

**Universidad de Concepción**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante:**

Sr. René Gómez P.

**EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE MACIZO ROCOSO Q  
DE BARTON EN GRANODIORITA**

CARLOS VEGA VERA

The logo of the University of Concepción is a shield-shaped emblem. It features a central yellow field with a blue torch and a blue chalice. The shield is surrounded by a blue laurel wreath. The entire emblem is set against a light blue background.

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Diciembre, 2018



*“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa”*

***Mahatma Gandhi***

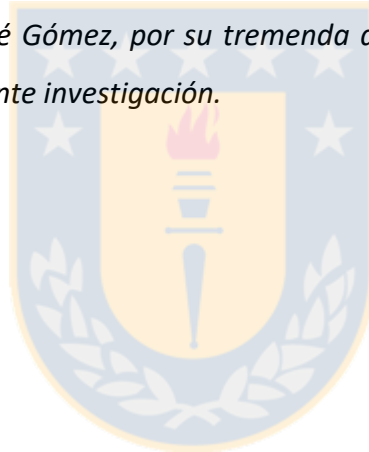
## AGRADECIMIENTOS

*A mi familia, por su apoyo incondicional en toda la etapa universitaria, supliendo hasta la más mínima necesidad que se me presentara, sobre todo en lo emocional. Ellos nunca dejaron de confiar en mí y me enseñaron que con esfuerzo y perseverancia se puede conseguir hasta lo imposible.*

*A mi pareja, por ser mi complemento perfecto, por todo el amor que me das y ser mi apoyo para cada desafío que se me ha presentado.*

*A mis amigos, Tajo Abierto, Karaoke, Donkey Konga y los Yustei por cada alegría, risa y hermosos momentos compartidos, gracias por darme la motivación cuando muchos de los días se tornaban grises.*

*A mi tutor, René Gómez, por su tremenda disposición, ayuda y orientación en el desarrollo de la presente investigación.*



## RESUMEN

Existen varios métodos empíricos para estimar la calidad del macizo rocoso en el que se realiza una excavación, muchos de éstos recomiendan un sistema de soporte y fortificación a utilizar cuando no se tiene la información geotécnica suficiente.

El objetivo de este trabajo es verificar si uno de estos sistemas de clasificación de macizo rocoso, llamado Q de Barton, condice sus recomendaciones con los resultados expuestos por un *software* de simulación numérica, en este caso RS2. Se simulan 5 escenarios que representan una galería en un macizo rocoso de material granodiorita.

Los resultados obtenidos indican que las recomendaciones de soporte y fortificación no coinciden para ninguno de los casos simulados. Lo obtenido mediante el software corresponde a resultados más conservadores que los recomendados por Barton, para los cuales, se evidencia una necesidad de fortificación y/o soporte más robusto con el fin de lograr estabilidad en la galería.



## ABSTRACT

There are several empirical methods to estimate the rock mass quality in which an excavation is carried out, many of them recommend a support and fortification system to be used when there is not much geotechnical information available.

This work has the objective of verifying if one of these rock mass classification systems, called Q of Barton, conforms its recommendations with the results exposed by a software of numerical simulation, in this case RS2. Five scenarios are simulated, representing a gallery in a rocky massif of granodiorite material.

The results obtained indicate that the support and fortification recommendations do not coincide for any of the simulated cases. The results obtained through the software correspond to results that are more conservative than those recommended by Barton, for which there is evidence of a need for more fortification and/or support to make the gallery stable.



## CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1) Objetivo general .....	2
1.2) Objetivos específicos .....	2
<b>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1) Galerías .....	3
2.2) Sistemas de clasificación del macizo rocoso .....	4
2.2.1) Rock Quality Designation .....	4
2.2.2) Q de Barton .....	6
2.2.3) Rock Mass Rating .....	8
2.2.4) Geological Strength Index .....	9
2.3) Criterios de falla .....	10
2.3.1) Criterio de Mohr-Coulomb .....	10
2.3.2) Criterio generalizado de Hoek-Brown .....	12
2.3.3) Criterio de Barton-Bandis .....	13
2.4) Elementos de estabilización .....	15
2.4.1) Pernos .....	16
2.4.2) Mallas .....	17
2.4.3) Hormigón proyectado .....	18
2.4.4) Arcos .....	19
2.5) Herramientas de diseño .....	20
2.5.1) Método de elementos finitos .....	20
2.5.2) Teoría de bloques .....	21
<b>CAPÍTULO 3 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS .....</b>	<b>23</b>
3.1) Transformación de valores del sistema Q a sistema GSI .....	23
3.2) Condición de discontinuidades del sistema RMR (1989) y <i>RQD</i> apropiados para utilizar .....	24
3.3) Índices de rugosidad ( <i>J<sub>r</sub></i> ) y alteración de discontinuidades ( <i>J<sub>a</sub></i> ) apropiados para utilizar .....	25
3.4) Índice de cantidad de familias de discontinuidades ( <i>J<sub>n</sub></i> ), coeficiente reductor por presencia de agua ( <i>J<sub>w</sub></i> ) y coeficiente de estado tensional del macizo rocoso ( <i>SRF</i> ) apropiados para utilizar .....	26
3.5) Valores del sistema Q y GSI a utilizar en cada escenario .....	27
3.6) Soporte y fortificación definido para cada escenario .....	27

<b>CAPÍTULO 4 MODELAMIENTO DE ESCENARIOS CON LA APLICACIÓN INFORMÁTICA RS2 .....</b>	<b>29</b>
4.1) Propiedades y características del material .....	30
4.2) Campo de tensiones .....	31
4.3) Criterio de falla de las discontinuidades .....	32
4.4) Módulo de Young del macizo rocoso .....	33
4.5) Manteo, direcciones de manteo y espaciamiento .....	33
4.6) Rigidez normal y rigidez al corte .....	34
4.7) Concepto de persistencia y valor a utilizar .....	35
4.8) Propiedades del perno a utilizar .....	36
4.9) Propiedades del <i>shotcrete</i> a utilizar .....	37
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS .....</b>	<b>38</b>
5.1) Fortificación de escenarios .....	38
5.2) Esfuerzos principales .....	43
5.3) Comparación de los 3 tipos de simulaciones .....	50
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>

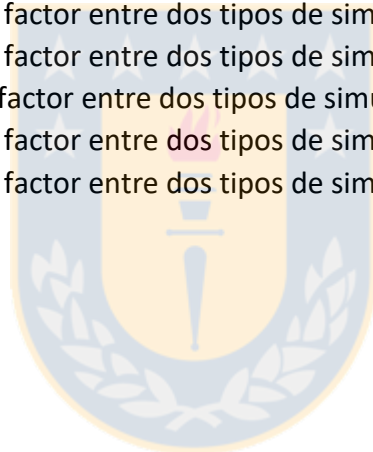


## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Clasificación de masa rocosa según RQD (Deere [11]) .....	5
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de masa rocosa según RQD (Priest & Hudson [12]) .....	6
<b>Tabla 3:</b> Clasificación de masa rocosa según RQD (Palmström [13]) .....	6
<b>Tabla 4:</b> Clasificación de masa rocosa según sistema Q .....	7
<b>Tabla 5:</b> Rango de valores ESR [4] .....	8
<b>Tabla 6:</b> Clasificación de masa rocosa según RMR [1] .....	9
<b>Tabla 7:</b> Cuadro general para las estimaciones de GSI a partir de observaciones geológicas [15]...	10
<b>Tabla 8:</b> Clasificación de sistema de fortificación según objetivo [17] .....	15
<b>Tabla 9:</b> Clasificación de sistema de fortificación según momento en que entra en acción [17] .....	16
<b>Tabla 10:</b> Tipos de pernos con sus características respectivas [17] .....	17
<b>Tabla 11:</b> Tipos de mallas con sus características respectivas [17] .....	18
<b>Tabla 12:</b> Aplicaciones informáticas que se basan en el método de los elementos finitos .....	21
<b>Tabla 13:</b> Aplicaciones informáticas que se basan en la Teoría de Bloques .....	22
<b>Tabla 14:</b> Calidad de masa rocosa a simular en color anaranjado .....	23
<b>Tabla 15:</b> Resultados valores Q a GSI .....	24
<b>Tabla 16:</b> Resultados GSI en base a parámetros $J_{cond89}$ y RQD .....	24
<b>Tabla 17:</b> GSI en función de parámetros $J_{cond89}$ y RQD [29] .....	25
<b>Tabla 18:</b> Parámetro $J_r$ para cada calidad de masa rocosa .....	26
<b>Tabla 19:</b> Parámetro $J_a$ para cada calidad de masa rocosa .....	26
<b>Tabla 20:</b> Parámetros $SRF, J_n, J_w$ para cada calidad de masa rocosa .....	26
<b>Tabla 21:</b> Resultados valores Q y GSI para cada escenario .....	27
<b>Tabla 22:</b> Resultados para Span/ESR .....	27
<b>Tabla 23:</b> Soporte y fortificación para cada escenario .....	28
<b>Tabla 24:</b> Parámetros de entrada requeridos por el software RS2 .....	29
<b>Tabla 25:</b> Propiedades de Granodiorita [30] .....	30
<b>Tabla 26:</b> Parámetros para criterio generalizado de Hoek & Brown .....	30
<b>Tabla 27:</b> Actualización de tabla de parámetro SRF [32] .....	31
<b>Tabla 28:</b> Parámetros para determinar el campo de tensiones .....	31
<b>Tabla 29:</b> Valores de los factores A y B para varias formas de excavaciones [18] .....	32
<b>Tabla 30:</b> Parámetros para criterio Barton-Bandis en función de $J_r$ [33] .....	32
<b>Tabla 31:</b> Parámetros de criterio Barton-Bandis definidos para cada escenario .....	33
<b>Tabla 32:</b> Valores de módulo de Young de macizo rocoso para cada escenario .....	33
<b>Tabla 33:</b> Valores de manto, direcciones de manto y espaciamiento para cada familia de juntas en cada escenario a evaluar .....	34
<b>Tabla 34:</b> Valores de rigidez normal ( $kn$ ) y rigidez al corte ( $ks$ ) para cada escenario de interés .....	35
<b>Tabla 35:</b> Persistencia y largos a utilizar en RS2 .....	36
<b>Tabla 36:</b> Propiedades del perno a utilizar .....	37
<b>Tabla 37:</b> Características de pernos para roca muy mala .....	37
<b>Tabla 38:</b> Propiedades del shotcrete a utilizar .....	37
<b>Tabla 39:</b> Espesor del shotcrete para roca muy mala .....	38



<b>Tabla 40:</b> Valores promedio de SF para masa de roca muy mala con fortificación .....	39
<b>Tabla 41:</b> Valores promedio de SF para masa de roca mala.....	40
<b>Tabla 42:</b> Valores promedio de SF para masa de roca regular .....	41
<b>Tabla 43:</b> Valores promedio de SF para masa de roca buena .....	42
<b>Tabla 44:</b> Valores promedio de SF para masa de roca muy buena .....	43
<b>Tabla 45:</b> Valores promedio de sigma 1 para masa de roca muy mala .....	44
<b>Tabla 46:</b> Valores promedio de sigma 3 para masa de roca muy mala .....	45
<b>Tabla 47:</b> Valores promedio de sigma 1 para masa de roca mala .....	45
<b>Tabla 48:</b> Valores promedio de sigma 3 para masa de roca mala .....	46
<b>Tabla 49:</b> Valores promedio de sigma 1 para masa de roca regular .....	47
<b>Tabla 50:</b> Valores promedio de sigma 3 para masa de roca regular .....	47
<b>Tabla 51:</b> Valores promedio de sigma 1 para masa de roca buena.....	48
<b>Tabla 52:</b> Valores promedio de sigma 3 para masa de roca buena.....	48
<b>Tabla 53:</b> Valores promedio de sigma 1 para masa de roca muy buena.....	49
<b>Tabla 54:</b> Valores promedio de sigma 3 para masa de roca muy buena.....	50
<b>Tabla 55:</b> Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para roca muy mala .....	51
<b>Tabla 56:</b> Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para roca mala .....	51
<b>Tabla 57:</b> Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para regular .....	51
<b>Tabla 58:</b> Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para buena .....	51
<b>Tabla 59:</b> Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para roca muy buena .....	51



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Miembros principales de un macizo rocoso y una galería.....	4
<b>Figura 2:</b> Gráfico para determinar sistema de soporte a través del sistema Q [4] .....	8
<b>Figura 3:</b> Comportamiento de criterio de falla de Mohr-Coulomb .....	11
<b>Figura 4:</b> Comportamiento de criterio generalizado de Hoek-Brown [20].....	12
<b>Figura 5:</b> Perfiles de rugosidad de las discontinuidades que muestra el rango del JRC asociado [21] .....	13
<b>Figura 6:</b> Gráfico para determinar el JCS [21] .....	14
<b>Figura 7:</b> Comportamiento del criterio de falla de Barton-Bandis [21] .....	14
<b>Figura 8:</b> Explicación visual de clasificación de sistema de fortificación según objetivo que se quiere lograr [17].....	16
<b>Figura 9:</b> A) Perno de adherencia con resina. B) Perno de fricción de anclaje mecánico. C) Perno de fricción de anclaje mecánico y lechado. D) Perno de fricción de baja carga Split Set. E) Perno de fricción de baja carga Swellex. F) Perno auto-perforante [17] .....	17
<b>Figura 10:</b> A) Malla soldada. B) Malla trenzada [17].....	18
<b>Figura 11:</b> Aplicación de shotcrete en una galería [17] .....	19
<b>Figura 12:</b> A) Arco rígido. B) Arco deslizante [17] .....	20
<b>Figura 13:</b> Categoría de reforzamiento utilizada para cada escenario a través del gráfico de soporte del sistema Q.....	28
<b>Figura 14:</b> Dimensiones de una galería y tipo de material de macizo rocoso a simular en RS2 .....	29
<b>Figura 15:</b> Elemento de juntas de Goodman [36].....	34
<b>Figura 16:</b> Largos de juntas para persistencia.....	36
<b>Figura 17:</b> A) SF roca muy mala con fortificación en simulación continua. B) SF roca muy mala con fortificación en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca muy mala con fortificación en simulación con fracturas con persistencia .....	39
<b>Figura 18:</b> A) SF roca mala en simulación continua. B) SF roca mala en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca mala en simulación con fracturas con persistencia .....	40
<b>Figura 19:</b> A) SF roca regular en simulación continua. B) SF roca regular en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca regular en simulación con fracturas con persistencia.....	41
<b>Figura 20:</b> A) SF roca buena en simulación continua. B) SF roca buena en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca buena en simulación con fracturas con persistencia .....	42
<b>Figura 21:</b> A) SF roca muy buena en simulación continua. B) SF roca muy buena en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca muy buena en simulación con fracturas con persistencia.....	43
<b>Figura 22:</b> A) Sigma 1 roca muy mala en simulación continua. B) Sigma 1 roca muy mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca muy mala en simulación con fracturas con persistencia .....	44
<b>Figura 23:</b> A) Sigma 3 roca muy mala en simulación continua. B) Sigma 3 roca muy mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca muy mala en simulación con fracturas con persistencia .....	44
<b>Figura 24:</b> Sigma 1 roca mala en simulación continua. B) Sigma 1 roca mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca mala en simulación con fracturas con persistencia .....	45

**Figura 25:** Sigma 3 roca mala en simulación continua. B) Sigma 3 roca mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca mala en simulación con fracturas con persistencia ..... 46

**Figura 26:** Sigma 1 roca regular en simulación continua. B) Sigma 1 roca regular en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca regular en simulación con fracturas con persistencia ..... 46

**Figura 27:** Sigma 3 roca regular en simulación continua. B) Sigma 3 roca regular en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca regular en simulación con fracturas con persistencia ..... 47

**Figura 28:** Sigma 1 roca buena en simulación continua. B) Sigma 1 roca buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca buena en simulación con fracturas con persistencia ..... 48

**Figura 29:** Sigma 3 roca buena en simulación continua. B) Sigma 3 roca buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca buena en simulación con fracturas con persistencia ..... 48

**Figura 30:** Sigma 1 roca muy buena en simulación continua. B) Sigma 1 roca muy buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca muy buena en simulación con fracturas con persistencia ..... 49

**Figura 31:** Sigma 3 roca muy buena en simulación continua. B) Sigma 3 roca muy buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca muy buena en simulación con fracturas con persistencia ..... 50



## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1:</b> Cálculo de RQD según Deere 1963 .....	5
<b>Ecuación 2:</b> Cálculo de RQD según Priest y Hudson 1976 .....	5
<b>Ecuación 3:</b> Cálculo de RQD según Palmström 1982 .....	6
<b>Ecuación 4:</b> Cálculo del sistema Q según Barton 1974 .....	7
<b>Ecuación 5:</b> Cálculo de luz máxima según Barton 1974 .....	8
<b>Ecuación 6:</b> Cálculo de RMR según Bieniawski 1973 .....	8
<b>Ecuación 7:</b> Cálculo de RMR según Bieniawski 1989 .....	9
<b>Ecuación 8:</b> Cálculo cizallamiento directo Mohr Coulomb .....	11
<b>Ecuación 9:</b> Cálculo esfuerzos principales para datos triaxiales Mohr Coulomb .....	11
<b>Ecuación 10:</b> Cálculo esfuerzos principales por criterio generalizado Hoek-Brown .....	12
<b>Ecuación 11:</b> Cálculo resistencia al corte de las discontinuidades Barton-Bandis .....	13
<b>Ecuación 12:</b> Cálculo RMR del 1989 usando Q del 1994 .....	24
<b>Ecuación 13:</b> Cálculo GSI usando RMR del 1989 .....	24
<b>Ecuación 14:</b> Cálculo GSI usando condición de discontinuidades del sistema RMR del 1989 .....	24
<b>Ecuación 15:</b> Cálculo RQD según Priest and Hudson .....	24
<b>Ecuación 16:</b> Cálculo tensión tangencial según Palmström 1995 .....	31
<b>Ecuación 17:</b> Cálculo módulo de Young del macizo rocoso Hoek and Diederichs 2006 .....	33
<b>Ecuación 18:</b> Cálculo de rigidez normal de la junta Barton 1972 .....	34
<b>Ecuación 19:</b> Cálculo rigidez al corte de la junta Kulhawy .....	35
<b>Ecuación 20:</b> Cálculo de persistencia .....	36

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Figura I-1:</b> Ejemplo de cálculo del RQD utilizando el primer procedimiento [5] .....	58
<b>Tabla II-1:</b> Rango de valores de RQD usados en sistema Q .....	59
<b>Tabla II-2:</b> Rango de valores de $J_n$ usados en sistema Q .....	59
<b>Tabla II-3:</b> Rango de valores de $J_r$ usados en sistema Q .....	59
<b>Tabla II-4:</b> Rango de valores de $J_a$ usados en sistema Q .....	60
<b>Tabla II-5:</b> Rango de valores de $J_w$ usados en sistema Q .....	61
<b>Tabla II-6:</b> Rango de valores de SRF usados en sistema Q .....	61
<b>Tabla III-1:</b> Rango de valores de $J_1$ usados en sistema RMR .....	63
<b>Tabla III-2:</b> Rango de valores de $J_2$ usados en sistema RMR .....	63
<b>Tabla III-3:</b> Rango de valores de $J_3$ usados en sistema RMR .....	63
<b>Tabla III-4:</b> Rango de valores de $J_4$ usados en sistema RMR .....	63
<b>Tabla III-5:</b> Rango de valores de $J_5$ usados en sistema RMR .....	64
<b>Tabla III-6:</b> Rango de valores de $J_6$ usados en sistema RMR .....	64
<b>Tabla III-7:</b> Orientación de discontinuidades en sistema RMR .....	64
<b>Tabla IV-1:</b> Elementos de estabilización según RMR [14] .....	65

## NOMENCLATURA

RQD: *Rock Quality Designation*

Q: sistema Q de Barton

RMR: *Rock Mass Rating*

GSI: *Geological Strength Index*

RS2: *rocscience software*

SF: *strength factor*

$\sigma_1$ : esfuerzo principal mayor [MPa]

$\sigma_3$ : esfuerzo principal menor [MPa]

$\sigma_c$ : resistencia a la compresión de la roca intacta [MPa]

$\sigma_\theta$ : tensión tangencial [MPa]

$E_m$ : módulo de Young del macizo rocoso [MPa]

$E_i$ : módulo de Young de la roca intacta [MPa]

$k_n$ : rigidez normal de la junta [MPa/m]

$k_s$ : rigidez al corte de la junta [MPa/m]

$\nu$ : módulo de Poisson

$\tau$ : resistencia al corte [MPa]



## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Construir una galería, conlleva un desafío desde el punto de vista de la estabilidad, debido a que en los inicios de un proyecto hay carencia de antecedentes e información geotécnica. Con el fin de orientar y guiar al profesional, diferentes autores han creado sistemas de clasificación geomecánica, en base a galerías estables existentes (tales como el RMR de Bieniawski [1], RMI de Palmström [2], GSI de Hoek [3] y el Q de Barton [4]). Estos sistemas son ampliamente usados hoy en día ya que sirven como herramienta para caracterizar el macizo rocoso y ofrecen estimaciones del sistema de soporte y fortificación que necesita una excavación.

Por otro lado, existen diversas aplicaciones informáticas geotécnicas, que son utilizadas en una amplia gama de proyectos de ingeniería, que incluyen: diseño de excavaciones, estabilidad de taludes, infiltración de aguas subterráneas, consolidación y capacidades de análisis dinámicos. Algunas de estas aplicaciones informáticas son GEO5, MineScape y RS2; esta última es la que se utiliza en este trabajo.

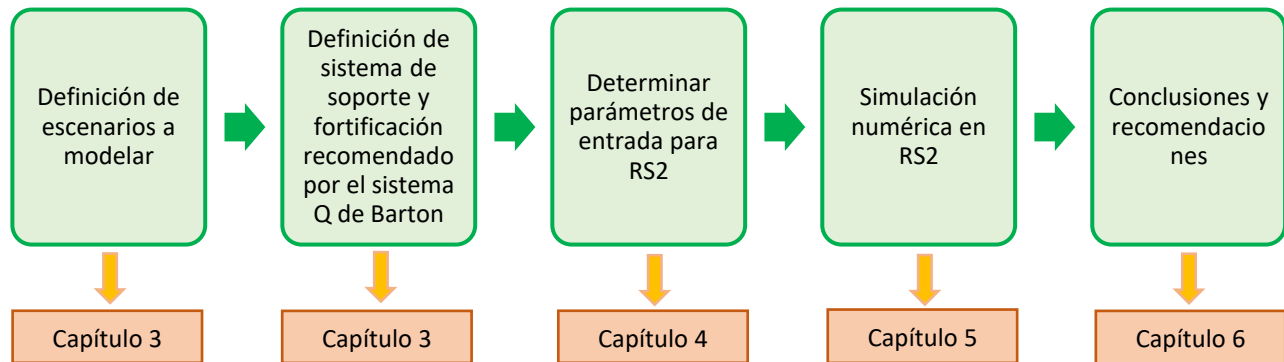
En particular, el sistema Q, ha sido usado durante más de 40 años en los proyectos de construcción de galerías tal como lo menciona Michelle van der Pouw en su tesis *Rockmass Behaviour Uncertainty* [5]. Además, este sistema cuenta con aprobación en el área geotécnica y está respaldado por sus resultados exitosos. Por otro lado, en la actualidad, la utilización de aplicaciones informáticas se ha convertido en una herramienta esencial a la hora de medir, calcular y analizar de forma precisa los sistemas diseñados.

Considerando lo anterior, en este trabajo se realiza una comparación entre el sistema de fortificación propuesto por Barton y su respectiva simulación numérica en el *software* RS2, con el fin de corroborar si se condicen los resultados.

Para realizar la propuesta comparativa, se definen 5 escenarios a modelar con sus respectivos sistemas de fortificación dados por el sistema Q. El modelamiento numérico en el *software*, se realiza en una galería de dimensiones 3 m x 3 m, para lo cual, es necesario determinar previamente los parámetros de entrada que requiere la aplicación informática.

Además, se realizan 2 análisis que, aunque no se relacionan directamente con el objetivo de la investigación, están involucrados en la estabilidad de las galerías.

A continuación, se presenta un esquema que resume la metodología general a utilizar con su respectivo capítulo de desarrollo.



### 1.1) Objetivo general

Establecer un marco comparativo entre el sistema de fortificación del macizo rocoso propuesto por Barton y su respectiva simulación numérica con el *software* RS2 en granodiorita.

### 1.2) Objetivos específicos

1. Describir fundamentos teóricos en los que se basa la investigación.
2. Determinar tipos de escenarios de macizo rocoso.
3. Establecer el soporte y fortificación recomendado para cada escenario
4. Realizar las simulaciones en RS2 para cada escenario.
5. Analizar resultados de las simulaciones realizadas.



## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describe el concepto de galería y aspectos importantes en la estabilidad de ella, tales como: caracterización y modo de falla del macizo rocoso y sistemas de soporte y fortificación. Además, se presenta el fundamento teórico mediante el cual funcionan algunas herramientas de diseño.

### 2.1) Galerías

Una labor minera es cualquier hueco excavado para explotar un yacimiento. La galería es la labor más común en minería subterránea, consiste en una excavación lineal, construida en posición horizontal o con cierto grado de inclinación, la cual depende de la forma y ubicación del cuerpo mineralizado. No corresponde asimilarla a un túnel de carretera o ferrocarril, ya que éstos cuentan con una entrada y una salida, en cambio, una galería sólo tiene una salida a superficie y otro extremo ciego [6].

Por otra parte, la RAE define a la galería como “Cada uno de los caminos subterráneos que se excavan en las minas y se utilizan para comunicación, ventilación, desagüe y descanso” [7]. Las galerías están construidas para acceder a una explotación minera, sirven como vía de transporte para materiales, suministros y personal. También hay galerías entre diferentes frentes de explotación del yacimiento. En general tienen carácter temporal, supeditadas al tiempo requerido para explotar los minerales, luego de lo cual la obra se abandona [8].

Las galerías son construidas al realizarse una excavación dentro de un macizo rocoso o suelo. Un macizo rocoso está compuesto por la matriz rocosa y discontinuidades. La matriz rocosa corresponde a los bloques de roca intacta separados por discontinuidades geológicas. Las discontinuidades están asociadas a planos de debilidad en el macizo rocoso y existen diferentes tipos dependiendo de su origen: diaclasas, planos de estratificación, foliación, entre otras [9].

El comportamiento mecánico del macizo rocoso está determinado por la roca intacta y las discontinuidades en conjunto, por ende, estudiar las propiedades de estos dos componentes es esencial para definir el comportamiento del macizo rocoso[9].

En la Figura 1 se muestra un macizo rocoso con la sección transversal de una galería indicándose sus miembros principales.

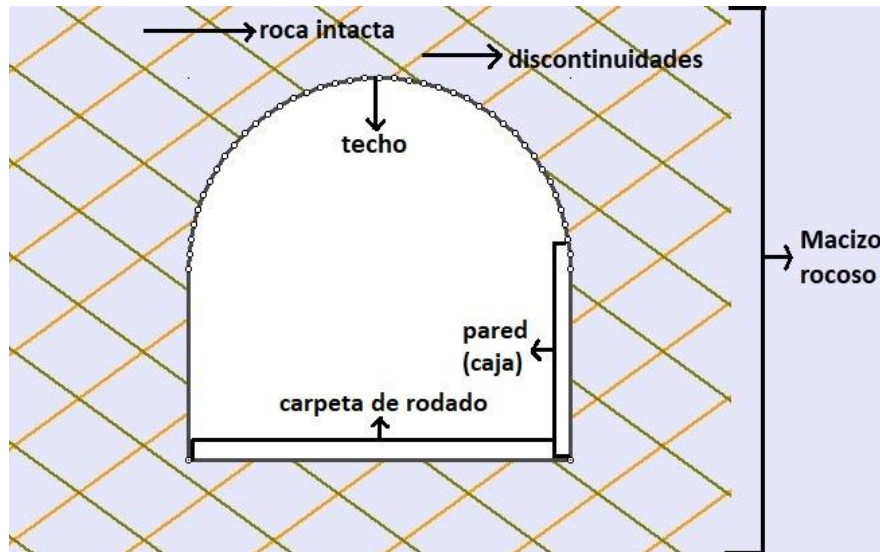


Figura 1: Miembros principales de un macizo rocoso y una galería

La construcción de galerías requiere conocer las condiciones del macizo rocoso, agua y campo de tensiones en las que se realizará la labor; para ello es fundamental que se realicen estudios geológicos y geotécnicos con el fin de determinar las características del macizo rocoso (propiedades de roca intacta y discontinuidades), realizar una descripción geológica, condiciones hidrogeológicas y distribución y magnitud de esfuerzos [5].

## 2.2) Sistemas de clasificación del macizo rocoso

Los sistemas de clasificación del macizo rocoso son sistemas empíricos que tienen por objetivo determinar la calidad del macizo rocoso y, en su mayoría, recomendar un sistema de soporte para la excavación a realizar. En estos sistemas se asignan valores numéricos a los parámetros más importantes que influyen en las excavaciones subterráneas a través de un análisis cuantitativo y cualitativo previo. En esta sección se explican 4 sistemas ampliamente usados en los proyectos de construcción de galerías.

### 2.2.1) Rock Quality Designation

El *Rock Quality Designation* (RQD) fue desarrollado inicialmente por Deere entre los años 1963 y 1967. Corresponde a un índice que clasifica la calidad del macizo rocoso en 5 categorías (excelente, buena, regular, mala y muy mala) distribuidas en porcentaje de 0 a 100% [10]. La clasificación del

macizo rocoso es determinada a través de los largos entre discontinuidades que cumplen cierta condición, tal como se muestra en los tres procedimientos siguientes para calcularla.

### Primer procedimiento

Deere en el año 1963 [11], con un testigo base de 150 cm de largo, mide todos los trozos que superan los 10 cm y luego los suma y los divide por el largo del sondaje base tal como se muestra en la Ecuación 1.

$$RQD = \frac{\sum \text{Testigos de sondeo de longitud } > 10 \text{ cm}}{L_{tot}} 100\% \quad (1)$$

Donde,  $L_{tot}$ : longitud total del sondaje [cm].

Los rangos de valores del RQD asociados a cada categoría de la calidad de la masa rocosa para el primer procedimiento se muestran en la Tabla 1.

*Tabla 1: Clasificación de masa rocosa según RQD (Deere [11])*

Calidad de masa rocosa	RQD [%]
Muy mala	0-25
Mala	25-50
Regular	50-75
Buena	75-90
Excelente	90-100

Un ejemplo del cálculo del RQD utilizando el primer procedimiento, se muestra en la Figura I-1 (Anexo I).

### Segundo procedimiento

En el año 1976 Priest y Hudson [12] desarrollaron una fórmula para calcular el RQD en función de un parámetro  $\lambda$  que indica la cantidad de fracturas por unidad de longitud medidas en terreno, como se presenta en la Ecuación 2.

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1) \quad (2)$$

Donde,  $\lambda$ : número de fisuras/ metro lineal [f/m].

Los rangos de valores del RQD asociados a cada categoría de la calidad de la masa rocosa para el segundo procedimiento se muestran en la Tabla 2.

*Tabla 2: Clasificación de masa rocosa según RQD (Priest & Hudson [12])*

Calidad de masa rocosa	RQD [%]
Muy mala (> 27 fracturas por m)	0-25
Mala (20 - 27 fracturas por m)	25-50
Regular (13 - 19 fracturas por m)	50-75
Buena (8 - 12 fracturas por m)	75-90
Excelente (0 - 7 fracturas por m <sup>3</sup> )	90-100

### Tercer procedimiento

En el año 1982 Palmström [13] desarrolla una fórmula para calcular el RQD en función de un parámetro  $J_v$  (*joint volumetric number*) que indica la cantidad de fracturas por metro cúbico, tal como se indica en la Ecuación 3.

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (3)$$

Donde,  $J_v$ : número de fisuras por metro cúbico.

Se calcula sumando la cantidad de fisuras presentes en cada uno de los ejes de un metro de largo (eje x,y,z).

Los rangos de valores del RQD asociados a cada categoría de la calidad de la masa rocosa para el tercer procedimiento se muestran en la Tabla 3.

*Tabla 3: Clasificación de masa rocosa según RQD (Palmström [13])*

Calidad de masa rocosa	RQD [%]
Muy mala (> 27 fracturas por m <sup>3</sup> )	0-25
Mala (20 - 27 fracturas por m <sup>3</sup> )	25-50
Regular (13 - 19 fracturas por m <sup>3</sup> )	50-75
Buena (8 - 12 fracturas por m <sup>3</sup> )	75-90
Excelente (0 - 7 fracturas por m <sup>3</sup> )	90-100

### **2.2.2) Q de Barton**

El sistema de clasificación del macizo rocoso Q fue desarrollado por Barton el año 1974 [4] basándose en un análisis de datos de más de 200 túneles en los que se consideraba la calidad de la

roca presente en relación al sistema de soporte aplicado. El sistema Q clasifica la calidad del macizo rocoso en 9 categorías que oscilan en los valores del 0-1000 analizando 6 parámetros y, además, recomienda un determinado soporte para la excavación. La fórmula para el cálculo del sistema Q se muestra en la Ecuación 4.

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

Donde, *RQD*: *Rock Quality Designation* [%], *J<sub>n</sub>*: índice de cantidad de familias de discontinuidades, *J<sub>r</sub>*: índice de rugosidad de discontinuidades, *J<sub>a</sub>*: índice de grado de alteración de discontinuidades, *J<sub>w</sub>*: coeficiente reductor por la presencia de agua y *SRF*: (*Stress Reduction Factor*) coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso.

Los valores numéricos asociados a cada parámetro del sistema Q se presentan en el Anexo II.

El rango de valores del sistema Q para cada calidad de masa rocosa se muestra en la Tabla 4.

*Tabla 4: Clasificación de masa rocosa según sistema Q*

Calidad de masa rocosa	Q
Roca excepcionalmente mala	0,001-0,01
Roca extremadamente mala	0,01-0,1
Roca muy mala	0,1-1
Roca mala	1-4
Roca media	4-10
Roca buena	10-40
Roca muy buena	40-100
Roca extremadamente buena	100-400
Roca excepcionalmente buena	400-1000

Barton recomienda un determinado tipo de soporte para la excavación y define a través del gráfico de la Figura 2 el sistema de reforzamiento adecuado en función del valor Q, *ESR* y el *Span*. Donde el parámetro *ESR* corresponde a un valor que depende del tipo de excavación y el *Span* corresponde al tamaño de la excavación [m]. Los valores del *ESR* y el *Span* máximo que puede tener una excavación sin fortificación se muestran en la Tabla 5 y la Ecuación 5 respectivamente [4].

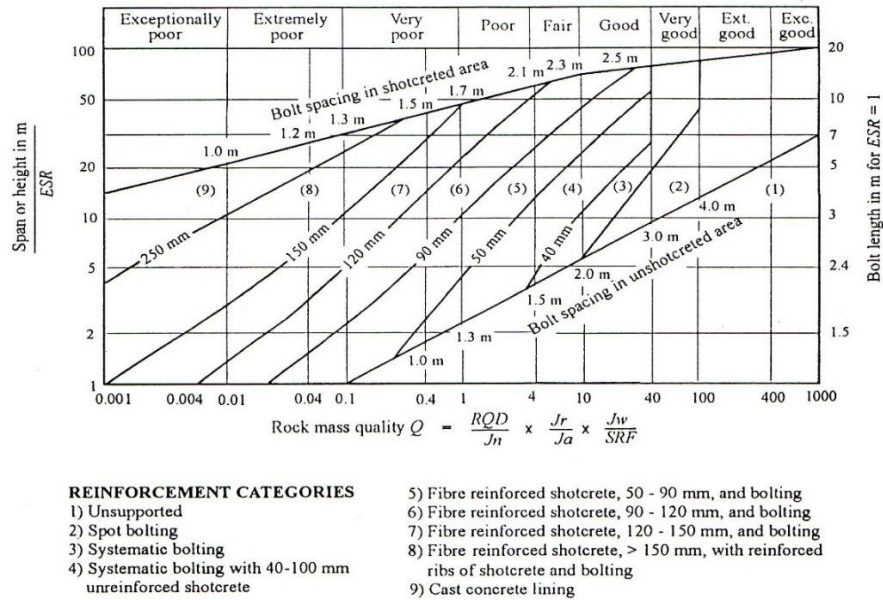


Figura 2: Gráfico para determinar sistema de soporte a través del sistema Q [4]

Tabla 5: Rango de valores ESR [4]

Categoría de Excavación	ESR
Excavaciones mineras (temporales)	3,0-5,0
Pozos verticales circulares	2,0-5,0
Pozos verticales rectangulares	2,0
Túneles mineros permanentes	
Túneles hidráulicos sin presión	1,6
Túneles exploratorios	
Cavidades de almacenamiento	1,3
Túneles de carretera y ferrocarril de sección pequeña	
Centrales hidroeléctricas subterráneas	1,0
Túneles de carretera y ferrocarril de sección grande	
Portales e intersecciones de túneles	
Centrales nucleares subterráneas	0,8
Estaciones de metros	

$$SLuz\ máxima = 2 * ESR * Q^{0,4} \quad (5)$$

### 2.2.3) Rock Mass Rating

El sistema de clasificación *Rock Mass Rating* (RMR) fue desarrollado por Bieniawski el año 1973 [1]. Este sistema clasifica la calidad del macizo rocoso en 5 categorías que comprenden los valores del 0 al 100 basándose para el cálculo en 5 parámetros y, además, recomienda un sistema de soporte a la excavación. El cálculo del RMR está definido por la Ecuación 6.

$$RMR = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 \quad (6)$$

Donde,  $J_1$ : representa la resistencia a la compresión uniaxial de la roca,  $J_2$ : representa el RQD,  $J_3$ : representa el espaciamiento de las discontinuidades,  $J_4$ : representa la condición de discontinuidades y  $J_5$ : representa la condición de agua subterránea.

Posteriormente, en el año 1989 Bieniawski [14] añade un nuevo parámetro al sistema RMR, el parámetro  $J_6$  que representa la orientación de las discontinuidades. El nuevo cálculo del RMR queda definido por la Ecuación 7.

$$RMR = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6 \quad (7)$$

Donde,  $J_1$ : representa la resistencia a la compresión uniaxial de la roca,  $J_2$ : representa el RQD,  $J_3$ : representa el espaciamiento de las discontinuidades,  $J_4$ : representa la condición de discontinuidades,  $J_5$ : representa la condición de agua subterránea y  $J_6$ : representa la orientación de las discontinuidades.

Los valores numéricos asociados a cada parámetro del sistema RMR se presentan en el Anexo III.

Los rangos de valores del RMR asociado a cada categoría de la calidad de la masa rocosa se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Clasificación de masa rocosa según RMR [1]

Calidad de la masa rocosa	RMR
Muy mala	0-20
Mala	21-40
Regular	41-60
Buena	61-80
Muy buena	81-100

Como se menciona anteriormente, el sistema RMR recomienda un sistema de soporte determinado dependiendo de la calidad de la masa rocosa obtenida. Los elementos de fortificación indicados para este sistema se muestran en el Anexo IV.

#### 2.2.4) Geological Strength Index

El sistema de clasificación de macizo rocoso *Geological Strength Index* (GSI) fue desarrollado inicialmente por Hoek en 1994 [3]. Este sistema clasifica la masa rocosa según la estructura del macizo y la condición de las discontinuidades. Los rangos numéricos para clasificar la masa rocosa



van del 0 al 100. En la Tabla 7 se muestra el valor del GSI con su respectiva clasificación del macizo rocoso.

Tabla 7: Cuadro general para las estimaciones de GSI a partir de observaciones geológicas [15]

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000) From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90				N/A	N/A
BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80					
VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70					
BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60					
DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50					
LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	40					
	30					
	20					
	10					
	N/A	N/A				

### 2.3) Criterios de falla

Los criterios de falla corresponden a formulaciones empíricas donde se predice numéricamente las condiciones máximas permitidas antes que se produzca un fallo en el material. Existe una gran variedad de criterios de falla, en esta sección, para la roca intacta, se revisa el criterio de Mohr-Coulomb y el criterio generalizado de Hoek-Brown y, para las discontinuidades, el criterio de Barton-Bandis.

#### 2.3.1) Criterio de Mohr-Coulomb

El criterio de falla de Mohr-Coulomb fue desarrollado de forma inicial por Coulomb el año 1773 y posteriormente modificado por Mohr el año 1900. En la ingeniería geotécnica es el criterio de falla más común que se encuentra y describe una relación lineal entre las tensiones normales y de corte (o las tensiones principales máximas y mínimas) al momento de ocurrir el fallo.



En la actualidad, una gran cantidad de programas y métodos de análisis geotécnico utilizan el criterio de falla de Mohr-Coulomb. La fórmula para calcular la resistencia a la falla por corte directo del criterio viene dada por la Ecuación 8 [16].

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (8)$$

Donde,  $\tau$ : resistencia a la falla por corte directo [MPa],  $c$ : cohesión del material [MPa],  $\sigma_n$ : esfuerzo normal [MPa] y  $\phi$ : ángulo de fricción [°].

Para un mismo material, bajo diferentes condiciones de carga, es posible determinar (a través de ensayos triaxiales) los diferentes círculos de Mohr. Una aproximación para modelar la curvatura de la envolvente de falla en tracción es utilizar la teoría de grietas de Griffith, donde el criterio de Mohr-Coulomb queda definido en función de los esfuerzos principales a través de la Ecuación 9 [17].

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (9)$$

Donde,  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ : esfuerzos principales mayor y menor [MPa],  $c$ : cohesión del material [MPa] y  $\phi$ : ángulo de fricción [°].

El gráfico que muestra el comportamiento del criterio de falla de Mohr-Coulomb queda definido por la Figura 3.

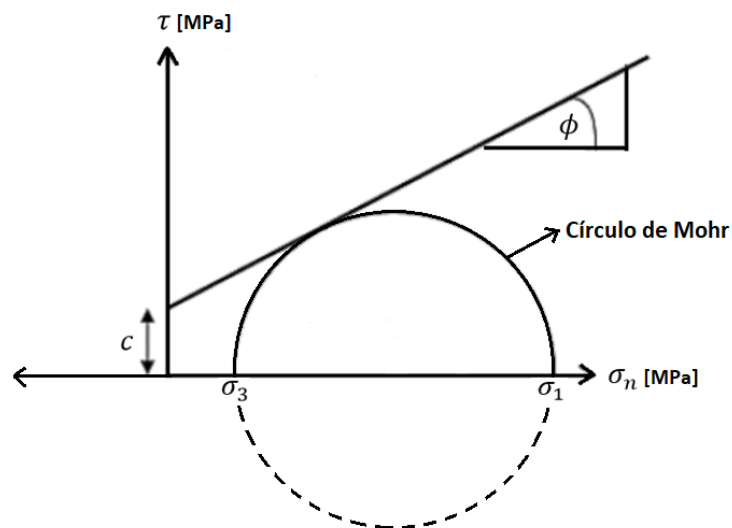


Figura 3: Comportamiento de criterio de falla de Mohr-Coulomb

### 2.3.2) Criterio generalizado de Hoek-Brown

El criterio generalizado de Hoek-Brown proviene del criterio de Hoek-Brown desarrollado el año 1980 [18], el cual intentaba estimar la resistencia de los macizos rocosos. El año 1997 Hoek y Brown [19] desarrollan el criterio generalizado, mejorando su versión anterior y agregando nuevos parámetros. El criterio generalizado se muestra en la Ecuación 10.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \left\{ \begin{array}{l} m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \\ s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \end{array} \right. \quad (10)$$

Donde,  $\sigma_1'$  y  $\sigma_3'$ : esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura [MPa],  $\sigma_{ci}$ : resistencia a la compresión uniaxial del material intacto [MPa],  $m_b$ : valor reducido de la constante del material  $m_i$ ,  $GSI$ : *Geological Strength Index*,  $s$ : constante del macizo rocoso,  $a$ : constante del macizo rocoso y  $D$ : factor que indica el grado de alteración del macizo rocoso, varía desde 0 para macizos rocosos inalterados y 1 para macizos rocosos muy alterados.

El gráfico que muestra el comportamiento del criterio generalizado de Hoek-Brown queda definido por la Figura 4, en el cual, se evidencia el comportamiento no lineal en comparación al criterio de falla de Mohr-Coulomb.

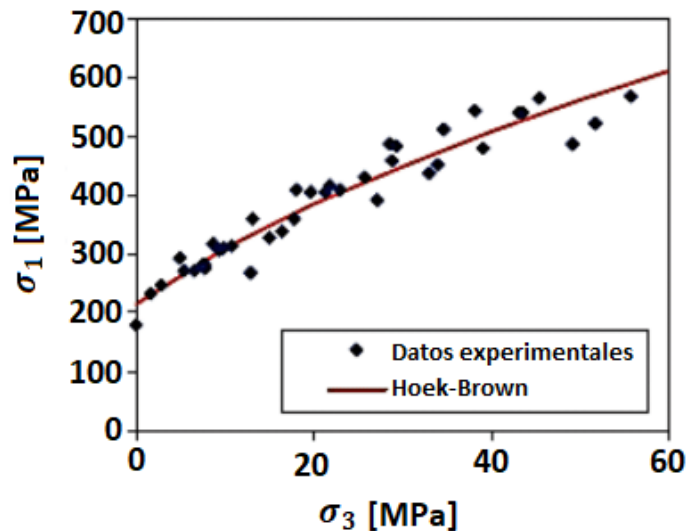


Figura 4: Comportamiento de criterio generalizado de Hoek-Brown [20]

### 2.3.3) Criterio de Barton-Bandis

El criterio de resistencia al corte de discontinuidades de Barton-Bandis fue desarrollado en el año 1976 por Barton y Choubey [21] y, posteriormente, fue corregido por Barton y Bandis el año 1982 [22]. Relaciona la resistencia al corte con el esfuerzo normal, como se muestra en la Ecuación 11.

$$\tau = \sigma_n \tan[\phi_b + JRC * \log_{10} \left( \frac{JCS}{\delta_n} \right)] \quad (11)$$

Donde,  $\tau$ : resistencia al corte de las discontinuidades [MPa],  $\sigma_n$ : esfuerzo normal al plano de la discontinuidad [MPa],  $\phi_b$ : ángulo básico de fricción interna de una superficie de deslizamiento [°],  $JRC$ : coeficiente que expresa el nivel de rugosidad de la discontinuidad y  $JCS$ : resistencia a la compresión de la pared de la discontinuidad [MPa].

Para determinar el valor del  $JRC$ , se utiliza la Figura 5 que muestra el perfil de rugosidad de las discontinuidades asociado al rango de valores del coeficiente.

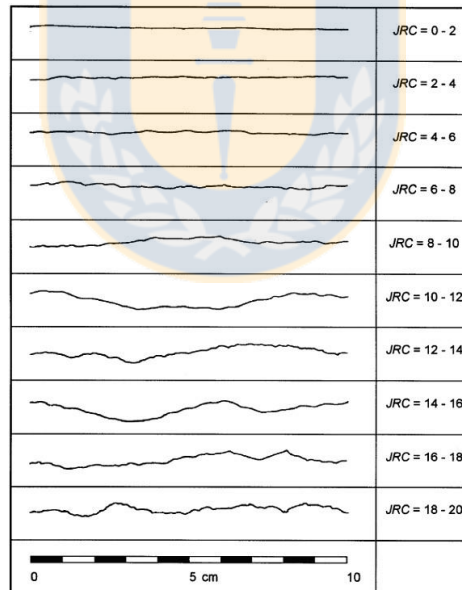


Figura 5: Perfiles de rugosidad de las discontinuidades que muestra el rango del JRC asociado [21]

El valor del  $JCS$  se determina utilizando la Figura 6 que muestra la relación entre los rebotes que entrega el martillo de Schmidt, la resistencia a la compresión y el peso específico de la roca.

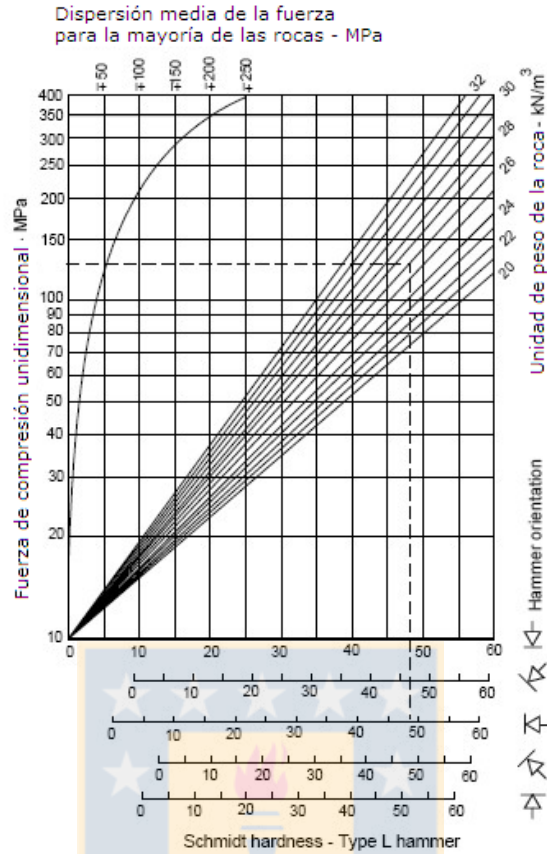


Figura 6: Gráfico para determinar el JCS [21]

En la Figura 7 se muestra el comportamiento que tendrá el criterio de falla para 3 casos distintos en los cuales se varía el  $JCS$  y se mantiene constante el  $\phi_b$ :  $30^\circ$  y el  $JRC$ : 20.

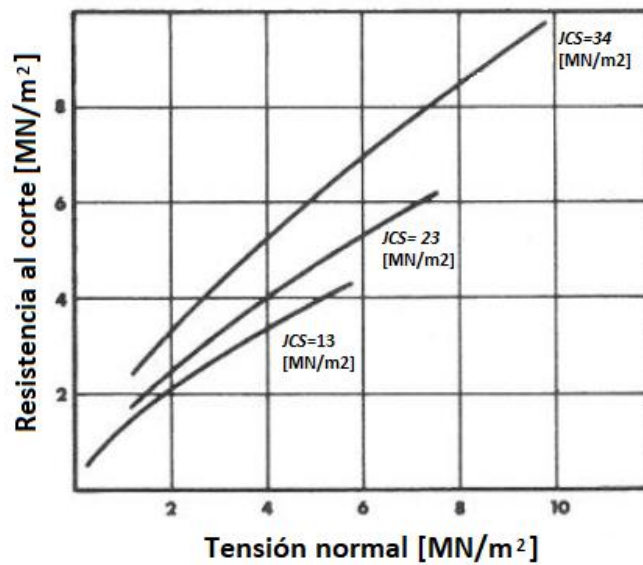


Figura 7: Comportamiento del criterio de falla de Barton-Bandis [21]

## 2.4) Elementos de estabilización

Los elementos de estabilización de galerías tienen por objetivo aumentar la seguridad, evitando que colapsen o que se produzcan caídas de rocas o cuñas tanto del techo como de las paredes de la galería [17].

El grado de fortificación requerido dependerá de [17]:

- El método de explotación
- Función de la excavación
- Calidad del macizo rocoso
- Campo de tensiones
- Vida útil de la excavación
- El grado de mecanización
- Tipo de equipamientos
- Costos y requerimientos adicionales

En las Tablas 8 y 9 se muestran 2 tipos de clasificaciones de sistemas de fortificación, por un lado, en base al objetivo que se quiere lograr y, por otro, en base al momento en que entran en acción. Además, para apoyar la descripción de la clasificación del sistema de fortificación según el objetivo que se quiere lograr se muestra la Figura 8.

*Tabla 8: Clasificación de sistema de fortificación según objetivo [17]*

<b>Objetivo</b>	<b>Descripción</b>
Soporte	De cargas o bloques individuales
Refuerzo	Evitar separación y deslizamiento de bloques a lo largo de planos de debilidad, resistencia del macizo
Retención	Mantener confinados los elementos de roca fracturada

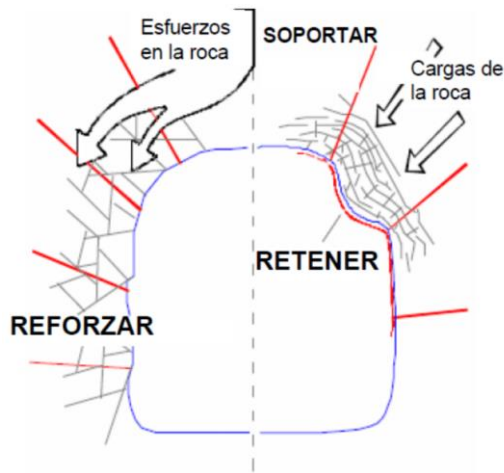


Figura 8: Explicación visual de clasificación de sistema de fortificación según objetivo que se quiere lograr [17]

Tabla 9: Clasificación de sistema de fortificación según momento en que entra en acción [17]

Momento en que entra en acción	Descripción
Activo	Corresponde a los elementos que adquieren carga al instante de ser instalados. Ejemplos: pernos tensionados, cables y segmentos de concreto
Pasivo	Corresponden a los elementos que adquieren carga a medida que la roca se va deformando. Ejemplos: marcos de acero, maderas, pernos, cables y sistemas de anclaje no tensionados

Hoy en día la instalación de sistemas de fortificación en la construcción de galerías es de carácter primordial. Existe una diversa cantidad de elementos que hacen más segura la excavación, como por ejemplo los pernos, *shotcrete*, mallas, arcos, cables, relleno, *jet grouting*, etc. En esta sección se presentan los elementos de estabilización más usados para fortificar galerías.

#### 2.4.1) Pernos

Un perno es un elemento de estabilización de refuerzo que está constituido por metal (normalmente acero o hierro), largo, cilíndrico, con cabeza redonda por un extremo y asegurada con una chaveta, una tuerca o un remache por otro, que tiene la característica de unir y fijar piezas de gran volumen [7].

Existen varios tipos de pernos utilizados para la estabilidad de galerías, algunos de éstos se presentan en la Tabla 10. Además, la Figura 9 muestra como son estos tipos de pernos físicamente.

Tabla 10: Tipos de pernos con sus características respectivas [17]

Tipo de perno	Características
Adherencia con resina	Alta capacidad de carga y resistencia a vibraciones por tronadura
Fricción de anclaje mecánico	Provee refuerzo inmediato y es adecuado para roca masiva
Fricción de anclaje mecánico y lechado	Usado en ambientes altamente corrosivos o cuando se necesita refuerzo permanente
Fricción de baja carga ( <i>Split Sets</i> y <i>Swelllex</i> )	Capacidad de carga generada mediante la fricción a lo largo del perno
Auto-perforantes	Usado en malas condiciones de terreno, genera refuerzo inmediato

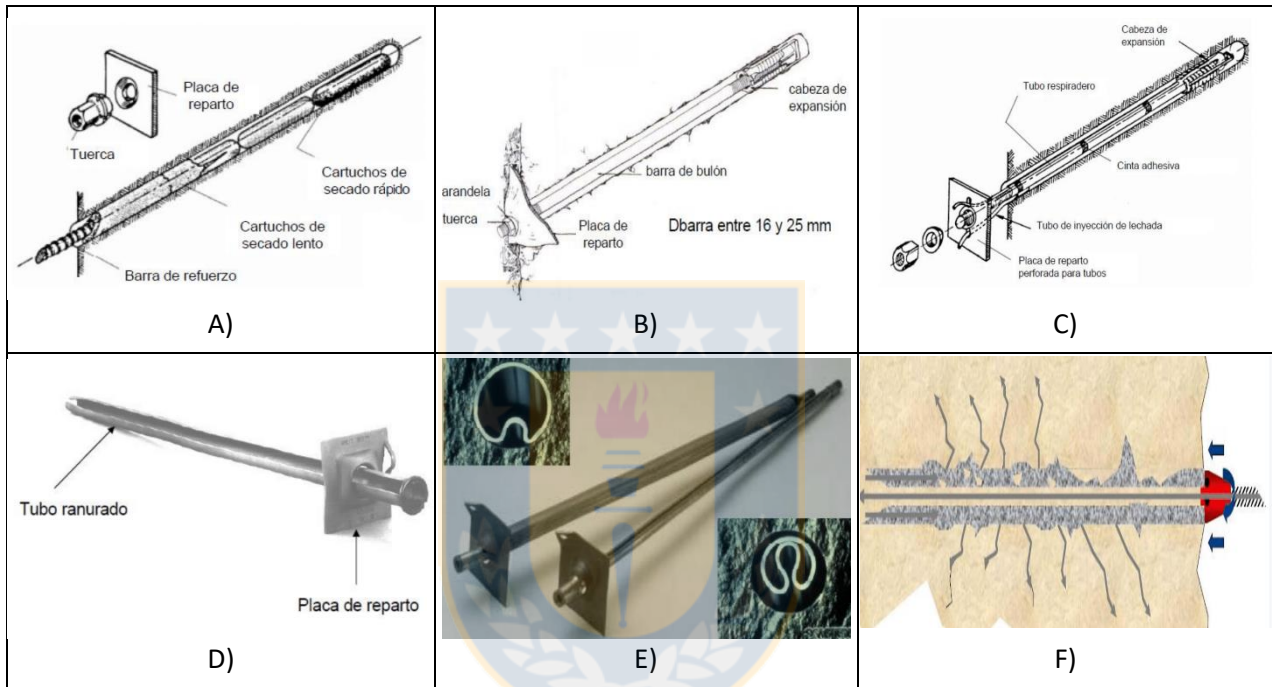


Figura 9: A) Perno de adherencia con resina. B) Perno de fricción de anclaje mecánico. C) Perno de fricción de anclaje mecánico y lechado. D) Perno de fricción de baja carga Split Set. E) Perno de fricción de baja carga Swellex. F) Perno auto-perforante [17]

#### 2.4.2) Mallas

La malla corresponde a un elemento de estabilización de retención que genera un gran control de deformaciones y de roca fracturada entre pernos. Las mallas son fabricadas por alambre de acero especial de alta resistencia. Suelen usarse en macizos rocosos muy alterados o en áreas donde se producen estallidos de roca [17].

Existen 2 tipos de mallas, soldadas y trenzadas, como se observa en la Tabla 11. Además, la Figura 10 muestra como son estos tipos de malla físicamente.



Tabla 11: Tipos de mallas con sus características respectivas [17]

Tipo de mallas	Características
Soldadas	Sus uniones son más sólidas y tienen terminaciones de alta calidad. Son fáciles y rápidas de instalar, la aplicación del <i>shotcrete</i> es más fácil y es preferible usarlas en superficies suaves
Trenzadas	Posee gran flexibilidad, se adapta fácilmente a superficies irregulares y tiene la capacidad de absorber importantes cantidades de energía. Eficiente en la retención de bloques pequeños inestables



Figura 10: A) Malla soldada. B) Malla trenzada [17]

### 2.4.3) Hormigón proyectado

El hormigón proyectado o *shotcrete* es un elemento de estabilización de retención que corresponde a una mezcla de cemento, agua, agregados (grava/arena) y aditivos que es transportado a través de una manguera, que se lanza neumáticamente, a alta velocidad, contra una superficie. La fuerza con que el hormigón llega a la superficie, hace que la mezcla se compacte logrando que esta se sostenga a sí misma, sin escurrir, incluso en aplicaciones verticales [17].

Como la palabra *shotcrete* en terreno es más utilizada que el hormigón proyectado, se usa ésta de aquí en adelante.

Algunas propiedades importantes del *shotcrete* son la consistencia adecuada y la resistencia temprana en su estado fresco (sobre todo para el soporte de excavaciones subterráneas), y la resistencia a la compresión y durabilidad en su estado endurecido [23].

Desde la década de los noventa, el hormigón proyectado reforzado con fibra (FRS) está reemplazando progresivamente a la malla de acero como principal método de soporte en minas subterráneas. Esto se debe a [23]:



- Soporte más resistente con FRS en combinación con pernos de anclaje
- Incremento de la seguridad del operador al trabajar desde zonas más seguras
- Mejora en los tiempos de ejecución de la obra
- Disminución de la necesidad de rehabilitar el soporte

En la Figura 11 se muestra a dos operadores aplicando *shotcrete* a una de las paredes de una galería.



*Figura 11: Aplicación de shotcrete en una galería [17]*

#### **2.4.4) Arcos**

El arco es un elemento de estabilización de soporte, ya que su función consiste en sostener el peso del macizo rocoso presente en el techo y paredes de la excavación. Generalmente los arcos son construidos con acero y su geometría dependerá de la sección transversal que presente la galería. Los dos tipos de arcos más comunes son los rígidos y los deslizantes. Los arcos rígidos se componen de dos o 3 secciones unidas y fijas, poseen una alta resistencia, se usan en excavaciones con poca deformación, con esfuerzos no muy altos y masas rocosas muy fracturadas. Los arcos deslizantes se componen de 3 secciones que deslizan entre sí y ajustados con uniones de tornillo, combinan su alta resistencia con la propiedad deslizante que poseen para ceder cuando la presión alcanza un determinado valor y así tener deformaciones controladas [17]. En la Figura 12 se muestra como son estos dos tipos de arcos.

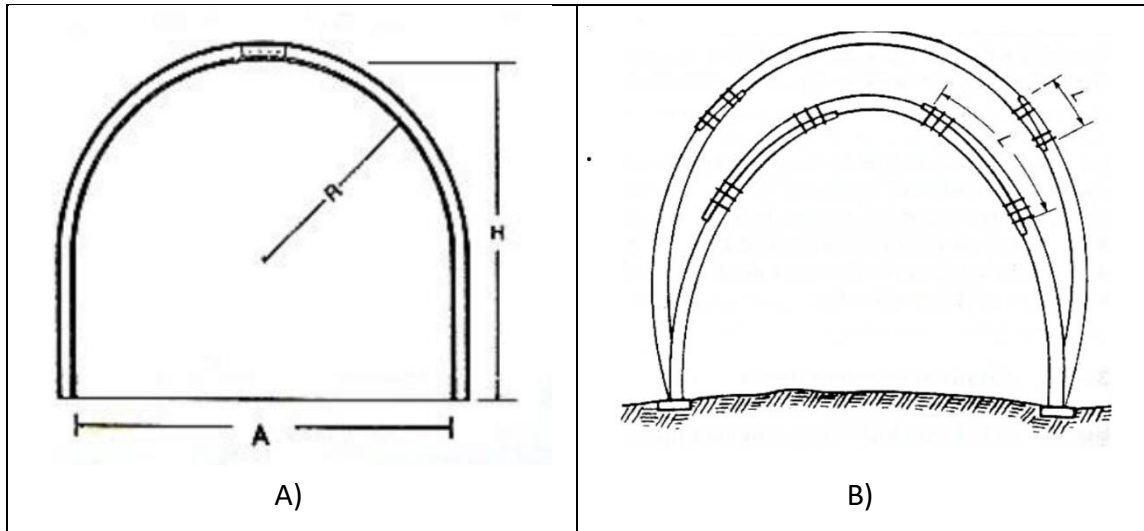


Figura 12: A) Arco rígido. B) Arco deslizante [17]

## 2.5) Herramientas de diseño

Con el importante avance de la investigación en el ámbito ingenieril y el aumento exponencial de la tecnología, se hace indispensable poseer herramientas con las cuales modelar, diseñar y dar solución a diferentes sistemas que se quieren analizar. Para el caso específico de las excavaciones subterráneas, es de gran importancia la existencia de aplicaciones informáticas que puedan entregar de forma rápida y confiable los diseños, reforzamientos y zonas de falla que se pueden presentar en la excavación, todo esto con el fin de analizar cuáles son las condiciones ideales para que las galerías no se derrumben y posean una estabilidad adecuada. A continuación, se presenta el método de los elementos finitos y la teoría de bloques, en los cuales se basa el funcionamiento de algunas aplicaciones informáticas.

### 2.5.1) Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF en castellano y FEM en inglés) es un método numérico que tiene por objetivo entregar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales complejas. El método divide un sistema continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Como el número de elementos es limitado, se les llama “elementos finitos” y al conjunto de elementos y nodos se le denomina “malla” [24,25].

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad),

que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no [24,25].

Típicamente el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones) [24,25].

Basándose en el método de los elementos finitos, las distintas compañías del ámbito informático han ofrecido diversos tipos de aplicaciones informáticas útiles como herramientas de diseño, los cuales han sido ampliamente utilizados en la estabilidad de excavaciones, tal como se muestra en la Tabla 12.

*Tabla 12: Aplicaciones informáticas que se basan en el método de los elementos finitos*

<b>Software</b>	<b>Compañía</b>	<b>Descripción</b>
RS2	Rocscience	Modela y analiza excavaciones subterráneas incluyendo sus sistemas de soporte
GEOS MEF	Fine	Modela y analiza problemas geotécnicos como estabilidad de taludes y excavaciones
RFEM	Dlubal	Modela, calcula y dimensiona problemas estructurales de ingeniería civil
Abaqus FEA	Abaqus	Realiza simulación de impactos, problema de contacto de sólidos, térmicos y fluidos

En particular, para el desarrollo de esta memoria, se utiliza el *software Rock and Soil 2-dimensional analysis program (RS2)* de Rocscience, que se basa en el método de los elementos finitos. Es un programa de elementos finitos 2D para aplicaciones de suelo y rocas, el cual se utiliza para crear modelos complejos como, por ejemplo: galerías en roca débil o muy fracturada, y de esta manera modelar su soporte respectivo incluyendo una gran variedad de elementos de estabilidad [26].

### **2.5.2) Teoría de bloques**

La Teoría de Bloques es una herramienta para evaluar la estabilidad de excavaciones subterráneas y de taludes en masas rocosas duras y fisuradas. Su objetivo primordial es conocer el grado de estabilidad del conjunto de bloques formados por distintas discontinuidades presentes en

el macizo rocoso, antes y después de que un soporte sea aplicado. El principio fundamental de la Teoría de Bloques es que la falla del macizo rocoso se inicia por el movimiento de ciertos bloques expuestos en una superficie de excavación. Por lo tanto, si estos bloques denominados cuñas claves, se mantienen en su lugar, se previene el movimiento de otros bloques y por ende se evita una posible falla en cadena [27].

La finalidad de la Teoría de Bloques es producir técnicas para especificar la formación de cuñas críticas que intersectan a una excavación; la cual es aplicable a la ingeniería de rocas, especialmente en excavaciones en roca dura donde los movimientos de los bloques predefinidos precipitan la falla [27].

Basándose en la Teoría de Bloques, las distintas compañías del ámbito informático han ofrecido diversos tipos de aplicaciones informáticas útiles como herramientas de diseño, los cuales han sido ampliamente utilizados en la estabilidad de excavaciones, tal como se muestra en la Tabla 13.

*Tabla 13: Aplicaciones informáticas que se basan en la Teoría de Bloques*

<b>Software</b>	<b>Compañía</b>	<b>Descripción</b>
Unwedge	Rocscience	Calcula y analiza las cuñas potenciales a deslizar en una galería
GEO5 Estabilidad de Rocas	Fine	Estudia estabilidad de taludes rocosos para un tipo de rotura específica

### CAPÍTULO 3 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

Es necesario definir los escenarios de interés para evaluar el sistema Q, sobre los cuales se realizarán las simulaciones en el *software* RS2, para ello, Barton ofrece 9 categorías para clasificar el macizo rocoso según su calidad, como se muestra en la Tabla 4. En base a la división de categorías del sistema Q se escogen 5 categorías a modelar. No se pueden escoger las categorías extremadamente mala y excepcionalmente mala por dos razones, la primera, en caso de lograr simularlas, la cantidad de elementos y nodos producidos supera las capacidades del hardware por ende no se podrán obtener resultados, y la segunda razón, es que al introducir el valor de una categoría del sistema Q al *software*, éste solo acepta la clasificación GSI y para pasar de Q a GSI el valor, la fórmula a utilizar solo acepta un GSI mayor a 23 por lo tanto las dos categorías anteriormente mencionadas quedan descartadas ya que sus valores serán inferiores a 23. Con respecto a las categorías extremadamente buena y excepcionalmente buena, se alejan del objetivo para analizar sistemas de soportes recomendados por Barton ya que son más próximas a familiarizarse con una roca intacta en la cual se le pueden ingresar muy pocas discontinuidades y por ende se agrega la restricción de no considerar un GSI mayor a 75 por el comportamiento que poseen con el fin de estudiar la presencia de discontinuidades. En la Tabla 14 se indica con color anaranjado las categorías de calidad de masa rocosa que se selecciona para modelar en la investigación.

*Tabla 14: Calidad de masa rocosa a simular en color anaranjado*

Calidad de masa rocosa	Q
Roca excepcionalmente mala	0,001-0,01
Roca extremadamente mala	0,01-0,1
Roca muy mala	0,1-1
Roca mala	1-4
Roca media	4-10
Roca buena	10-40
Roca muy buena	40-100
Roca extremadamente buena	100-400
Roca excepcionalmente buena	400-1000

#### 3.1) Transformación de valores del sistema Q a sistema GSI

Los límites de los rangos de valores que adopta el sistema Q en función de la calidad de masa rocosa se transforman al sistema GSI. Para ello, en primer lugar, el límite inferior y superior del rango de valores del sistema Q del año 1994 correspondiente a cada calidad de masa rocosa se transforma

a RMR del año 1989 utilizando la Ecuación 12 [28]. Posteriormente, el valor del  $RMR_{89}$  obtenido se transforma a GSI utilizando la Ecuación 13 [3]. Los resultados obtenidos para todas las categorías se muestran en la Tabla 15.

$$RMR_{89} = 8,2 \ln(Q_{94}) + 45,2 \quad (12)$$

$$GSI = RMR_{89} - 5, \text{ para } GSI > 23 \quad (13)$$

Tabla 15: Resultados valores Q a GSI

Calidad de masa rocosa	Rango Q	GSI inferior	GSI superior
Muy mala	0,1-1	21,32	40,20
Mala	1-4	40,20	51,57
Regular	4-10	51,57	59,08
Buena	10-40	59,08	70,45
Muy buena	40-100	70,45	77,96

### 3.2) Condición de discontinuidades del sistema RMR (1989) y RQD apropiados para utilizar

Con el fin de obtener un valor de GSI dentro de los límites previamente establecidos para cada calidad de masa rocosa, se procede a utilizar la Ecuación 14 [29] en la cual se utilizan valores de  $Jcond_{89}$  (condición de discontinuidades del sistema RMR año 1989) y  $RQD$  convenientes para cada caso. Para determinar adecuadamente el parámetro  $Jcond_{89}$  se utiliza la Tabla III-4 (Anexo III) utilizando valores que tengan coherencia con la calidad de masa rocosa respectiva. Para determinar adecuadamente el parámetro  $RQD$  se utiliza la Ecuación 15 [12] procurando obtener un valor que tenga consistencia con los rangos de calidad de masa rocosa que ofrece el  $RQD$ . Los resultados obtenidos para todas las categorías se muestran en la Tabla 16.

$$GSI = 1,5Jcond_{89} + \frac{RQD}{2} \quad (14)$$

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1) \quad (15)$$

Donde,  $\lambda$ : número de fracturas/ metro lineal [f/m].

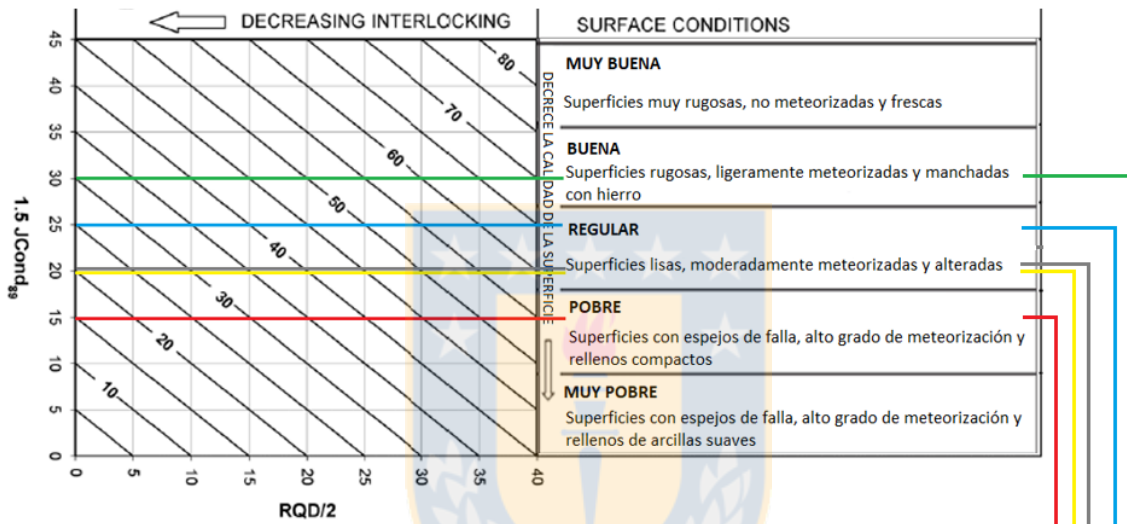
Tabla 16: Resultados GSI en base a parámetros  $Jcond_{89}$  y  $RQD$

Calidad masa rocosa	$Jcond_{89}$	$\lambda$ [f/m]	$RQD$	GSI
Muy mala	15	27	24,87	34,93
Mala	20	24	30,84	45,42
Regular	20	16	52,49	56,25
Buena	25	14	59,18	67,09
Muy buena	30	13	62,68	76,34

### 3.3 Índices de rugosidad ( $J_r$ ) y alteración de discontinuidades ( $J_a$ ) apropiados para utilizar

En base a los valores de  $J_{cond_{89}}$  previamente asumidos se determina el  $J_r$  y  $J_a$  asociando la descripción que entrega la condición de discontinuidades de la Tabla 17 con la descripción que entregan las Tablas II-3 y II-4 (Anexo II) de los parámetros  $J_r$  y  $J_a$  tal como lo muestran las líneas coloreadas. Los valores de  $J_r$  y  $J_a$  que se determinan para cada calidad de masa rocosa se muestran en las Tablas 18 y 19 respectivamente.

Tabla 17: GSI en función de parámetros  $J_{cond_{89}}$  y RQD [29]



3. Rugosidad de las juntas	$J_r$
a) Contacto con las paredes	
b) Contacto con las paredes antes de un corte de 10 cm	
A. Juntas sin continuidad	4
B. Rugosa e irregulares, onduladas	3
C. Lisa, ondulant	2
D. Pulidas, ondulant	1,5
E. Rugosas o irregulares, planares	1,5
F. Lisas, planares	1,0
G. Pulidas, planares	0,5

4. Alteración de las juntas	$J_a$
a) Contacto con las paredes de roca	
A. Relleno soldado, duro, inablandable, impermeable	0,75
B. Paredes de juntas inalteradas, sólo con manchas de oxidación	1,0
C. Paredes ligeramente alteradas, con recubrimiento de minerales inablandables, partículas arenosas, roca desintegrada no arcillosa	2,0
D. Recubrimientos limosos o arenoso-arcillosos, con una pequeña fracción de arcilla (inablandable)	3,0
E. Recubrimientos ablandables o con arcilla de baja fricción o sea caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas (recubrimiento discontinuo de 1-2 mm de espesor menos)	4,0

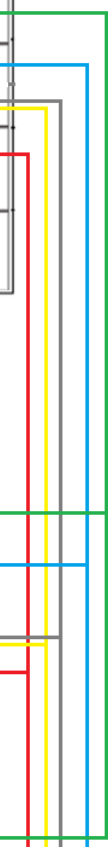


Tabla 18: Parámetro  $J_r$  para cada calidad de masa rocosa

Calidad de masa rocosa	$J_r$
Muy mala	0,5
Mala	1
Regular	1
Buena	2
Muy buena	4

Tabla 19: Parámetro  $J_a$  para cada calidad de masa rocosa

Calidad de masa rocosa	$J_a$
Muy mala	4
Mala	3
Regular	2
Buena	2
Muy buena	1

### 3.4) Índice de cantidad de familias de discontinuidades ( $J_n$ ), coeficiente reductor por presencia de agua ( $J_w$ ) y coeficiente de estado tensional del macizo rocoso ( $SRF$ ) apropiados para utilizar

Para los parámetros  $SRF$ ,  $J_n$ ,  $J_w$  que se utilizan en el sistema Q, no se realiza ningún cálculo específico, si no que se asumen condiciones. Para el parámetro  $SRF$  se escoge “esfuerzo elevado” en todas las categorías de calidad de masa rocosa utilizando la Tabla II-6 (Anexo II). Para el parámetro  $J_n$  se escoge el valor 9 (3 familias de juntas) de la Tabla II-2 (Anexo II) para todas las categorías de calidad de masa rocosa, con el fin de que todos los escenarios se modelen con la misma cantidad de familias de discontinuidades ya que es de interés para el presente trabajo analizar el soporte del sistema Q bajo un mismo patrón estructural. Para el parámetro  $J_w$  se escoge el valor 1 (Excavación seca o flujos bajos) de la Tabla II-5 (Anexo II) para todas las categorías de calidad de masa rocosa ya que se asume que no hay presencia de agua para simplificar las simulaciones y, además, esta fuera del alcance de este trabajo analizar el efecto del agua. Los valores que se escogen se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20: Parámetros  $SRF$ ,  $J_n$ ,  $J_w$  para cada calidad de masa rocosa

Calidad de masa rocosa	$SRF$	$J_n$	$J_w$
Muy mala	0,5	9	1
Mala	0,5	9	1
Regular	0,5	9	1
Buena	0,5	9	1
Muy buena	0,5	9	1



### 3.5) Valores del sistema Q y GSI a utilizar en cada escenario

Finalmente, con los resultados previamente establecidos de los 6 parámetros que requiere el cálculo del valor del sistema Q dado por la Ecuación 4, se obtienen los resultados del valor Q que adopta cada categoría de la calidad de la masa rocosa a representar. Los resultados para el sistema Q y su respectiva transformación a GSI utilizando las Ecuaciones 14 y 15 se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Resultados valores Q y GSI para cada escenario

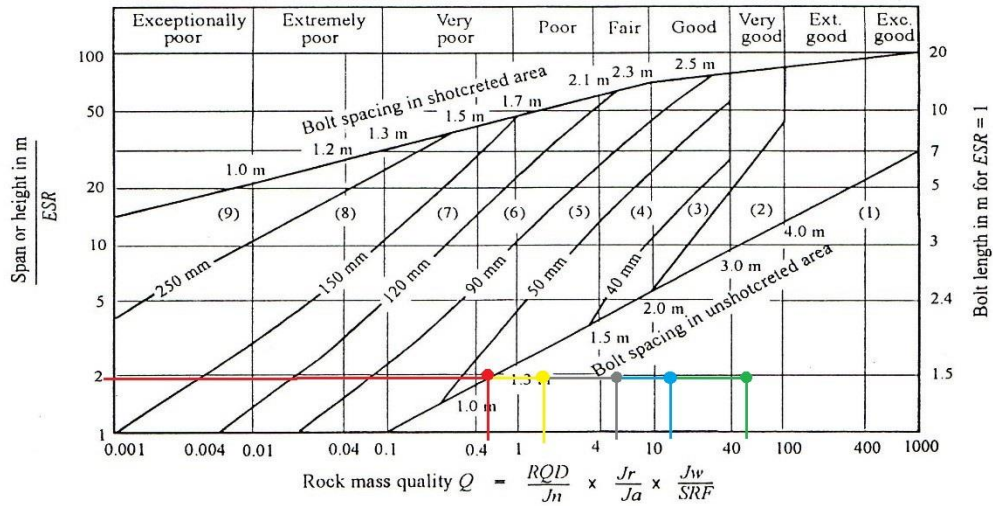
Escenarios	<i>RQD</i>	<i>Jn</i>	<i>Jr</i>	<i>Ja</i>	<i>Jw</i>	<i>SRF</i>	Q	GSI
Muy mala	24,87	9	0,5	4	1	0,5	0,69	37,17
Mala	30,84	9	1	3	1	0,5	2,28	46,98
Regular	52,49	9	1	2	1	0,5	5,83	54,66
Buena	59,18	9	2	2	1	0,5	13,15	61,33
Muy buena	62,68	9	4	1	1	0,5	55,72	73,17

### 3.6) Soporte y fortificación definido para cada escenario

En la Figura 13 (gráfico para determinar sistema de soporte a través del sistema Q) se aprecia con líneas coloreadas la categoría de soporte determinada para cada escenario. Para determinar este soporte, se necesitan los parámetros *ESR* y *Span*; para el *ESR* se utiliza el valor 1,6 dado por la Tabla 5 que corresponde a túneles mineros permanentes y, para el *Span*, se utiliza el valor 3 que corresponde a los 3 metros de ancho (altura) que posee la galería. Los valores y resultados obtenidos de estos parámetros para cada escenario se presentan en la Tabla 22. Por otro lado, la Tabla 23 muestra el soporte y fortificación utilizado para cada escenario.

Tabla 22: Resultados para *Span/ESR*

Escenarios	Q	ESR	Span	Span/ESR
Muy mala	0,69	1,6	3	1,9
Mala	2,28	1,6	3	1,9
Regular	5,83	1,6	3	1,9
Buena	13,15	1,6	3	1,9
Muy buena	55,72	1,6	3	1,9



**REINFORCEMENT CATEGORIES**

- 1) Unsupported
- 2) Spot bolting
- 3) Systematic bolting
- 4) Systematic bolting with 40-100 mm unreinforced shotcrete
- 5) Fibre reinforced shotcrete, 50 - 90 mm, and bolting
- 6) Fibre reinforced shotcrete, 90 - 120 mm, and bolting
- 7) Fibre reinforced shotcrete, 120 - 150 mm, and bolting
- 8) Fibre reinforced shotcrete, > 150 mm, with reinforced ribs of shotcrete and bolting
- 9) Cast concrete lining

Figura 13: Categoría de reforzamiento utilizada para cada escenario a través del gráfico de soporte del sistema Q

Tabla 23: Soporte y fortificación para cada escenario

Escenarios	Span/ESR	Q	Descripción
Muy mala	1,9	0,69	Sistema de pernos con 40-100 mm de <i>shotcrete</i> sin reforzar
Mala	1,9	2,28	Sin reforzamiento
Regular	1,9	5,83	Sin reforzamiento
Buena	1,9	13,15	Sin reforzamiento
Muy buena	1,9	55,72	Sin reforzamiento

## CAPÍTULO 4 MODELAMIENTO DE ESCENARIOS CON LA APLICACIÓN INFORMÁTICA RS2

Las simulaciones de cada escenario en RS2 se realizan para una galería con forma de herradura de dimensiones 3m x 3m y, además, cada escenario modelado se representa con un macizo rocoso de material granodiorita tal como lo muestra la Figura 14.

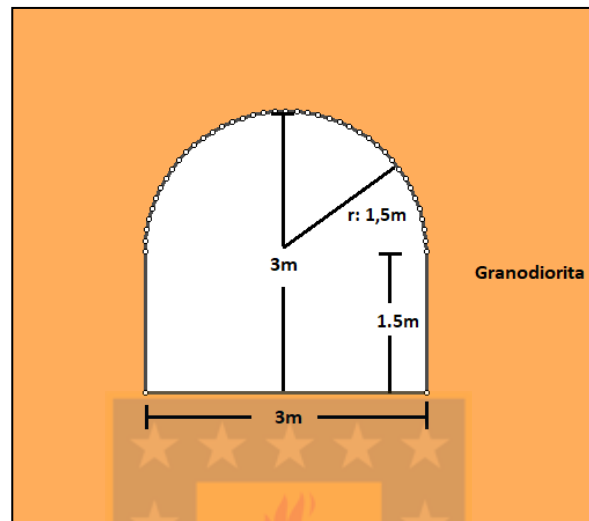


Figura 14: Dimensiones de una galería y tipo de material de macizo rocoso a simular en RS2

Es necesario conocer los parámetros de entrada que requiere el *software* RS2 para poder realizar la simulación lo más real posible. En la Tabla 24 se muestran los parámetros de entrada requeridos para poder realizar las simulaciones.

Tabla 24: Parámetros de entrada requeridos por el software RS2

Propiedades	Inputs
Campo de tensiones	Elevación de la superficie o campo de esfuerzos
	Razón tensión horizontal y vertical, $k$
Material (Granodiorita)	Tipo de comportamiento ( <i>Elastic</i> )
	Peso unitario material [ $MN/m^3$ ]
	<i>Geological Strength Index</i> , GSI
	Resistencia a compresión roca intacta, $\sigma_c$ [MPa]
	Constante de roca intacta, $m_i$
	Factor de disturbancia, $D$
	Módulo de Young roca intacta, $E_i$ [MPa]
	Módulo de Young macizo rocoso, $E_m$ [MPa]
	Módulo de Poisson, $\nu$
	Discontinuidades
<i>Dip</i> [°]	
<i>Dip Direction</i> [°]	
Espaciamiento [m]	
Largo [m]	
Persistencia	

	Criterio de falla ( <i>Barton-Bandis</i> )
	Resistencia a la compresión, $JCS$
	Coefficiente de rugosidad, $JRC$
	Ángulo de fricción residual, $\phi_r$
	Rigidez normal, $k_n$ [MPa/m]
	Rigidez al corte, $k_s$ [MPa/m]

#### 4.1) Propiedades y características del material

Las simulaciones se realizan con un material en específico, que para este caso corresponde al mineral Granodiorita, mineral que se presenta ampliamente en los yacimientos mineros de Chile, el cual se utiliza para todos los escenarios a simular. En la Tabla 25 se muestran las propiedades principales de la Granodiorita, las cuales se utilizan como parámetros de entrada en el *software*. Cabe mencionar que los valores que se utilizan corresponden al promedio de los rangos de valores dados para este material.

Tabla 25: Propiedades de Granodiorita [30]

Propiedades	Valor
Tipo de comportamiento elástico	Isotrópico
Peso unitario material [ $MN/m^3$ ]	0,0268
Módulo de Young roca intacta, $E_i$ [MPa]	50000
Módulo de Poisson, $\nu$	0,22
Resistencia a compresión roca intacta, $\sigma_c$ [MPa]	150

El criterio de falla que se utiliza para esta masa rocosa es el criterio generalizado de Hoek & Brown el cual se explica en detalle en la sección 2.3.2. Para el cálculo de los parámetros que el criterio requiere, se asume un factor de disturbancia (grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso) igual a cero ya que no se quiere que los daños por tronadura afecten los resultados, el GSI que se utiliza para cada calidad de macizo rocoso es de 100 ya que representa a la roca intacta del modelo, por otro lado, la constante de roca intacta es igual a 29 [30]. Los parámetros para el criterio se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: Parámetros para criterio generalizado de Hoek & Brown

Parámetro	Valor
GSI	100
Constante roca intacta, $m_i$	29
Factor de disturbancia, $D$	0

#### 4.2) Campo de tensiones

El campo de tensiones tipo gravitacional se determina con el peso unitario del material, la constante  $k$  y la profundidad de la excavación que se encuentran en la fórmula de la tensión tangencial dada por la Ecuación 16 [31].

$$\sigma_{\theta} = (Ak - 1)\gamma h \quad (16)$$

Donde,  $\sigma_{\theta}$ : tensión tangencial [MPa],  $A$ : factor de forma de la excavación,  $k$ : razón de tensión horizontal sobre vertical,  $\gamma$ : peso unitario del material [kN/m<sup>3</sup>],  $h$ : profundidad de la excavación [m].

Tal como se muestra en la Tabla 27, la razón entre la tensión tangencial y la resistencia a la compresión de la roca intacta (150 [MPa]) debe estar entre 0,3 y 0,4 para un  $SRF$  igual a 0,5; por lo tanto, para cumplir esta razón, se escogen los valores que muestra la Tabla 28 para la tensión tangencial.

Tabla 27: Actualización de tabla de parámetro  $SRF$  [32]

b) Excavación en rocas duras (competentes)		$\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$	$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_c}$	SRF
Comportamiento geotécnico				
H	Tensiones bajas, cerca de la superficie, diaclasas abiertas	>200	<0,01	2,5
J	Tensiones de nivel medio, estables	200-10	0,01-0,3	1
K	Elevado nivel de tensiones, estructura muy cerrada, Slabbing bajo, Slabbing menor, tensiones altas, ligera inestabilidad	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L	Slabbing moderado	5-3	0,5-0,65	5-50
M	Slabbing y estallido de roca, Slabbing fuerte, Slabbing muy fuerte	3-2	0,65-1	50-200
N	Estallido de roca severo	<2	>1	200-400

Tabla 28: Parámetros para determinar el campo de tensiones

Simbología	Valor
$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_c}$	0,36
$\sigma_{\theta}$ [MPa]	38,06
$A$	3,2
$k$	1,2
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	26,8
$h$ [m]	700

El valor de la constante  $A$  se obtiene de la Tabla 29 en la cual se considera la excavación tipo herradura, por otro lado, el valor que toma el parámetro  $k$  corresponde al utilizado en Chile.

Tabla 29: Valores de los factores A y B para varias formas de excavaciones [18]

A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8
B	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	5.0	1.9	3.9

#### 4.3) Criterio de falla de las discontinuidades

El criterio de falla que se utiliza para ingresar las propiedades y características de las discontinuidades al *software* RS2 es el de Barton-Bandis que se explica en detalle en la sección 2.3.3. Para determinar los parámetros que requiere la Ecuación 11 del criterio ya mencionado, se utiliza la Tabla 30, en la cual, se toma como referencia el  $J_r$  determinado para cada condición de escenarios, con el fin de escoger el  $JRC$  (promedio),  $JCS$  y  $\phi_r$ , adecuados, tal como lo muestran las líneas coloreadas.

Tabla 30: Parámetros para criterio Barton-Bandis en función de  $J_r$  [33]

Joint or Block Wall Condition					
Very good Very rough, fresh unweathered surfaces	Good Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Fair Smooth, moderately weathered or altered surfaces	Poor Slack-sided, highly weathered surfaces with compact coating or fillings of angular fragments	Very poor Slack-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings	
12	4.5	1.7	0.67	0.25	0.1
Joint Condition Factor, $J_c$					
4	3	2	1.5	1	0.5
Joint Roughness, $J_r$					
11	9	8	2.3	0.9	0.5
Joint Roughness Coefficient, $JRC$ , low					
20	14	11	7	1.5	0.6
Joint Roughness Coefficient, $JRC$ , high					
100	75	55	40	20	5
Joint Wall Compressive Strength, $JCS$					
45	35	30	24	18	8
Residual Friction Angle, $\phi_r$					

Los valores que adopta cada variable se muestran en la Tabla 31. Cabe mencionar que estos valores obtenidos se repiten para cada familia de discontinuidades de una misma calidad de macizo rocoso.

Tabla 31: Parámetros de criterio Barton-Bandis definidos para cada escenario

Escenarios	$Jr$	$JRC$	$JCS$	$\phi_r$
Muy mala	0,5	0,55	5	8
Mala	1	1,2	20	13
Regular	1	1,2	20	13
Buena	2	9,5	55	30
Muy buena	4	15,5	100	45

#### 4.4) Módulo de Young del macizo rocoso

Para determinar el módulo de Young de cada categoría de calidad de macizo rocoso se utiliza la Ecuación 17 [34].

$$E_m = E_i \left( 0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\left( \frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right) \quad (17)$$

Donde,  $E_m$ : módulo de Young del macizo rocoso [MPa],  $E_i$ : módulo de Young de la roca intacta [MPa],  $D$ : factor de disturbancia y  $GSI$ : *Geological Strength Index*.

Los valores del parámetro  $GSI$  que se usan en la Ecuación 17 para cada calidad de macizo rocoso se muestran en la Tabla 21. Los resultados del módulo de Young para cada escenario se indican en la Tabla 32.

Tabla 32: Valores de módulo de Young de macizo rocoso para cada escenario

Escenarios	$E_i$ [MPa]	$GSI$	$D$	$E_m$ [MPa]
Muy mala	40000	37,17	0	5259
Mala	40000	46,98	0	10173
Regular	40000	54,66	0	16039
Buena	40000	61,33	0	22006
Muy buena	40000	73,17	0	31519

#### 4.5) Manteo, direcciones de manteo y espaciamento

En el terreno se pueden obtener una infinidad de direcciones y orientaciones de las familias de discontinuidades. Para poder realizar la simulación se escogen de forma constante los manteos (*dip*) y direcciones de manteo (*dip direction*) para cada familia de discontinuidades. Por otro lado, el

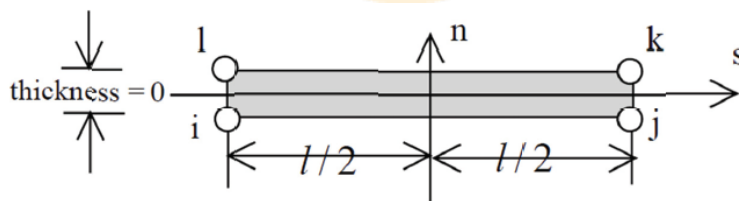
espaciamiento para cada familia se escoge de tal forma que, al intersectar las 3 familias de fracturas, correspondientes a cada simulación, se obtenga la cantidad de fracturas por metros ( $\lambda$ ) indicada para cada categoría por la Tabla 16. Los valores del manto, direcciones de manto y espaciamiento a utilizar para cada familia de discontinuidades de cada escenario se muestran en la Tabla 33.

*Tabla 33: Valores de manto, direcciones de manto y espaciamiento para cada familia de juntas en cada escenario a evaluar*

Escenarios	Familia principal			Familia 2			Familia 3		
	Dip [°]	Dip Direction [°]	S1 [m]	Dip [°]	Dip Direction [°]	S2 [m]	Dip [°]	Dip Direction [°]	S3 [m]
Muy mala	45	300	0,1	0	200	0,1	45	100	0,1
Mala	45	300	0,1125	0	200	0,1125	45	100	0,1125
Regular	45	300	0,18	0	200	0,18	45	100	0,15
Buena	45	300	0,18	0	200	0,18	45	100	0,225
Muy buena	45	300	0,225	0	200	0,225	45	100	0,18

#### 4.6) Rigidez normal y rigidez al corte

Antiguamente el modelado de una masa rocosa con discontinuidades implicaba la disminución de los módulos elásticos y la resistencia del material intacto, es decir, la masa rocosa se modelaba de forma continua [35]. Goodman et al. desarrollaron un elemento de juntas para el FEM, el cual, tiene una longitud "L", ocho nodos y cuatro nudos en dos pares como se ve en la Figura 15. El modelo constitutivo elástico tiene los parámetros de rigidez normal ( $k_n$ ) y rigidez al corte ( $k_s$ ).



*Figura 15: Elemento de juntas de Goodman [36]*

Barton realizó una serie de pruebas de laboratorio para analizar la deformación de las juntas, en particular, la rigidez de las juntas (1972). Uno de los resultados de este trabajo fue el desarrollo de una fórmula para la rigidez normal de una junta, la cual se presenta en la Ecuación 18 [5].

$$k_n = \frac{E_m * E_i}{L(E_i - E_m)} \quad (18)$$



Donde,  $k_n$ : rigidez normal de la junta [MPa/m],  $E_m$ : módulo de Young de macizo rocoso [MPa],  $E_i$ : módulo de Young de la roca intacta [MPa] y  $L$ : espaciamiento de familia de juntas [m].

Kulhawy propuso una relación empírica que relaciona la rigidez normal de la junta con la rigidez al corte de la junta y el módulo de Poisson, tal como se muestra en la Ecuación 19 [37].

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)} \quad (19)$$

Donde,  $k_s$ : rigidez al corte de la junta [MPa/m],  $k_n$ : rigidez normal de la junta [MPa/m] y  $\nu$ : módulo de Poisson.

Los valores que adopta la rigidez normal ( $k_n$ ) y la rigidez al corte ( $k_s$ ) para cada categoría de calidad de macizo rocoso a evaluar se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34: Valores de rigidez normal ( $k_n$ ) y rigidez al corte ( $k_s$ ) para cada escenario de interés

Categoría	Familia	$E_i$ [MPa]	$E_m$ [MPa]	$L$ [m]	$k_n$ [MPa/m]	$\nu$	$k_s$ [MPa/m]
Muy mala	1	40000	5259	0,1	60547	0,22	24815
	2	40000	5259	0,1	60547	0,22	24815
	3	40000	5259	0,1	60547	0,22	24815
Mala	1	40000	10173	0,1125	121266	0,22	49699
	2	40000	10173	0,1125	121266	0,22	49699
	3	40000	10173	0,1125	121266	0,22	49499
Regular	1	40000	16039	0,18	148749	0,22	60963
	2	40000	16039	0,18	148749	0,22	60963
	3	40000	16039	0,15	178499	0,22	73155
Buena	1	40000	22006	0,18	271759	0,22	111377
	2	40000	22006	0,18	271759	0,22	111377
	3	40000	22006	0,225	217408	0,22	89101
Muy buena	1	40000	31519	0,225	660723	0,22	270788
	2	40000	31519	0,225	660723	0,22	270788
	3	40000	31519	0,18	825904	0,22	338485

#### 4.7) Concepto de persistencia y valor a utilizar

El *software* RS2 incluye una opción denominada persistencia, la cual ha sido incluida por dos razones, primero, modela las discontinuidades de una forma más representativa con la realidad, ya que, de otro modo, las juntas son representadas de forma infinita. En segundo lugar, permite disminuir el tiempo en que se realiza la simulación ya que se analiza una menor cantidad de elementos. La Figura 16 muestra los largos que explican la definición de persistencia para una familia

de discontinuidades, por un lado, el largo promedio de una junta y por el otro, el largo promedio hasta el inicio de la siguiente junta.

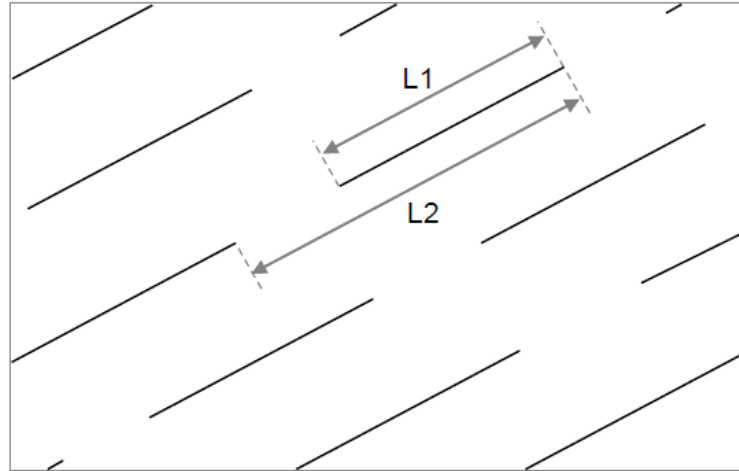


Figura 16: Largos de juntas para persistencia

Para realizar el cálculo de la persistencia incluida en el *software*, se utiliza la Ecuación 20. Los valores que se utilizan para el cálculo de la persistencia para todos los escenarios de interés se muestran en la Tabla 35.

$$\text{Persistencia} = \frac{L1}{L2} \quad (20)$$

Tabla 35: Persistencia y largos a utilizar en RS2

Parámetro	Valor
Persistencia	0,5
Largo L1 [m]	10
Largo L2 [m]	20

#### 4.8) Propiedades del perno a utilizar

El tipo de perno a utilizar y sus propiedades se determinan de forma estándar por los valores que entrega por defecto el *software* RS2, ya que esta investigación no se enfoca en determinar con exactitud las propiedades de los reforzamientos y tipos de soporte a utilizar. En la Tabla 36 se muestran las propiedades del perno que se utiliza.

*Tabla 36: Propiedades del perno a utilizar*

Propiedad	Valor
Tipo de perno	End Anchored
Diámetro del perno [mm]	19
Módulo de elasticidad del perno [MPa]	200000
Capacidad a tracción [MN]	0,1
Capacidad a tracción residual [MN]	0

Por otro lado, la Tabla 23 indica que la categoría de roca muy mala necesita pernos como sistema de soporte y reforzamiento. Las características de los pernos para la roca muy mala según la Figura 2 se muestran en la Tabla 37.

*Tabla 37: Características de pernos para roca muy mala*

Categoría	Largo de perno [m]	Espaciamiento entre pernos [m]
Muy mala	1,7	1,6

#### 4.9) Propiedades del *shotcrete* a utilizar

El tipo de *shotcrete* a utilizar y sus propiedades se determinan de forma estándar por los valores que entrega por defecto el *software* RS2 considerando que no sea un tipo de concreto reforzado, ya que éste correspondería a otra recomendación de Barton según su gráfico. En la Tabla 38 se muestran las propiedades del *shotcrete* que se utiliza.

*Tabla 38: Propiedades del shotcrete a utilizar*

Propiedad	Valor
Tipo de <i>shotcrete</i>	Standard Beam
Tipo de material	Plástico
Módulo de Young [MPa]	30000
Módulo de Poisson	0,2
Resistencia a la compresión [MPa]	35
Resistencia a la compresión residual [MPa]	5
Resistencia a la tracción [MPa]	5
Resistencia a la tracción residual [MPa]	0

Por otro lado, la Tabla 23 indica que la categoría de roca muy mala necesita *shotcrete* como sistema de soporte y reforzamiento. El espesor del *shotcrete* para la roca muy mala según la Figura 2 se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39: Espesor del shotcrete para roca muy mala

Categoría	Espesor [m]
Muy mala	0,1

## CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

Se realizan 3 tipos de simulaciones para cada categoría de macizo rocoso y a cada una se le analiza el  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  y *strength factor*. La primera, denominada “simulación continua” corresponde al modelamiento del macizo rocoso sin incluir discontinuidades, en el cual, se ingresa el *GSI* en el criterio generalizado de Hoek and Brown correspondiente al escenario de interés a evaluar. La segunda, denominada “simulación con fracturas infinitas” corresponde al modelamiento del macizo rocoso incluyendo discontinuidades con un largo infinito, sin el uso de la opción persistencia explicada en la sección 4.7. La tercera, denominada “simulación con fracturas con persistencia” corresponde al modelamiento del macizo rocoso incluyendo discontinuidades con el uso de la opción persistencia. Cabe mencionar que para los dos tipos de simulaciones que poseen discontinuidades, la roca intacta se modela con un *GSI* de 100 en el criterio generalizado de Hoek and Brown con el propósito de realizar una simulación lo más representativa posible y así no causar un doble deterioro al macizo rocoso a modelar.

### 5.1) Fortificación de escenarios

Para comparar la estabilidad de la galería según lo que recomienda empíricamente Barton en la Tabla 23 y lo que recomienda el *software* RS2, se utiliza el *strength factor* como parámetro de referencia para decidir si una excavación es estable o no, para el cual, se considera estable la excavación que posea un *strength factor* mayor a 1,3 según lo utilizado en Chile. Para cada escenario se comparan los resultados del *strength factor* en el techo, paredes y suelo con el *strength factor* de referencia igual a 1,3. Cabe mencionar, que el análisis se realiza en la simulación con fracturas con persistencia ya que este tipo de simulación es la más representativa con respecto a lo que uno observa en terreno y como se presenta el macizo rocoso en la realidad.

La Tabla 23 muestra los resultados del soporte y fortificación recomendado para cada categoría de calidad de macizo rocoso, en ella, se indica que solo la categoría para la roca muy mala necesita un sistema de soporte y fortificación, en particular, pernos con 40-100 mm de *shotcrete* sin

reforzar. Se realiza la simulación del macizo rocoso muy malo con fracturas con persistencia, al cual, se le agregan pernos y *shotcrete* con sus respectivas características vistas en las secciones 4.8 y 4.9.

Para que la excavación sea estable es necesario que los valores del *strength factor* de las cuñas sea mayor a 1,3, y según los resultados observados en la Figura 17.C la galería no presenta estabilidad suficiente, por lo tanto, los resultados muestran discrepancia con respecto al índice de Barton. Por otro lado, la Tabla 40 indica que el valor promedio del *strength factor* para la pared derecha, pared izquierda y techo, 1,19, 1,25 y 1,06 respectivamente, no superan el valor de *strength factor* 1,3 que indica estabilidad, por lo tanto, se concluye efectivamente que los resultados no se asemejan a los esperados por el sistema Q.

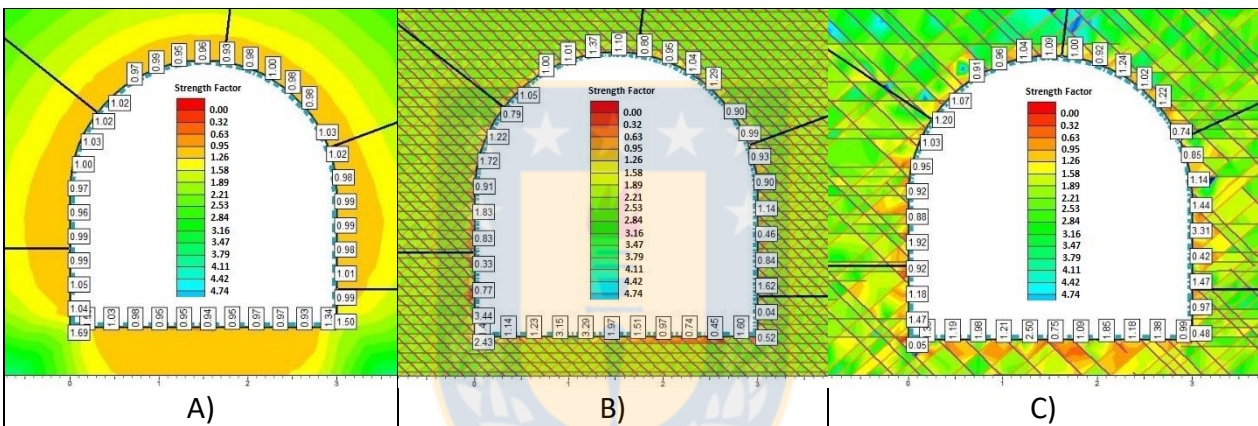


Figura 17: A) SF roca muy mala con fortificación en simulación continua. B) SF roca muy mala con fortificación en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca muy mala con fortificación en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 40: Valores promedio de SF para masa de roca muy mala con fortificación

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	1,02±0,16	1,63±1,15	1,44±0,65
Pared izquierda	1,04±0,19	1,59±1,44	1,25±0,87
Pared derecha	1,10±0,24	1,62±1,16	1,19±1,18
Techo	0,99±0,03	1,10±0,31	1,06±0,30

La Figura 18.C muestra los resultados del *strength factor* para la roca mala con fracturas con persistencia, es claro notar que tanto las paredes y el techo de la excavación presentan valores de *strength factor* de cuñas inferiores a 1,3 por lo tanto, como el sistema Q recomienda que para este escenario no se necesita ningún tipo de soporte según la Tabla 23, los resultados obtenidos por la simulación muestran discrepancia con respecto al índice de Barton. Por otro lado, en la Tabla 41 se

muestra que el valor promedio del *strength factor* para el suelo, la pared izquierda y el techo de este escenario, 1,19, 1,17 y 1,10 respectivamente, no superan el valor 1,3 de referencia de estabilidad, ratificando que los resultados no se asemejan a los esperados por el sistema Q.

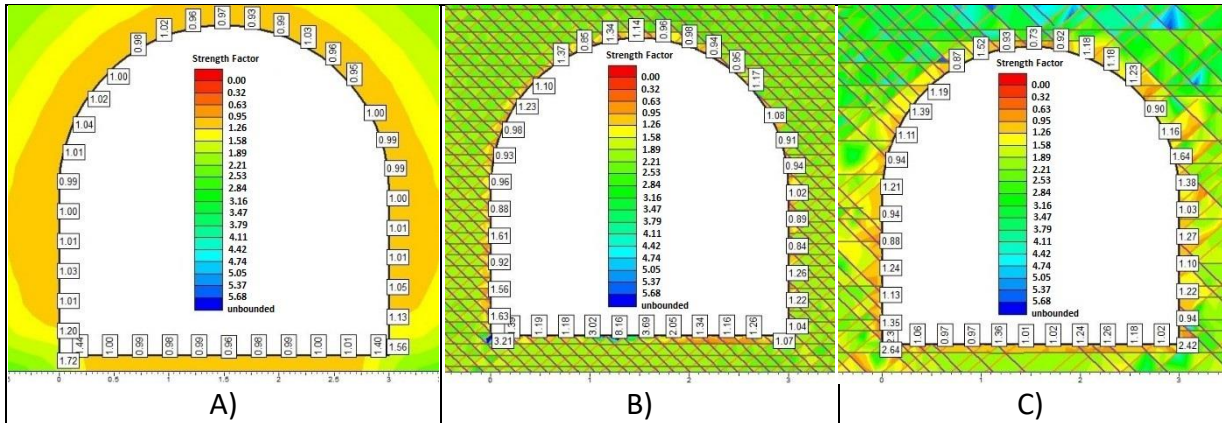


Figura 18: A) SF roca mala en simulación continua. B) SF roca mala en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca mala en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 41: Valores promedio de SF para masa de roca mala

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
<b>Suelo</b>	1,04±0,14	2,56±2,07	1,19±0,35
<b>Pared izquierda</b>	1,12±0,23	1,63±2,09	1,17±0,40
<b>Pared derecha</b>	1,13±0,23	1,03±0,36	1,30±0,51
<b>Techo</b>	0,99±0,03	1,08±0,31	1,10±0,24

La Figura 19.C muestra los resultados del *strength factor* para la roca regular con fracturas con persistencia, se observa al igual que en la roca mala, que tanto las paredes y el techo de la excavación presentan valores de *strength factor* de cuñas inferiores a 1,3, por lo tanto, como el sistema Q recomienda que para este escenario no se necesita ningún tipo de soporte según la Tabla 23, los resultados obtenidos por la simulación muestran discrepancia con respecto al índice de Barton. Por otro lado, en la Tabla 42 se muestra que el valor promedio del *strength factor* para la pared izquierda y el techo de este escenario, 1,23 y 1,06 respectivamente, no superan el valor 1,3 de referencia de estabilidad, ratificando que los resultados no se asemejan a los esperados por el sistema Q.



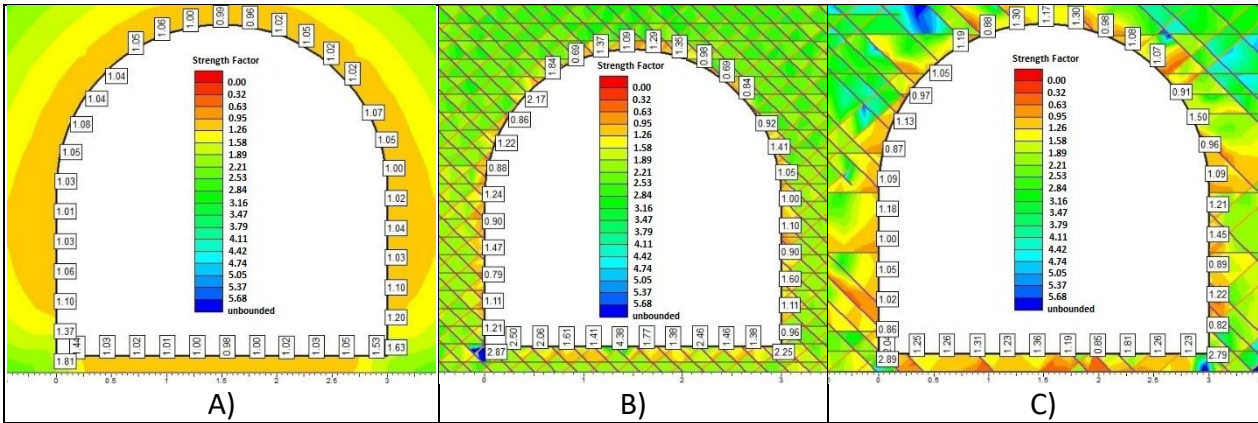


Figura 19: A) SF roca regular en simulación continua. B) SF roca regular en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca regular en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 42: Valores promedio de SF para masa de roca regular

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
<b>Suelo</b>	1,07±0,15	1,98±0,92	1,38±0,38
<b>Pared izquierda</b>	1,19±0,28	1,79±2,57	1,23±0,54
<b>Pared derecha</b>	1,18±0,26	1,19±0,48	1,36±0,85
<b>Techo</b>	1,03±0,03	1,10±0,36	1,06±0,24

La Figura 20.C muestra los resultados del *strength factor* para la roca buena con fracturas con persistencia, para este caso, el análisis es más detallado ya que, si bien es cierto, que hay una gran cantidad de valores de *strength factor* de cuñas superiores a 1,3, en el techo se presentan un par de valores de *strength factor* de cuñas que son inferiores a 1,3 que en teoría presentan un peligro en el caso que cedan y caigan; por ende, como el sistema Q recomienda que para este escenario no se necesita ningún tipo de soporte según la Tabla 23, los resultados obtenidos por la simulación muestran discrepancia con respecto al índice de Barton. Por otro lado, en la Tabla 43 se muestra que el valor promedio del *strength factor* para el suelo y el techo de este escenario, 1,29 y 1,20 respectivamente, no superan el valor 1,3 de referencia de estabilidad, ratificando que los resultados no se asemejan a los esperados por el sistema Q.

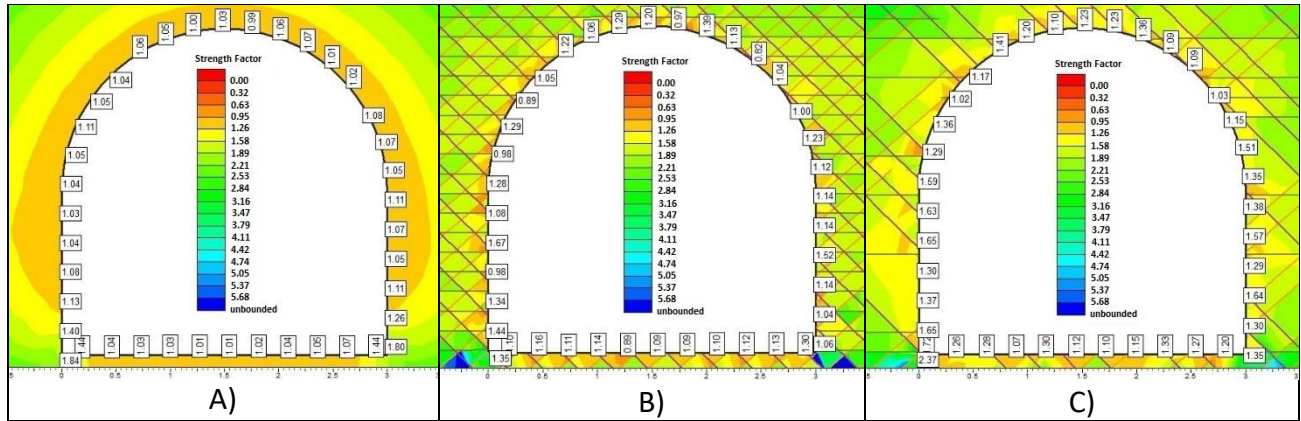


Figura 20: A) SF roca buena en simulación continua. B) SF roca buena en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca buena en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 43: Valores promedio de SF para masa de roca buena

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	1,08±0,13	1,18±0,18	1,29±0,24
Pared izquierda	1,21±0,28	1,30±0,63	1,50±0,30
Pared derecha	1,24±0,28	1,28±0,40	1,58±0,62
Techo	1,04±0,03	1,10±0,27	1,20±0,21

Finalmente, la Figura 21.C muestra los resultados del *strength factor* para la roca muy buena con fracturas con persistencia, aunque a simple vista, pareciera que la excavación no necesita de ningún tipo de soporte y fortificación ya que posee una gran cantidad de valores de *strength factor* de cuñas mayores a 1,3, es evidente considerar que en realidad no se puede permitir ninguna cuña con un valor de *strength factor* menor a 1,3 y para este escenario existe un par de cuñas con esos valores, por lo tanto, como el sistema Q recomienda que para este escenario no se necesita ningún tipo de soporte según la Tabla 23, los resultados obtenidos por la simulación muestran discrepancia con respecto al índice de Barton. Por otro lado, en la Tabla 44 se muestra que el valor promedio del *strength factor* para el techo de este escenario, 1,28, no supera el valor 1,3 de referencia de estabilidad, ratificando que los resultados no se asemejan a los esperados por el sistema Q.



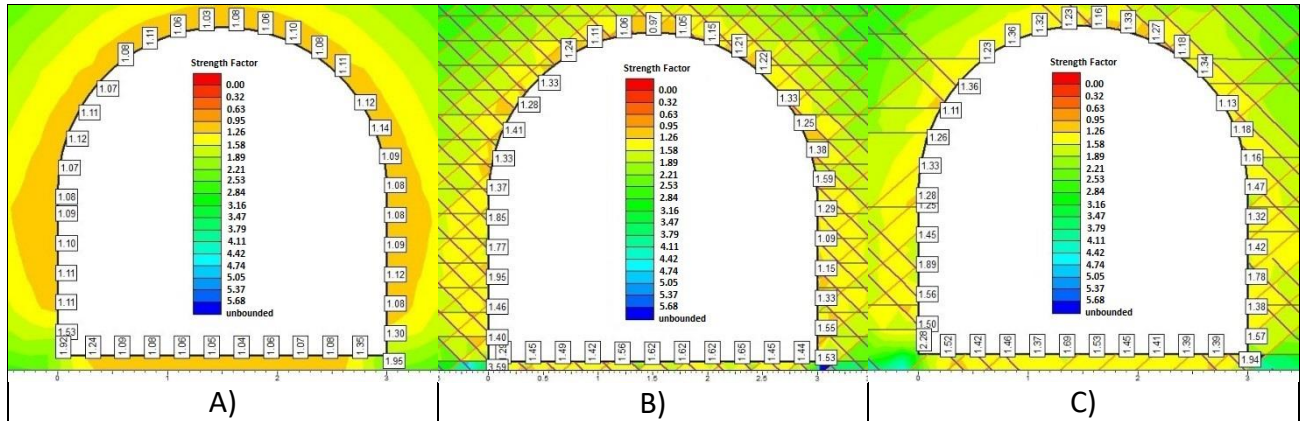


Figura 21: A) SF roca muy buena en simulación continua. B) SF roca muy buena en simulación con fracturas infinitas. C) SF roca muy buena en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 44: Valores promedio de SF para masa de roca muy buena

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	1,15±0,20	1,51±0,14	1,44±0,12
Pared izquierda	1,26±0,32	1,62±0,54	1,61±0,34
Pared derecha	1,21±0,27	1,40±0,36	1,61±0,29
Techo	1,09±0,03	1,21±0,17	1,28±0,12

### 5.2) Esfuerzos principales

Para los distintos escenarios de interés simulados en el *software* RS2 se analiza el sigma 1 y sigma 3 para predecir los posibles comportamientos que se pueden producir en la excavación producto de los esfuerzos presentes. El análisis se realiza con la simulación con fracturas con persistencia que es la más representativa, el valor promedio del sigma 1 de las paredes y el techo se compara con el UCS (resistencia a la compresión uniaxial) de la granodiorita de valor 150 [MPa], y el valor promedio del sigma 3 de las paredes y el techo se compara con la resistencia a la tracción de la granodiorita de valor -15 [MPa]. El valor del sigma 3 es negativo ya que para RS2 el signo negativo indica tracción.

Para la masa de roca muy mala con fortificación la Figura 22 muestra los resultados del sigma 1 y la Tabla 45 indica los resultados de los valores promedios del sigma 1, en la cual se muestra que tanto el techo como la pared derecha exceden el valor del UCS con un promedio de 225,76 [MPa] y 169,74 [MPa] respectivamente, lo que puede generar un estallido de roca en la excavación. Por otro lado, la Figura 23 muestra los resultados del sigma 3 y la Tabla 46 indica los resultados de los valores promedios del sigma 3, en la cual se indica que la pared derecha excede el valor referencial de

deslizamiento de cuñas dado por la resistencia a la tracción de -15 [MPa] con un valor de -44,97 [MPa], por lo tanto, existe la posibilidad de que un par de cuñas de esa pared deslicen y caigan.

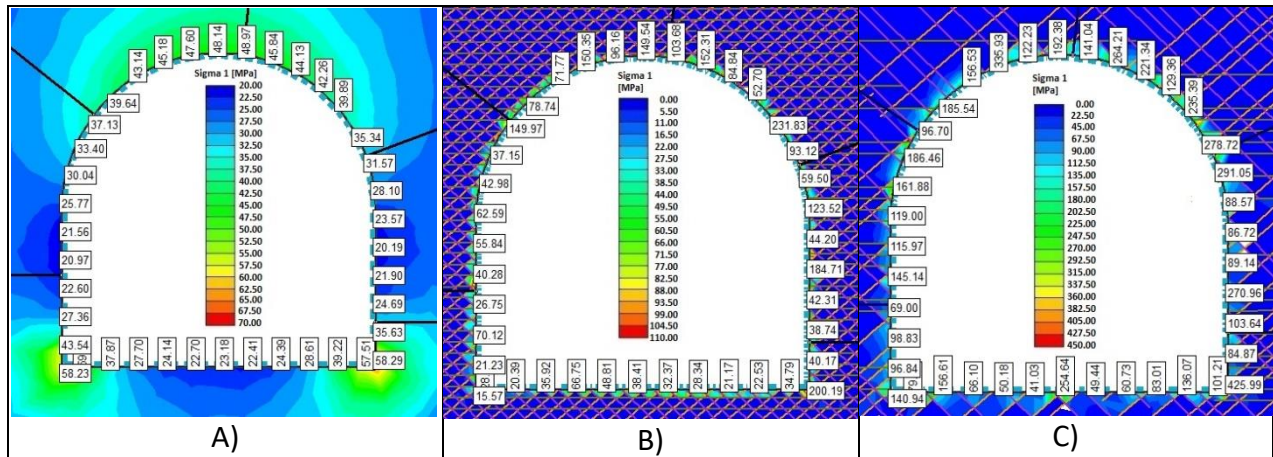


Figura 22: A) Sigma 1 roca muy mala en simulación continua. B) Sigma 1 roca muy mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca muy mala en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 45: Valores promedio de sigma 1 para masa de roca muy mala

	Continua $\bar{X} \pm \sigma$	Fracturas infinitas $\bar{X} \pm \sigma$	Fracturas con persistencia $\bar{X} \pm \sigma$
Suelo	31,91±11,76	30,05±17,49	100,02±76,73
Pared izquierda	29,91±13,72	59,40±51,05	111,93±36,77
Pared derecha	32,41±15,59	68,77±61,27	169,74±161,19
Techo	39,31±7,38	98,62±54,87	225,76±133,76

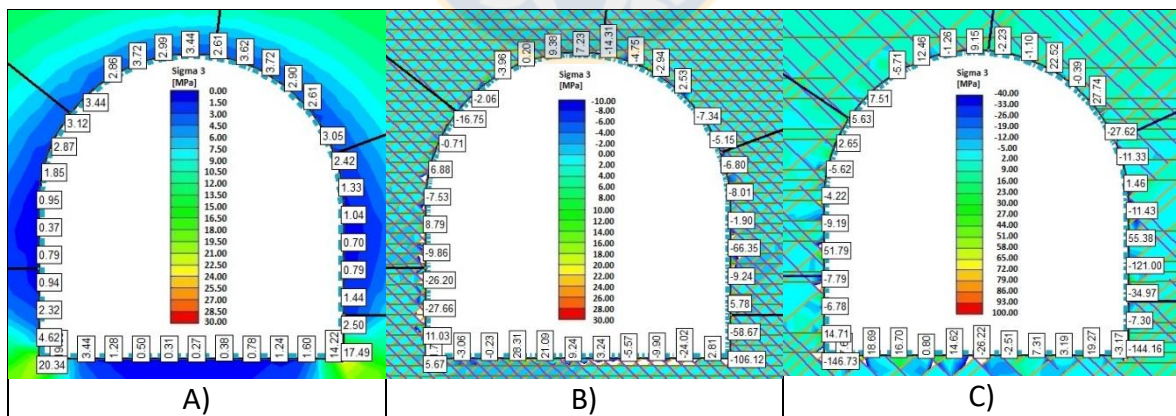


Figura 23: A) Sigma 3 roca muy mala en simulación continua. B) Sigma 3 roca muy mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca muy mala en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 46: Valores promedio de sigma 3 para masa de roca muy mala

	Continua $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas infinitas $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas con persistencia $[\bar{X} \pm \sigma]$
Suelo	3,00±5,15	-0,34±18,80	7,69±27,86
Pared izquierda	3,26±5,65	-7,76±37,91	0,20±59,12
Pared derecha	4,62±7,43	-10,66±43,65	-44,97±78,03
Techo	2,83±0,77	-2,43±10,64	1,96±18,29

Para la masa de roca mala la Figura 24 muestra los resultados del sigma 1 y la Tabla 47 indica los resultados de los valores promedios del sigma 1, en la cual se muestra que el techo, la pared izquierda y la pared derecha exceden el valor del UCS con un promedio de 194,94, 189,31 y 158,33 [MPa] respectivamente, lo que puede ocasionar un estallido de roca en la excavación. Por otro lado, la Figura 25 muestra los resultados del sigma 3 y la Tabla 48 indica los resultados de los valores promedios del sigma 3, en la cual se indica que ni paredes ni techo exceden el valor referencial de deslizamiento de cuñas dado por la resistencia a la tracción de -15 [MPa].

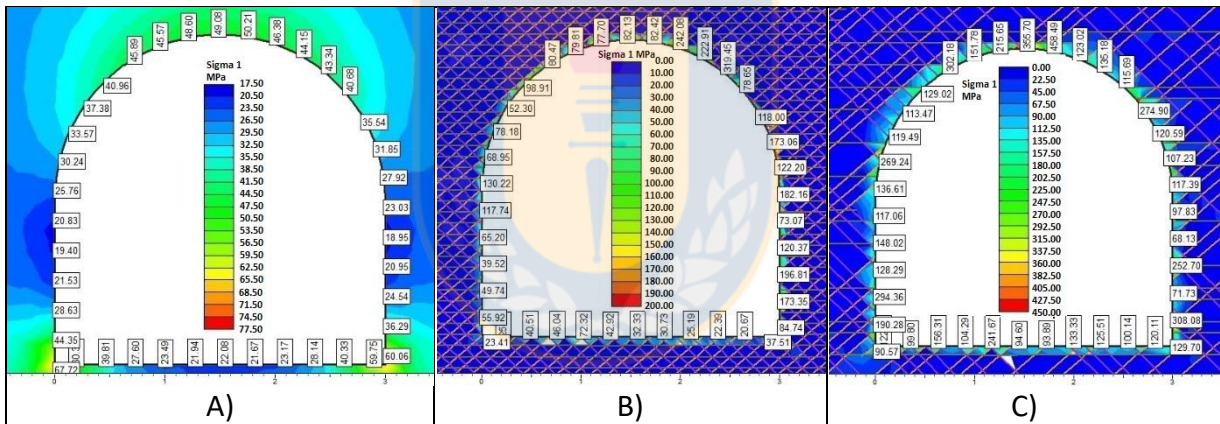


Figura 24: Sigma 1 roca mala en simulación continua. B) Sigma 1 roca mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca mala en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 47: Valores promedio de sigma 1 para masa de roca mala

	Continua $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas infinitas $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas con persistencia $[\bar{X} \pm \sigma]$
Suelo	31,83±12,71	28,42±17,06	118,79±56,53
Pared izquierda	31,88±16,88	71,15±47,49	189,31±96,58
Pared derecha	32,12±16,72	140,15±78,13	158,33±138,01
Techo	39,72±7,52	135,04±110,56	194,94±96,53



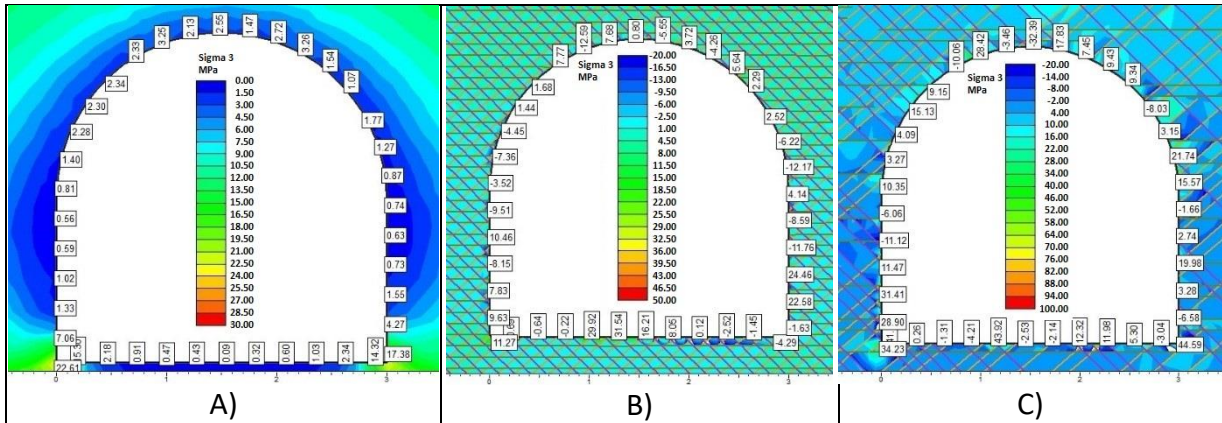


Figura 25: Sigma 3 roca mala en simulación continua. B) Sigma 3 roca mala en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca mala en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 48: Valores promedio de sigma 3 para masa de roca mala

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	2,63±4,47	7,82±12,78	6,94±19,55
Pared izquierda	4,50±7,29	2,27±10,48	10,04±20,65
Pared derecha	4,96±7,43	-0,66±15,75	8,46±17,01
Techo	2,00±0,76	-2,90±11,94	5,01±15,48

Para la masa de roca regular la Figura 26 muestra los resultados del sigma 1 y la Tabla 49 indica los resultados de los valores promedios del sigma 1, en la cual se muestra que solo el techo excede el valor del UCS con un promedio de 196,82 [MPa] lo que puede provocar estallido de roca en la excavación. Por otro lado, la Figura 27 muestra los resultados del sigma 3 y la Tabla 50 indica los resultados de los valores promedios del sigma 3, en la cual se indica que ni paredes ni techo exceden el valor referencial de deslizamiento de cuñas dado por la resistencia a la tracción de -15 [MPa].

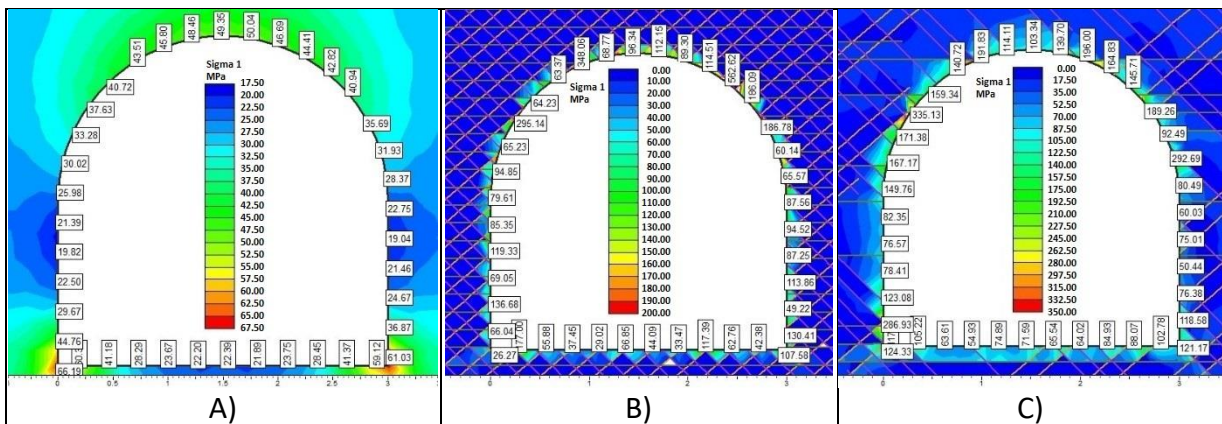


Figura 26: Sigma 1 roca regular en simulación continua. B) Sigma 1 roca regular en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca regular en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 49: Valores promedio de sigma 1 para masa de roca regular

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	32,29±12,71	61,97±46,06	84,59±24,78
Pared izquierda	31,75±15,82	90,80±55,40	113,48±77,04
Pared derecha	32,42±16,80	96,51±40,37	81,49±26,10
Techo	39,74±7,54	152,68±132,63	196,82±130,62

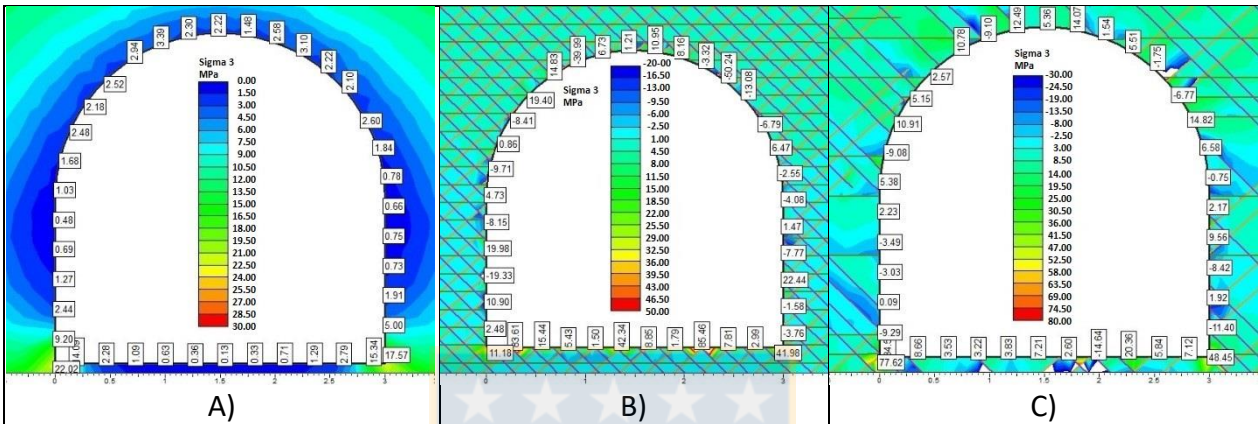


Figura 27: Sigma 3 roca regular en simulación continua. B) Sigma 3 roca regular en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca regular en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 50: Valores promedio de sigma 3 para masa de roca regular

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	2,75±4,45	24,12±35,98	8,87±12,60
Pared izquierda	4,56±7,08	5,19±17,46	6,20±24,72
Pared derecha	4,81±7,19	3,18±17,60	4,99±25,65
Techo	2,29±0,69	-5,45±21,46	0,71±20,21

Para la masa de roca buena la Figura 28 muestra los resultados del sigma 1 y la Tabla 51 indica los resultados de los valores promedios del sigma 1, en la cual se muestra que ni el techo ni las paredes exceden el valor del UCS, por lo tanto, no se producen estallidos de roca en la excavación. Por otro lado, la Figura 29 muestra los resultados del sigma 3 y la Tabla 52 indica los resultados de los valores promedios del sigma 3, en la cual se indica que ni paredes ni techo exceden el valor referencial de deslizamiento de cuñas dado por la resistencia a la tracción de -15 [MPa].

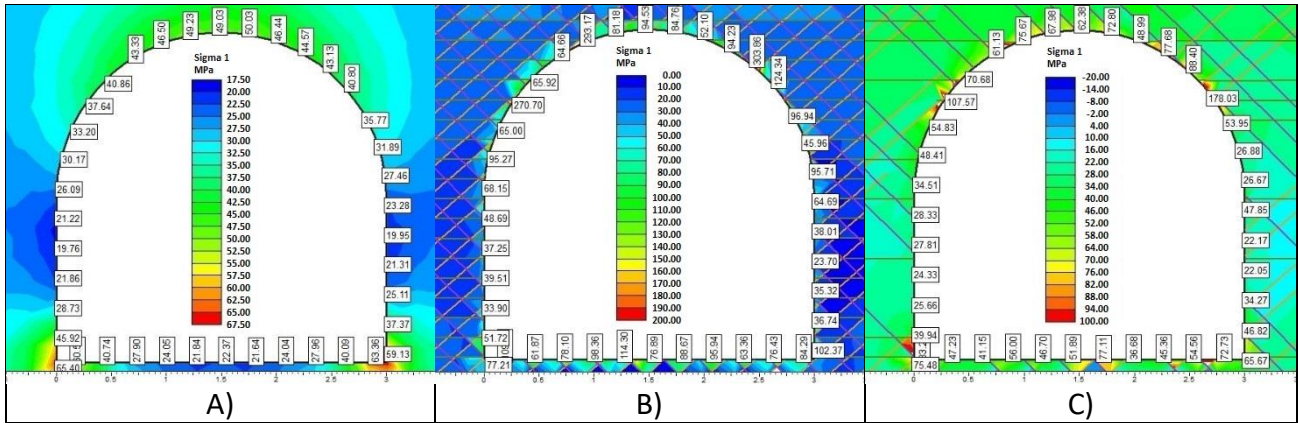


Figura 28: Sigma 1 roca buena en simulación continua. B) Sigma 1 roca buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca buena en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 51: Valores promedio de sigma 1 para masa de roca buena

	Continua $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas infinitas $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas con persistencia $[\bar{X} \pm \sigma]$
Suelo	32,39±13,22	82,52±52,24	51,84±20,62
Pared izquierda	31,55±15,81	53,91±22,90	40,07±24,56
Pared derecha	32,04±15,69	60,51±37,86	36,74±16,55
Techo	40,53±7,06	108,28±77,99	78,23±49,18

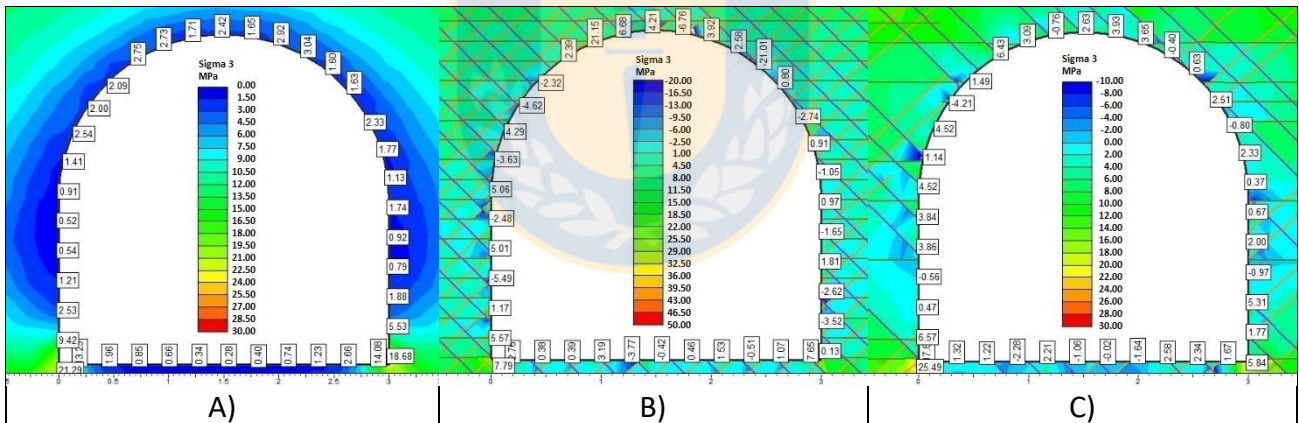


Figura 29: Sigma 3 roca buena en simulación continua. B) Sigma 3 roca buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca buena en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 52: Valores promedio de sigma 3 para masa de roca buena

	Continua $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas infinitas $[\bar{X} \pm \sigma]$	Fracturas con persistencia $[\bar{X} \pm \sigma]$
Suelo	2,56±4,11	2,19±4,81	1,80±4,70
Pared izquierda	5,12±7,35	0,93±8,33	4,33±7,02
Pared derecha	5,56±7,48	3,67±15,71	3,28±6,45
Techo	2,05±0,68	-2,87±14,82	1,36±4,69

Para la masa de roca muy buena la Figura 30 muestra los resultados del sigma 1 y la Tabla 53 indica los resultados de los valores promedio del sigma 1, en la cual se muestra que ni el techo ni



las paredes exceden el valor del UCS, por lo tanto, no se producen estallidos de roca en la excavación. Por otro lado, la Figura 31 muestra los resultados del sigma 3 y la Tabla 54 indica los resultados de los valores promedios del sigma 3, en la cual se indica que ni paredes ni techo exceden el valor referencial de deslizamiento de cuñas dado por la resistencia a la tracción de -15 [MPa].

Cabe mencionar que en el análisis del sigma 3, de lo concluido anteriormente para cada escenario, solo es válido para el promedio obtenido, ya que, si se analiza de forma puntual los valores de las cuñas para cada escenario, existen casos donde los bloques si deslizan superando el valor de referencia de -15 [MPa] de la resistencia a la tracción.

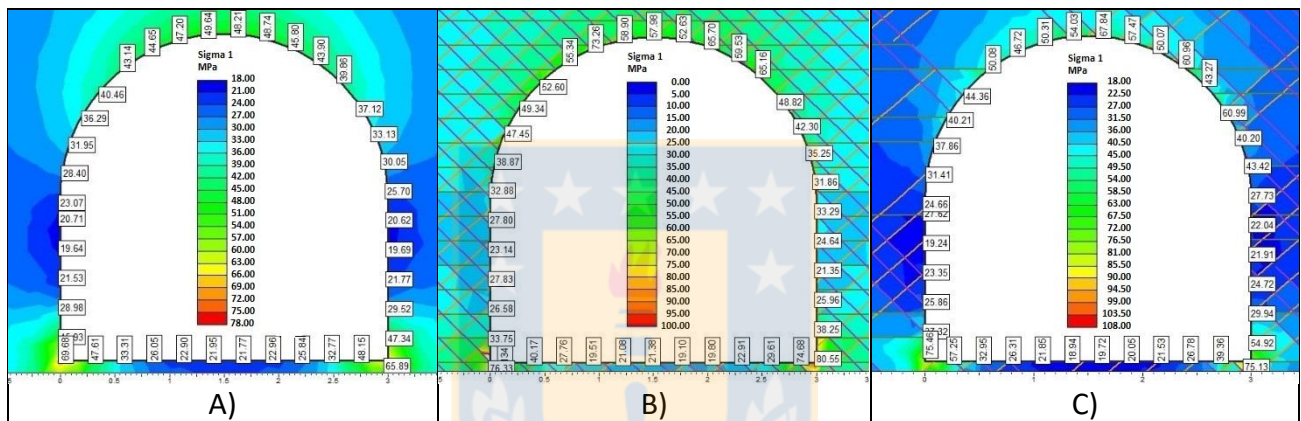


Figura 30: Sigma 1 roca muy buena en simulación continua. B) Sigma 1 roca muy buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 1 roca muy buena en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 53: Valores promedio de sigma 1 para masa de roca muy buena

	Continua $[\bar{x} \pm \sigma]$	Fracturas infinitas $[\bar{x} \pm \sigma]$	Fracturas con persistencia $[\bar{x} \pm \sigma]$
<b>Suelo</b>	32,34±13,04	31,51±24,69	32,44±18,22
<b>Pared izquierda</b>	32,28±17,38	32,99±15,36	32,16±17,11
<b>Pared derecha</b>	31,45±15,90	40,69±22,07	33,64±17,76
<b>Techo</b>	40,15±7,34	56,32±15,22	47,34±10,37

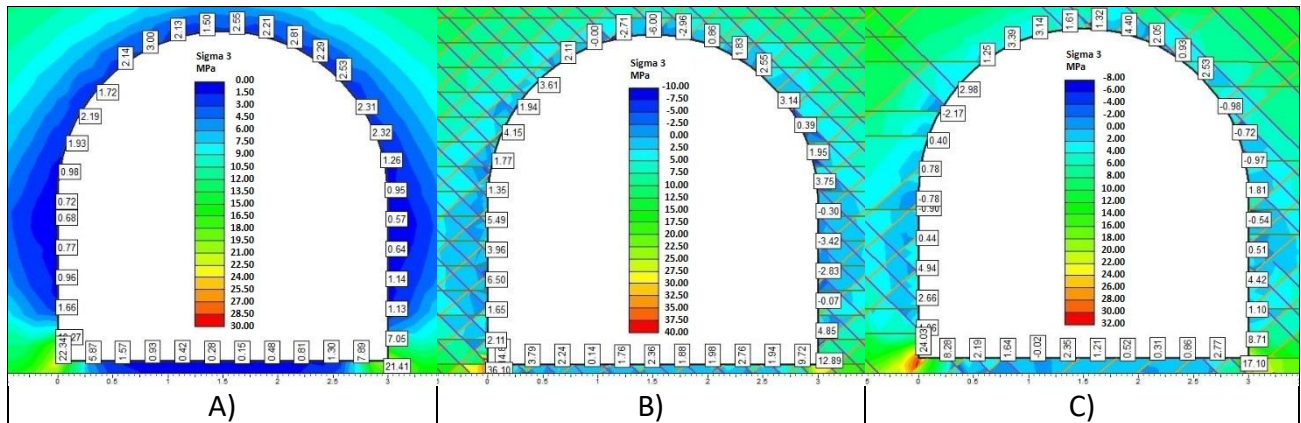


Figura 31: Sigma 3 roca muy buena en simulación continua. B) Sigma 3 roca muy buena en simulación con fracturas infinitas. C) Sigma 3 roca muy buena en simulación con fracturas con persistencia

Tabla 54: Valores promedio de sigma 3 para masa de roca muy buena

	Continua [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas infinitas [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]	Fracturas con persistencia [ $\bar{X} \pm \sigma$ ]
Suelo	2,96±4,84	2,84±3,14	2,38±3,65
Pared izquierda	4,85±7,67	4,23±8,17	4,50±7,39
Pared derecha	3,92±6,64	2,45±8,17	5,04±7,16
Techo	2,07±0,62	1,04±4,13	1,67±2,35

### 5.3) Comparación de los 3 tipos de simulaciones

Con los resultados obtenidos, y tomando la simulación con fracturas con persistencias de referencia, se realiza un análisis comparativo para saber cuál de las dos simulaciones (continua o fracturas infinitas) está más cerca de los resultados obtenidos por la simulación con fracturas con persistencia. Para realizar el análisis se comparan los resultados promedios del *strength factor* de las dos simulaciones en cuestión con respecto al promedio del *strength factor* de la simulación de referencia, para ello, se analizará las paredes y el techo.

Para las diferentes categorías de calidad de macizo rocoso se utilizan las Tablas 40, 41, 42, 43 y 44 las cuales presentan los promedios del *strength factor* respectivos para cada tipo de simulación. En líneas generales, la simulación que presente menor diferencia es la que presenta más representatividad después de la simulación con fracturas con persistencia. El objetivo de realizar esto es para tener en consideración otro tipo de simulación para investigaciones futuras del rubro en caso de que no se quiera utilizar fracturas con persistencia al modelar. Los resultados para el macizo rocoso muy malo, malo, regular, bueno y muy bueno se entregan en las Tablas 55, 56, 57, 58 y 59 respectivamente.



Tabla 55: Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para roca muy mala

	Diferencia entre Continua y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$	Diferencia entre Fracturas infinitas y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$
Pared izquierda	0,21	0,34
Pared derecha	0,09	0,43
Techo	0,07	0,04

Tabla 56: Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para roca mala

	Diferencia entre Continua y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$	Diferencia entre Fracturas infinitas y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$
Pared izquierda	0,05	0,46
Pared derecha	0,17	0,27
Techo	0,11	0,02

Tabla 57: Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para regular

	Diferencia entre Continua y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$	Diferencia entre Fracturas infinitas y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$
Pared izquierda	0,04	0,56
Pared derecha	0,18	0,17
Techo	0,03	0,04

Tabla 58: Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para buena

	Diferencia entre Continua y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$	Diferencia entre Fracturas infinitas y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$
Pared izquierda	0,29	0,2
Pared derecha	0,34	0,3
Techo	0,16	0,1

Tabla 59: Diferencias de strength factor entre dos tipos de simulaciones para roca muy buena

	Diferencia entre Continua y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$	Diferencia entre Fracturas infinitas y Fracturas con persistencia $[\bar{X}]$
Pared izquierda	0,35	0,01
Pared derecha	0,4	0,21
Techo	0,19	0,07

Los resultados indican que no se presenta una tendencia clara que demuestre que la simulación continua o la simulación con fracturas infinitas posea un menor error con respecto a la otra, ya que la diferencia de *strength factor* para cada categoría es variable y cambia ya sea para las

paredes como para el techo en cada modelamiento. Por lo tanto, se concluye que no existen evidencias significativas para determinar cuál es el tipo de simulación más representativo después de la simulación con fracturas con persistencia, por ende, es conveniente en la idealidad, siempre usar fracturas con persistencia.



## CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede observar discrepancia entre lo planteado en el sistema Q de Barton y los resultados obtenidos para cada escenario, con el *software* RS2, estos se encuentran en la sección 5.1 para cada caso realizado. En base a los resultados, solamente se muestra un leve acercamiento en el escenario correspondiente al análisis del macizo rocoso de calidad muy buena.

Para el correcto análisis se deben considerar los posibles errores de arrastre producidos por la interacción de fórmulas y sistemas utilizados. Los resultados arrojados por el *software* corresponden a resultados más conservadores que los recomendados por Barton, para los cuales, se evidencia una necesidad de fortificación más robusta en el caso del macizo rocoso de calidad muy mala, o la incorporación de pernos en los otros escenarios simulados, con el fin de lograr estabilidad en la galería.

Es necesario tener en consideración que no se realiza ningún cálculo para estimar las características más apropiadas del *shotcrete* y pernos utilizados en el *software* RS2 (por ejemplo, la presión de soporte), por tanto, esto puede ser un factor que influye directamente en los resultados obtenidos al analizar la estabilidad a través del *strength factor*.

Con respecto a la orientación de discontinuidades utilizadas, se escogió de forma aleatoria el *dip* y *dip direction* para los inputs que requiere el *software*. Cabe mencionar que la orientación utilizada influye directamente en la estabilidad de la galería, ya que, si el eje se encuentra entre 45° a 90° a favor del manto, resulta una situación muy favorable, no obstante, lo más conveniente es tener un rumbo perpendicular del sistema de discontinuidades con respecto al eje de excavación

Debido a lo anterior, es correcto afirmar que la orientación es un factor muy importante al indicar la estabilidad de la excavación, pues afecta los resultados del *strength factor*. Es por esto que resulta necesario tener en consideración la orientación de las discontinuidades para futuras investigaciones.

Es prudente realizar algunas recomendaciones sobre las simulaciones realizadas en el *software* RS2 que pueden servir para futuras investigaciones relacionadas al tema. En primer lugar, se recomienda simular con un factor de extensión 5 para que el modelamiento del escenario sea más representativo, por otro lado, se debe si o si configurar el *setting* correspondiente al límite de

iteraciones que trae por defecto el *software* para computar los resultados. De forma estándar asigna un máximo de 500 iteraciones, sin embargo, para encontrar el óptimo, se debe ingresar manualmente un límite de 20000 iteraciones, esto con tal de tener más opciones para encontrar el resultado más acertado, sobre todo para las simulaciones más pesadas que presentan una mayor cantidad de elementos finitos.

También existe la posibilidad que un *software* arroje resultados menos conservadores, por lo cual es recomendable que se realice un análisis detallado, criterioso y profundo de los resultados obtenidos, ya que, tal como se evidenció en este trabajo, las aplicaciones informáticas no siempre entregan los resultados esperados.

Finalmente, para realizar simulaciones, es prudente considerar que las correspondientes a esta investigación se realizaron con un factor de extensión igual a 3, esto debido a las limitantes del hardware al simular y la gran cantidad de horas que se demora para concretar los resultados. Además, las simulaciones se realizaron con el *software* RS2 versión 8.014 la cual corresponde a una versión desactualizada del mismo, por lo que, una versión más reciente, probablemente puede entregar resultados más acertados con respecto a los obtenidos, por tanto, para futuras investigaciones, sería ideal que se realice el modelamiento en la versión más actualizada del *software*.

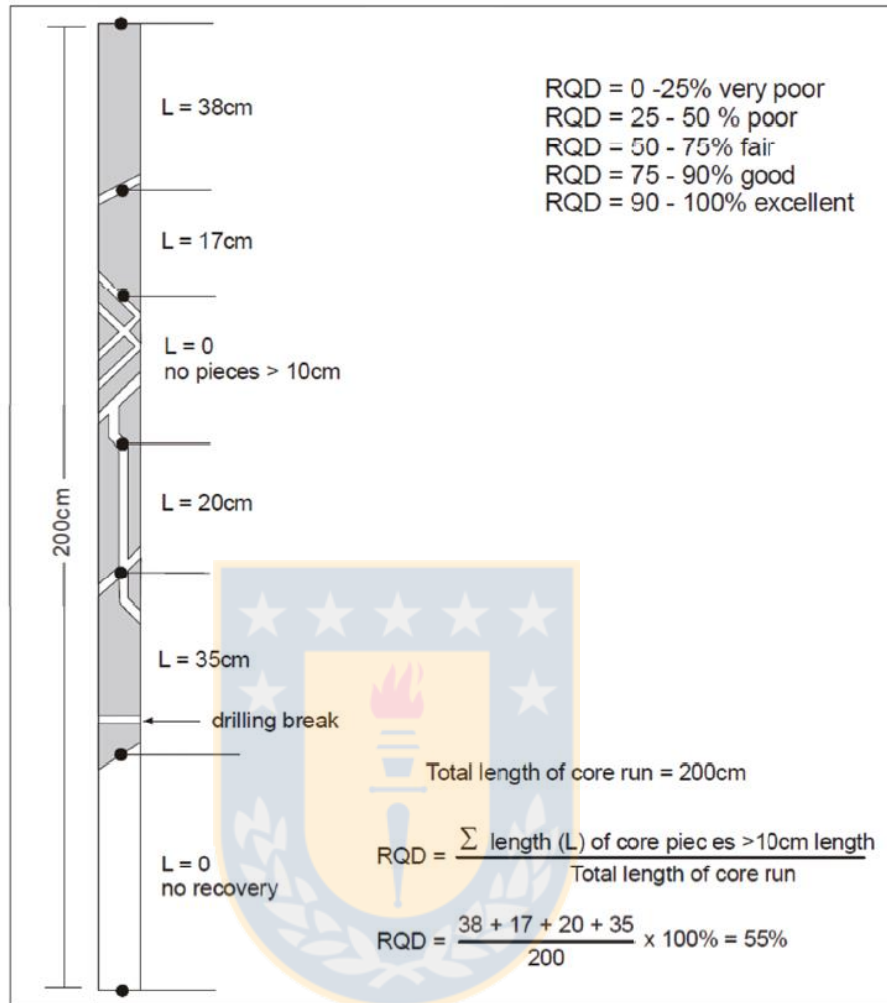
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bieniawski, Z. *Engineering classification of jointed rock masses*. Civil Engineering, 15, 1973.
- [2] Palmstrom, A. *Recent developments in rock support estimates by the RMI*. Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology, 6, 1-19. 2000.
- [3] Hoek, E, Kaiser, P y Bawden, W. *Support of underground excavations in hard rock*. 1995. Rotterdam: A.A. Balkema.
- [4] Barton, N, Lien, R y Lunde, J. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. 1974. Rock Mechanics 6, 189-236.
- [5] van der Pouw, M. *Rockmass Behavioural Uncertainty: implications for hard rock tunnel geotechnical baseline reports*. (Tesis doctoral) Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá. 2014.
- [6] De la Cuadra, L. *Curso de Laboreo de Minas*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela T.S de Ingenieros de Minas, Madrid, España. 1974.
- [7] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*. Edición del Tricentenario. 2017.
- [8] Puerto, J. *Túneles Viales*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. 2010.
- [9] Maldonado, Y. *Macizo rocoso, matriz rocosa y discontinuidades* [En línea]. Disponible: <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/mecanica-de-rocas/macizo-rocoso/>. [Último acceso: 11 Mayo 2018].
- [10] Deere, D, Hendron, A, Patton, F y Cording, E. *Design of surface and near surface construction in rock*. 8<sup>th</sup> U.S Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, Estados Unidos. 1967.
- [11] Deere, D. *Technical description of rock cores for engineering purposes*. Felsmechanik und Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology), 1:1, 16-22. 1963.
- [12] Priest, S y Hudson, J. *Discontinuity spacing in rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 13, 135-148. 1976.
- [13] Palmström, A. *The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing*. IV Congress International Association of Engineering Geology, 2, 1982.

- [14] Bieniawski, Z. *Engineering rock mass classification*. New York: Wiley. 1989.
- [15] Marinou, P y Hoek, E. *A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. GeoEng2000 Conference, Melbourne, Australia. 2000.
- [16] Rocscience. *Mohr-Coulomb Criterion* [En línea]. Disponible: [https://www.rocscience.com/help/rocddata/rocddata/Mohr-Coulomb\\_Criterion.htm](https://www.rocscience.com/help/rocddata/rocddata/Mohr-Coulomb_Criterion.htm). [Último acceso: 10 Abril 2018].
- [17] Gómez, R. *Diseño y Fortificación Cap. 3.4. Apuntes de asignatura Geomecánica*. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 2017.
- [18] Hoek, E y Brown, E. *Underground excavations in rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, Inglaterra. 1980.
- [19] Hoek, E y Brown, E. *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 1165-1186. 1997.
- [20] Vallejos, J. *Estabilización del Macizo Rocoso*. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 2014.
- [21] Barton, N y Choubey, V. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 10, 1-54. 1977.
- [22] Barton, N y Bandis, S. *Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock*. 23<sup>rd</sup> U.S Symposium on Rock Mechanics and Rock Engineering, Berkeley, California, Estados Unidos. 1982.
- [23] Putzmeister. *Best support underground* [En línea]. Disponible: <http://bestsupportunderground.com/que-es-el-shotcrete/>. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [24] Mirlissena, G. *Método de los elementos finitos: ¿Qué es?* [En línea]. Disponible: <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>. [Último acceso: 17 Abril 2018].
- [25] Carnicero, A. *Introducción al método de los elementos finitos*. 1-25. 2001.
- [26] Rocscience. *RS2* [En línea]. Disponible: <https://www.rocscience.com/software/rs2>. [Último acceso: 10 Octubre 2018].

- [27] Ayes, J. *La teoría de bloques aplicada a la mecánica de rocas*. (Tesis pre-grado), Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Ciudad de México, México. 2011.
- [28] Fernández, J, Pérez, H y Mulone, D. *Correlación entre el índice RMR de Biniwaski y el índice Q de Barton en formaciones sedimentarias de grano fino*. Informes de la Construcción, Bilbao, España, 69, 2017.
- [29] Hoek, E. *Quantification of the Geological Strength Index chart*. 47<sup>th</sup> U.S Rock Mechanics Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, Estados Unidos. 2013.
- [30] Read, J y Stacey, P. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. 1<sup>st</sup> Edition, Australia. 2009.
- [31] Palmstrom, A. *RMI - a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Ph.D. thesis, University of Oslo, Norway. 1995.
- [32] Barton, N y Grimstad, E. *Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM*. 26, 39-42. 1994.
- [33] Pitts, M y Diederichs, M. *The effect of joint condition and block volume on GSI and rockmass strength estimation*. Geotechnical Conference, Dept. of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario. Canadá. 2011.
- [34] Hoek, E y Diederichs, M. *Empirical estimation of rock mass modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203-215. 2006.
- [35] Goodman, R, Taylor, R y Brekke, T. *A model for the mechanics of jointed rock*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, 94, 637-659. 1968.
- [36] Jing, L. *A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, 283-353. 2003.
- [37] Kulhawy, F. *Stress deformation properties of rock and rock discontinuities*. Engineering Geology, 9, 327-350. 1975.

**ANEXO I: Ejemplo de cálculo del RQD utilizando el primer procedimiento**



*Figura I-1: Ejemplo de cálculo del RQD utilizando el primer procedimiento (5)*



## ANEXO II: Tablas de valores numéricos de cada parámetro del sistema Q de Barton (4)

Tabla II-1: Rango de valores de RQD usados en sistema Q

Descripción	Valor	Notas
<b>1. Índice de calidad de roca</b>	<b>RQD [%]</b>	
A. Muy mala	0-25	1. Cuando se obtienen valores de RQD inferiores o iguales a 10, se toma un valor de 10 para calcular el índice Q. 2. Los intervalos de 5 unidades para el RQD, es decir, 100, 95, 90, etc., tienen suficiente precisión.
B. Mala	25-50	
C. Regular	50-75	
D. Buena	75-90	
E. Excelente	90-100	

Tabla II-2: Rango de valores de Jn usados en sistema Q

Descripción	Valor	Notas
<b>2. Número de familias de juntas</b>	<b>Jn</b>	
A. Masivo o con pocas juntas	0,5-1,0	1. En intersecciones de túneles se utiliza la expresión $(3,0 \times Jn)$ . 2. En las bocaminas de los túneles se utiliza la expresión $(2,0 \times Jn)$ .
B. Una familia de juntas	2	
C. Una familia de juntas + una aislada	3	
D. Dos familias de juntas	4	
E. Dos familias de juntas + una aislada	6	
F. Tres familias de juntas	9	
G. Tres familias y algunas juntas aleatorias	12	
H. Cuatro familias, juntas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrones, etc.	15	
I. Roca triturada, terrosa	20	

Tabla II-3: Rango de valores de Jr usados en sistema Q

Descripción	Valor	Notas
<b>3. Rugosidad de las juntas</b>	<b>Jr</b>	
a) Contacto con las paredes b) Contacto con las paredes antes de un corte de 10 cm		1. Las descripciones se refieren a caracterizaciones a pequeña escala y a escala intermedia, por este orden.
A. Juntas sin continuidad	4	
B. Rugosa e irregulares, onduladas	3	
C. Lisa, ondulantes	2	
D. Pulidas, ondulantes	1,5	
E. Rugosas o irregulares, planares	1,5	
F. Lisas, planares	1,0	
G. Pulidas, planares	0,5	2. Si el espaciado de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, se debe aumentar el índice Jr, en una unidad. 3. En el caso de diaclasas planas perfectamente lisas que presenten lineaciones, y que dichas lineaciones estén orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor $Jr = 0,5$ .
c) Sin contacto con roca después de corte de 10 cm.		
H. Zonas que contienen minerales arcillosos, de espesor suficiente para impedir el contacto de paredes	1,0	
I. Zona arenosa, gravosa o de roca triturada, de espesor suficiente para impedir el contacto de paredes	1,0	

Tabla II-4: Rango de valores de  $J_a$  usados en sistema Q

Descripción	Valor		Notas
	$J_a$	$\phi_r$ [°]	
<b>4. Alteración de las juntas</b>			
a) Contacto con las paredes de roca			
A. Relleno soldado, duro, inablandable, impermeable	0,75		1. Los valores de $\phi_r$ , ángulo de fricción residual, dan una guía aproximada de las propiedades mineralógicas de los productos de alteración, si éstos están presentes.
B. Paredes de juntas inalteradas, sólo con manchas de oxidación	1,0	25-30	
C. Paredes ligeramente alteradas, con recubrimiento de minerales inablandables, partículas arenosas, roca desintegrada no arcillosa	2,0	25-30	
D. Recubrimientos limosos o arenoso-arcillosos, con una pequeña fracción de arcilla (inablandable)	3,0	20-25	
E. Recubrimientos ablandables o con arcilla de baja fricción o sea caolinita o mica. También clorita, talco, yeso, grafito, etc., y pequeñas cantidades de arcillas expansivas (recubrimiento discontinuo de 1-2 mm de espesor menos)	4,0	8-16	
b) Contacto con las paredes antes de un corte de 10 cm.			
F. Partículas arenosas, roca desintegrada, sin arcilla, etc.	4,0	25-30	
G. Rellenos de minerales arcillosos muy sobreconsolidados e inablandables (continuos <5 mm de espesor)	6,0	16-24	
H. Rellenos de minerales arcillosos de sobreconsolidación media a baja (continuos <5 mm de espesor)	8,0	12-16	
I. Rellenos de arcilla expansiva, o sea montmorillonita (continuos < 5 mm de espesor). El valor de $J_a$ depende del porcentaje de partículas expansivas del tamaño de arcilla y del acceso al agua	8,0-12	6-12	
c) Sin contacto de las paredes después del corte			
J.K.L. Zonas o capas de roca desintegrada o triturada y arcilla (ver G, H e I para las condiciones de la arcilla)	6,0, 8,0 o 8,0-12	6-24	2. Los valores expresados para los parámetros $J_r$ y $J_a$ se aplican a las familias de diaclasas que son menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por la orientación de las mismas como por su resistencia al corte (esta resistencia puede evaluarse mediante la expresión: $T \sim \sigma_n t g^{-1}(\frac{J_r}{J_a})$ ).
M. Zonas o capas de arcilla limosa o arenosa, pequeña fracción de arcilla (inablandable)	5,0		
N.O.P Zonas o capas gruesas y continuas de arcilla (ver G, H e I para las condiciones de la arcilla)	10, 13 o 13-20	6-24	

Tabla II-5: Rango de valores de  $J_w$  usados en sistema Q

Descripción	Valor		Notas
	$J_w$	Presión de agua [kg/cm <sup>2</sup> ]	
<b>5. Reducción por agua en las juntas</b>			
A. Excavación seca o flujos bajos (<5 L/min localmente)	1,0	<1,0	1. Los factores C hasta F son estimaciones imprecisas. Aumentar $J_w$ , si se instala drenaje. 2. Los problemas especiales causados por la presencia de hielo no se toman en consideración.
B. Flujo o presión medios, con lavado ocasional de los rellenos	0,66	1,0-2,5	
C. Gran flujo o presión alta en roca competente con juntas sin relleno	0,5	2,5-10	
D. Gran flujo o presión alta, lavado considerable de los rellenos	0,33	2,5-10	
E. Flujo o presión excepcionalmente altos con las voladuras, disminuyendo con el tiempo	0,2-0,1	>10	
F. Flujo o presión excepcionalmente altos en todo momento	0,1-0,05	>10	

Tabla II-6: Rango de valores de SRF usados en sistema Q

Descripción	Valor		Notas
	SRF		
<b>6. Factor de reducción de esfuerzos</b>			
a) Zonas de debilidad que intersectan la excavación y pueden ser las causa de que el macizo se desestabilice cuando se construya el túnel			1. Reducir estos valores del SRF en un 25-50%, si las zonas de corte relevantes influyen pero no intersectan la excavación
A. Múltiples zonas de debilidad con contenido de arcilla o roca químicamente desintegrada; roca circundante muy suelta (cualquier profundidad).	10		
B. Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación <50 m.)	5,0		
C. Zonas de debilidad aisladas que contengan arcilla o roca químicamente desintegrada (profundidad de excavación >50 m)	2,5		
D. Múltiples zonas de corte en roca competente (sin arcilla), roca circundante suelta (cualquier profundidad)	7,5		
E. Zonas de corte aisladas en roca competente (sin arcilla) (profundidad de excavación <50 m)	5,0		

F. Zonas de corte aisladas en roca competente (sin arcilla) (profundidad de excavación >50 m)	2,5				
G. Juntas abiertas sueltas, fisuración intensa (cualquier profundidad)	5,0				
b) Roca competente, problemas de esfuerzos	$\sigma_c/\sigma_1$	$\sigma_t/\sigma_1$	<b>SRF</b>		<p>2. Para un campo de tensiones muy anisotrópico (si es medido): cuando <math>5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10</math>, reducir <math>\sigma_c</math> a <math>0,8\sigma_c</math> y <math>\sigma_t</math> a <math>0,8\sigma_t</math> donde:</p> <p><math>\sigma_c</math>: resistencia a la compresión sin confinar.  <math>\sigma_t</math>: resistencia a la tracción (carga puntual).  <math>\sigma_1</math> y <math>\sigma_3</math>: esfuerzos principales mayor y menor.</p>
A. Esfuerzo bajo, cerca de la superficie	>200	>13	2,5		
B. Esfuerzo medio	200-10	13-0,66	1,0		
C. Esfuerzo elevado, estructura muy cerrada, generalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de las paredes	10-5,0	0,66-0,33	0,5-2,0		
D. Estallido de roca moderado (roca masiva)	5,0-2,5	0,33-0,16	5,0-10		
E. Estallido de roca intenso (roca masiva)	<2,5	<0,16	10-20		
c) Roca compresiva, flujo plástico de roca incompetente bajo la influencia de presiones altas de roca					<p>3. Hay pocos registros de casos donde la profundidad del techo debajo de la superficie sea menor que el ancho. Se sugiere que se incremente el SRF de 2,5 a 5,0 para esos casos.</p>
A. Presión moderada de roca extrusiva	5,0-10				
B. Presión alta de roca extrusiva	10-20				
d) Roca expansiva, acción química expansiva, dependiendo de la presencia de agua					
A. Presión moderada de roca expansiva	5,0-10				
B. Presión alta de roca expansiva	10-5,0				

**ANEXO III: Tablas de valores numéricos de cada parámetro del sistema RMR (1)**

*Tabla III-1: Rango de valores de J1 usados en sistema RMR*

Parámetro			Rango de valores						
J1	Resistencia de la roca intacta	Resistencia a la carga puntual [MPa]	>10	4,0-10	2,0-4,0	1,0-2,0	Rango bajo se usa el test de resistencia a la compresión uniaxial		
		Resistencia a la compresión uniaxial [MPa]	>250	100-250	50-100	25-50	5,0-25	1,0-5,0	<1,0
Valor			15	12	7,0	4,0	2,0	1,0	0

*Tabla III-2: Rango de valores de J2 usados en sistema RMR*

Parámetro		Rango de valores				
J2	RQD [%]	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Valor	20	17	13	8	3

*Tabla III-3: Rango de valores de J3 usados en sistema RMR*

Parámetro		Rango de valores				
J3	Espaciamiento de discontinuidades [m]	>2,0	0,6-2,0	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06
	Valor	20	15	10	8	5

*Tabla III-4: Rango de valores de J4 usados en sistema RMR*

Parámetro		Rango de valores				
J4	Condición de discontinuidades	*Muy rugosas *Sin continuidad *No separadas *Borde sin desgaste	*Ligeramente rugosas *Separaciones <1,0 mm *Borde ligeramente desgastado	*Ligeramente rugosas *Separaciones <1,0 mm *Borde muy desgastado	*Resbaladizas *Ranura <5,0 mm *Separaciones 1,0-5,0 mm *Continuas	*Ranura suave >5,0 mm *Separaciones > 5,0 mm *Continuas
	Valor	30	25	20	10	0

*Tabla III-5: Rango de valores de J5 usados en sistema RMR*

Parámetro			Rango de valores				
J5	Agua subterránea	Afluencia en 10 m de túnel [l/m]	Ninguna	<10	10-25	25-125	>125
		Presión de agua/Esfuerzo principal mayor	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5
		Condiciones generales	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Afluyente
	Valor	15	10	7,0	4,0	0	

*Tabla III-6: Rango de valores de J6 usados en sistema RMR*

Parámetro		Rango de valores				
J6	Dirección y Buzamiento	Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

*Tabla III-7: Orientación de discontinuidades en sistema RMR*

Orientación de las discontinuidades						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento		Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 0-20°
Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°			
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

**ANEXO IV: Tabla para determinar el sistema de soporte a través del sistema RMR**

*Tabla IV-1: Elementos de estabilización según RMR (14)*

RMR	Excavación	Pernos (20 mm de diámetro, completamente lechado)	Shotcrete	Arcos
81-100	Avance a sección completa de 3 m.	Innecesario a excepción de bloques sueltos	Innecesario	Innecesario
61-80	Avance a sección completa de 1,0-1,5 m Soporte a 20 m del tope	Anclado local en la corona de 2,0 a 3,0 m de largo y espaciado de 2,0 a 2,5 m con malla ocasional	5,0 cm en la corona para impermeabilización	Innecesario
41-60	Avance y desborde (cabeza y banqueo) de 1,5 a 3,0 m en cabeza. Comenzar soporte por disparo. Sostenimiento completo a 10 m del tope	Anclado sistemático en la corona y lados de 3,0 a 4,0 m de largo y espaciado de 1,5 a 2,0 m con malla en techo	5,0 a 10 cm en la corona y 3,0 cm en los lados	Innecesario
21-40	Avance y desborde (cabeza y banqueo) 1,0 a 1,5 m en cabeza. Instalar soporte al mismo tiempo con la excavación a 10 m del tope	Anclado sistemático en la corona y lados de 4,0 a 5,0 m de largo y espaciado de 1,0 a 1,5 m con malla	10 a 15 cm en corona y 10 cm en los lados	Ligeros a medianos con espaciamiento de 1,5 m donde se requieran
<20	Avance por partes (múltiples fases), avances de 0,5 a 1,5 m en cabeza. Instalar soporte al mismo tiempo con la excavación. Shotcrete lanzado tan pronto como sea posible después de la voladura	Anclado sistemático en la corona y lados de 5,0 a 6,0 m de largo y espaciado de 1,0 a 1,5 m con malla. Contra corona anclada	15 a 20 cm en corona, 15 en los lados y 5,0 cm en frente o tope, inmediata después de cada avance	Medianos a pesados con espaciamiento de 0,75 m botadores y forro