	25	20	10	0		
5	AGUA	FLUJO EN CADA 10 m DE TUNEL, o bien	Ninguno	<10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Relación presión del agua en la junta/tensión principal máxima.	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		CONDICIONES GENERALES	Completamente seco	Manchas de humedad	Muy húmedo.	Goteo.	Flujo de agua.		
		VALOR	15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski, 1989.

Una vez determinado el efecto de orientación de las fracturas o fallas, que puede ser desde favorable hasta muy desfavorable, se vuelve a corregir según la siguiente tabla de corrección por orientación de fracturas o fallas. Aquí encontraremos algunas alternativas, pero utilizaremos específicamente la opción del túnel.

Tabla 1.8 Corrección por orientación de fracturas o fallas.

Orientación de las fracturas o fallas		Muy Favorable	Favorable	Discreta	Desfavorable	Muy Desfavorable
Puntaje	Túnel	0	-2	-5	-10	-12
	Fundición	0	-2	-7	-15	-25
	Talud	0	-5	-26	-50	-60

Fuente: Feijoo, 1996.

Con este proceso obtendremos un valor, el cual se resta al obtenido del total que corresponde al RMR, todo esto nos indica aspectos importantes como son la estabilidad del macizo y la necesidad de soporte.

En la siguiente tabla, se debe determinar la clase de roca y descripción, con el valor del RMR obtenido anteriormente.

Tabla 1.9 Clasificación Geomecánica CSIR.

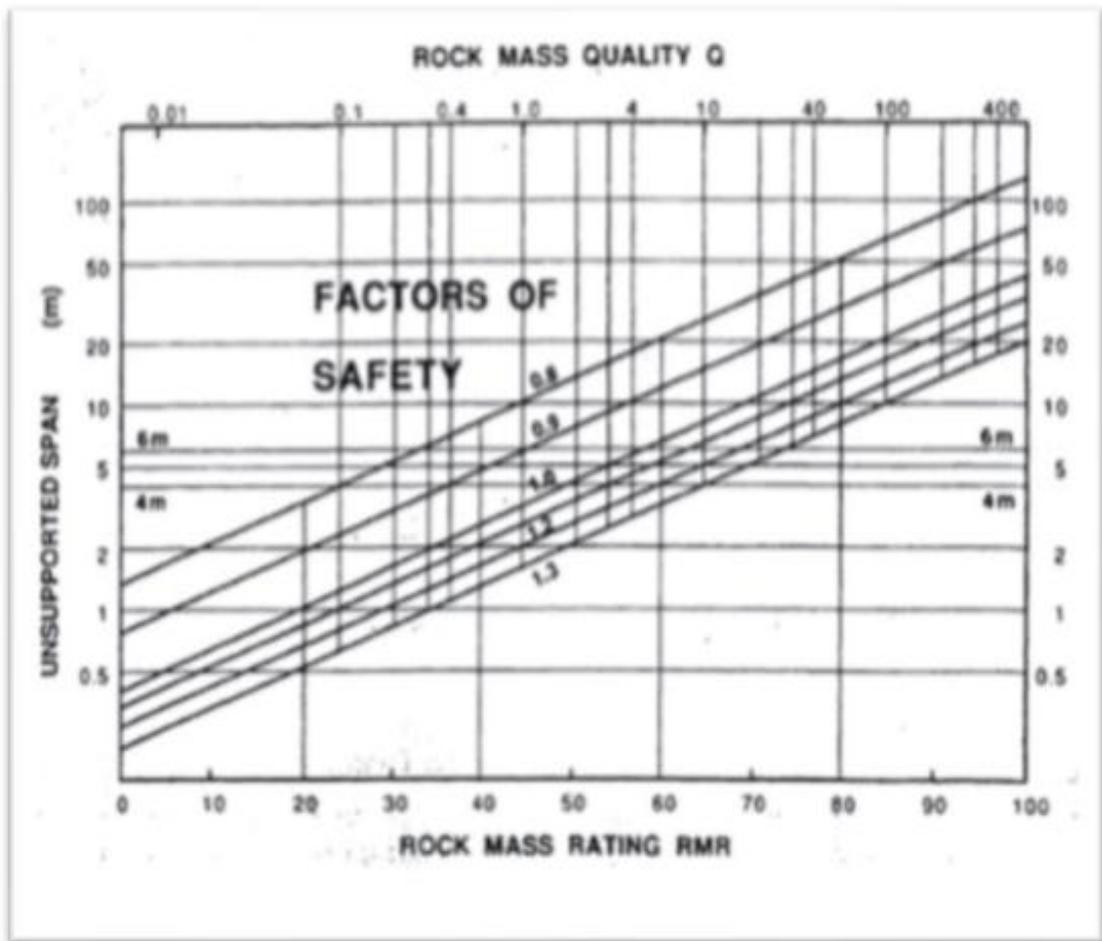
RMR	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	< 20
CLASE No	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	ROCA MUY BUENA	ROCA BUENA	ROCA DISCRETA	ROCA POBRE	ROCA MUY POBRE

Fuente: Feijoo, 1996.

Con el valor del RMR de la tabla 1.9, determinaremos la clase de roca y su descripción. Feijoo (1996) afirma que con la clase de roca que determinamos, tenemos una serie de datos adicionales sobre el comportamiento del macizo, logrando observar en una serie de tablas y ábacos del CSIR (Consejo de Investigación Científica e Industrial) el tiempo de auto sostenimiento, cohesión de la roca y el ángulo de fricción.

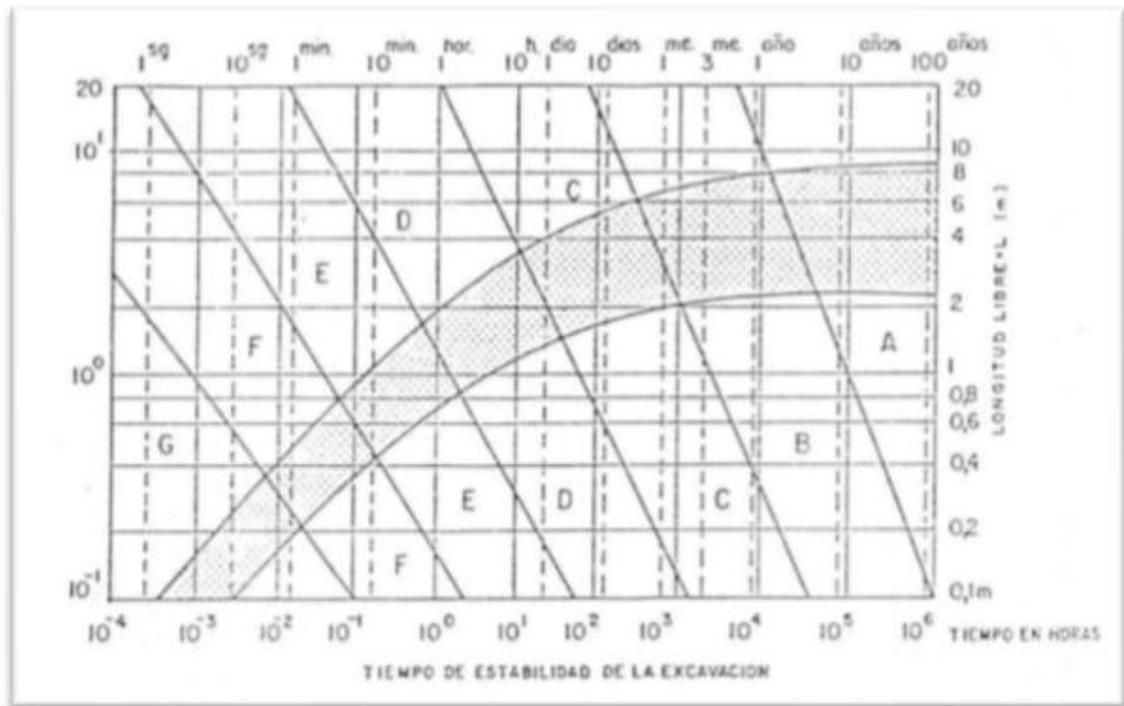
El siguiente ábaco (Tabla 1.10) nos ayudará para determinar el factor de seguridad, en donde influyen dos parámetros que son: la luz del túnel y el puntaje obtenido del RMR. Como resultado obtendremos valores entre 0.8 y 1.3, significando que si es  $< 0.8$  tendríamos un colapso total de nuestro túnel; y si es  $> 1.3$ , el túnel es auto soportante y no requiere fortificación alguna.

Tabla 1.10 Ábaco de determinación del factor de seguridad.



Fuente: Cuervas J. 2015.

Tabla 1.11 Ábaco de determinación del tiempo de auto sostenimiento.



Fuente: (E.T.S.E.C.C.P.B. – U.P.C), 2017.

### 1.3.3 Índice de calidad Q

La clasificación Q fue desarrollada en 1974 por Barton, Lunde y Lien a partir de la información de numerosos ensayos experimentales en túneles.

Esta clasificación geo-mecánica logra evaluar parámetros de la geotecnia del macizo rocoso, y lo más importante permite diseñar el sostenimiento para túneles y otras labores subterráneas.

El índice Q varía entre 0,001 y 1000 clasificándose el macizo rocoso como:

- 0,00 y 0,01: Roca excepcionalmente mala.
- 0,01 y 0,1: Roca extremadamente mala.
- 0,1 y 1: Roca muy mala.
- 1 y 4: Roca mala.
- 4 y 10: Roca media.

- 10 y 40: Roca buena.
- 40 y 100: Roca muy buena.
- 100 y 400: Roca extremadamente buena.
- 400 y 1.000: Roca excepcionalmente buena.

Se calcula mediante 6 parámetros geotécnicos según la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (4).$$

En donde:

**- RQD: Rock Quality Designation**

Tabla 1.12 Valoración del RQD.

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	OBSERVACIONES
<b>RQD</b>	A.- Muy mal	0 a 25	Cuando RQD se reporta o es medido como menor a 10, se le otorga un valor nominal de 10.
	B.- Mala	25 a 50	
	C.- Regular	50 a 75	
	D.- Buena	75 a 90	
	E.- Excelente	90 a 100	

Fuente: Portilla, 2015.

**- J<sub>n</sub>: Índice de diaclasado**

Tabla 1.13 Número de familias de juntas J<sub>n</sub>.

DESCRIPCIÓN	J <sub>n</sub>
- Roca masiva	0,5-1
- Una familia de diaclasas	2
- Una familia y algunas juntas ocasionales	3
- Dos familias	4
- Dos familias y algunas juntas	6
- Tres familias	9
- Tres familias y algunas juntas	12
- Cuatro o más familias, roca muy fracturada, "terrones de azúcar", etc.	15
- Roca triturada terrosa	20
En boquillas, se utiliza 2 J <sub>n</sub> y en intersecciones de túneles 3 J <sub>n</sub>	

Fuente: Feijoo, 1996.

### - Jr: Índice de rugosidad de las discontinuidades o juntas

Tabla 1.14 Índice de Rugosidad Jr.

DESCRIPCIÓN	J <sub>r</sub>
* Contacto entre las dos caras de la junta mediante un desplazamiento cortante de menos de 10 cm	
- Juntas discontinuas	4
- Junta rugosa o irregular ondulada	3
- Suave ondulada	2
- Espejo de falla, ondulada	1,5
- Rugosa o irregular, plana	1,5
- Suave plana	1
- Espejo de falla, plana	0,5
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ambas se desplazan lateralmente	J <sub>r</sub>
- Zona conteniendo minerales arcillosos, suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las caras de la junta	1
- Arenas, gravas o zona fallada suficientemente gruesa para impedir el contacto entre las dos caras de la junta	1
NOTA: Si el espaciado de la familia de juntas es mayor de 3 m hay que aumentar el J <sub>r</sub> en una unidad. Para juntas planas con espejo de falla provisto de lineaciones, si éstas están orientadas en la dirección de mínima resistencia, se puede usar J <sub>r</sub> =0,5	

Fuente: Feijoo, 1996.

- Ja: Índice de la alteración de las discontinuidades

Tabla 1.15 Meteorización de las Juntas.

DESCRIPCIÓN	$J_a$	$\varphi_r^*$
* Contacto entre las dos caras de la junta.		
- Junta sellada dura, sin reblandecimiento, impermeable, p.ej. cuarzo, paredes sanas.	0,75	
- Caras de la junta únicamente manchadas.	1	25-30
- Las caras de la junta están alteradas ligeramente y contienen minerales no reblandecibles, partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	2	25-30
- Recubrimiento de limo o arena arcillosa, pequeña fracción arcillosa no reblandecible.	3	20-25
- Recubrimiento de minerales arcillosos blandos o de baja fricción, p.ej. caolinita, mica, clorita, talco, yeso, grafito, etc. y pequeñas cantidades de arcillas expansivas. Los recubrimientos son discontinuos con espesores máximos de 1 ó 2 mm.	4	8-16
*Contacto entre las dos caras de la junta con menos de 10 cm de desplazamiento.	$J_a$	$\varphi_r^*$
- Partículas de arena, roca desintegrada libre de arcilla.	4	25-30
- Rellenos de minerales arcillosos no reblandecidos, fuertemente sobreconsolidados. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	6	16-24
- Sobreconsolidación media o baja, reblandecimiento; rellenos de minerales arcillosos. Los recubrimientos son continuos de menos de 5 mm de espesor.	8	12-16
- Rellenos de arcillas expansivas, p.ej. montmorillonita, de espesor continuo de 5 mm. El valor $J_a$ depende del porcentaje de partículas del tamaño de la arcilla expansiva.	8-12	6-12
* No existe contacto entre las dos caras de la junta cuando ésta ha sufrido un desplazamiento cortante.	$J_a$	$\varphi_r^*$
- Zonas o bandas de roca desintegrada o roca machacada y arcilla.	6-8 u 8-12	6-24 "
- Zonas blandas de arcilla limosa o arenosa con pequeña fracción de arcilla, sin reblandecimiento.	5	6-24
- Milonitos arcillosos gruesos	10-13 ó 13-20	6-24 "

Fuente: Feijoo, 1996.

**-  $J_w$ : Factor de reducción por la presencia de agua**

Tabla 1.16. Presencia de agua en las juntas.

DESCRIPCIÓN	$J_w$	Presión agua kg/cm <sup>2</sup>
- Excavaciones secas o de fluencia poco importante, p.ej. menos de 5 l/min localmente.	1	<1
- Fluencia o presión medias, ocasional lavado de los rellenos de las juntas.	0,66	1-2,5
- Fluencia grande o presión alta; considerable lavado de los rellenos de las juntas.	0,33*	2,5-10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas al dar las pegas, decayendo con el tiempo.	0,1-0,2*	>10
- Fluencia o presión de agua excepcionalmente altas y continuas, sin disminución.	0,05-0,1*	>10
<p>Los valores presentados con el signo * son sólo valores estimativos. Si se instalan elementos de drenaje, hay que aumentar <math>J_w</math>.</p> <p>Los problemas causados por la formación de hielo no se consideran.</p>		

Fuente: Feijoo, 1996.

## - SRF: Stress Reduction Factor

Tabla 1.17 Tensiones en la excavación SRF.

DESCRIPCIÓN				
1. Zonas débiles que intersectan la excavación y pueden causar caídas de bloques, según avanza la misma.				SRF
A Varias zonas débiles conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca muy suelta alrededor (cualquier profundidad).				10
B Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación menor de 50 m).				5
C Sólo una zona débil conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de excavación mayor de 50 m).				2,5
D Varias zonas de fractura en roca competente (libre de arcilla), roca suelta alrededor (cualquier profundidad).				7,5
E Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad de excavación menor de 50 m).				5
F Sólo una zona fracturada en roca competente (libre de arcilla), (profundidad mayor de 50 m).				2,5
G Juntas abiertas sueltas, muy fracturadas, etc. (cualquier profundidad).				5
2. Rocas competentes, problemas de tensiones en las rocas.	$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_t/\sigma_1$	SRF	
H Tensiones pequeñas cerca de la superficie.	>200	>13	2,5	
J Tensiones medias.	200-10	13-0,66	1,0	
K Tensiones altas, estructura muy compacta (normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales).	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0	
L Explosión de roca suave (roca masiva).	5-2,5	0,33-0,16	5-10	
M Explosión de roca fuerte (roca masiva).	<2,5	<0,16	10-20	
$\sigma_c$ y $\sigma_t$ son las resistencias a compresión y tracción, respectivamente, de la roca; $\sigma_1$ es la tensión principal máxima que actúa sobre la roca.				
3. Roca fluyente, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de altas presiones litostáticas.				SRF
N Presión de flujo suave.				5-10
O Presión de flujo intensa.				10-20
4. Rocas expansivas, actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua.				SRF
P Presión de expansión suave.				5-10
R Presión de expansión intensa.				10-20
- Observaciones al SRF:				
i Reducir los valores del SRF en un 25-50% si las zonas de rotura sólo influyen pero no intersectan a la excavación.				
ii En los casos en que la profundidad de la clave del túnel sea inferior a la anchura del mismo, se sugiere aumentar el SRF de 2,5 a 5 (ver H).				
iii Para campos de tensiones muy anisótropos (si se miden) cuando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ , reducir $\sigma_c$ y $\sigma_t$ a 0,8 $\sigma_c$ y 0,8 $\sigma_t$ ; cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ , reducir $\sigma_c$ y $\sigma_t$ a 0,2 $\sigma_c$ y 0,6 $\sigma_t$ , donde $\sigma_3$ es la tensión principal mínima que actúa sobre la roca.				

Fuente: Feijoo, 1996.

El índice Q tiene un alto grado de fiabilidad, ya que está basado en un elevado número de casos que comprenden una diversidad de tamaños de túneles, tipos de excavación, profundidades y calidades de macizos rocosos. Se diría que, por definición, el índice Q no presenta el problema de falta de sensibilidad a los parámetros considerados individualmente, ya que estos aparecen como multiplicadores o divisores.

Gutiérrez F. (2017) afirma que, durante casi 20 años, el sistema no se ha modificado, manteniéndose las 38 categorías de sostenimiento propuestas en 1974. En los años 1993 y 1994, el sistema fue revisado con el fin de incorporar la experiencia y los avances tecnológicos.

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 2.1. Ubicación geográfica

La concesión minera “Bomba de Pacchapamba” perteneciente la Compañía Industrial Minera Pacheco Espinoza S.A, está situada en la provincia de El Oro, en el distrito minero Zaruma – Portovelo, dentro del cantón Portovelo, la cual está emplazada en la Cordillera Occidental de los Andes. Su boca mina denominada “Agua Dulce” se encuentra en las coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator): X = 654023 de longitud, Y = 9591028 de latitud, Z = 879 m.s.n.m.; la dimensión de la boca mina son: una luz de 3 metros, y una altura de 2.75 metros.

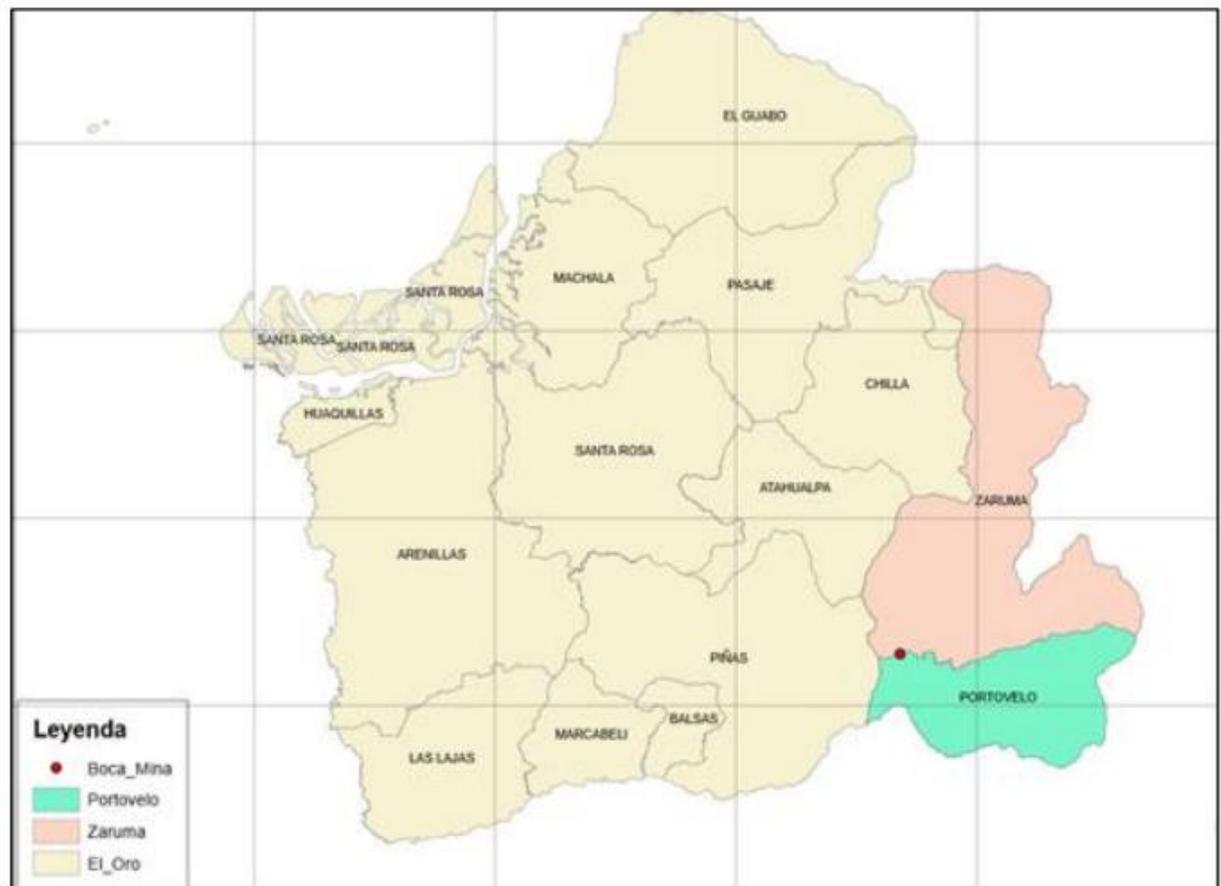


Figura 2.1. Mapa político de la provincia de El Oro.

Fuente: PRODEMINCA, 2000.

### 2.1.1. Área y tipo de minería

La concesión “Bomba de Pacchapamba” posee 42 hectáreas mineras contiguas, donde se realiza la explotación de minerales metálicos bajo el régimen de pequeña minería.

Tabla 2.1. Datos de la Concesión Minera.

<b>GENERALIDADES DE LA CONCESIÓN MINERA</b>	
<b>Nombre de la Concesión</b>	Bomba de Pacchapamba
<b>Código</b>	526
<b>Titular</b>	Walter Valarezo Rivera
<b>Tipos de minerales</b>	Oro y Plata
<b>Fase en la que se encuentra</b>	Exploración - Explotación

Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.2. Acceso y coordenadas de ubicación de la concesión

La concesión minera se encuentra ubicada en el cantón Portovelo, sector Agua Dulce. Para acceder a la concesión se puede tomar las siguientes rutas: Cuenca – Machala – Santa Rosa – Piñas – Portovelo, desde la Sierra por las vías de primer orden, para luego tomar la vía de segundo orden Portovelo – Agua Dulce.

Tabla 2.2. Coordenadas de la Concesión “Bomba de Pacchapamba”.

<b>Coordenadas de la Concesión</b>	
<b>X</b>	<b>Y</b>
653850	9591136
653850	9590836
653750	9590836

653750	9590746
653885	9590746
653885	9590636
654130	9590636
654130	9590543
654350	9590543
654350	9590946
654150	9590946
654150	9591136

Fuente: Elaboración propia.

 **Concesión Bomba de Pacchapamba Unificada**

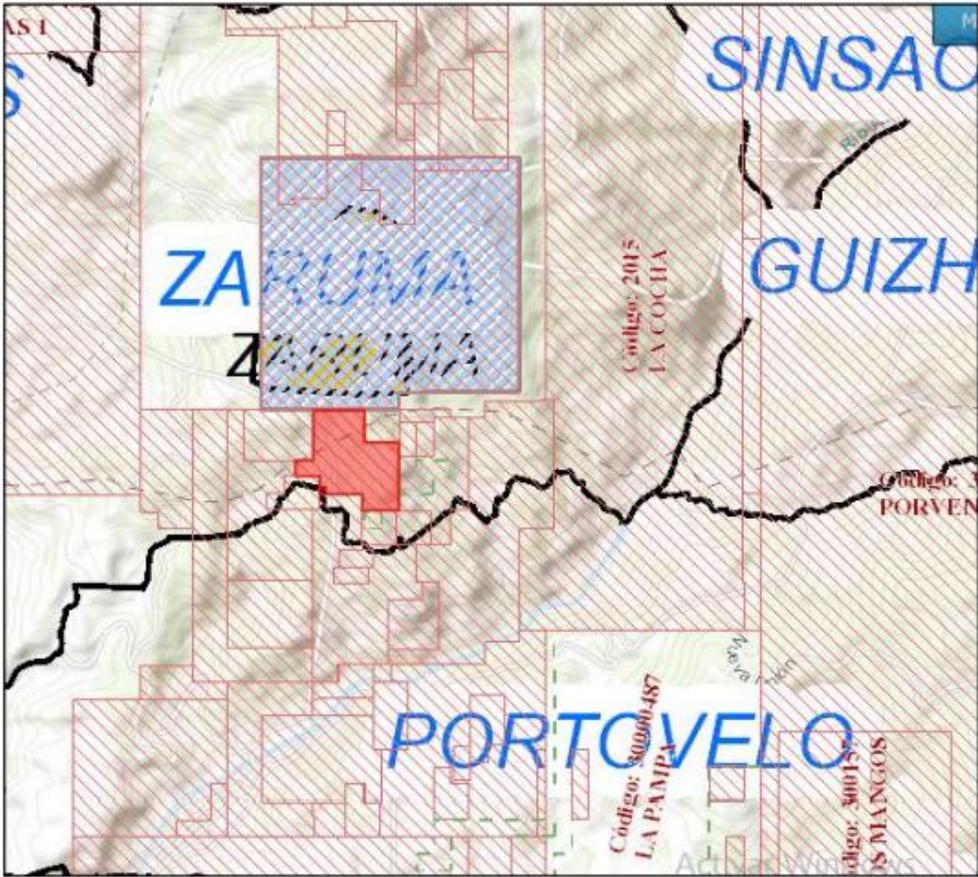


Figura 2.2. Ubicación de la concesión Bomba de Pacchapamba.  
Fuente: (ARCOM, 2019).

## **2.2. Geología regional**

PRODEMINCA (2000), afirma que: la mineralización del Distrito Minero Zaruma – Portovelo está alojada en rocas volcánicas intermedias a silíceas de la recientemente definida Unidad Portovelo que está fallada contra las rocas metamórficas del Sur en el sistema de fallas Piñas – Portovelo y que se superpone disconformemente sobre el complejo metamórfico de El Oro.

La Unidad Portovelo está dominada por lavas andesíticas masivas porfídicas, basaltos andesíticos y brechas con tobas de cristales intermedias.

## **2.3. Geología local**

La zona minera está constituida por un sistema de vetas epi-mesotermales, la mineralización de esta zona está alojada en rocas volcánicas intermedias a silíceas de la Unidad Portovelo, la cual se encuentra fallada contra las rocas metamórficas en la parte Sur a lo largo del sistema de fallas Piñas – Portovelo y que se superpone sobre el Complejo Metamórfico de El Oro. La Unidad está conformada por lavas andesíticas masivas porfídicas, basaltos andesíticos y brechas con tobas que presentan cristalizaciones intermedias. También incluyen tobas de “ash flow” riolíticas y dacíticas con intercalaciones sedimentarias menores. Datos recientes indican edades de 21.5 – 28.4 millones de años que confirma la pertenencia de la Unidad Portovelo al Grupo Saraguro. (PRODEMINCA, 2000).

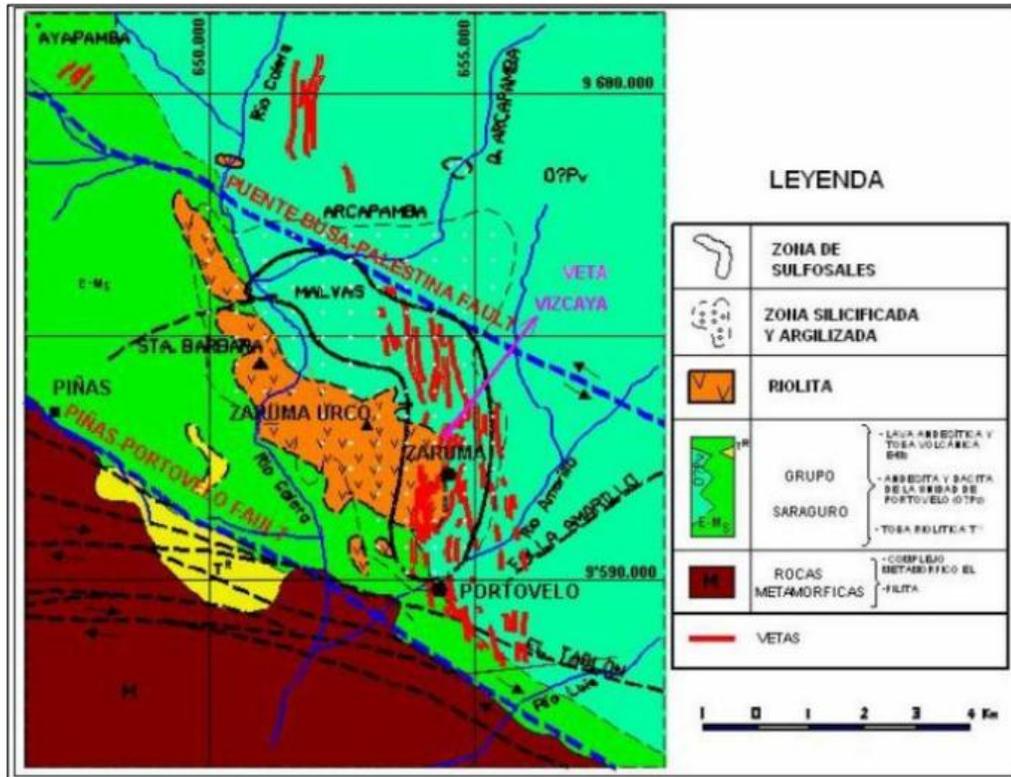


Figura 2.3. Geología local Distrito Zaruma – Portovelo.  
Fuente: (PRODEMINCA, 2000).

### 2.3.1 Topografía del lugar

La topografía que se presenta en el lugar es muy irregular, con pendientes que pueden llegar a ser muy elevadas e imposibles de trabajarlas en el ámbito de exploración de nuevas áreas.

Generalmente las pendientes presentan un valor desde 5° en determinados lugares, y hasta 52° en otros, en donde no existe una regularidad, ocasionando problemas en el ámbito de exploración, y extracción del material hacia la bocamina.

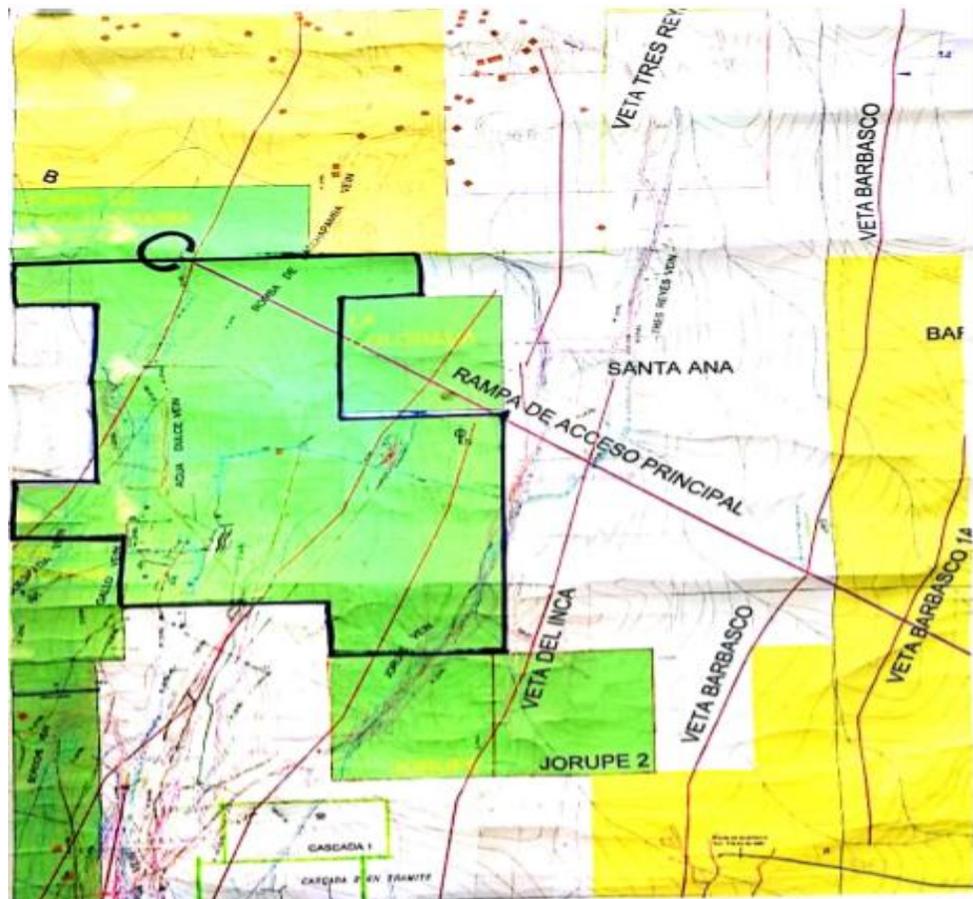


Figura 2.4. Mapa topográfico de la concesión Bomba de Pacchapamba.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Obtención de datos y muestras del macizo rocoso

Previo a realizar una caracterización geo-mecánica del macizo rocoso, debemos conocer las características del macizo y los problemas que han surgido en ciertas etapas del proyecto por las condiciones que tiene el macizo.

Se procedió a recolectar 20 muestras en el tramo del túnel, donde se realizará la propuesta de fortificación. Se elaboraron paralelepípedos rectangulares en todas las muestras, las cuales fueron elaboradas en el área de mecánica dentro de la concesión. Para las dimensiones de los paralelepípedos nos basamos en la relación diámetro / longitud de 1:2, en donde se determinó las medidas de 5cm x 5cm en la parte frontal, y 10cm de longitud para lo que viene siendo la parte larga del paralelepípedo.



Figura 2.5. Muestras de roca para ensayo de Resistencia a la Compresión Simple (RCS).  
Fuente Elaboración propia.

El material recolectado corresponde a muestras de roca de basalto andesítico, un tipo de roca ígnea de color gris claro a oscuro, con una textura fina, en donde se puede observar que tiene un grado de fracturación medio, es decir, se encuentra meteorizado.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

#### 3.1. Análisis de datos y caracterización del macizo rocoso

Las muestras fueron extraídas del lugar en donde se propuso el sistema de Sostenimiento. Se determinó un área de 4 metros cuadrados, en donde se procedió a extraer las muestras del techo y la pared del túnel, se escogieron las muestras con el menor grado de fracturación para realizar la experimentación con las mismas.

Las muestras recolectadas, fueron obtenidas con el fin de realizar los ensayos de Resistencia a la Compresión Simple en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Civil perteneciente a la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay.



Figura 3.1. Muestra siendo sometida a RCS por la prensa hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber experimentado con todas las muestras, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 3.1. Resultados de las muestras sometidas a Compresión Simple.

<b>MUESTRA N°</b>	<b>FUERZA (N)</b>	<b>DIMENSIONES (mm)</b>	<b>ÁREA (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>RCS (MPa)</b>
1	38358	50 X 49	2450	15.65632653
2	44421	47 X 50	2350	18.90255319
3	42757	50 X 50	2500	17.1028
4	35979	48 X 51	2448	14.69730392
5	43816	50 X 50	2500	17.5264
6	72086	51 X 51	2601	27.71472511
7	55832	50 X 50	2500	22.3328
8	55329	49 X 50	2450	22.58326531
9	48738	50 X 50	2500	19.4952
10	58541	45 X 47	2115	27.67895981
11	55870	47 X 45	2115	26.41607565
12	54386	50 X 50	2500	21.7544
13	35130	47 X 50	2350	14.94893617
14	53920	50 X 50	2500	21.568
15	68145	50 X 51	2550	26.72352941
16	36979	48 X 50	2400	15.40791667
17	56147	50 X 50	2500	22.4588

18	48752	49 X 50	2450	19.89877551
19	48904	51 X 50	2550	19.17803922
20	52623	48 X 50	2400	21.92625
<b>TOTAL</b>				413.9710565
<b>MEDIA</b>				20.69855282

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber obtenido el valor de 20.6985 MPa como valor promedio de los ensayos de Resistencia a la Compresión Simple, procedemos a determinar el valor del Índice de Calidad de la Roca (RQD), Para ello se tomaron las muestras en 5 puntos de muestreo dentro del área de estudio, y en cada punto se midieron las familias de fracturas que se encuentran a cada metro.

Para obtener el valor del RQD, tuvimos que aplicar la siguiente fórmula:

$$RQD = 100 - (N^{\circ} \text{ fracturas halladas en un metro} \times 4). \quad (5).$$

Tabla 3.2. Valores del RQD de Deere.

<b>Toma de Muestra N°</b>	<b>Numero de Fracturas</b>	<b>RQD (%)</b>
1	6	76
2	5	80
3	6	76
4	7	72
5	5	80
<b>RQD PROMEDIO</b>		76.8

Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber realizado el cálculo del RQD con las muestras recolectadas en el área de estudio, se obtuvo el valor promedio de 76.8%, el cual determina la calidad de la roca, considerándola como roca buena. (Tabla 1.12).

### Cálculo del Índice Q de Barton

Se procedió a realizar el cálculo del índice Q, ya que es muy importante determinar el valor con el fin de diseñar el sostenimiento para el tramo del túnel en donde haremos nuestra propuesta de fortificación.

El valor del índice Q lo determinamos con la siguiente expresión:

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

Y obtuvimos lo siguiente:

Tabla 3.3. Determinación del valor del Índice Q de Barton

<b>RQD</b>	76.8
<b>J<sub>n</sub></b>	9
<b>J<sub>r</sub></b>	4
<b>J<sub>a</sub></b>	0.75
<b>J<sub>w</sub></b>	1
<b>SRF</b>	2.5
<b>Q</b>	18.2044444

Fuente: Elaboración propia.

El resultado del Índice Q ubica a la clasificación de la roca en un puesto medio, considerando a la roca como buena.

El índice Q tiene un alto grado de fiabilidad, ya que está basado en un elevado número de casos que comprenden una diversidad de tamaños de túneles, tipos de excavación, profundidades y calidades de macizos rocosos. Se diría que, por definición el índice Q no presenta falta de sensibilidad en los parámetros considerados individualmente, ya que estos aparecen como multiplicadores o divisores.

### **Caracterización Rock Massing Rating (RMR)**

Se determinó el valor RMR del tramo del túnel en donde se realizará la propuesta de fortificación.

Adicional a esto, se debe saber que no existe la presencia de flujo de agua en el lugar de estudio, los espaciados de las juntas se encuentran distanciados entre 0.7 – 1.8 metros, la condición de las juntas presentan una separación muy meteorizada, considerada como como ligeramente rugosa.

Finalmente, nos encontramos con que las fracturas se encuentran en una dirección perpendicular al eje del túnel. Por lo que se encuentran en la categoría de favorable expuesta en la tabla 1.8.

Una vez determinadas las características del lugar de estudio, se procedió a determinar el valor del RMR:

Tabla 3.4. Resultados del índice RMR.

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
<b>RCS</b>	2
<b>RQD</b>	12
<b>Espaciado de juntas</b>	15
<b>Condición de las juntas</b>	20
<b>Flujo de Agua</b>	15
<b>Corrección de las juntas</b>	-2
<b>RMR</b>	62

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de 62, nos indica que es una caracterización de clase II, dando el valor para ser considerada como roca buena.

### **3.2 Análisis de los posibles sistemas de fortificación que se puede aplicar en la zona de estudio**

#### **3.2.1 Mallas de acero**

De acuerdo al RMR de 62 que obtuvimos en la caracterización geo-mecánica del macizo rocoso, la fortificación con mallas de acero sería una opción a tomar en cuenta para nuestra propuesta final.

Las mallas de fortificación para túneles son de alta resistencia, de diferentes grosores, lo que permite una mayor distancia entre los anclajes. Su uso es especialmente indicado para zonas comprometidos por estallidos de rocas o donde el macizo rocoso está muy alterado y por lo tanto muy fragmentado.

La principal característica de las mallas es su alta flexibilidad y su capacidad de absorber importantes cantidades de energía, dependiendo de su instalación. Es muy eficiente en la retención de bloques pequeños inestables provocados por eventos sísmicos, activaciones estructurales y otros.

Las mallas se caracterizan por tener medidas y pesos conocidos, poseen uniones más sólidas y terminaciones de alta calidad, las secciones de acero se mantienen sin variación y por tratarse de elementos prefabricados, las mallas soldadas son fáciles y rápidas de instalar ahorrando tiempo que en minería representa también ganancias económicas.



Figura 3.2. Fortificación con mallas de acero reforzadas.

Autor: Ing. Rafael Fonseca Gonzales.

### **3.2.2 Marcos de madera**

La fortificación con marcos de madera ha sido uno de los métodos más ampliamente usados durante la minería tradicional del siglo pasado, y aun en la actualidad es una de las más usadas en la pequeña minería. En la minería a gran escala tiene un uso muy restringido, ya que para la viabilidad del tiempo de fortificación se decide utilizar materiales más modernos y resistentes; y únicamente se utiliza en algunos casos como complemento a otros sistemas que requieren fortificaciones más complejas, de forma pasiva y temporal.

Los marcos de madera se instalan en poco tiempo y son económicos, siendo muy favorables ya que es un sistema de bajo costo, y con instalación en un periodo corto de tiempo.

Además, sirve para ocasiones en las que exista una condición de peligro localizada por desmoronamiento de planchones, y permite advertir la presión del macizo rocoso en el sector (a través del daño observado en la madera).



Figura 3.3. Marcos de madera empleados en la bocamina de la concesión “Bomba de Pacchapamba”.

Autor: Sr. Carlos Pacheco Espinoza.

En cualquier nivel de la mina, el método utilizado para proteger y asegurar a las personas y equipos, son los marcos de madera, que se instalan principalmente para asegurar sectores con mayor daño y extensión, originados principalmente por fallas geológicas o eventos sísmicos de tronaduras anteriores.

### 3.2.3 Marcos metálicos

Los marcos metálicos son una de las varias opciones que se tiene para presentar la propuesta del sistema de fortificación en el tramo del túnel de la mina, ya que es un sistema que tiene una vida útil más larga que los marcos de madera, debido a las condiciones ambientales subterráneas.

Este mecanismo de sostenimiento, desde el punto de vista de la temporalidad, es para realizarlo de forma definitiva, y desde el punto de vista de funcionalidad es un sistema de fortificación pasiva, pues modifican el exterior de la labor y actúan al momento que el macizo rocoso comienza a sufrir deformaciones.

Se utiliza generalmente para sectores de puntos de extracción, zonas de sobre excavación, o para recuperar la infraestructura minera de sectores colapsados.



Figura 3.4. Fortificación con marcos metálicos utilizados en Pequeña Minería.

Autor: Ing. Dinko Rosso Ledezma.

### **3.3 Fundamentación y diseño de la fortificación**

El sistema de fortificación fue definido mediante la indagación y evaluación estructural del macizo rocoso, y su diseño garantiza exigencias de producción, ahorro de tiempo (tiempo de instalación rápido) y evita gastos económicos fuertes (bajo costo de la fortificación).

En base a lo analizado en los puntos anteriores, la fortificación con Marcos de Madera responde a las exigencias de la zona de estudio en donde se requiere la propuesta de un sistema de fortificación.

La fortificación con marcos de madera es seleccionada con el fin de mejorar el ambiente de trabajo para prevenir el posible desprendimiento de bloques de material, debido a que es un lugar de avance denominado “corta vetas” por donde transita el personal todos los días.

Esta fortificación fue determinada en función del estudio previo de las características geo-mecánicas que presentó el macizo rocoso, ya que se obtuvieron puntos para considerar a la roca como Buena, con la clasificación RMR de Bieniawski, la clasificación RQD de Deere y Miller, y la determinación del índice Q de Barton. Debemos tener en cuenta, que el diaclasamiento existente en el lugar de estudio, no influye en la clasificación del macizo rocoso, ya que las familias de fracturas desempeñan una condición favorable para la estabilidad del túnel.

Una fortificación de madera es aplicable en esta zona de estudio debido a que no existe la presencia de agua ni humedad en el tramo del túnel, esto quiere decir que los elementos de la madera no se tienden a debilitar con el tiempo, y eso es un aspecto muy importante.

El tipo de fortificación elegida se justifica con el hecho de que se debe disponer de sistemas que minimicen el uso de material de acuerdo a la geometría de la excavación, que sean fáciles de instalar y que posean una durabilidad acorde con la vida de servicio de la excavación. Esto permite crear un ambiente seguro de trabajo para el personal de la mina, con el fin de aumentar la producción y evitar exponerlos a los peligros inherentes asociados a la actividad de excavación.

### **3.4 Propuesta final de fortificación en el tramo del túnel H – 11**

A continuación, se detalla el diseño de la fortificación propuesta para el tramo del túnel analizado:

#### **Macizo rocoso**

En el tramo del túnel analizado, en donde existe una luz de 2.50 metros y una altura de 2.80 metros, tenemos lo siguiente:

Para las bases laterales de los marcos de madera se utilizarán vigas de eucalipto, las cuales tienen una gran duración en seco, y una resistencia a la compresión simple suficiente para el tramo del túnel que será fortificado. Se utilizarán tablas de 2.50 metros, y 20cm de ancho; además es necesario excavar alrededor de 20 cm en las zonas laterales para acondicionar las bases de apoyo a los postes.

Así mismo, la parte superior estará recubierta con un tablón de 20 cm de ancho y 2 metros de largo, el cual brindará el soporte necesario para los marcos y servirá para prevenir el desprendimiento del material.

Se realizará una fortificación puntual en las partes laterales, ubicando dos tirantes en cada lado, con el fin de poder ubicar tablonces durante el avance de la fortificación.

Los tirantes serán tablonces de 10 cm de ancho, y tendrán una distancia de más o menos 50 cm hasta empotrarse con el macizo rocoso.

Los marcos de madera base, se encontrarán cada 3 metros, con el fin de nuevamente repetir el proceso y poder obtener una mayor estabilidad del macizo rocoso.

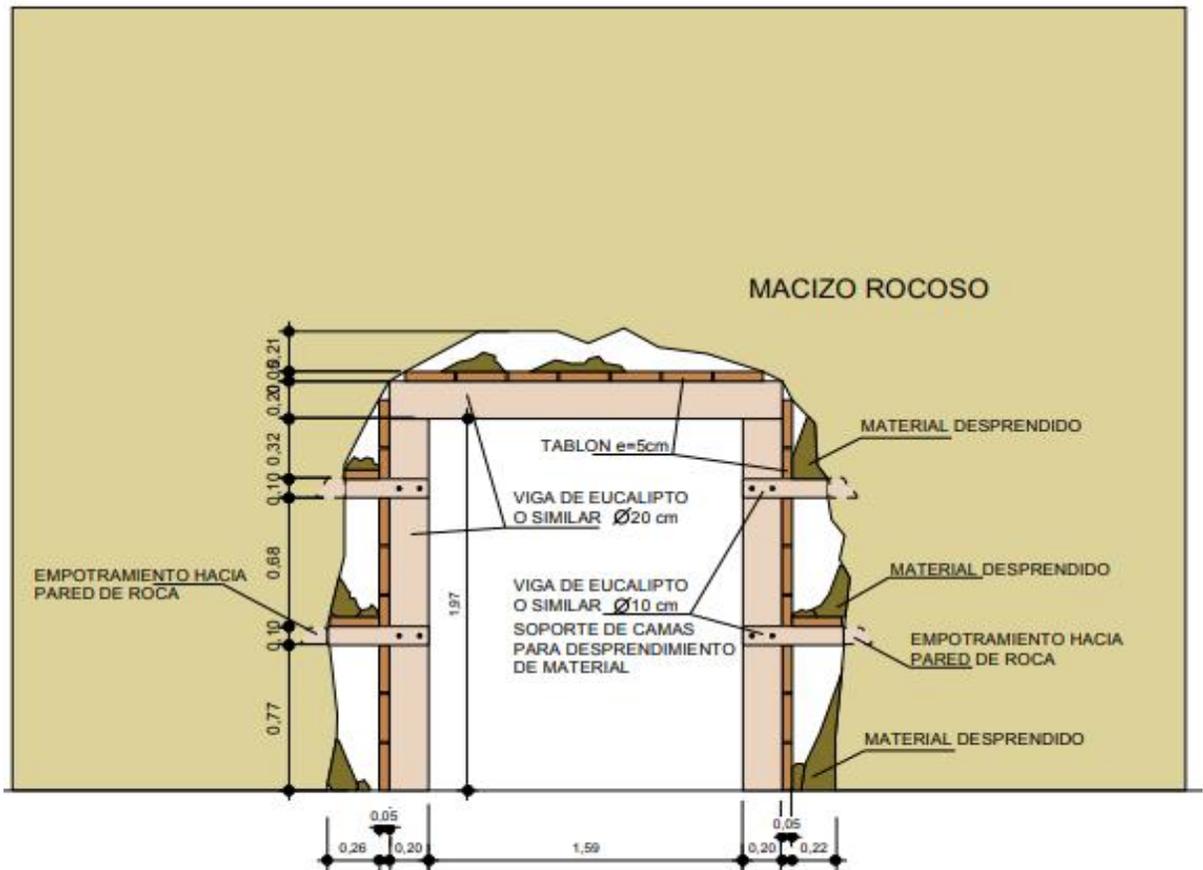


Figura. 3.5 Diseño vista frontal de los marcos de madera.

Autor: Francis Noguera Flores.

### Proyección de excavación

En las partes superiores y laterales se ubicarán tabloncillos rectangulares de eucalipto de 5 cm de espesor, 25 cm de ancho, y 3 metros de largo, con fines de sostenimiento del macizo rocoso.

Se utilizará empotramientos en las paredes de roca, y también empotramiento con pernos entre uniones de las vigas de base y tabloncillos de avance de fortificación.

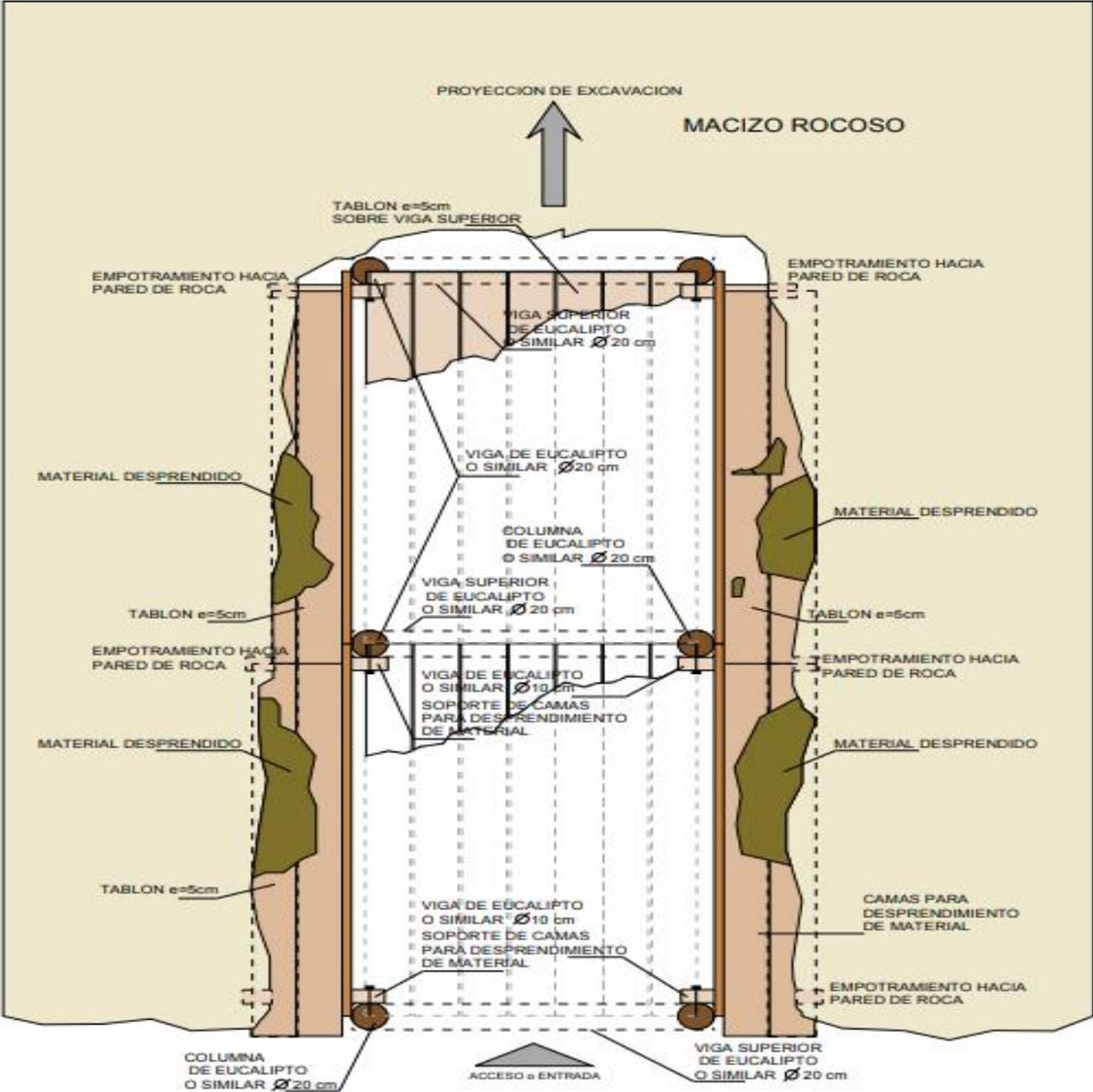


Figura. 3.6. Proyección de excavación vista superior.

Autor: Francis Noguera Flores

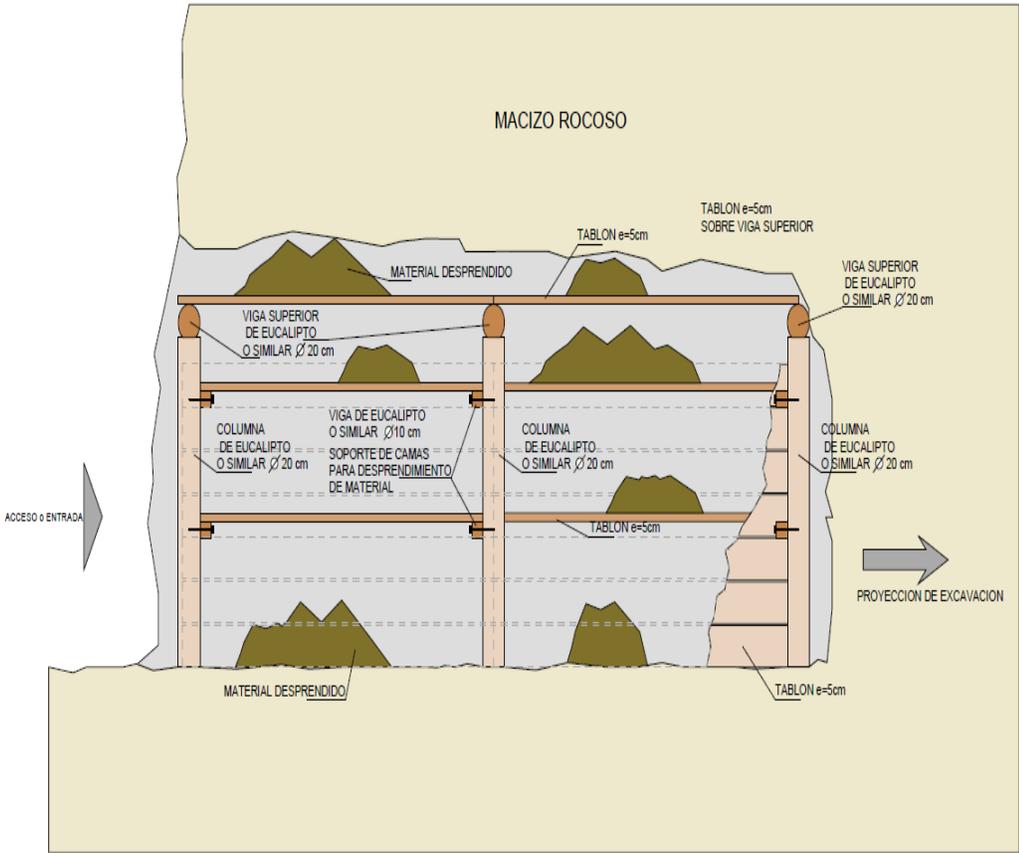


Figura. 3.7. Proyección de excavación.

Autor: Francis Noguera Flores.

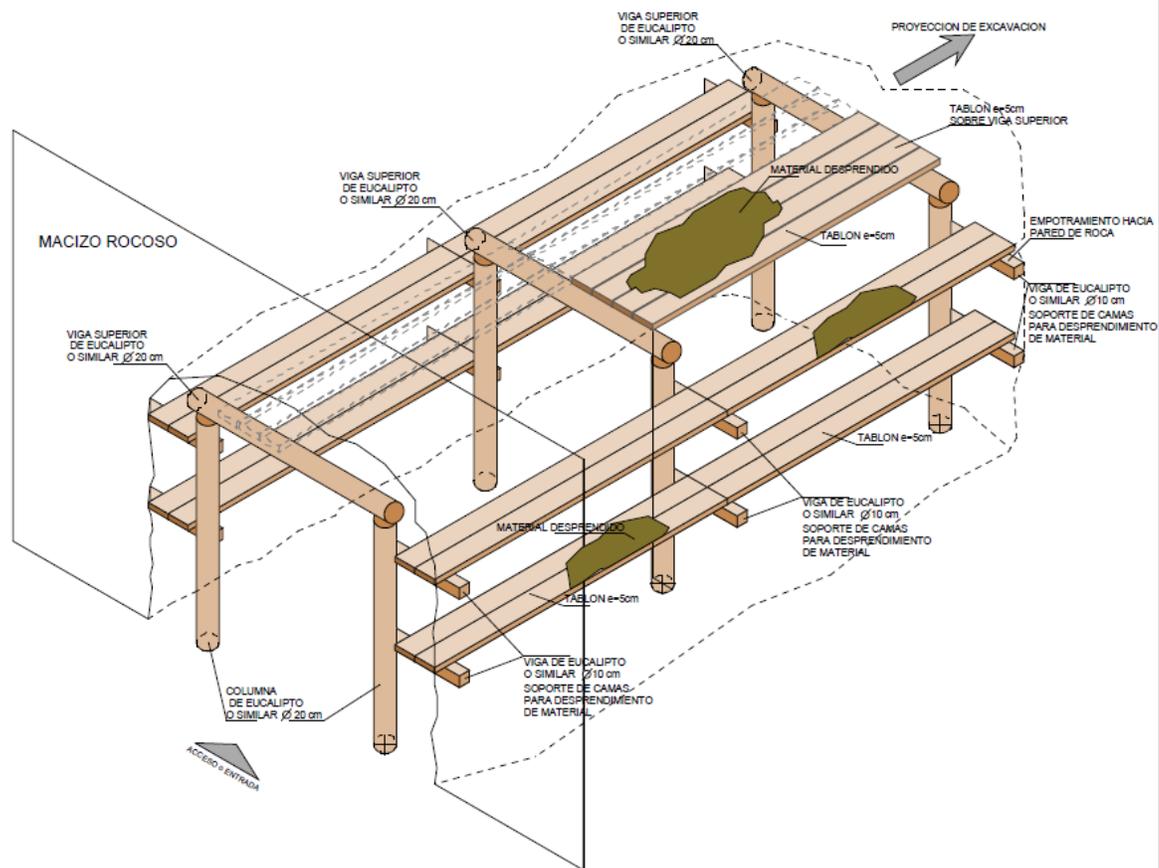


Figura. 3.8. Axonetría del diseño de fortificación propuesto.

Autor: Francis Noguera Flores.

Para que la proyección de la fortificación se pueda ver y entender de una manera más adecuada, se realizó una axonetría del diseño propuesto, y así poder representarlo en los planos X, Y, Z.

### Análisis económico

El análisis económico se ha presentado con el fin de planificar una fortificación de 18 metros, tomando en cuenta todos los factores que se necesitan para realizar una adecuada fortificación.

La siguiente tabla detalla el costo de fortificación por cada 3 metros de avance:

Tabla 3.5. Análisis Económico por cada 3 metros de avance.

<b>MATERIALES</b>	<b>PRECIO(\$)</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>TOTAL(\$)</b>
VIGA PARA SOSTENIMIENTO DE 20CM DE DIÁMETRO	\$28	3	\$84
VIGA PARA EMPOTRAMIENTO A LA PARED DE ROCA DE 10CM DE DIÁMETRO	\$13	4	\$52
TABLONES DE AVANCE RECTANGULARES DE DIMENSIONES 3M X 20CM X 5CM	\$15	\$13	\$195
MATERIALES ADICIONALES	\$10	1	\$10
		<b>TOTAL</b>	<b>\$341</b>

Fuente: Elaboración propia

Por cada 3 metros de avance se necesita \$341 para avanzar en la fortificación, entonces, para los 18 metros planificados el resultado sería el siguiente:

Tabla 3.6. Planificación económica para la fortificación del tramo del túnel.

<b>FORTIFICACIÓN PLANIFICADA 18 METROS</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO</b>
\$341 POR AVANCE DE 3 METROS	6	\$ 2.046
ÚLTIMA ESTRUCTURA DE SOSTENIMIENTO	1	\$ 146
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2.192</b>

Fuente: Elaboración propia.

No hay que olvidarse de la última estructura de sostenimiento con sus vigas la cual tiene un costo de \$146, que, al sumarle al valor total de la fortificación, nos da un valor de \$2192.

Esta fortificación brindará seguridad al personal de la mina, y creará un ambiente de trabajo mucho más tranquilo, con el fin de evitar accidentes, preocupaciones y problemas en el interior de la mina.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Se realizó la caracterización geo-mecánica del macizo rocoso con la clasificación propuesta por Bieniawski, la cual concluyó clasificando al macizo rocoso como clase II, considerada como roca buena, con un valor de RMR equivalente a 62, que está en los rangos establecidos de 80-61 (RMR).

Al observar las condiciones estudiadas de las características geo-mecánicas de la zona, se encontró que el macizo rocoso es medianamente estable, ya que existe una falla con rumbo y buzamiento favorable.

Se analizaron 3 posibles sistemas de fortificación que podrían ser utilizados en el tramo H-11 de la zona de estudio, en donde se tuvieron en cuenta factores importantes como: exigencias de producción, tiempo de fortificación, evaluación económica y evaluación estructural del macizo rocoso en la zona de estudio. Todo esto para llegar a una propuesta tecnificada y aprovechando los recursos de la zona.

Se realizó el diseño y propuesta del Sistema de Sostenimiento que se ajusta al tramo del túnel de la zona de estudio, concluyendo que el sistema de fortificación a utilizar será a través de Marcos de Madera, siendo una propuesta viable para realizar el diseño.

El costo de la Fortificación con Marcos de Madera es de \$2192, siendo un valor económico viable para los 18 metros del tramo del túnel.

## **Recomendaciones**

Para los ensayos de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca, se deben obtener muestras frescas recién extraídas de la zona de estudio.

Se debe usar siempre todos los equipos de protección personal, con el fin de evitar accidentes en el interior de la mina.

Verificar los valores de la resistencia a la compresión uniaxial de las muestras estudiadas, realizando siempre los análisis en laboratorios de confianza y certificados, con el fin de obtener resultados óptimos.

Realizar de manera permanente análisis del macizo rocoso, para conocer más a detalle la estabilidad del mismo y así poder realizar un correcto diseño del Sistema de Fortificación.

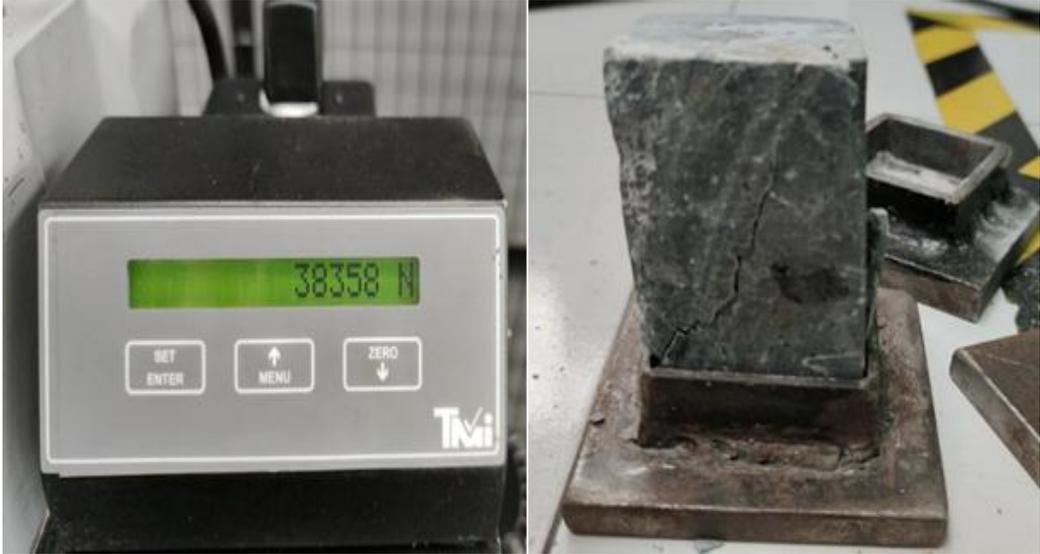
La Empresa debe implementar un mecanismo de control, supervisión y seguimiento de los procesos de fortificación, con el fin de evitar un alto consumo de recursos económicos y de personal de trabajo.

Se debe usar madera de Eucalipto en las diferentes fortificaciones que se encuentran en el nivel H de la mina, ya que esta resulta mucho más eficiente y económica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Agudelo D. (2012). Influencia de los procesos de meteorización en la estructura del suelo y la estabilidad de taludes. Bogotá, Colombia.
- Bieniawski Z.T. (2003). New tendencies in rock mass characterization. Jornada técnica sobre “Aspectos relevantes en la caracterización de un macizo rocoso”. Madrid
- Brady E. y Brown E.T. (1985). Rock Mechanics for Underground Mining. Ed. George Allen & Unwin. Londres, RU.
- Feijoo P. (1996). Manual de Mecánica de Rocas y Estabilidad de Taludes y Túneles. Cuenca, Universidad del Azuay.
- Gere J. y Goodno B. (2009). Mecánica de materiales. México
- Gutiérrez E. (2017). Mecánica de rocas en proyectos y obras. México
- Hoek, E & Brown, E. (1985). Excavaciones Subterráneas en Roca, USA: McGraw – Hill Book Company.
- Hudson, J. A. (1989). Rock Mechanics principles in engineering practice. Butterworths. Ciria. London
- PRODEMINCA. (2000). Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador. Vol 4. Quito: UCP PRODEMINCA.
- Ramírez P. y Alejano L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Editorial Vigo. Madrid.
- E.T.S.E.C.C.P.B UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA. (2015). Procesos de obtención del índice RQD. Editorial Ports Catalunya. Barcelona
- SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA. (2014). Manual de Geo-mecánica aplicada a las caídas de roca en minería.
- Vallejos, J. (2012). Estabilización de macizos rocosos. Cátedra de Mecánica de Rocas. Departamento de Ingeniería de Minas- Universidad de Chile.

**ANEXOS**



Anexo 1. Muestra N° 1.



Anexo 2. Muestra N° 3.



Anexo 3. Muestra N° 4.



Anexo 4. Muestra N° 6.



Anexo 5. Muestra N° 7.



Anexo 6. Muestra N° 8.



Anexo 7. Muestra N° 9.



Anexo 8. Muestra N° 12.



Anexo 9. Muestra N° 13.



Anexo 10. Muestra N° 14.



Anexo 11. Muestra N° 18.



Anexo 12. Muestra N° 19.



Anexo 13. Muestra sometida a ensayo de RCS.



Anexo 14. Muestras preparadas para someter a ensayo de RCS.



Anexo 15. Tramo del túnel estudiado.



Anexo 16. Recolección de muestras de roca en la zona de estudio.