



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

APLICACIONES GEOTÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES  
HIDRÁULICAS DEL MACIZO ROCOSO DURANTE LA EXPLOTACIÓN MINERA POR  
HUNDIMIENTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

CAROL SHAND MORALES

PROFESOR GUÍA:

EUGENIO SANTANDER AGUIRRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

YURI GARCÍA CIFUENTES

GONZALO MONTES ATENAS

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas

**POR:** Carol Shand Morales

**FECHA:** 10/04/2018

**PROFESOR GUÍA:** Eugenio Santander Aguirre

## **APLICACIONES GEOTÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL MACIZO ROCOSO DURANTE LA EXPLOTACION MINERA POR HUNDIMIENTO**

Históricamente, durante el desarrollo de las explotaciones mineras subterráneas por hundimiento, el agua ha sido un problema que ha afectado el normal y seguro desarrollo de la operación, en ocasiones obligando incluso al cierre de dichas operaciones (Milford 1924, Luotuoshan 2010). Algunos de los típicos problemas que generan las aguas subterráneas es la alteración y cambio en las propiedades físicas y mecánicas de algunos materiales cuando éstos son contactados y principalmente, la generación de Aguas Mina, que corresponden a aquellas aguas de infiltración que entran en contacto con sustancias minerales en el subsuelo pudiendo ocasionar daños a los procesos e instalaciones. Este contacto entre agua y macizo rocoso, medido por el volumen de agua por unidad de tiempo, podrá resultar en cambios en las condiciones geomecánicas del macizo, al igual que cambios químicos que modifiquen las condiciones previstas del material a extraer.

Por otra parte, en la actualidad las faenas mineras se enfrentan a un escenario donde el recurso hídrico debe ser gestionado de manera racionalmente eficiente, por lo que la estimación de caudales de agua de infiltración en etapas tempranas del proyecto representa una valiosa información a considerar para futuros dimensionamientos de sistemas drenaje mina, consideraciones medioambientales y aspectos operacionales propios de un método de explotación por hundimiento.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para estimar propiedades hidráulicas básicas del macizo rocoso aplicando criterios geotécnicos y, a partir de esto, evaluar potenciales volúmenes de agua que podrían infiltrar desde niveles superficiales hasta niveles inferiores en una explotación minera subterránea por hundimiento, esto, desde una condición de macizo rocoso inicial (pre-minería) hasta cuándo se ha desarrollado de manera progresiva el avance del hundimiento en altura, conectando a superficie, en un método minero del tipo block o panel caving.

Para la implementación de esta metodología, se han desarrollados modelos conceptuales basado en 2 enfoques: el primero corresponde a un modelo analítico soportado en formulismos matemáticos (para el cálculo de permeabilidad) mediante el uso de geometrías bidimensionales simplificadas del proceso de hundimiento y un segundo enfoque, que corresponde al desarrollo de un modelo numérico tridimensional del tipo diferencias finitas (FLAC 3D®) que permite de manera adicional la estimación del cambio de las propiedades geotécnicas del macizo rocoso y por ende de sus propiedades hidráulicas durante etapas claves en el desarrollo del método de hundimiento. Ambos enfoques son evaluados a través de un ejemplo comparativo, que permitirá entregar recomendaciones relativas para su utilización, según, por ejemplo, niveles de confiabilidad requeridos.

*«Limitar nuestra atención a cuestiones terrestres sería limitar el espíritu humano. El mayor enemigo del conocimiento no es la ignorancia, sino la ilusión del conocimiento.»*  
**Stephen Hawking**

# Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Objetivos .....	3
2. FLUJOGRAMA EXPLICATIVO .....	4
3. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN POR HUNDIMIENTO.....	5
3.1. Impactos de la Minería .....	5
3.2. Geotecnia y Recurso Hídrico.....	7
3.3. Características del Macizo Rocoso .....	9
3.3.1. Caracterización Geotécnica del Macizo Rocoso.....	9
3.3.1.1. Sistema <i>Rock Mass Rating</i> (RMR, Bieniawski, 1976).....	9
3.3.1.2. Sistema del Índice “Q” de Barton (Barton y otros,1974) .....	15
3.3.1.3. Índice de Resistencia Geológica (GSI) de Hoek (Marinos, P. y Hoek, 2000) .....	21
3.3.1.3.1. Consideraciones del GSI .....	21
3.3.1.4. Sistema <i>Mining Rock Mass Rating</i> (MRMR o IRMR) Laubscher, 1990. ....	24
3.3.1.5. Tamaño de bloque.....	29
3.3.1.5.1. Representación de tamaño de bloques en sistemas de clasificación .....	30
3.3.1.5.2. Parámetros geotécnicos asociados al tamaño de bloques.....	30
3.3.1.5.3. Espaciamiento de discontinuidades (S).....	31
3.3.1.5.4. Volumen de bloque ( $V_b$ ).....	31
3.3.1.5.5. Conteo de discontinuidades volumétrico ( $J_v$ ) .....	32
3.3.1.5.6. RQD (Rock Quality Designation).....	33
3.4. Caracterización de Propiedades Hidráulicas del Macizo Rocoso .....	34
3.4.1. Estimación de permeabilidad .....	34
3.4.1.1. Permeabilidad de discontinuidades.....	35
3.4.1.2. Formulismo empírico en la estimación de permeabilidad .....	36
3.4.1.3. Permeabilidad de macizo rocoso intacto .....	37
3.5. Definición de Método de Explotación – Método de Hundimiento.....	40
3.5.1. Propagación de hundimiento .....	40
3.5.2. Predicción de subsidencia.....	42
3.5.3. Efecto de fábrica estructural en la subsidencia .....	46
3.6. Suficiencia de información en estudios hídricos .....	47

3.7. Aportes de la literatura a la resolución de la problemática .....	49
4. CONCEPTUALIZACIÓN Y ENFOQUES UTILIZADOS EN LA DEFINICIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS.....	50
4.1. Conceptualización .....	50
4.2. Modelos Conceptuales Iniciales.....	51
4.3. Definición de Parámetros.....	52
4.4. Definición de Modelos conceptuales analítico y numérico.....	54
4.4.1. Modelo analítico .....	54
4.4.2. Modelo numérico.....	55
5. MODELO ANALÍTICO o ENFOQUE TRADICIONAL .....	56
5.1. Cálculo de Geometría de Subsistencia a partir de métodos empíricos y/o analíticos.....	56
5.2. Cálculo de Permeabilidades a partir de métodos analíticos .....	56
5.3. Análisis de Resultados .....	57
5.3.1. Estimación indirecta de permeabilidad in-situ y durante el proceso de caving.....	57
5.3.2. Definición de zonas de permeabilidad.....	58
6. MODELO NUMÉRICO o PROPUESTA DE METODOLOGÍA .....	59
6.1. Análisis de Resultados .....	59
6.2. Comparación y validación con secciones obtenidas del modelo analítico y numérico.....	61
7. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES .....	62
8. PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....	63
9. BIBLIOGRAFÍA .....	64

## ***Índice de Ilustraciones***

Ilustración 1 Consecuencia de infiltración de agua barro en un proyecto minero	2
Ilustración 2 Flujograma de desarrollo de hipótesis de trabajo	4
Ilustración 3 Derrumbe en mina de Turquía deja 20 trabajadores atrapados (Fuente: Perú 21)	8
Ilustración 4 Representación gráfica de los parámetros del método Q (Hutchinson y Diederichs (1996))	13
Ilustración 5 Ejemplos de cálculo de $J_n$ en sondajes (Piteau Associates, 2018)	16
Ilustración 6 Ejemplos de identificación de parámetro $J_r$ en discontinuidades (Piteau Associates, 2018)	17
Ilustración 7 Correlación entre parámetros $J_r$ y JRC (Barton y Choubey, 1987)	18
Ilustración 8 Ejemplos de identificación del parámetro $J_a$ en discontinuidades (Piteau Associates, 2018)	18
Ilustración 9 Caracterización del macizo rocoso en función de los bloques basado en el trabamamiento y las condiciones de las discontinuidades (Marinos y Hoek, 2000)	20
Ilustración 10 Caracterización del GSI en sondajes de acuerdo al Índice de Resistencia Geológica de Macizos Rocosos Fracturados (Piteau Associates, 2018)	21
Ilustración 11 Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos (Marinos y Hoek, 2000)	21
Ilustración 12 Sistema MRMR (basada en Laubscher, 1990)	22
Ilustración 13 Diferentes tamaños de bloque y su variación respecto a las familias de discontinuidades presentes (Yarahmadi, R., 2015)	26
Ilustración 14 Ejemplo de geometrías de bloques afectadas por espaciamiento de discontinuidades (Barton, 1995)	28
Ilustración 15 Bloque mínimo y máximo en un macizo rocoso teórico (Palmstrom, 2011)	29
Ilustración 16 Cálculo de RQD (modificado a partir de Deere, 1989)	30
Ilustración 17 Rangos de Permeabilidad (Read, 2013)	32
Ilustración 18 Flujo en macizo rocoso, con direcciones preferentes siguiendo las discontinuidades presentes (Read, 2013)	33
Ilustración 19 Influencia de la apertura y espaciamiento de discontinuidades en la conductividad hidráulica (Read, 2013)	34
Ilustración 20 Flujo en macizo rocoso (Read, 2013)	35
Ilustración 21 Gráfico relación RQD y permeabilidad	36
Ilustración 22 Iniciación de Hundimiento – Socavación	37
Ilustración 23 Terminología en Subsistencia (Flores & Karzulovic, 2004b)	39
Ilustración 24 Zonas de Subsistencia (Van As, et.al, 2003)	41
Ilustración 25 Desarrollo de subsidencia superficial inducida por hundimiento (Van As, 2003)	41
Ilustración 26 Influencia en superficie de subsidencia en topografía irregular (Mina El Teniente, Chile). Área de subsidencia delimitada por línea punteada.	42
Ilustración 27 Influencia en superficie de subsidencia en topografía plana (Mina Northparkes, Australia). Área de subsidencia delimitada por línea punteada.	42
Ilustración 28 Efectos de los planos de debilidad principales en la subsidencia (Stacey, 2007)	43
Ilustración 29 Conceptualización de dirección y cantidad de flujo (Magnitud de Flecha proporcional a la cantidad de flujo)	45
Ilustración 30 Modelo Conceptual esquemático	46
Ilustración 31 Modelo Conceptual de Avance de Socavación	47
Ilustración 32 Cálculo de geometría mediante métodos empíricos	52
Ilustración 33 Zonificación de Permeabilidad en Modelo Empírico	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

Ilustración 34 Resultados Modelo Isotrópico sin Presencia de Fallas - Distribución Esfuerzo Principal	54
Ilustración 35 Resultados Modelo Isotrópico sin Presencia de Fallas - Distribución Desplazamientos	54
Ilustración 36 Distribución de permeabilidad (Zonas de permeabilidad)	55
Ilustración 37 Comparación de Zonificación de Permeabilidad en ambos métodos	<b>Error!</b>

**Bookmark not defined.**

## ***Índice de Tablas***

Tabla 1 Sistema RMR <sub>76</sub> - Clasificación del Macizo Rocoso	10
Tabla 2 Sistema RMR <sub>76</sub>	11
Tabla 3 Definición de JC <sub>76</sub> (Basada en Bieniawski, 1976))	12
Tabla 4 Descripción y puntajes para el parámetro Jn	15
Tabla 5 Descripción y ratings para el parámetro Jr	16
Tabla 6 Clasificación de GSI (Marinos y Hoek, 2000)	19
Tabla 7 Descripción parámetros involucrados en Jc – Condición de Agua (Laubscher, 1990)	24
Tabla 8 Métodos de medición de tamaño de bloque	27
Tabla 9 Grados de influencia de factores que afectan la subsidencia superficial sugerido por Flores & Karzulovic (2002)	43
Tabla 10 Parámetros típicos de diseño en minería subterránea por hundimiento (Flores & Karzulovic, 2002)	48
Tabla 11 Parámetros de Modelos – Macizo Rocoso	48
Tabla 12 Parámetros de Modelos – Fallas	49

## ***Índice de Ecuaciones***

Ecuación 1 Definición de RMR - Sumatoria de parámetros	9
Ecuación 2 Formulismo Índice Q de Barton	13
Ecuación 3 Formulismo Índice Q' de Barton	14
Ecuación 4 Relación entre índice Q' e índice GSI	19
Ecuación 5 Formulismo de Sistema MRMR - Cálculo de RMRL	22

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

En las alturas de la cordillera de los Andes, se encuentran yacimientos minerales de cuantioso valor económico. En ocasiones, éstos se encuentran acompañados de reservas de agua dulce, principalmente en forma de glaciares, capaces de proveer de agua a importantes valles facilitando así, el establecimiento de asentamientos humanos y el desarrollo de importantes actividades productivas como la minería.

Estas reservas de agua, mediante distintos procesos de infiltración, fluyen mayoritariamente por las discontinuidades presentes en el macizo rocoso (naturales o inducidas) pudiendo aflorar en niveles inferiores, durante el desarrollo de métodos mineros subterráneos de hundimiento masivo del tipo block o panel caving. Este flujo de agua puede acarrear diversos problemas, que deben ser abordados con rapidez, eficiencia y principalmente antelación, buscando así optimizar el uso del recurso, minimizar los impactos a la continuidad operacional, aumentando la seguridad a las personas, equipos e infraestructura que normalmente deben convivir con los afloramientos de estas aguas subterráneas de infiltración.

Lo anterior, justifica la necesidad de identificar y cuantificar anticipadamente – y por ejemplo para etapas tempranas de proyectos -, los flujos de entrada de agua subterránea, a través de la preparación de adecuados y razonables planes de manejo de agua.

El presente estudio busca realizar la estimación de propiedades hidráulicas a partir de parámetros geotécnicos. La estimación de la permeabilidad permite la estimación de flujo de agua subterránea que tendrá efectos en los niveles inferiores en un método minero subterráneo del tipo de hundimiento. En la implementación de la estimación se utilizan dos enfoques: un modelo analítico soportado en formulismos matemáticos (enfoque tradicional con cálculo de permeabilidad) y geometrías bidimensionales simplificadas del proceso de hundimiento y un modelo numérico tridimensional del tipo diferencias finitas (FLAC 3D®), basado en la utilización de los mismos principios del modelo analítico. Ambos enfoques son evaluados a través de un ejemplo comparativo, que permitirá entregar recomendaciones para su utilización, según niveles de confiabilidad requeridos.

## REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA<sup>1</sup>

“**Art. 113.-** Documentación sobre labores antiguas. - Los titulares de derechos mineros que ejecuten trabajos subterráneos, deben contar con la correspondiente información gráfica respecto de la situación o condiciones del o los lugares, en los que existan labores antiguas, fallas, depósitos naturales de agua, etc. con el fin de prevenir accidentes de personal que circule por el sector, así como derrumbes o inundaciones que puedan afectar la seguridad de las operaciones.”

---

<sup>1</sup> Decreto Supremo N° 132, Ministerio de Minería. Publicado en el Diario Oficial el 07 de Febrero de 2004.



*Ilustración 1 Consecuencia de infiltración de agua barro en un proyecto minero*

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Implementar aplicaciones geotécnicas que permitan estimar propiedades hidráulicas básicas del macizo rocoso y a partir de esto, potenciales volúmenes de agua que podrían infiltrar desde niveles superficiales hasta niveles inferiores de producción, considerando una condición de macizo rocoso inicial (pre-minería) y una final donde se han registrado evidencias de subsidencia en superficie (cráteres), debido al desarrollo y avance de métodos de hundimiento masivo del tipo block o panel caving.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

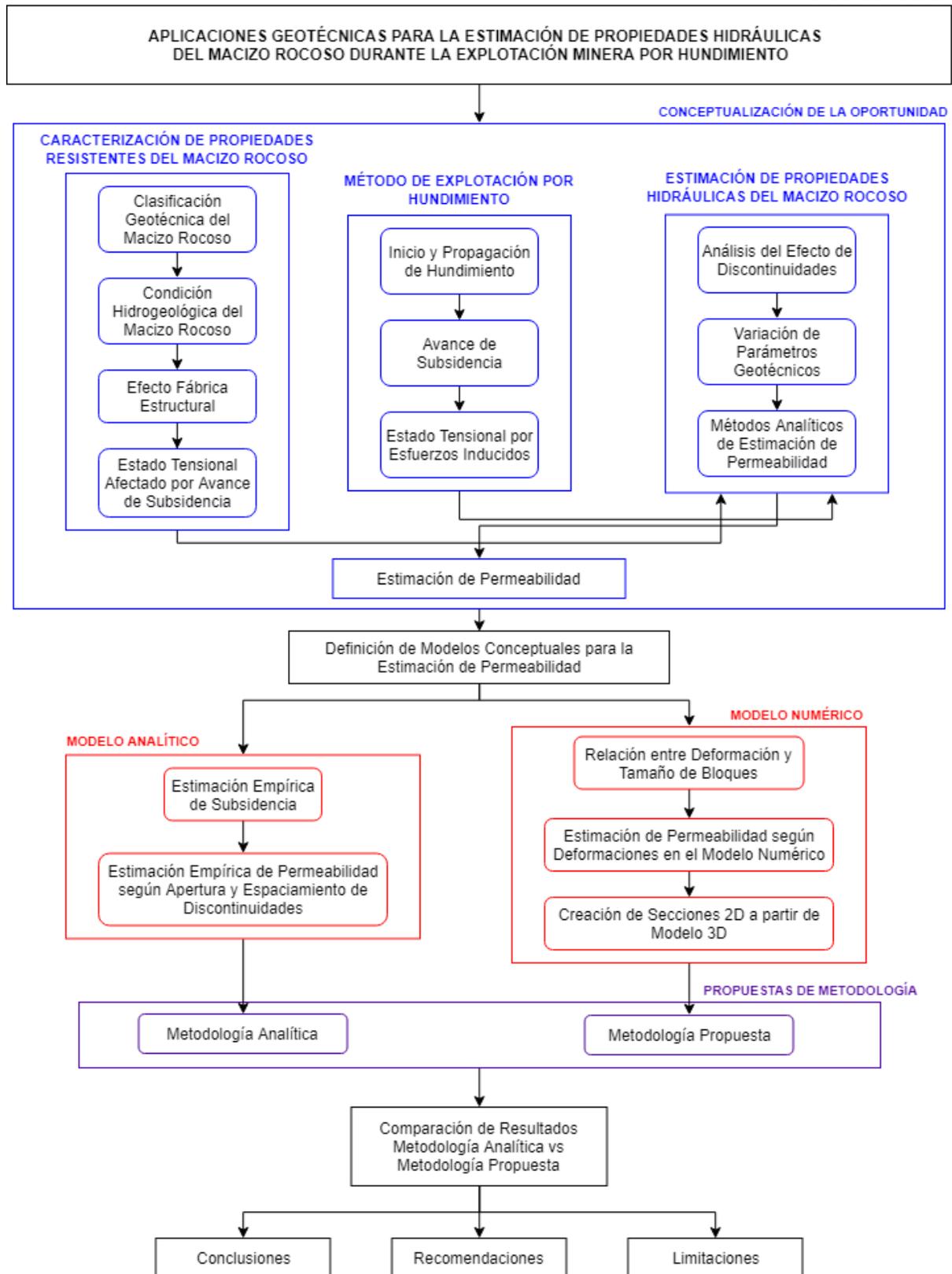
- Proponer la utilización de un par de enfoques a partir del cual estimar la permeabilidad del macizo rocoso; Modelo analítico soportado en formulismos matemáticos (enfoque tradicional con cálculo de permeabilidad) y geometrías bidimensionales simplificadas del proceso de hundimiento. Modelo numérico tridimensional del tipo diferencias finitas (FLAC 3D®) basado en la utilización de los mismos principios del modelo analítico.
- Evaluación a través de un ejemplo comparativo de la diferencia de ambas metodologías.

### **1.3. Objetivos**

- Simplificación del método de extracción por hundimiento, utilizando etapas predefinidas que simulan el avance del hundimiento, basado en los estados de quiebre del macizo rocoso (pre-minería y conexión a superficie).
- Modelo teórico de subsidencia basado en las simplificaciones antes mencionadas.
- Ejemplo comparativo de ambas metodologías y su aplicación está limitada a las simplificaciones del análisis (ingeniería a nivel conceptual).
- Efectos de infraestructura no considerados.
- No se considera un análisis de flujos.

## 2. FLUJOGRAMA EXPLICATIVO

HIPÓTESIS DE TRABAJO



### **3. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN POR HUNDIMIENTO**

A continuación, se presentan los antecedentes necesarios para la realización del presente estudio, abordando temas como: los impactos de la minería y su efecto respecto al uso del recurso hídrico, los métodos de explotación minera por hundimiento, los sistemas de clasificación geotécnica del macizo rocoso, la condición hidrogeológica del macizo rocoso y su relación con el parámetro de permeabilidad. Luego los efectos de la fábrica estructural presente el fenómeno de subsidencia, clasificación de macizo rocoso, método MRMR. Además, se presentan los fundamentos de permeabilidad en macizo rocoso y discontinuidades.

#### **3.1. Impactos de la Minería**

La minería genera cambios ambientales y sociales no importa donde ocurra. Las perturbaciones causadas por la minería pueden impactar el ambiente físico (a través, por ejemplo, de pérdida de hábitats y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas) o comunidades locales (a través, por ejemplo, de modificaciones culturales por la presencia de trabajadores mineros). Aunque es inevitable cierto grado de perturbación incluso en las minas mejor manejadas, casi todos los impactos sociales y ambientales negativos son evitables si las compañías operasen de acuerdo a los mejores estándares posibles. Desafortunadamente, las estructuras existentes no han asegurado consistentemente un comportamiento responsable en las operaciones mineras, y los impactos negativos ambientales y sociales ocurren más frecuentemente de lo que deberían.

En los últimos años, se han realizado campañas exitosas para un comportamiento corporativo más responsable, enfocándose en la promoción de silvicultura sostenible, el detenimiento de la comercialización conflictiva de diamantes, y protegiendo los derechos laborales en la industria del vestido, entre otros. Los comercializadores y el sector privado entienden los riesgos de asociación que se encuentran en las mentes de los consumidores hacia productos provenientes de procesos irresponsables. Por cierto, los consumidores en algunos países industrializados tratan de hacer elecciones ambiental y socialmente responsables a la hora de comprar productos o servicios, y los inversionistas y aseguradores han comenzado a responder a esto; entienden que, disminuyendo los riesgos ambientales y sociales, puede traducirse en menores costos para hacer negocios.

Reconociendo estas tendencias, algunas corporaciones han avanzado a distinguirse así mismas de sus competidores sujetando sus operaciones al escrutinio independiente y haciendo verificable el origen responsable de sus productos. Muchos se han dado cuenta que el cumplimiento de las leyes en los países donde operan es insuficiente para proteger el ambiente o las comunidades vulnerables. Algunas corporaciones reconocen la necesidad de cumplir con códigos internacionales, protocolos, convenios, declaraciones, instrumentos y costumbres que protegen los derechos humanos fundamentales, la

autodeterminación, la integridad cultural, derechos sociales y laborales, y el ambiente natural.

En un esfuerzo por evaluar los impactos ambientales y sociales de la minería, en el 2002 el Instituto Internacional de Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED por sus siglas en inglés) publicó un análisis comprehensivo de los temas principales que enfrenta el sector minero, éste fue el resultado de un proyecto de investigación de dos años conocido como “Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable” (MMSD por sus siglas en inglés). El reporte fue comisionado por el Consejo Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD por sus siglas en inglés), y promovido y financiado en gran parte por grandes compañías mineras. Algunas de estas compañías, de la misma manera, formaron una nueva asociación de comercio en la industria, el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM por sus siglas en inglés), con un mandato para promover el desarrollo sostenible en el sector.

Este esfuerzo investigativo liderado por la industria fue subsecuentemente seguido por iniciativas del sector, específicas y detalladas, con la meta de abordar los impactos ambientales y sociales de la minería en una variedad de contextos, los que incluyen:

- Una revisión independiente de los impactos de los préstamos del Banco Mundial en los sectores de industrias extractivas, el cual resultó en un reporte final con recomendaciones para futuras actividades de préstamo en estos sectores;
- Un código voluntario de conducta conocido como los Principios de Ecuador para proveer guías para el financiamiento, por bancos privados, de proyectos de más de 50 millones de dólares. Desde entonces, algunos de los bancos privados más grandes han producido guías aún más detalladas para los sectores, incluso para el sector minero;
- Un diálogo entre la Unión Mundial para la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés) y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) para abordar temas de conservación de biodiversidad y minería;
- Iniciativas por los gobiernos en los sectores de las industrias extractivas para promover una mayor transparencia y protección a los derechos humanos;
- Iniciativas del sector privado, como códigos de conducta para la industria minera, que busquen establecer condiciones para un comportamiento más responsable en el sector;
- Una variedad de declaraciones, demandas, y documentos de posición de política preparados por grupos de sociedad civil que apunten a mejorar las prácticas de las compañías mineras alrededor del mundo; y
- La publicación de un suplemento sobre el sector minero en la Global Reporting Initiative (Iniciativa Global de Informes, GRI por sus siglas en inglés) dirigido a estandarizar la forma por lo cual las compañías mineras informan de sus impactos sociales y ambientales.

Estas iniciativas y varias otras forman la base del marco básico para una Minería Responsable. Sin embargo, estas iniciativas colectivamente cubren un amplio rango de temas referidos a la minería, y por sí mismas no brindan una base integral para el desarrollo de estándares ambiental y socialmente responsables para la minería. El objetivo del marco básico es proporcionar los antecedentes de investigación y recomendar principios para ser considerados por un amplio rango de actores interesados en promover una minería responsable.

### **3.2. Geotecnia y Recurso Hídrico**

El rol del agua en las operaciones mineras es muy decisivo. En base al tipo de sus actividades, convencionalmente la minería se divide en subterránea y a tajo abierto, sin embargo, desde el punto de vista hidrogeológico y por su ubicación es más apropiado distinguirla por encima o por debajo del nivel freático. En este sentido el estudio del agua subterránea es un problema mucho más importante en los yacimientos bajo tierra, ya que en contados casos se convierte en un inconveniente para las actividades a campo abierto.

La mayor demanda del líquido vital del planeta ocurre en los procesos metalúrgicos, siendo la flotación la que mayor consumo requiere, y la lixiviación en pilas, la de menor. Para satisfacer su necesidad de agua, la actividad minera utiliza generalmente la que se encuentra en los lagos y ríos, sin embargo, solo en contados casos, y generalmente de forma casual, echa mano de la subterránea. En algunas minas se acude al drenaje para eliminarla. La técnica empleada es la extracción por bombeo, aunque en casos de mayor gravedad se realiza mediante túneles.

La geotecnia está orientada a vigilar que las construcciones propias de la actividad minera estén bien estructuradas, que cuenten con los materiales adecuados, que las paredes sean estables y estén diseñadas para controlar la cantidad de agua existente. Además, debe encargarse de sugerir los métodos de excavación.

Pese a las medidas de seguridad y a los avances tecnológicos, el riesgo a tener algún accidente es real, sobre todo, en las excavaciones profundas. Sin embargo, para el especialista en minería de la Organización Mundial del Trabajo, Martin Hann, el peligro ha disminuido: “A nivel mundial hay un menor número de accidentes en el sector en comparación con lo que ocurría 10 años atrás, pero algunos países siguen sin registrar sus datos de forma sistemática. El mayor número de accidentes ocurren en la minería informal”.

Pese al aumento en seguridad que se ha dado en el sector, una mala gestión en cuanto al agua subterránea y los sistemas para el drenaje y evacuación de la misma puede terminar generando el derrumbe de los yacimientos. Ejemplo de esto es lo que pasó el 2014 en Turquía, donde 20 mineros quedaron atrapados en una mina de carbón en la provincia de Karaman, ubicada en la parte central del país europeo, al producirse un derrumbe por acumulación de agua. “El derrumbe no se ha debido a ninguna explosión ni fuga de gas, el agua ha inundado la galería”, declaró el gobernador de la zona, Murat Koca, a los medios de comunicación.

Los cambios en los acuíferos locales por acción directa de la minería son muy notorios. Se producen variaciones de los niveles freáticos y alteraciones localizadas en el caudal de los manantiales. El drenaje de socavones en yacimientos minerales con abundantes sulfuros y rocas de naturaleza ácida puede causar la generación de agua con abundante contenido de sulfatos y oxido. A fin de preservar la calidad del agua subterránea, las empresas están reutilizando ese líquido empleado durante el proceso minero-metalúrgico de modo que la disposición o vertido de efluentes cumplan con los estándares de calidad impuestos por los organismos nacionales e internacionales.



*Ilustración 3 Derrumbe en mina de Turquía deja 20 trabajadores atrapados (Fuente: Perú 21)*

### **3.3. Características del Macizo Rocosó**

Para definir las condiciones del Macizo Rocosó existen sistemas de clasificación geomecánica ampliamente difundidos en todo el mundo como los desarrollados por Bieniawski (1976), Barton (1974), Laubscher (1990) y Marinos y Hoek (2000) entre otros.

De todos estos sistemas, los más utilizados son el RMR<sub>76</sub> (Bieniawski, 1976), el Q (Barton, 1974) y el GSI (Marinos y Hoek, 2000) y en menor medida el sistema de IRMR (Laubscher, 1990). Sin embargo, dependiendo de la aplicación y/o contexto del estudio se utilizará el método más adecuado.

#### **3.3.1. Caracterización Geotécnica del Macizo Rocosó**

##### **3.3.1.1. Sistema *Rock Mass Rating* (RMR, Bieniawski, 1976)**

Es un sistema de clasificación desarrollado para estimar la fortificación de túneles en función del índice RMR de calidad geotécnica, en el que se le asigna un puntaje al macizo rocosó en base a la sumatoria de los puntajes de cinco parámetros. Este sistema fue desarrollado por Z.T. Bieniawski durante los años 1972- 1973, y modificado posteriormente en los años 1976, 1979 y 1989, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones.

Para el presente estudio se presentará la versión del método correspondiente al 1976, ya que tiene una correlación directa con el GSI (Índice de Resistencia Geológica), esto permitirá su posterior utilización como parámetro de calidad de la roca.

El GSI tiene una correlación directa con el RMR<sub>76</sub>, siempre que se considere un macizo rocosó completamente seco y sin ajustes por orientación de las estructuras es así como, Hoek E., Kaiser P. K. et al. 1993 (en el Libro "Support of Underground Excavations in Hard Rock"), indica que:

Si  $RMR_{76}' > 18$ , entonces  $RMR_{76}' = GSI$

Si  $RMR_{76}' < 18$  no se puede utilizar la clasificación de Bieniawski de 1976 para estimar GSI, en cambio se debería usar el valor de Q' de Barton, Lien y Lunde.

Sin embargo, Hoek E. 2006, en su libro "Practical Rock Engineering", establece que el valor mínimo de GSI para realizar esta correlación debería ser 25 ( $GSI \geq 25$ ) ya que para macizos rocosos de muy mala calidad el valor de RMR es muy difícil de estimar y el equilibrio entre las clasificaciones ya no entrega una base confiable para estimar la resistencia del macizo rocosó. Por consiguiente, no se debería usar la clasificación del RMR de Bieniawski para estimar valor GSI en los macizos rocosos de mala calidad."

El RMR está definido de acuerdo con la siguiente ecuación:

*Ecuación 1 Definición de RMR - Sumatoria de parámetros*

$$RMR_{76} = P(IRS) + P(RQD) + P(s) + P(JC) + P(WC)$$

Donde:

- $P(X)$  es el puntaje asociado a cada parámetro.
- IRS es la resistencia de la roca intacta.
- $s$  espaciamiento entre las estructuras, el cual, se ve reflejado de acuerdo al número de estructuras naturales presentes en un tramo registrado.
- JC es la condición de la fractura.
- WC es la condición de las aguas que, en el caso de los sondajes geotécnicos, se asume una condición seca (puntaje=10).

El RMR se obtiene como suma de puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los cinco parámetros antes mencionados y varía entre 0 y 100, y su valor es mayor cuanto mejor es la calidad geotécnica del macizo rocoso.

*Tabla 1 Sistema RMR<sub>76</sub> - Clasificación del Macizo Rocosos*

Clase	Puntaje RMR <sub>76</sub>	Calidad Geotécnica del Macizo
I	81 – 100	Muy Bueno
II	61 – 80	Bueno
III	41 – 60	Regular
IV	40 – 21	Malo
V	< 21	Muy Malo

Tabla 2 Sistema RMR<sub>76</sub>

PARÁMETRO			RANGO DE VALORES						
1	<b>Resistencia de la roca intacta</b>	Índice de carga puntual	>8 MPa	4–8 MPa	2–4 MPa	1–2 MPa	Para rangos menores es preferible utilizar resultados de pruebas UCS		
		Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)	>200 MPa	100–200 MPa	50–100 MPa	25–50 MPa	10–25 MPa	3–10 MPa	1–3 MPa
Puntaje			15	12	7	4	2	1	0
2	<b>Calidad del testigo perforado (RQD)</b>		90–100%	75–90%	50–75%	25–50%	<25%		
Puntaje			20	17	13	8	3		
3	<b>Espaciamiento de fracturas</b>		>3 m	1–3 m	0.1–1 m	50–300 mm	<50 mm		

PARÁMETRO		RANGO DE VALORES				
Puntaje		30	25	20	10	5
4	<b>Condición de fracturas</b>	Superficies muy rugosas. Sin continuidad. Sin separación. Paredes de roca dura	Superficies algo rugosas. Separación <1 mm. Paredes de roca dura.	Superficies algo rugosas. Separación <1 mm. Paredes de roca débil.	Superficies pulidas o relleno <5 mm. O fracturas abiertas 1–5 mm.	Relleno blando >5 mm. O fracturas abiertas >5 mm y continuas.
Puntaje		25	20	12	6	0
5	<b>Agua subterránea</b>	Cantidad de infiltración por 10 m de longitud de túnel.	Ninguna	<25 lt/min	25–125 lt/min	>0.5 lt/min
		Relación: Presión del agua en las fracturas/ esfuerzo principal.	0	0.0–0.2	0.2–0.5	>0.5
		Condiciones generales	Totalmente seco	Sólo húmedo	Ligera presión de agua	Serios problemas de agua
Puntaje		10	7	4	0	0

La Condición de Fractura (*JC*) es un parámetro fundamental en el sistema RMR de Bieniawski (1976) y abarca varias características de las discontinuidades, entre ellas: la continuidad, la abertura/espesor, la competencia de las paredes de la fractura, la rugosidad y el relleno.

La Condición de Fractura se asigna en cada estructura que corta el testigo de acuerdo con la tabla de clasificación de Bieniawski (1976) y se le asignan una valuación entre 0 y 25.

Para facilitar la interpretación del esquema de calificación de Bieniawski (1976), se presenta la siguiente tabla, la cual permite la estimación detallada de condición de fractura sobre la base de una evaluación de la resistencia de la pared de la discontinuidad y condiciones de rugosidad de la superficie y el relleno.

Tabla 3 Definición de  $JC_{76}$  (Basada en Bieniawski, 1976)

Condición de Relleno	Dureza de las paredes de la fractura o condición de relleno suave	Descripción de superficie de la fractura	Condición de la fractura ( $JC_{76}$ )
Sin relleno, relleno duro o el relleno no afecta la fricción de la fractura	$R \geq 3.0$	Muy rugoso	24
		Rugoso	22
		Poco rugoso	20
		Liso/Plano	16
	$R \geq 2.5$	Muy rugoso	16
		Rugoso	14
		Poco rugoso	12
		Liso/Plano	9

Condición de Relleno	Dureza de las paredes de la fractura o condición de relleno suave	Descripción de superficie de la fractura	Condición de la fractura (JC <sub>76</sub> )
El relleno afecta a la fricción de la fractura	Relleno Blando <1 mm	-	7-9
	Relleno Blando 1-5 mm/ con estrías	-	6
	Relleno Blando >5 mm	-	0

### 3.3.1.2. Sistema del Índice “Q” de Barton (Barton y otros,1974)

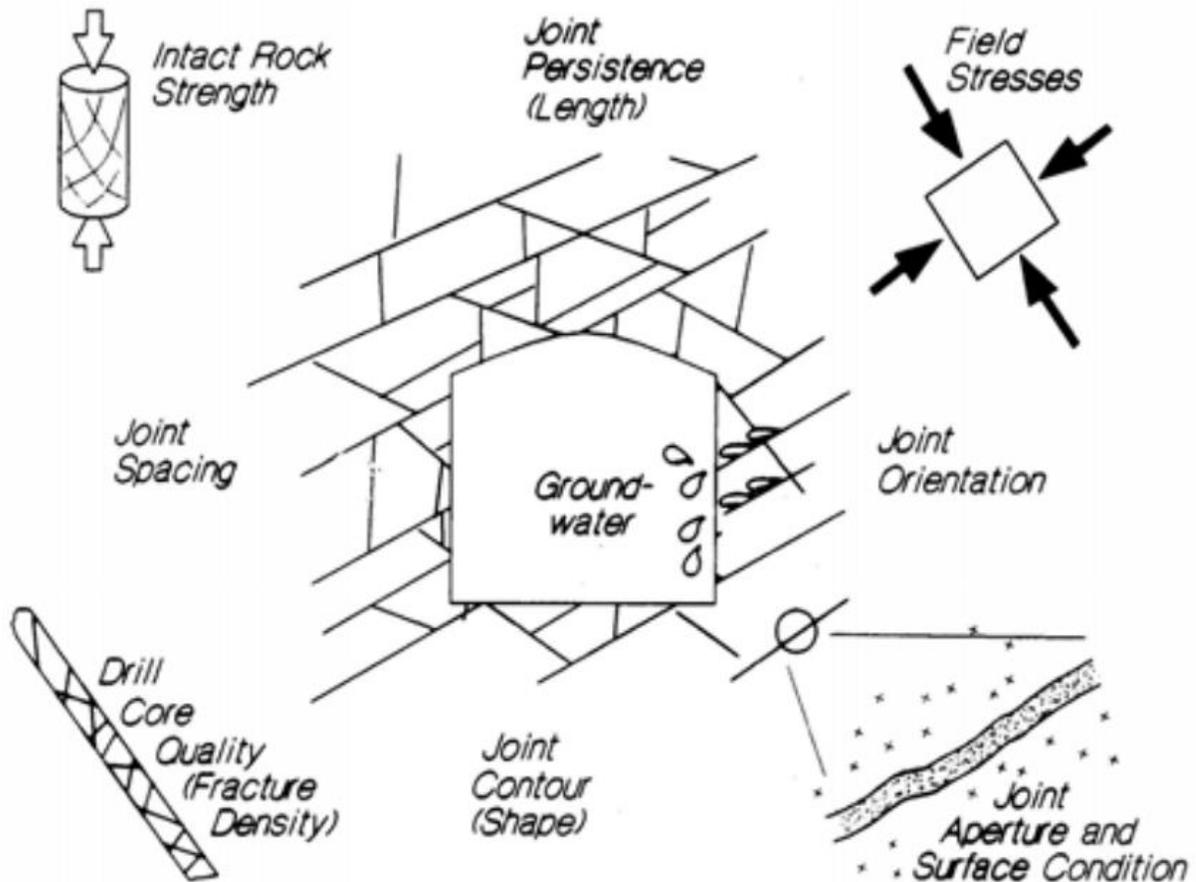


Ilustración 4 Representación gráfica de los parámetros del método Q (Hutchinson y Diederichs (1996))

En el Índice “Q”, la calidad geotécnica del macizo rocoso (Barton y otros, 1974; Grimstad y Barton, 1993; Barton, 2002), se calcula evaluando seis parámetros distintos combinados de la manera que se muestra en la siguiente fórmula:

Ecuación 2 Formulismo Índice Q de Barton

$$Q = \underbrace{\left( \frac{RQD}{J_n} \right)}_{\text{Tamaño de bloque}} \times \underbrace{\left( \frac{J_r}{J_a} \right)}_{\text{Resistencia al corte}} \times \underbrace{\left( \frac{J_w}{SRF} \right)}_{\text{Esfuerzo activo}}$$

Dónde:

- **RQD**: Es la designación de calidad del macizo rocoso (“rock quality designation”) definido por Deere D. U. (1988).
- **Jn**: Es el número de sistemas o familias de discontinuidades menores o diaclasas.

- **Jr:** Es el valor-índice de la rugosidad de las diaclasas del macizo rocoso.
- **Ja:** Es el valor-índice del grado de alteración y materiales de relleno de los planos de diaclasas.
- **Jw:** Es el valor-índice que representa la cantidad y presión de los afloramientos de aguas subterráneas (caso de registro de sondajes se considera  $Jw=1$  (seco))
- **SRF:** Es el factor de reducción debido al estado tensional del macizo rocoso, que representa la relación existente entre los esfuerzos del macizo rocoso y la resistencia del macizo rocoso excavado. Para el caso del registro de sondajes se considera,  $SRF=1$  (condición de esfuerzos favorables).

La primera relación ( $RQD/J_n$ ) representa la condición estructural del macizo rocoso, y corresponde a una medida del tamaño de los bloques existentes en el macizo rocoso.

La segunda relación ( $J_r/J_a$ ) representa la rugosidad y las características resistentes de las paredes de las discontinuidades o de los materiales de relleno que las limitan o ponen en contacto y está relacionado con la resistencia al corte entre bloques.

La tercera relación ( $J_w/SRF$ ) corresponde a dos parámetros de esfuerzos (presión de las filtraciones de agua y esfuerzos principales a que está expuesto el macizo rocoso) y es un factor empírico que representa el esfuerzo activo del macizo rocoso. Para el caso de sondajes y/o caracterización en superficie se asume esta relación con un valor 1.

Considerando lo anterior la relación de esfuerzo activo sería uno, por lo que la ecuación para el cálculo del Q quedaría determinada por la siguiente fórmula:

*Ecuación 3 Formulismo Índice Q' de Barton*

$$Q' = \underbrace{\left( \frac{RQD}{J_n} \right)}_{\text{Tamaño de bloque}} \times \underbrace{\left( \frac{J_r}{J_a} \right)}_{\text{Resistencia al corte}}$$

El rango de valores posibles para el valor del índice “Q” es exponencial y va desde 0,001 hasta 1.000, y abarca el espectro completo de calidades de macizos rocosos.

Los valores para los diferentes parámetros involucrados en este algoritmo son determinados a través del mapeo geológico de superficie y de los testigos de rocas provenientes de los sondajes geotécnicos de reconocimiento geomecánico.

### **Número de sistemas de discontinuidades (Jn)**

Un sistema de discontinuidades es un grupo de estructuras que se presentan de manera sistemática en el sondaje y que tienen una orientación y características geotécnicas semejantes.

El  $J_n$  entonces es un coeficiente asociado al número de sistemas de estructuras presentes en el macizo rocoso, que puede variar de 0.5 (macizo masivo o con pocas estructuras) a 20 (roca totalmente disgregada o triturada) como puede observarse en la siguiente tabla y figura.

Tabla 4 Descripción y puntajes para el parámetro  $J_n$

Caso	Condición	$J_n$	
AUMENTA LA BLOCOSIDAD DEL MACIZO ROCOSO	A	Macizos rocosos masivos, sin o con muy pocas estructuras	0.5-1
	B	Macizos rocosos con un único sistema de estructuras.	2
	C	Macizos rocosos con un sistema de estructuras más estructuras aleatorias.	3
	D	Macizos rocosos con dos sistemas de estructuras	4
	E	Macizos rocosos con dos sistemas de estructuras más estructuras aleatorias.	6
	F	Macizos rocosos con tres sistemas de estructuras.	9
	G	Macizos rocosos con tres sistemas de estructuras más estructuras aleatorias.	12
	H	Macizos rocosos con cuatro o más sistemas de estructuras, con muchas estructuras aleatorias.	15
	J	Macizos rocosos totalmente desintegrado, similar a un suelo granular.	20

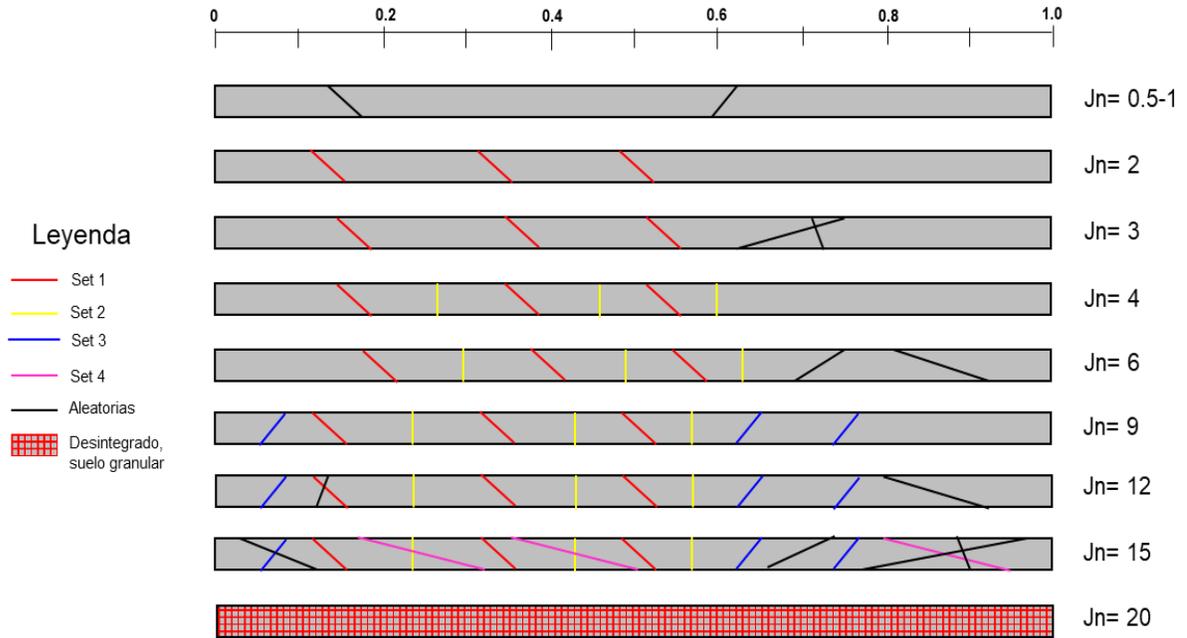


Ilustración 5 Ejemplos de cálculo de  $J_n$  en sondajes (Piteau Associates, 2018)

## Número de rugosidad de discontinuidad ( $J_r$ )

Este parámetro corresponde al coeficiente asociado a la rugosidad de las estructuras presentes en el macizo rocoso. Se registra en cada estructura y se le asigna un puntaje en base a lo observado.

Tabla 5 Descripción y ratings para el parámetro  $J_r$

Caso	Condición	$J_r$
	<p><b>a)</b> Contacto entre los planos</p> <p><b>b)</b> Contacto entre las paredes antes de un cizalle de 10 cm</p>	
A	Estructuras sin continuidad	4
B	Rugosas e irregulares y onduladas	3

C	Suaves y onduladas	2
D	Estriadas y onduladas	1.5
E	Rugosas o irregulares y planar	1.5
F	Suaves y planas	1
G	Estriadas y planas	0.5
<b>c) Sin contacto entre las dos superficies cuando hay cizalle</b>		
H	Zona con minerales de arcillas de espesor suficiente para evitar el contacto entre las superficies	1
J	Zona arenosa, de grava o de roca triturada de espesor suficiente para evitar el contacto entre las superficies	1



*Ilustración 6 Ejemplos de identificación de parámetro Jr en discontinuidades (Piteau Associates, 2018)*

Descripción	Perfil	$J_r$	JRC 200mm	JRC 1 m
Rugosa		4	20	11
Suave		3	14	9
Pulida		2	11	8
	Escalonada	2	11	8
Rugosa		3	14	9
Suave		2	11	8
Pulida		1.5	7	6
	Ondulada	1.5	7	6
Rugosa		1.5	2.5	2.3
Suave		1.0	1.5	0.9
Pulida		0.5	0.5	0.4
	Plana	0.5	0.5	0.4

Ilustración 7 Correlación entre parámetros  $J_r$  y JRC (Barton y Choubey, 1987)

## Número de alteración de discontinuidad ( $J_a$ )

Es el coeficiente asociado a la condición o grado de alteración de las estructuras presentes en el macizo rocoso, el cual se puede obtener a partir de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**



Ilustración 8 Ejemplos de identificación del parámetro  $J_a$  en discontinuidades (Piteau Associates, 2018)

### 3.3.1.3. Índice de Resistencia Geológica (GSI) de Hoek (Marinos, P. y Hoek, 2000)

El índice de resistencia geológica (GSI), fue desarrollado por Hoek (1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR al evaluar la resistencia del macizo rocoso según el criterio generalizado de Hoek-Brown. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos, los cuales son,

- “Estructura del macizo rocoso”, definida en términos de su integridad/blocosidad y grado de trabazón del macizo rocoso.
- Condición de las estructuras presentes en el macizo rocoso

Tabla 6 Clasificación de GSI (Marinos y Hoek, 2000)

GSI	Clase	Calidad del Macizo
81 – 100	I	Muy Buena
61 – 80	II	Buena
41 – 60	III	Regular
40 – 21	IV	Mala
< 21	V	Muy Mala

#### 3.3.1.3.1. Consideraciones del GSI

- Es un sistema cualitativo, rápido y usado en terreno para tener un valor aproximado de la calidad del macizo rocoso, por ende, siempre hay que considerar el valor escala cuando se utiliza en sondajes.
- El GSI tiene una correlación directa con el  $RMR_{76}$ , siempre que se considere un macizo rocoso completamente seco y sin ajustes por orientación de las estructuras.
- EL GSI debe definirse en un rango y no como un valor específico. En la práctica es posible definir un rango de unos 10 puntos.
- Si se utiliza el índice Q (Barton y otros, 1974), deberá asumirse un macizo rocoso completamente seco y los parámetros  $J_w$  y SRF iguales a 1 (estado tensional

moderado). El valor resultante del índice  $Q'$  se relaciona con el índice GSI de la siguiente forma:

Ecuación 4 Relación entre índice  $Q'$  e índice GSI

$$GSI = 9 \times \ln \ln Q' + 44$$

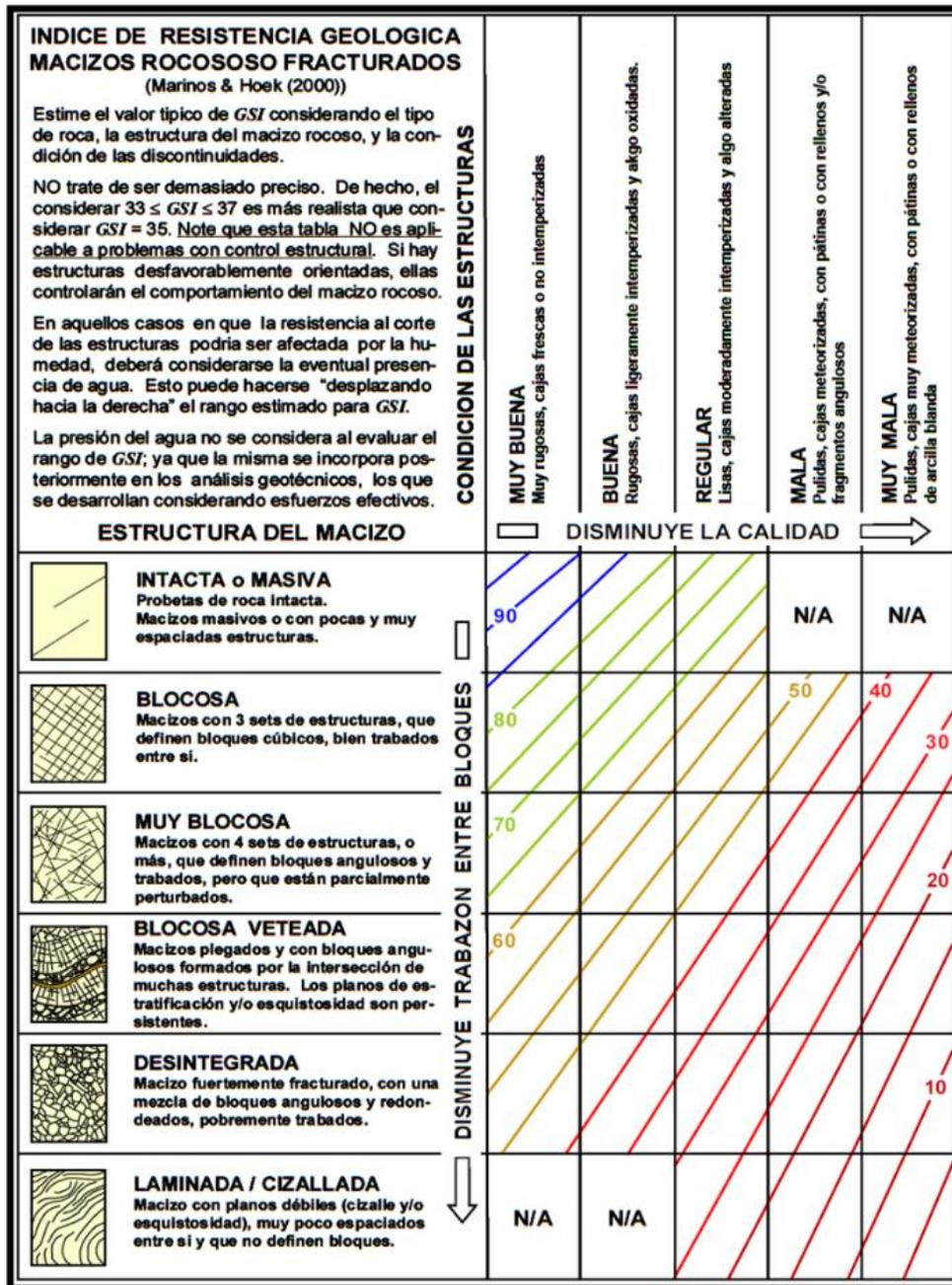


Ilustración 9 Caracterización del macizo rocoso en función de los bloques basado en el trabamiento y las condiciones de las discontinuidades (Marinos y Hoek, 2000)



Ilustración 10 Caracterización del GSI en sondajes de acuerdo al Índice de Resistencia Geológica de Macizos Rocosos Fracturados (Piteau Associates, 2018)

<b>INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA</b> <b>MACIZOS ROCOSOS ESTRATIFICADOS HETEROGENEOS</b> <small>(Marinos &amp; Hoek (2000))</small>		CONDICION ESTRUCTURAS (PLANOS DE ESTRATIFICACION)		CONDICION ESTRUCTURAS (PLANOS DE ESTRATIFICACION)		CONDICION ESTRUCTURAS (PLANOS DE ESTRATIFICACION)		CONDICION ESTRUCTURAS (PLANOS DE ESTRATIFICACION)	
<p>En base a una descripción de la litología, la estructura del macizo y la condición de las estructuras (especialmente los planos de estratificación), seleccione una zona en la tabla. Ubique en esa zona la posición correspondiente a la condición de las estructuras y estime el valor medio de <i>GSI</i>. NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar <math>33 \leq GSI \leq 37</math> es más realista que suponer <math>GSI = 35</math>. <b>Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural.</b> Si hay estructuras desfavorablemente orientadas ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para <i>GSI</i> para condiciones regular, mala o muy mala de las estructuras. La presión del agua no se considera al evaluar el <i>GSI</i> (análisis en esfuerzos efectivos).</p> <p><b>COMPOSICION Y ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO</b></p>		MUY BUENA Muy rugosas, superficies frescas o no Meteorizadas.	BUENA Rugosas, superficies algo meteorizadas.	REGULAR Lisas, superficies moderadamente meteorizadas y lateradas.	MALA Muy lisas, ocasionalmente pulidas, con pátinas compactas o rellenos con fragmentos angulosos.	MUY MALA Muy lisas y pulidas o de superficies muy meteorizadas, y con pátinas o rellenos de arcilla blanca.			
<p><b>A.</b> Estratos gruesos de arenisca de mucha blocosidad. El efecto de posibles pátinas peliticas en los planos de estratificación se ve minimizado por el confinamiento del macizo rocoso; sin embargo, en túneles poco profundos y/o taludes, estos planos de estratificación pueden generar inestabilidades controladas estructuralmente.</p>		70	A						20
<p><b>B.</b> Arenisca con lentes delgadas de limolita.</p>	<p><b>C.</b> Arenisca y limonita, en estratos de similar potencia.</p>	<p><b>D.</b> Limolitas o esquistos limosos con estratos de arenisca.</p>	<p><b>E.</b> Limolitas débiles o esquistos arcillosos con estratos de arenisca.</p>						
<p><b>C, D, E y G:</b> Pueden estar más o menos plegados que lo indicado, pero esto no altera su resistencia. Si presentan deformación tectónica, fallamientos y pérdidas de continuidad, cambie estas categorías a <b>F</b> y <b>H</b>.</p>			60	B, C, D, E					
	<p><b>F.</b> Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, muy plegados y Cizallados, con estratos de arenisca deformados y quebrados, definiendo una estructura casi caótica.</p>		50						10
<p><b>G.</b> Esquistos limosos o arcillosos no perturbados, con o sin intercalaciones de estratos delgados de arenisca.</p>	<p><b>H.</b> Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, con una estructura caótica y bolsones de arcilla. Estratos delgados de arenisca quebrados en pequeños bloques de roca.</p>		40						
			N/A	N/A					

Ilustración 11 Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos (Marinos y Hoek, 2000)

### 3.3.1.4. Sistema *Mining Rock Mass Rating* (MRMR o IRMR) Laubscher, 1990.

La clasificación geomecánica de Laubscher es una modificación de la clasificación de Bieniawski (1976, 1979) y está basada en experiencias en explotaciones mineras, donde se le agregan parámetros de ajustes relacionados a situaciones mineras.

Se ajusta el RMR para considerar los esfuerzos in-situ e inducidos y los efectos de tronadura y alteración por exposición de la roca fresca al ambiente.

Para sondajes este no es un sistema muy utilizado, sin embargo, si el proyecto lo requiere se puede usar en sondajes con algunas condiciones, por ejemplo, los factores de ajustes no se consideran.

## MRMR: Mining Rock Mass Rating

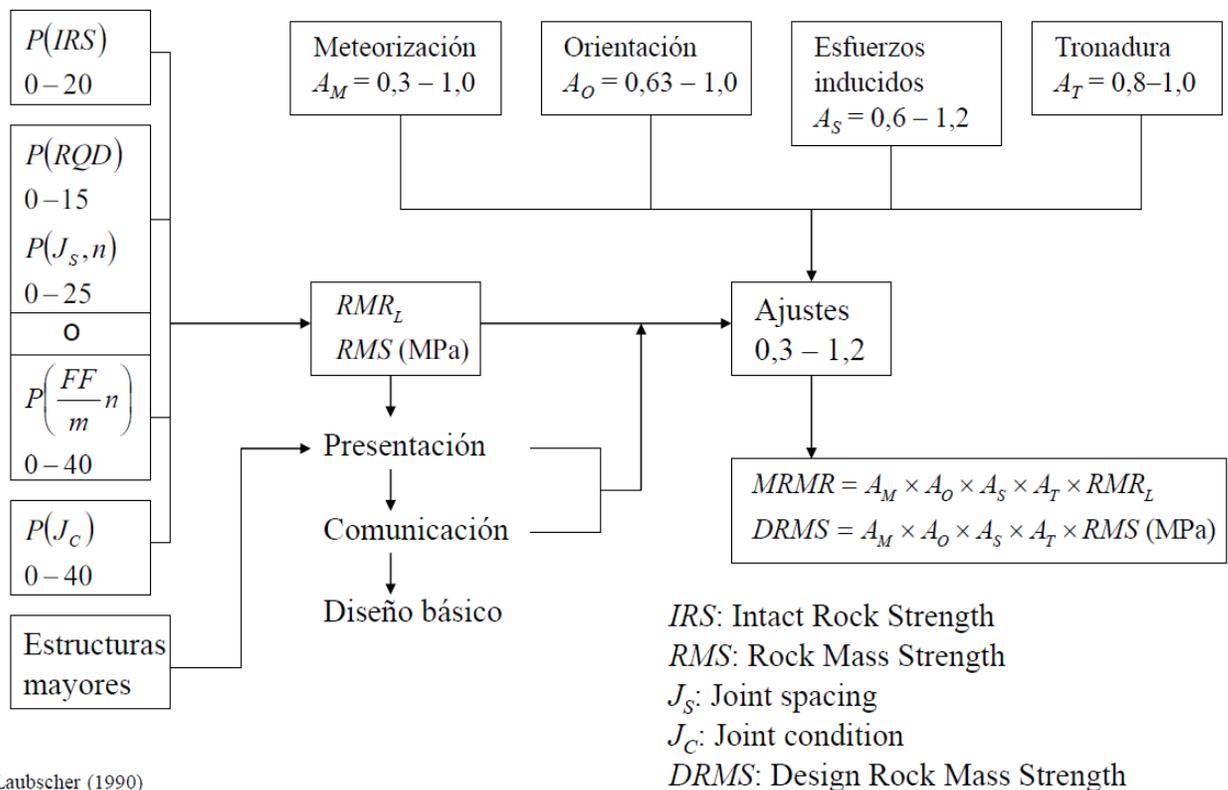


Ilustración 12 Sistema MRMR (basada en Laubscher, 1990)

El  $RMR_L$  se obtiene según la ecuación a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 5 Formulismo de Sistema MRMR - Cálculo de  $RMR_L$

$$RMR_L = P(IRS) + [P(RQD) + P(J_s, n)] \text{ ó } P(\frac{FF}{m}, n) + P(J_c = 40 \times [A \times B \times C \times D])$$

Donde:

- **P(x)**: puntaje asociado al parámetro x.
- **IRS**: Dureza de la roca intacta (Intact Rock Strength)
- **P(Js,n)**: Espaciamiento de sistemas, donde se asume que el macizo rocoso contiene sólo tres sistemas de estructuras, es decir, el número de sistemas requerido para definir un bloque de roca. Si existen cuatro o más sets de fracturas se utilizan los tres sistemas más representativos.
- **P(FF/m,n)**: Fracturas por metro. Requiere la medición de todas las discontinuidades que interceptan la línea de muestreo. El rating de este parámetro va a variar dependiendo del N° de sistemas que se observe en el testigo.
- **P(Jc)**: Condición de discontinuidades. Este parámetro se basa en cuatro subparámetros, de acuerdo con la relación  $Jc = 40 \times [A \times B \times C \times D]$ , los cuales se explican en la siguiente tabla:

Parámetros	Descripción	Condición Seca	Condición de Humedad			
			Húmedo	Presión Moderada 25-125 lts/min	Presión Severa >125 lts/min	
A	Ondulada	Multidireccional	1	0.10	0.95	0.90
		Unidireccional	0.95	0.90	0.85	0.80
	Curva		0.85	0.80	0.75	0.70
	Suavemente ondulada		0.80	0.75	0.70	0.65
	Lisa		0.75	0.70	0.65	0.60
B	Irregular áspero		0.95	0.90	0.85	0.80
	Escalonado suave		0.90	0.85	0.80	0.75
	Escalonado pulido		0.85	0.80	0.75	0.70
	Ondulada rugoso		0.80	0.75	0.70	0.65

		Ondulada suave	0.75	0.70	0.65	0.60		
		Ondulada pulida	0.70	0.65	0.60	0.55		
		Planar rugosa	0.65	0.60	0.55	0.50		
		Planar suave	0.60	0.55	0.50	0.45		
		Pulida	0.55	0.50	0.45	0.40		
C	<b>Si las paredes de las fracturas son más débiles que la caja y sólo si son más débiles que el relleno</b>		0.75	0.70	0.65	0.60		
D	<b>Relleno de las fracturas</b>	Material cizallado y no reblandecido	Grano grueso	0.90	0.85	0.80	0.75	
			Grano medio	0.85	0.80	0.75	0.70	
			Grano fino	0.80	0.75	0.70	0.65	
		Material cizallado reblandecido	Grano grueso	0.70	0.65	0.60	0.55	
			Grano medio	0.60	0.55	0.50	0.45	
			Grano fino	0.50	0.45	0.40	0.35	
		Espesor < amplitud de irregularidad			0.45	0.40	0.35	0.30
		Espesor > amplitud de irregularidad			0.30	0.20	0.15	0.10

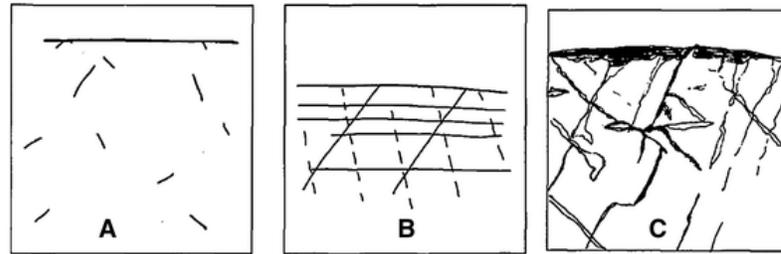
Tabla 7 Descripción parámetros involucrados en Jc – Condición de Agua (Laubscher, 1990)

Parámetros	Descripción	Condición Seca	Condición de Humedad				
			Húmedo	Presión Moderada 25-125 lts/min	Presión Severa >125 lts/min		
A	<b>Expresión de discont. (Irregularidad a gran escala)</b>	Ondulada	Multidireccional	1	0.10	0.95	0.90
			Unidireccional	0.95	0.90	0.85	0.80
		Curva		0.85	0.80	0.75	0.70
		Suavemente ondulada		0.80	0.75	0.70	0.65
		Lisa		0.75	0.70	0.65	0.60
B	<b>Expresión de discont. (Irregularidad a pequeña escala) 200x200 mm</b>	Irregular áspero		0.95	0.90	0.85	0.80
		Escalonado suave		0.90	0.85	0.80	0.75
		Escalonado pulido		0.85	0.80	0.75	0.70
		Ondulada rugoso		0.80	0.75	0.70	0.65
		Ondulada suave		0.75	0.70	0.65	0.60
		Ondulada pulida		0.70	0.65	0.60	0.55
		Planar rugosa		0.65	0.60	0.55	0.50
		Planar suave		0.60	0.55	0.50	0.45
		Pulida		0.55	0.50	0.45	0.40
C	<b>Si las paredes de las fracturas son más débiles que la caja y sólo si son más débiles que el relleno</b>		0.75	0.70	0.65	0.60	

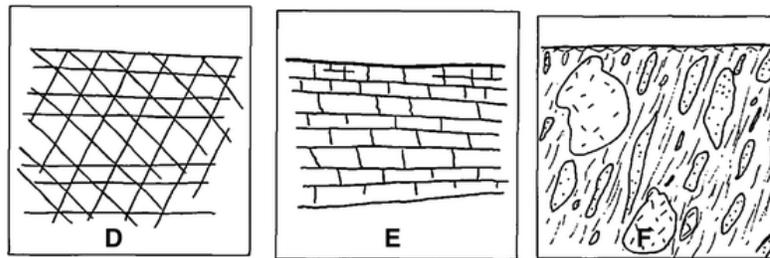
D	<b>Relleno de las fracturas</b>	Material cizallado y no reblandecido	Grano grueso	0.90	0.85	0.80	0.75	
			Grano medio	0.85	0.80	0.75	0.70	
			Grano fino	0.80	0.75	0.70	0.65	
		Material cizallado reblandecido	Grano grueso	0.70	0.65	0.60	0.55	
			Grano medio	0.60	0.55	0.50	0.45	
			Grano fino	0.50	0.45	0.40	0.35	
		Espesor < amplitud de irregularidad			0.45	0.40	0.35	0.30
		Espesor > amplitud de irregularidad			0.30	0.20	0.15	0.10

### 3.3.1.5. Tamaño de bloque

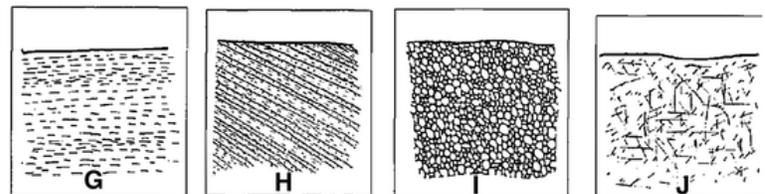
El término tamaño de bloque engloba el efecto de diversos parámetros geotécnicos como: grado de fracturamiento, densidad y espaciamiento de discontinuidades y volumen de bloque. Estos bloques tendrán distintos tipos de geometrías, debido a todas estas combinaciones, como se observa en la siguiente figura:



1) Big Average Size



2) Medium Average Size



3) Small Average Size

*Ilustración 13 Diferentes tamaños de bloque y su variación respecto a las familias de discontinuidades presentes (Yarahmadi, R., 2015)*

Las distintas discontinuidades presentes en el macizo rocoso, divide la roca en bloques cuyo tamaño puede variar desde  $\text{cm}^3$  a rocas masivas de varios  $\text{m}^3$  de volumen. Este tamaño depende principalmente de los siguientes parámetros:

- Espaciamiento de discontinuidades
- Cantidad de familias de discontinuidades
- Tamaño y persistencia de discontinuidades

En distintas publicaciones (ISRM, 1978; Barton, 1990), se menciona el tamaño de bloques como uno de los parámetros más importantes, afectando el comportamiento del macizo rocoso. El tamaño de los bloques presentes en excavaciones subterráneas determinará el comportamiento del macizo: como un medio continuo o discontinuo.

### 3.3.1.5.1. Representación de tamaño de bloques en sistemas de clasificación

- 1. Sistema GSI (Geological Strength Index):** En este sistema se observa una relación implícita del tamaño de bloques en el término “blocosidad” del macizo rocoso, definida en forma indirecta mediante variables asociadas al grado de fracturamiento y/o espaciamiento de las estructuras del macizo rocoso.
- 2. Sistema Q de Barton:** El tamaño de bloques se define directamente como la razón entre el RQD y el factor del número de familias de discontinuidades ( $J_n$ ).
- 3. Sistema RMR de Bienawski:** Mediante los parámetros RQD y espaciamiento de discontinuidades (S).

### 3.3.1.5.2. Parámetros geotécnicos asociados al tamaño de bloques

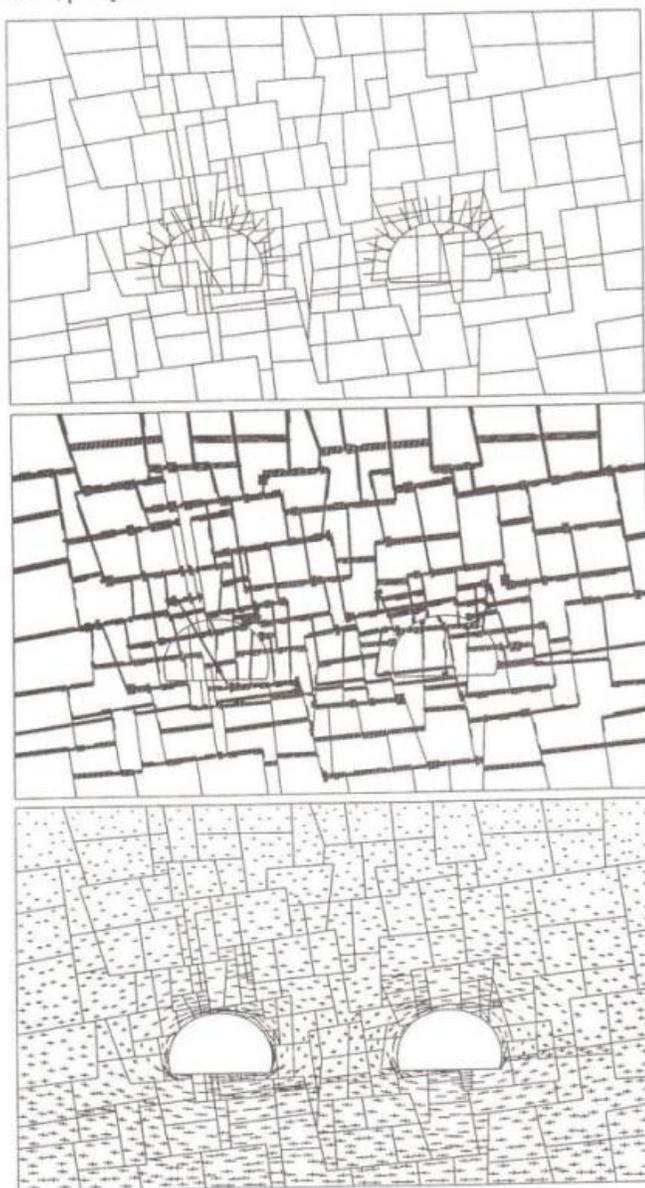
Es de suma importancia identificar y catalogar, dentro de lo posible, las distintas características y dimensiones de las discontinuidades presentes en un macizo rocoso, pero este proceso es usualmente complejo y limitado en su alcance. Las discontinuidades generan patrones tridimensionales a lo largo del macizo rocoso, pero para las mediciones de estas características se cuenta con superficies en dos dimensiones o sondajes que reducen a una dimensión. A continuación, se resumen algunos métodos de medición:

Tabla 8 Métodos de medición de tamaño de bloque

Mediciones Superficiales	Mediciones en Sondaje
Espaciamiento de Discontinuidades (S)	RQD
Volumen de Bloque ( $V_b$ ) – Tamaño de Bloque	Frecuencia de Fracturas
Conteo de Discontinuidades Volumétrico ( $J_v$ )	Intercepto de Discontinuidades
RQD (Rock Quality Designation)	Densidad de Discontinuidades Ponderada ( $wJ_d$ )
Densidad de Discontinuidades Ponderada ( $wJ_d$ )	

### 3.3.1.5.3. Espaciamiento de discontinuidades (S)

El espaciamiento de discontinuidades o de familias de discontinuidades es la distancia entre las discontinuidades individuales dentro de una familia.



*Ilustración 14 Ejemplo de geometrías de bloques afectadas por espaciamiento de discontinuidades (Barton, 1995)*

### 3.3.1.5.4. Volumen de bloque ( $V_b$ )

En macizos rocosos donde los bloques son fácilmente identificables, es posible medir y calcular el volumen de estos utilizando parámetros promedio, como se observa en la siguiente ilustración:

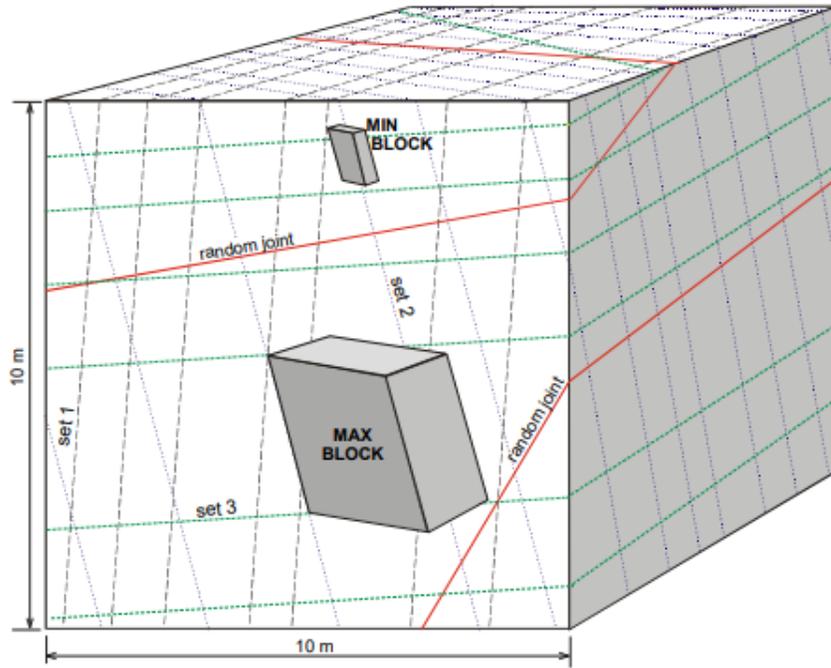


Ilustración 15 Bloque mínimo y máximo en un macizo rocoso teórico (Palmstrom, 2011)

En casos donde el volumen de los bloques puede ser observado en superficie, se puede medir el volumen a partir de distintos parámetros representativos y sus dimensiones promedio. Este método es extremadamente útil en el caso de bloques pequeños, donde el volumen es una dimensión más representativa que aquellas que podrían involucrar a todas las discontinuidades.

En el caso de sondajes, donde se encuentran tramos de roca fracturada, también es más representativo calcular el volumen de bloque.

### 3.3.1.5.5. Cuento de discontinuidades volumétrico ( $J_v$ )

El parámetro  $J_v$  es el número de discontinuidades que intersecan el volumen del macizo rocoso. Se define como el número de discontinuidades por  $m^3$ .

Según Palmström (1982, 1985, 1986, 2001) y Sen y Eissa (1991, 1992) puede ser calculado a partir del espaciamiento de las familias de discontinuidades presentes en un volumen de macizo rocoso según:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}$$

Donde  $S_1, S_2, \dots, S_n$  son los espaciamientos de cada familia.

Así también se puede incluir el efecto de un espaciamiento aleatorio  $S_r$  (Palmström, 1982), este valor, según experiencia, se define como  $S_r = 5m$ . Según estas consideraciones, se obtiene una versión general:

$$Jv = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{Nr}{5}$$

Donde  $Nr$  es la cantidad de discontinuidades aleatorias.

### 3.3.1.5.6. RQD (Rock Quality Designation)

El parámetro RQD fue desarrollado por Deere (1963) donde se detalla una estimación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso observada en registros de sondajes. Se define como “el porcentaje de piezas intactas de testigo cuya longitud es mayor a 100 mm en el total de la longitud del sondaje”. El tamaño del sondaje debe ser al menos NX (54.7 mm de diámetro).

Este parámetro es una forma fácil y rápida de medir el grado de fracturamiento en un sondaje, por esto es que es usado constantemente en el logueo y caracterización de sondajes.

El uso más importante del RQD es como componente del método de clasificación RMR y Q de Barton.

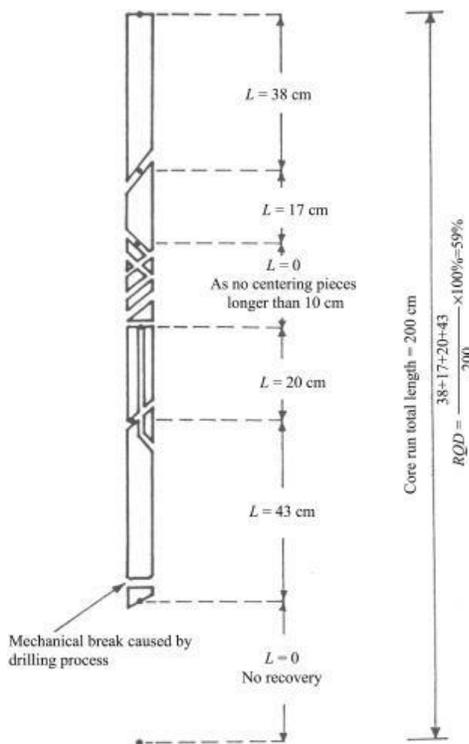


Ilustración 16 Cálculo de RQD (modificado a partir de Deere, 1989)

### 3.4. Caracterización de Propiedades Hidráulicas del Macizo Rocosó

#### 3.4.1. Estimación de permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad de un medio poroso, como roca o suelo, que controla su habilidad para transmitir un fluido bajo la influencia de un gradiente de energía. Depende de la porosidad, ya que la permeabilidad no puede coexistir en un ambiente que no contenga espacios de poros, pero no es proporcional a ésta, dándose el caso donde materiales altamente porosos poseen valores de permeabilidad bajos (i.e. arcillas).

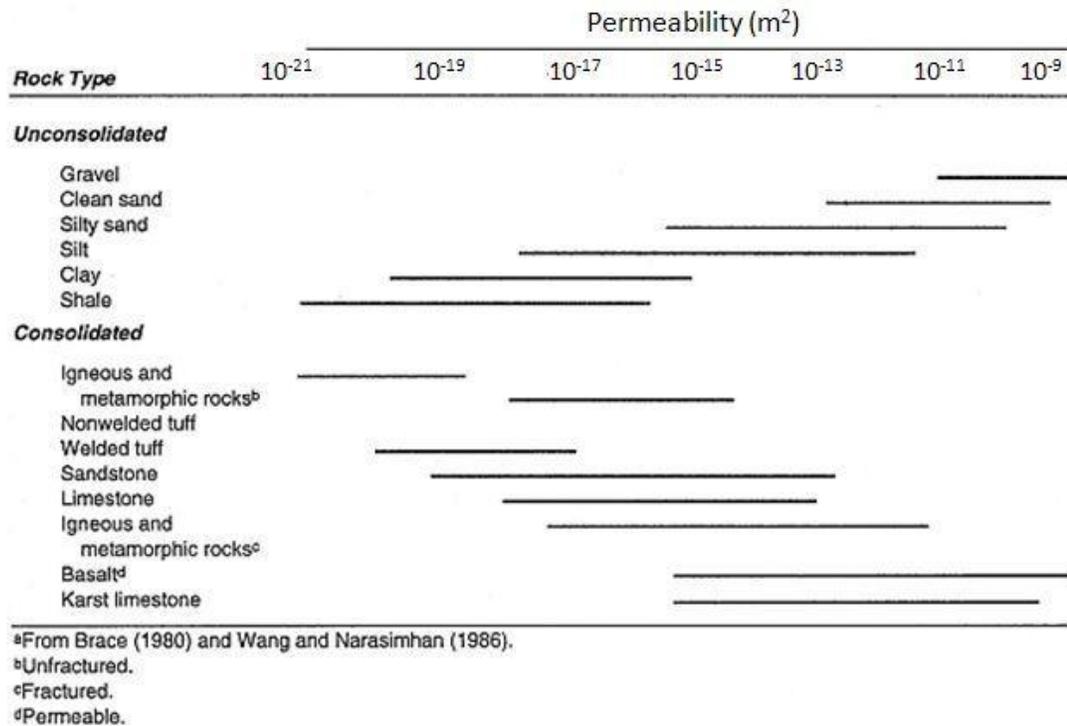
El flujo de fluidos en un medio poroso puede ser descrito por la ley de Darcy, la cual indica que un fluido que se mueve a través de un medio poroso pierde energía, y por lo tanto se mueve desde un área donde posee mayor energía a una región con menor energía.

Para un flujo de fluido a través de un medio homogéneo e isotrópico, la ley de Darcy puede describirse según:

$$q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Donde:

- $q$  es la tasa a la que el fluido fluye a través de una unidad de área del medio, siendo el área perpendicular a la dirección de flujo.
- $K$  es la conductividad hidráulica, una propiedad intrínseca del medio y del fluido que pasa por los poros.
- $\left(-\frac{\Delta h}{\Delta l}\right)$  es el gradiente hidráulico.



*Ilustración 17 Rangos de Permeabilidad (Read, 2013)*

El coeficiente de permeabilidad varía dependiendo de la densidad y de la viscosidad de los fluidos:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} = k \frac{g}{\nu}$$

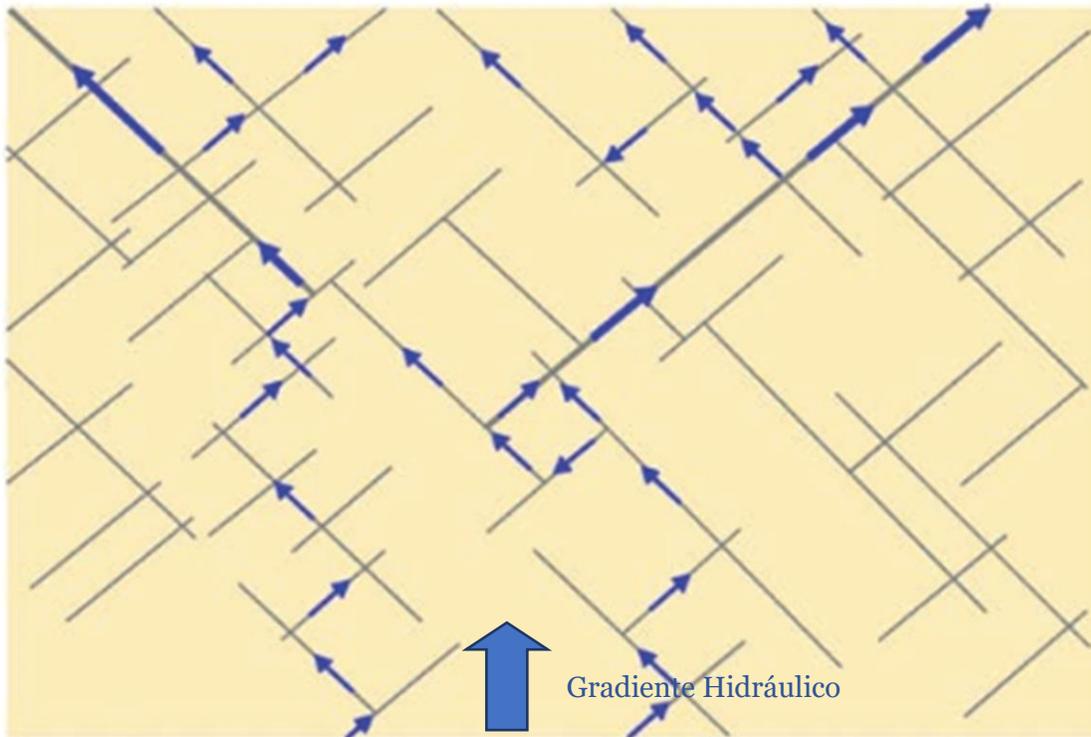
Donde:

- $k$  es la permeabilidad intrínseca de la roca
- $\rho$  es la densidad
- $\mu$  es la viscosidad
- $\nu$  es la viscosidad dinámica del fluido

#### **3.4.1.1. Permeabilidad de discontinuidades**

La roca de caja de las principales faenas mineras consiste principalmente de rocas duras (ígneas o metamórficas). Este tipo de roca es susceptible a fracturamiento, y estas fracturas podrían contribuir a la variación de la permeabilidad in-situ.

En un medio fracturado, las napas freáticas subterráneas fluyen a través de las fracturas interconectadas (inducidas o naturales), diaclasas y otras discontinuidades, como se observa en la siguiente ilustración:



*Ilustración 18 Flujo en macizo rocoso, con direcciones preferentes siguiendo las discontinuidades presentes (Read, 2013)*

### **3.4.1.2. Formulismo empírico en la estimación de permeabilidad**

El coeficiente de permeabilidad en fluidos que son paralelos a las discontinuidades se define como:

$$K = \frac{ge^2}{12vC}$$

Donde:

- $e$  es la apertura de la discontinuidad
- $v$  es la viscosidad cinemática del fluido ( $1.0 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s en el caso del agua)
- $C$  es el factor de corrección entre la apertura de la discontinuidad y la apertura generada por el fluido hidráulico

Si se utiliza el coeficiente de corrección, el coeficiente de permeabilidad queda definido como:

$$K = \frac{ge_h^2}{12v}$$

Donde:

- $e_h$  es la apertura equivalente hidráulica de la discontinuidad

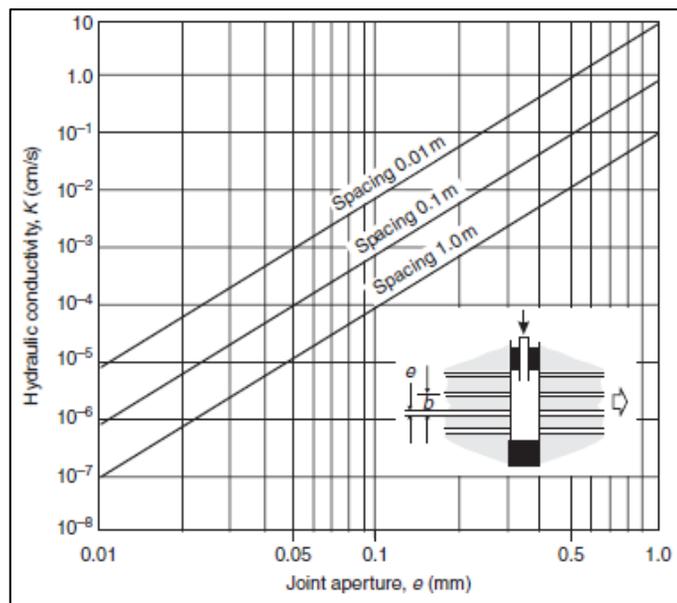
- $g$  es la aceleración de gravedad
- $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido ( $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  en el caso del agua)

Según Davis (1969), se plantea que la conductividad hidráulica para discontinuidades paralelas con conductividad hidráulica paralela a las discontinuidades:

$$K = \frac{ge^3}{12\nu b}$$

Donde:

- $g$  es la aceleración gravitacional ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )
- $e$  es la apertura de las discontinuidades
- $\nu$  es el coeficiente de viscosidad cinemática ( $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )
- $b$  es el espaciamiento de las discontinuidades



*Ilustración 19 Influencia de la apertura y espaciamiento de discontinuidades en la conductividad hidráulica (Read, 2013)*

### 3.4.1.3. Permeabilidad de macizo rocoso intacto

Considerando el caso sencillo de un set de discontinuidad singular con un set de estructuras paralela al fluido hidráulico, tal como se aprecia en la siguiente imagen

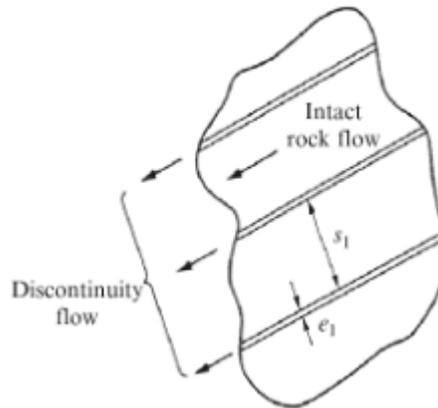


Ilustración 20 Flujo en macizo rocoso (Read, 2013)

El coeficiente de permeabilidad del macizo rocoso se define como:

Ecuación 6 Permeabilidad de macizo rocoso afectado por discontinuidades paralelas

$$K = \frac{ge_1^3}{12\nu C_1 s_1} + K_i \left(1 - \frac{e_1}{s_1}\right)$$

Donde:

- $e_1$  es la apertura de la discontinuidad
- $s_1$  es el espaciamiento de la discontinuidad
- $C_1$  es el factor de corrección de la discontinuidad
- $K_i$  es el coeficiente de permeabilidad de la roca intacta.

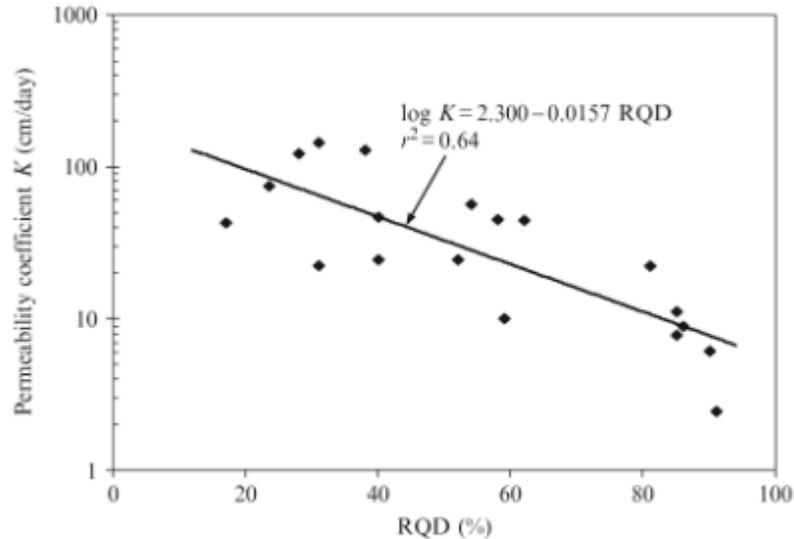
El siguiente estudio fue realizado en macizos rocosos de roca sedimentaria, el cual fue obtenido mediante análisis de regresiones.

$$\log \log K = 2.300 - 0.0157 \cdot RQD \quad (r^2 = 0.64)$$

Donde:

- $K$  es el coeficiente de permeabilidad (cm/día)

Se ha relacionado el índice de permeabilidad de la roca medida in-situ con respecto a la calidad del macizo medida mediante RQD, RMR y Q de Barton (El-Naqa2001, Cha et al, 2006, Barton, 2008, Jiang et al 2009), en donde se muestra en la siguiente grafica el decrecimiento progresivo del coeficiente de permeabilidad a medida que aumenta la calidad del macizo rocoso.



**FIG. 8.8** Measured permeability coefficient versus RQD for Cambrian sandstone rock mass in central Jordan. (From El-Naqa, A., 2001. *The hydraulic conductivity of the fractures intersecting Cambrian sandstone rock masses, central Jordan. Environ. Geol.* 40, 973–982.)

*Ilustración 21 Gráfico relación RQD y permeabilidad*

De la gráfica se puede observar una disminución progresiva de la permeabilidad a medida que existe un aumento del RQD.

Hay que considerar que el RQD no considera la apertura de las discontinuidades del macizo rocoso, lo cual es relevante a la hora de analizar el coeficiente de permeabilidad. También se debe tener en cuenta que se puede estimar el coeficiente de permeabilidad en función del RQD para diferentes tipos de roca, lo cual es recomendable a la hora de realizar un estudio acabado en un sector determinado.

Posteriormente, El-Naqa (2001) plantea una regresión entre el coeficiente de permeabilidad en función del RMR:

$$K = 6.749 - 0.0835 \cdot RMR \quad (r^2 = 0.74)$$

Finalmente, Barton en el año 2008 define la relación entre el coeficiente de permeabilidad y factores relacionados a clasificación de la roca mediante Q de Barton y JCS (Joint compressive stress):

$$K = \left( \frac{0.002}{Q} \right) \left( \frac{100}{JCS} \right) \left( \frac{1}{H^{5/3}} \right) \quad (m/s)$$

### 3.5. Definición de Método de Explotación – Método de Hundimiento

#### 3.5.1. Propagación de hundimiento

El hundimiento por bloques es una técnica en la cual se utiliza la gravedad en conjunto con los esfuerzos internos de la roca para generar fracturas y romper el macizo rocoso en pedazos que puedan ser manejados por mineros. El término “bloque” se refiere al diseño minero que divide el yacimiento mineral en grandes secciones que abarcan varios miles de metros cuadrados.

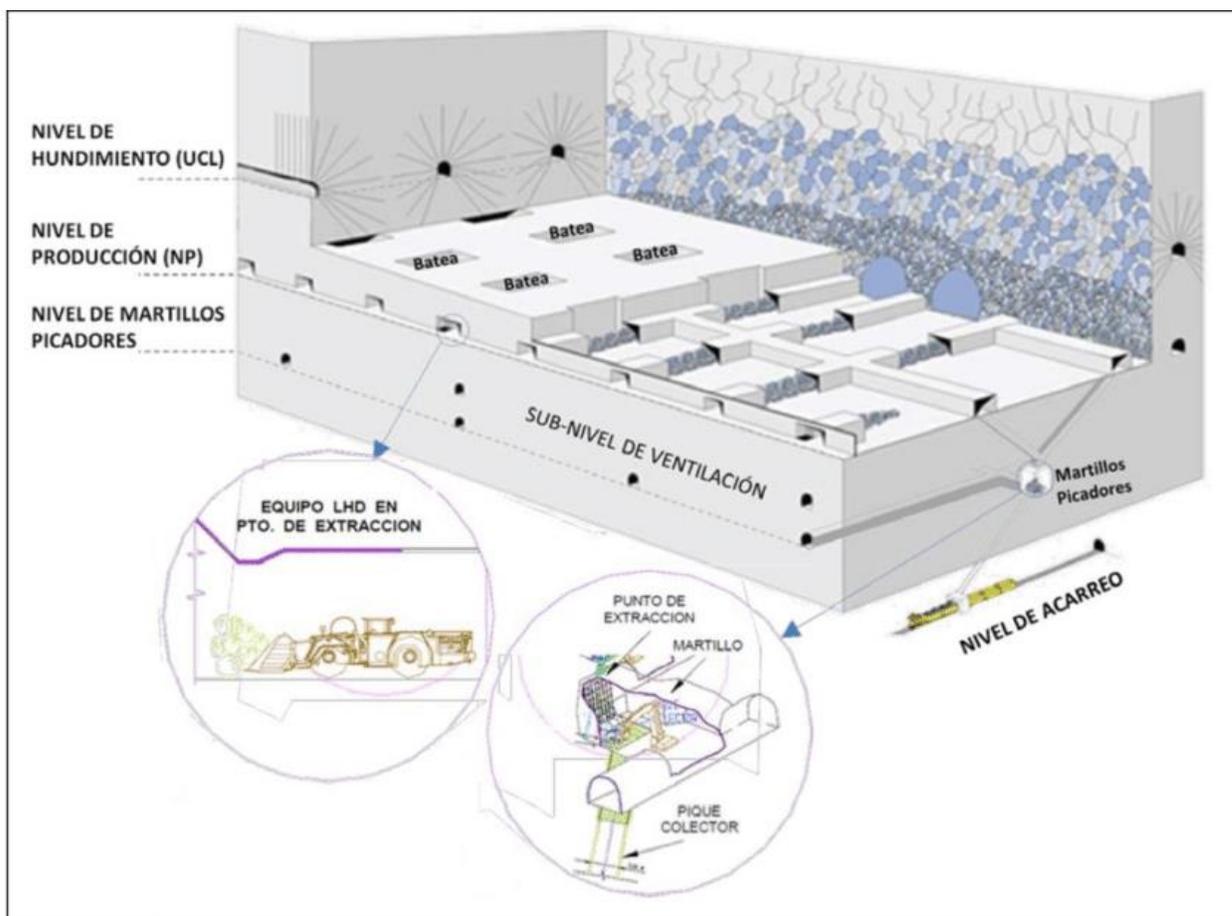


Ilustración 22 Modelo isométrico que ejemplifica el método Block Caving. Muñoz (2002).

El hundimiento del macizo rocoso es inducido mediante la socavación de un bloque. La porción de roca ubicada directamente bajo el bloque es fracturada mediante tronadura, destruyendo la capacidad que éste tenía de soportar la roca que se encuentra sobre este. Luego, la fuerza de gravedad, en orden de los millones de toneladas de fuerza, afecta al bloque generando fracturas que se propagan hasta que la totalidad del bloque se ve afectado. La presión continua destruye la roca en pedazos más pequeños los cuales pueden pasar por los puntos de extracción donde el mineral es extraído mediante LHDs.

El método block caving es una técnica de producción a gran escala, aplicada en yacimientos minerales masivos de baja ley teniendo las siguientes características:

- Grandes dimensiones horizontales y verticales.

- Un macizo rocoso que pueda quebrarse en pedazos de tamaño manejable
- Una superficie con capacidad de socavar.

Estas condiciones limitan este método sólo a ciertos depósitos de minerales. Si observamos el estado global de la actividad minera, el block caving se utiliza principalmente en la extracción de hierro, cobre de baja ley, depósitos de molibdeno y pipas de kimberlina con rastros de diamantes. El gran tonelaje producido por cada una de las minas convierte al método en el peso pesado en comparación con otro tipo de minas.

El desarrollo, incluyendo el flujo convencional influenciado por la gravedad, implica:

- La socavación, donde el macizo rocoso por debajo del bloque es fracturado mediante tronadura profunda.
- Puntos de extracción bajo el nivel de socavación que recogen la roca fracturada.
- Piques que recolectan la roca desde los puntos de extracción a la zona de molienda primaria.

Los espacios vacíos que se generan bajo el bloque se encuentran sujetos a grandes esfuerzos internos. Al completar la socavación, el macizo rocoso comienza a fracturarse. Los bloques son recibidos por los puntos de extracción y llevados a niveles inferiores para luego ser transportados fuera de la mina. El fin de este método de extracción es mantener un flujo continuo de mineral desde cada bloque. En teoría, no se requiere perforación y tronadura para mantener el fracturamiento del macizo rocoso, pero en la práctica esta técnica se utiliza para evitar la presencia de bloques masivos que impidan el flujo de material. Estos bloques masivos pueden ocasionar colgaduras en las cavernas las cuales son peligrosas y difíciles de abordar.

Originalmente, las técnicas de hundimiento por bloques dependían exclusivamente en el flujo gravitacional para suministrar al nivel de transporte de mineral y luego ser transportado por medio de ferrocarriles. En la actualidad, las minas han cambiado este método por el uso de LHDs, por lo que se ha agregado un nivel de ventilación que permita expulsar los gases generados por los motores diesel.

El método de hundimiento es uno de los más económicos y eficientes considerando que el macizo rocoso posea condiciones favorables para su implementación. Se requiere una cantidad mínima de perforación y tronadura, mientras que el volumen de desarrollo requerido es inmenso.

El comportamiento del macizo rocoso y las condiciones de socavación son difíciles de predecir por lo que se requiere altos niveles de planificación.

### 3.5.2. Predicción de subsidencia

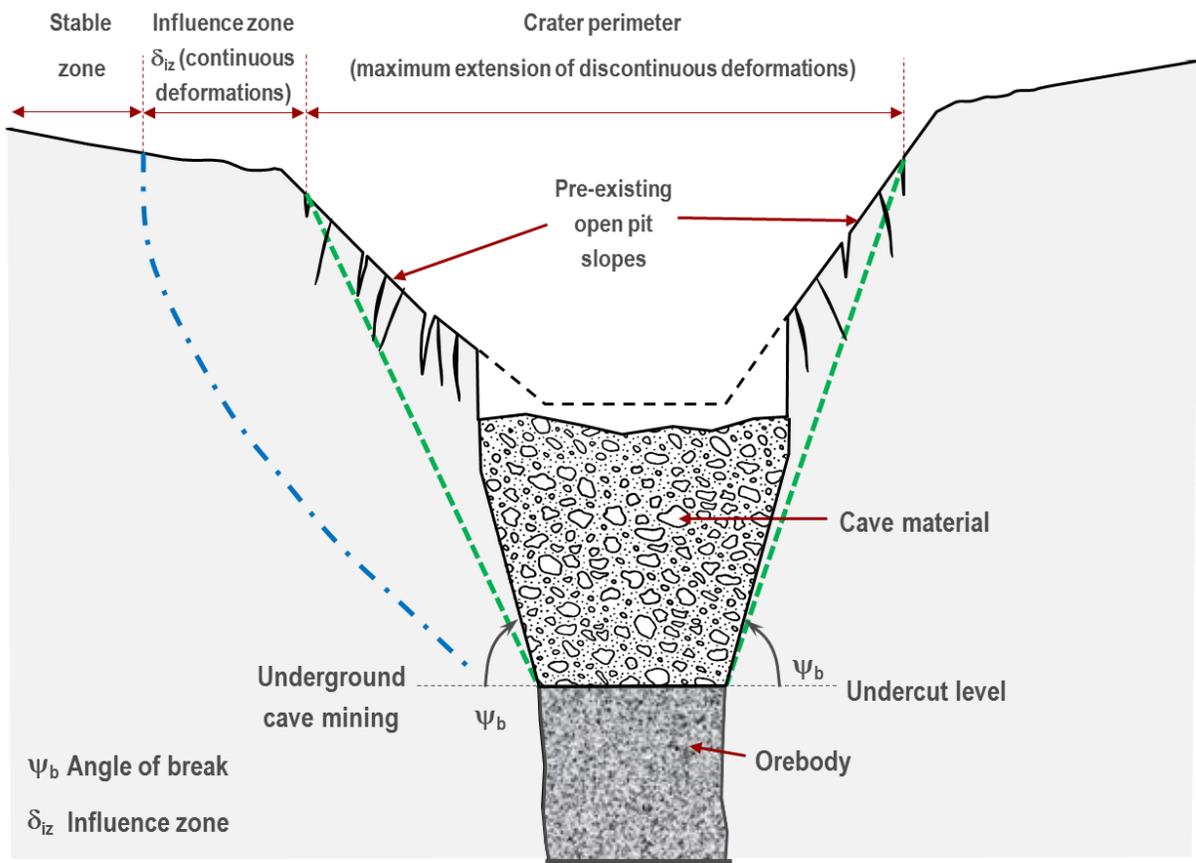


Ilustración 23 Terminología en Subsidencia (Flores & Karzulovic, 2004b)

Las actividades mineras asociadas al método de explotación masivo block caving resultan en la subsidencia discontinua que afecta grandes áreas en superficie. Si el yacimiento de mineral es vertical y con una diferenciación clara entre mineral y roca huésped el hundimiento se propagará verticalmente a superficie formando taludes inclinados solamente en zonas débiles o erosionadas. Sin embargo, ciertos parámetros del yacimiento, geografía local y topografía pueden influenciar la extensión de la influencia en superficie del hundimiento. Estos factores incluyen:

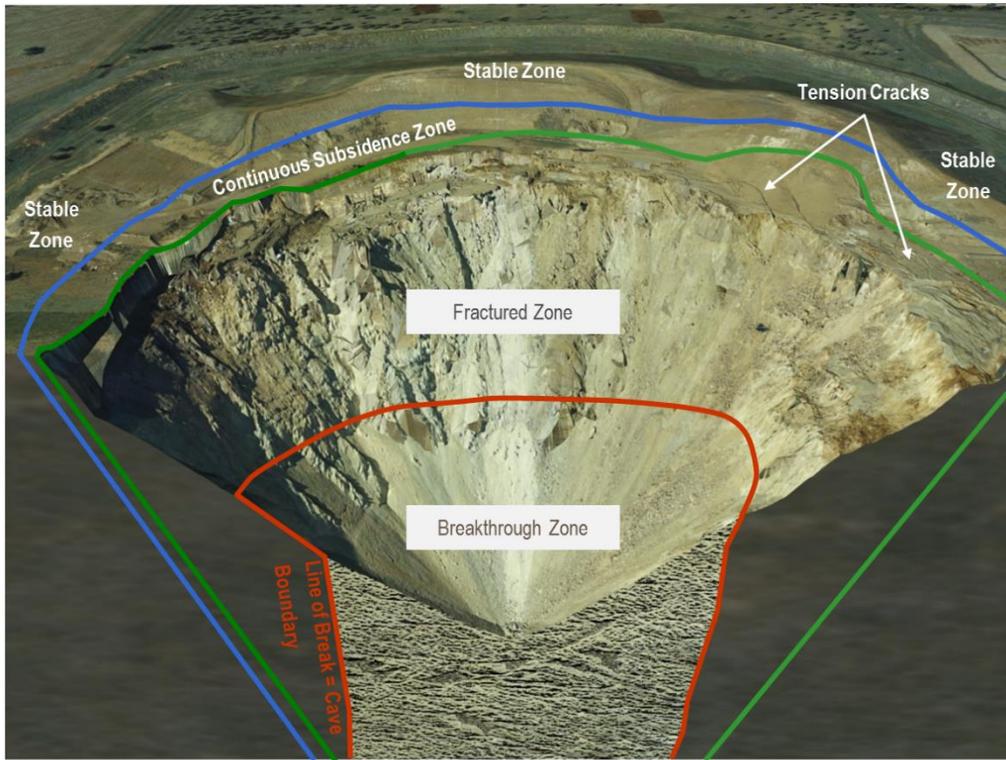
- Inclinación del yacimiento.
- Forma en plano del yacimiento.
- Resistencia del yacimiento.
- Resistencia de la roca huésped.
- Resistencia de la sobrecarga o capa rocosa impermeable.
- Presencia de estructuras mayores como fallas o diques que intersecan el yacimiento o la sobrecarga.
- Profundidad del nivel de desarrollo y el campo de esfuerzos in-situ.
- Pendiente de la superficie del terreno.
- Ubicación de niveles abandonados rellenos o la presencia de un nuevo cráter.
- Excavaciones subterráneas cercanas.

La extensión de la alteración en superficie se define mediante el ángulo de quiebre o ángulo de subsidencia, el ángulo que se genera entre un plano horizontal en la socavación y una línea recta al extremo del quiebre en superficie como se observa en la ilustración 2.

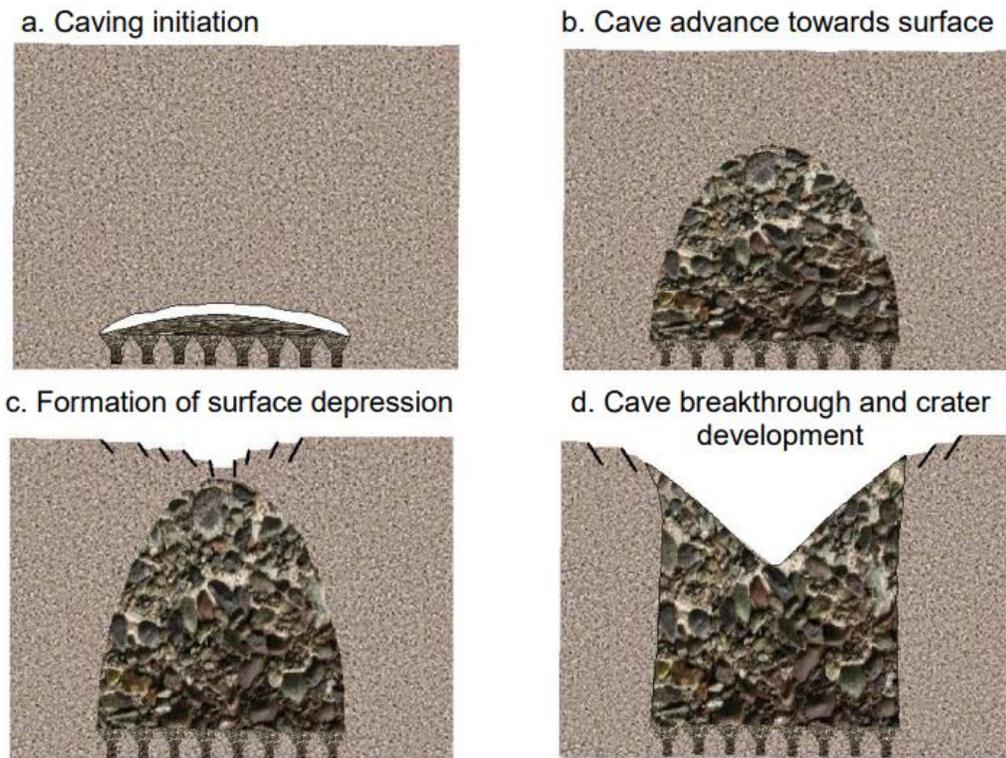
El complemento del ángulo de quiebre es el ángulo de tiraje. La zona de subsidencia se define por el ángulo de quiebre y en ella ocurren las principales deformaciones. Fuera de esta zona, se encuentra la zona de influencia, también afectada por deformaciones, aunque de menor escala a aquellas que ocurren en la zona de subsidencia. Aun así, estas deformaciones pueden llegar a dañar infraestructuras o excavaciones dentro de la zona de influencia. La roca dentro de esta zona llega a soportar altos niveles de esfuerzos debido a la redistribución de esfuerzos producto de las actividades de desarrollo y la progresión vertical de la socavación; y luego se ve relajada al progresar la socavación.

Los límites de la zona de influencia de un bloque socavado pueden ser estimados utilizando una combinación de monitoreo, experiencia local y modelamiento numérico. Se han sugerido (Butcher, 2002; Brown, 2003) los siguientes pasos al realizar estas predicciones:

1. Proyectar el perímetro del contacto roca caja – yacimiento en todos los niveles de la mina a superficie para establecer el área que será afectada y destruida por el hundimiento.
2. Hacer una estimación preliminar del ángulo de quiebre utilizando un método empírico o experimental.
3. Calibrar ese estimado utilizando ángulos de quiebre observados en esta u otras minas.
4. Corroborar la estimación del ángulo mediante otros métodos de análisis que consideren mecanismos de falla.
5. Modificar la estimación actual considerando características geológicas como fallas, topografía y el material quebrado en el cráter.
6. Utilizar un modelamiento numérico para revisar el ángulo de quiebre y estimar los esfuerzos y deformaciones inducidas en el macizo rocoso alrededor de la zona de hundimiento.



*Ilustración 24 Zonas de Subsidencia (Van As, et.al, 2003)*



*Ilustración 25 Desarrollo de subsidencia superficial inducida por hundimiento (Van As, 2003)*



*Ilustración 26 Influencia en superficie de subsidencia en topografía irregular (Mina El Teniente, Chile). Area de subsidencia delimitada por línea punteada.*



*Ilustración 27 Influencia en superficie de subsidencia en topografía plana (Mina Northparkes, Australia). Area de subsidencia delimitada por línea punteada.*

### 3.5.3. Efecto de fábrica estructural en la subsidencia

Laubscher (1994) sugiere que los parámetros con mayor influencia en el desarrollo de la subsidencia son las estructuras geológicas mayores, la resistencia del macizo rocoso, esfuerzos inducidos y la profundidad de las cavidades. Luego, Flores & Karzulovic (2002), utilizando la información recopilada en diez operaciones mineras por hundimiento, clasificaron las causas de subsidencia por el grado de influencia. Estos resultados se resumen en la siguiente tabla:

Grado de influencia en la subsidencia superficial	
Alto	Moderado
Estructuras geológicas	Condición de aguas
Calidad del macizo rocoso	Geometría del footprint
Altura de bloque	Iniciación de la minería
Tasa de extracción	Secuencia de explotación
Control de extracción	Control de socavación

*Tabla 9 Grados de influencia de factores que afectan la subsidencia superficial sugerido por Flores & Karzulovic (2002)*

Stacey & Swart (2001) y van As (2003) notaron que, en la mayoría de los casos, cuando una frente de avance se encuentra con una discontinuidad mayor, como una falla, que cuente con un manto moderado a empinado, la subsidencia ocurrirá a lo largo de la falla, independiente del ángulo de quiebre en la roca intacta.

Si el manto de la falla es menos empinado que el ángulo de quiebre, el área de influencia de la subsidencia en superficie aumentará. Por otra parte, si el manto de la falla es más empinado, el área de influencia disminuirá. Este fenómeno se representa visualmente en la siguiente ilustración:

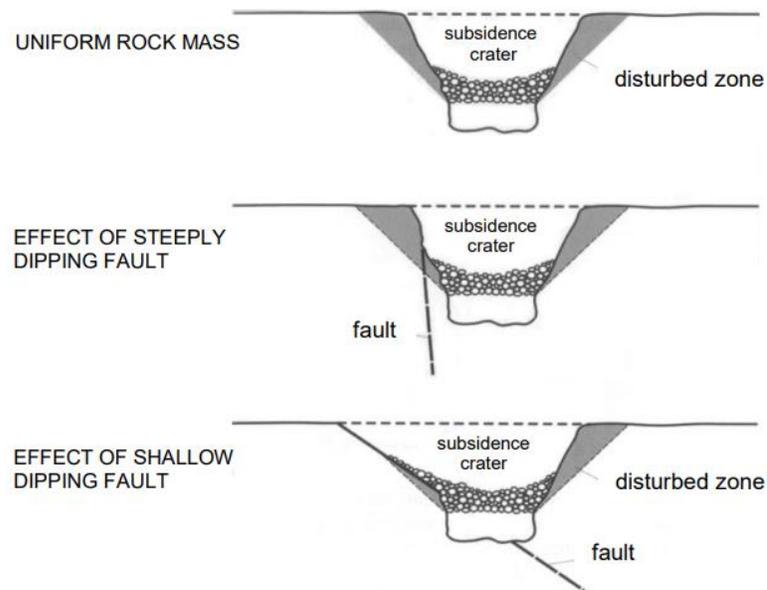


Ilustración 28 Efectos de los planos de debilidad principales en la subsidencia (Stacey, 2007)

### 3.6. Suficiencia de información en estudios hídricos

Elemento	Fuente de Información	Comentarios
Clima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lluvia, evaporación y registros de temperatura estacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Establece balances hídricos iniciales</li> </ul>
Levantamiento de información de manantiales y afloramientos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapas publicados.</li> <li>- Fotografías aéreas.</li> <li>- Levantamientos en terreno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificación de zonas de carga y descarga.</li> <li>- Evaluación de receptores claves en las zonas de posible impacto.</li> </ul>
Aguas superficiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manantiales, ríos y lagos.</li> <li>- Registros de flujo de agua.</li> <li>- Información de química de agua superficial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Importante contribución al balance temprano de aguas.</li> </ul>

Elemento	Fuente de Información	Comentarios
Topografía	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapas publicados.</li> <li>- Fotogrametría aérea.</li> <li>- Estudios topográficos detallados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificación de aguas superficiales perennes o efímeras.</li> <li>- Permite establecer gradientes hidráulicos.</li> </ul>
Estratigrafía a escala regional (litología)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapeos regionales.</li> <li>- Reportes de perforación.</li> <li>- Información de proyectos previos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Establece régimen de aguas subterráneas en un contexto regional.</li> <li>- Determina condiciones de borde para modelos de simulación.</li> </ul>
Estratigrafía a escala mina (litología)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reportes de perforación.</li> <li>- Modelo geológico digital.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Base del desarrollo de unidades hidroestratigráficas en el área del proyecto.</li> </ul>
Estructuras a escala mina y regional	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapeo regional (Levantamiento geológico).</li> <li>- Mapeo estructural.</li> <li>- Fotografías aéreas o interpretación de imágenes satelitales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determina el rol de las estructuras en el flujo subterráneo.</li> <li>- Información relevante en la interacción del sistema local de aguas subterráneas con el sistema regional.</li> </ul>
Fábrica del macizo rocoso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mapeo de estructuras específico para el proyecto.</li> <li>- Frecuencia de fracturas registrada en logueos de sondajes de diamantina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite una primera impresión de los valores de permeabilidad / conductividad hidráulica / anisotropía para cada unidad litológica.</li> </ul>

Elemento	Fuente de Información	Comentarios
Niveles de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reportes hidrogeológicos.</li> <li>- Registros de monitoreos.</li> <li>- Levantamientos de información en terreno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite determinar la continuidad del sistema de aguas subterráneas, regional y local.</li> <li>- Principal componente del modelo hidrogeológico preliminar.</li> </ul>
Resultados de ensayos hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayos de bombeo en pozos regionales existentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite estimar la magnitud del drenaje mina y despresurización de taludes.</li> </ul>
Química de aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reportes hidrogeológicos y de geoquímica.</li> <li>- Registros de monitoreo.</li> <li>- Muestreo en terreno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valida el análisis hidrogeológico global y entrega una estimación preliminar de posibles riesgos ambientales.</li> </ul>

*Tabla 10 Suficiencia de Información*

### **3.7. Aportes de la literatura a la resolución de la problemática**

Según lo observado en la literatura, la fábrica estructural tendrá una gran importancia en la caracterización del macizo rocoso, y a la vez, ésta se verá afectada por el proceso de hundimiento. A medida que se propaga la socavación, la fábrica estructural cambiará sus propiedades geotécnicas, en mayor medida en la apertura de las estructuras, debido al desconfinamiento generado por las labores mineras. Es el fin del presente trabajo definir esquemática y numéricamente el efecto de la fábrica estructural en el cálculo de permeabilidad, definiendo una zonificación de permeabilidad a partir de estas diferencias en propiedades de estructuras.

Así, se define preliminarmente el umbral para la identificación de una estructura “abierta” o “sellada” en 5 mm, dado que este valor es reconocido como aquel en que las propiedades de la estructura no afectan en la estabilidad del macizo rocoso, es decir, el macizo rocoso se encontrará fracturado en su totalidad (Bieniawski, 1976).

Además, se relacionará el desplazamiento de los elementos numéricos utilizados en los modelos con la apertura de discontinuidades, ya que el desplazamiento se interpretará como una rotura en el macizo rocoso, y la primera debilidad encontrada en el macizo será la fábrica estructural.

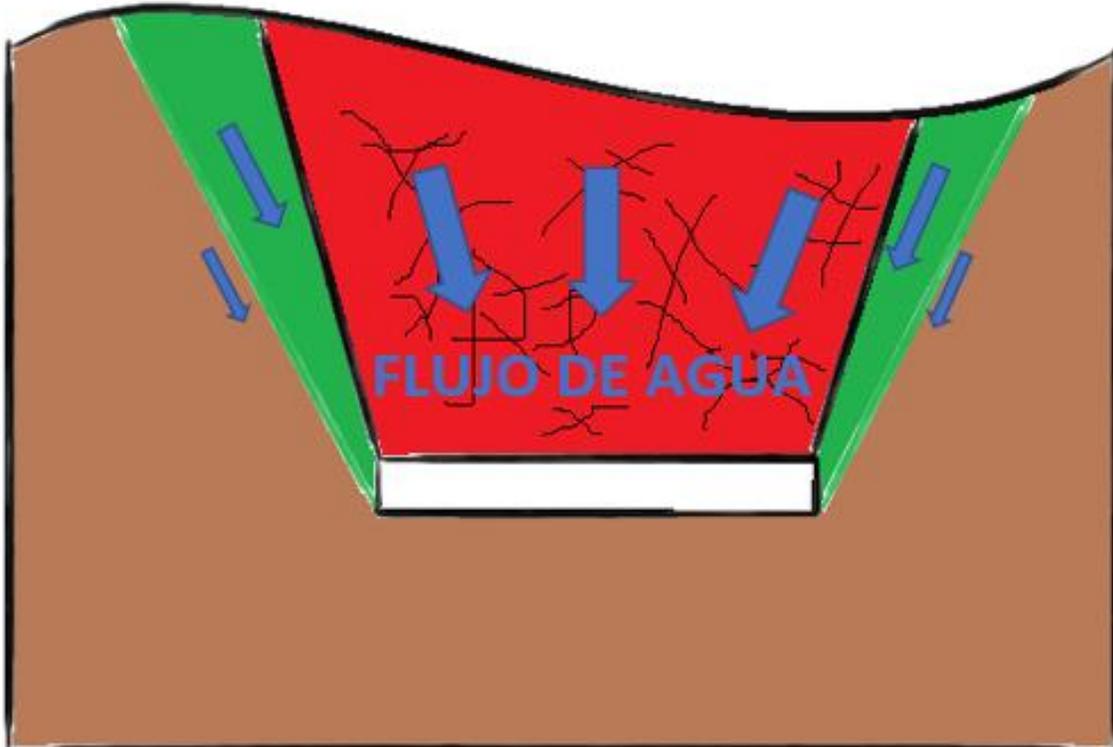
#### 4. CONCEPTUALIZACIÓN Y ENFOQUES UTILIZADOS EN LA DEFINICIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Este trabajo comienza con una revisión bibliográfica sobre:

- Caracterización de macizo rocoso.
- Estimación de hundibilidad.
- Parámetros geométricos de métodos de hundimiento masivo.
- Efecto de discontinuidades en el proceso de socavación.
- Permeabilidad hidráulica.
- Porosidad de macizo rocoso.
- Flujo de fluidos en discontinuidades.

Una vez revisada la información, y con un mayor conocimiento de la problemática a abordar, se preparan diversos modelos conceptuales, considerando los alcances y resultados esperados. Luego se procede a la estimación de propiedades hidráulicas: permeabilidad y porosidad, en un modelo simplificado de explotación minera por hundimiento. Para este fin, se consideran parámetros geotécnicos de la roca y la fábrica estructural del medio simplificados, lo que permite una visión de la variación en los parámetros previo y después de las labores mineras.

##### 4.1. Conceptualización



*Ilustración 29 Conceptualización de dirección y cantidad de flujo (Magnitud de Flecha proporcional a la cantidad de flujo)*

Como se observa en la figura anterior, se espera que la propagación de hundimiento y siguiente quebramiento del macizo rocoso resulte en una zona de roca quebrada con mayor permeabilidad. Se espera este aumento en permeabilidad ya que el fracturamiento progresivo del macizo rocoso en la zona de subsidencia, permitirá la conexión de fracturas que previamente no estaban presentes o de estructuras que se encontraban cerradas y debido al desconfinamiento se abren. Estas conexiones serán caminos preferenciales para el paso de flujo de agua, disminuyendo este flujo a medida que nos alejamos de la zona de influencia de la subsidencia.

## 4.2. Modelos Conceptuales Iniciales

A continuación, se presenta un esquema del modelo conceptual preparado para realizar las comparaciones entre método analítico y modelamiento numérico:

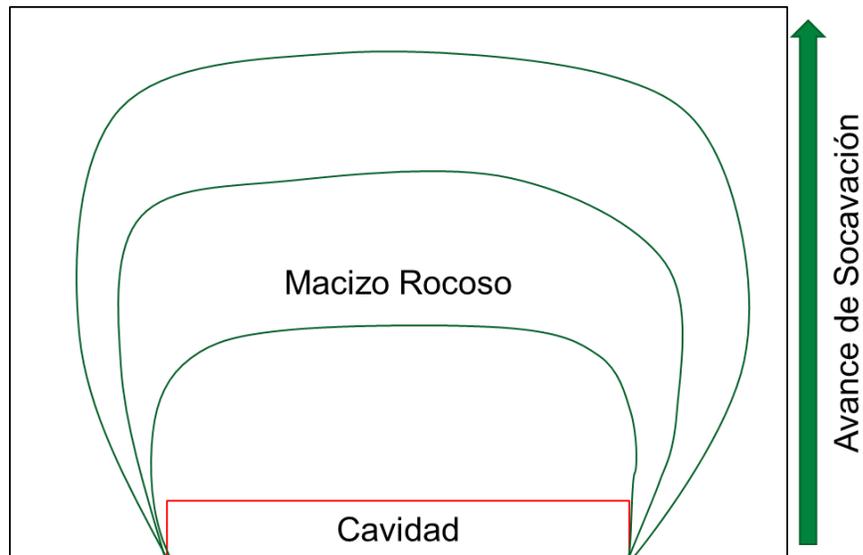


*Ilustración 30 Modelo Conceptual esquemático*

Como se observa en la ilustración, el modelo se simplifica considerando una sola unidad geotécnica representada por la roca caja. Luego se realiza un corte, simulando el relajamiento de esfuerzos resultado de la extracción de material.

Además, se considera un caso adicional con la inclusión de una falla explícita en el modelo, buscando representar, de manera simplificada, la presencia de discontinuidades y su efecto en la propagación de socavación, y en las propiedades hidráulicas del modelo.

En la siguiente ilustración se presenta una representación simplificada de los resultados esperados tras la propagación de la socavación:



*Ilustración 31 Modelo Conceptual de Avance de Socavación*

### **4.3. Definición de Parámetros**

El enfoque final de este trabajo es realizar una metodología en una etapa de proyecto donde la información disponible normalmente es muy limitada. Es por esto que se utilizará como guía la información recopilada en el “Geotechnical Guidelines for a Transition from Open Pit to Underground Mining” de Flores & Karzulovic. En este documento se rescata información sobre parámetros, consideraciones, etc. de varias minas en el mundo que se encontraban en el proceso de transición de minería a cielo abierto a minería subterránea.

Es así como se utilizarán valores de benchmarking en los diseños, parámetros, etc. según la siguiente tabla:

**TYPICAL DESIGN PARAMETERS FOR A BLOCK/PANEL CAVING MINE**

Mine Design Parameter		Typical Value	Comments	
Rock Mass Quality		$50 \leq \text{RMR} < 60$	If $\text{RMR} > 60$ rock mass cavability must be evaluated carefully.	
Acces		Decline	Currently 70% of mines prefer declines, and 20% declines <u>and</u> shafts as mine access.	
Block Height		210 m	This typical block height could vary $\pm 20\%$ .	
Footprint Area	< 50000 m <sup>2</sup>	30000 m <sup>2</sup>	These typical areas could vary +20%. It is recommended to use equal or larger areas, but not smaller than the typical values. Also, square areas are better than the rectangular ones.	
	50000 a 100000 m <sup>2</sup>	75000 m <sup>2</sup>		
	> 100000 m <sup>2</sup>	170000 m <sup>2</sup>		
Caving Initiation	Area	10000 m <sup>2</sup>	Smaller areas are not recommended, specially in massive rock masses.	
	Shape	Square	Internal corners must be avoided (e.g. a "L" shaped area).	
	Measures to Facilitate	Slot	Is highly recommended to facilitate cave initiation.	
	Hydraulic Radius	20 to 30 m	Avoid being close to the limit in Laubscher's chart.	
Undercut Level	Drifts	Spacing	15 m	This is the current practice.
		Height	4 m	Could be increased but not decreased.
		Width	4 m	
	Undercut Height	8 m	Could vary, but be careful if using small undercutting heights.	
	Undercut Rate	2100 m <sup>2</sup> /month	Could be increased but be careful with induced seismicity, specially if in a high stress environment.	
Extraction Level	Drifts	Crown-Pillar Thickness	17 m	Could vary $\pm 20\%$ (measured from floor UCL to floor EXT).
		Spacing	30 m	Could vary from 26 to 36 m.
		Height	4 m	Could be increased but not decreased.
		Width	4 m	
Draw Points	Spacing	15 m	Could vary from 13 to 18 m.	
	Influence Area	225 m <sup>2</sup>	Could vary from 169 to 324 m <sup>2</sup> .	
Draw Rates		0.20 m/day	This is an average value. Typically lower values are used at the beginning of caving, and higher values are used when over 30% of the block height has been extracted.	
LHD Equipment	Capacity	11 ton	It could vary $\pm 20\%$ .	
	Traming Distance	140 m	Smaller traming distances are preferable.	
Powder Factor		400 grm/ton	For undercutting blasting. It could vary $\pm 20\%$ .	
Oversize Limit		1.8 to 2.0 m <sup>3</sup>	It could vary $\pm 20\%$ .	
Subsidence	$\text{RMR} < 70$	$\alpha > 45^\circ$	$\alpha$ is the break angle defining the mean inclination of the crater walls.	
	$\text{RMR} > 70$	$\alpha > 60^\circ$		
Geotechnical Hazards		The project must take account that collapses, rockbursts, subsidence, water inflows and mudrushes, and hangups could occur		
Instrumentation & Monitoring		The most common monitoring systems include displacements and seismicity. It is recommended to include a seismic monitoring system, specially in massive hard rock and/or high stress environments..		

- (1) These typical values are intended only for the pre-feasibility stage of a mining project.  
 (2) **RMR** values are for Laubscher's 1990 system.

*Tabla 11 Parámetros típicos de diseño en minería subterránea por hundimiento (Flores & Karzulovic, 2002)*

La siguiente tabla presenta los parámetros de materiales utilizados en el modelamiento y cálculo empírico de propiedades hidráulicas:

Parámetro Macizo Rocoso	Valor
Peso Específico $\gamma [t/m^3]$	2.6
UCS [MPa]	100

$m_i$	15
GSI	60
Factor de Perturbación D	0 – 1.0

Tabla 12 Parámetros de Modelos – Macizo Rocoso

Parámetro Fallas	Valor
Peso Específico $\gamma$ [ $t/m^3$ ]	2.6
Cohesión [MPa]	0
Ángulo de Fricción [ $^\circ$ ]	35

Tabla 13 Parámetros de Modelos – Fallas

#### 4.4. Definición de Modelos conceptuales analítico y numérico

##### 4.4.1. Modelo analítico

El modelo conceptual analítico tendrá como base los siguientes supuestos:

- Macizo Rocoso: Homogéneo, propiedades de roca establecidas según bibliográfica.
- Estructuras: Sin presencia debido a las limitaciones de cálculo.
- Proceso de hundimiento: Dos etapas estáticas (in-situ y post conexión de subsidencia).

Para realizar el cálculo de permeabilidad en el modelo analítico, se utilizarán formulismos (Lianyang) diseñados para incorporar las componentes geotécnicas del macizo rocoso en el cálculo de permeabilidad.

Se definirán dos estados del macizo rocoso:

- Macizo Rocoso In-Situ: Macizo rocoso que no se encuentra perturbado por las labores de minería, donde las estructuras se encuentran “selladas” y por lo tanto la permeabilidad será la del macizo rocoso in-situ.
- Macizo Rocoso Fracturado: Macizo rocoso que se encuentra totalmente fracturado, producto del desconfinamiento generado por la socavación. Se considerará que las estructuras se encuentran “abiertas”, con una apertura mínima de 5 mm, lo que asegura una condición de bloques fragmentados.

#### **4.4.2. Modelo numérico**

Debido a la complejidad que presenta el replicar el proceso continuo de subsidencia, desde un estado de pre-minería a la conexión completa de la socavación, se exponen a continuación las consideraciones y limitaciones asociadas al modelo numérico:

- Se asume un macizo rocoso homogéneo e isotrópico.
- Se utiliza una caja de 400x400x400 m para construir la base del modelo, donde la cavidad se encontrará centrada en la base de la caja, con una altura de 20m.
- El tamaño de los elementos finitos en el modelo es de 10x10x10 m.

Para realizar la zonificación de permeabilidad se considerará lo siguiente:

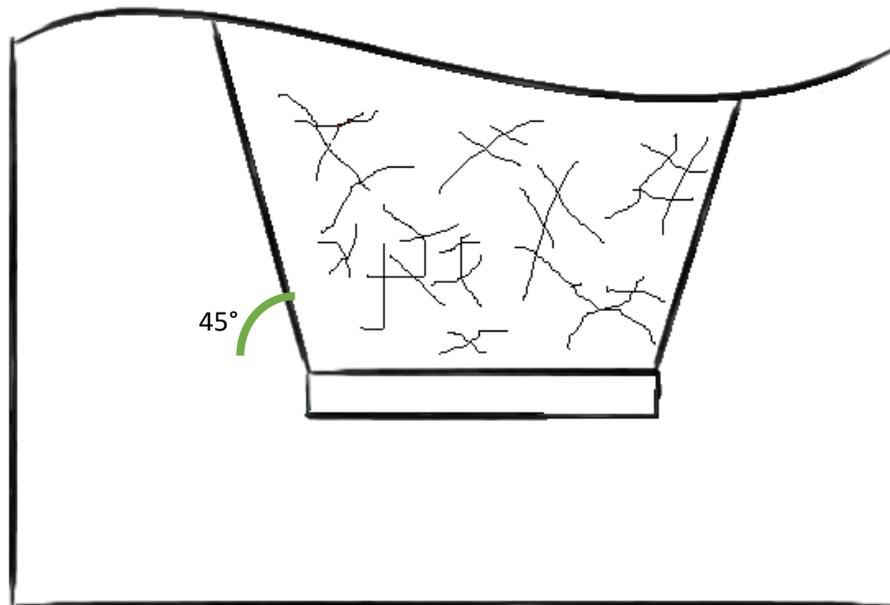
- **Zona de Influencia:** Macizo rocoso que se encuentra suficientemente alejado del área de socavación para que no se vea afectado por los desplazamientos ocurridos producto de las labores mineras. El comportamiento de esta zona será asumido igual a la del macizo rocoso in-situ
- **Zona de Transición:** Macizo rocoso afectado por desplazamientos menores a los 5 mm, por lo que no se asegura un estado de bloques fragmentados, pero que sí tendrá efecto en la permeabilidad. La fábrica estructural tiene un grado bajo de conexión entre estructuras.
- **Zona Quebrada:** Macizo rocoso totalmente disgregado, con desplazamientos mayores a los 5 mm. El comportamiento de esta zona será asumido igual a la del macizo rocoso fracturado.

## 5. MODELO ANALÍTICO o ENFOQUE TRADICIONAL

### 5.1. Cálculo de Geometría de Subsistencia a partir de métodos empíricos y/o analíticos

Según lo expuesto en la revisión de antecedentes, es posible predecir la geometría final de subsidencia producida por un método de hundimiento masivo según métodos analíticos y empíricos. Es así como se definen 2 zonas de permeabilidades diferidas, relacionadas a la apertura de las estructuras y/o fracturas presentes en el macizo rocoso.

Para el cálculo del ángulo de subsidencia, se utilizan distintos estudios para obtener un valor que represente una realidad promedio de los ángulos esperados. A continuación, se presentan diversas fuentes de información respecto a estos valores:



*Ilustración 32 Cálculo de geometría mediante métodos empíricos*

### 5.2. Cálculo de Permeabilidades a partir de métodos analíticos

Utilizando la sectorización mencionada en el punto anterior, y los formulismos propuestos en este trabajo, se procede a calcular la permeabilidad de las zonas utilizando la apertura de las discontinuidades abiertas (5 mm, según criterio de RMR de Bienawski para estructuras abiertas). A continuación, se presentan los resultados de permeabilidades y la zonificación final definida.

### 5.3. Análisis de Resultados

#### 5.3.1. Estimación indirecta de permeabilidad in-situ y durante el proceso de caving

Según lo expuesto en el capítulo de análisis de antecedentes, existen variadas opciones para el cálculo de permeabilidad de macizo rocoso, desde la asignación de permeabilidad por medio de valores de bibliografía, utilización de parámetros intrínsecos del macizo rocoso y relaciones con la calidad geotécnica (RQD, RMR, etc.).

En este estudio se calcula la permeabilidad en base a parámetros de las discontinuidades, los cuales variarán en los dos estados definidos del proceso de socavación: macizo rocoso in-situ y macizo rocoso fracturado.

Estado del Macizo Rocoso	e (mm)	s prom (m)	v (m <sup>2</sup> /s)	K <sub>i</sub> (m/s)	g (m/s <sup>2</sup> )	k <sub>D</sub> (cm/s)
In-Situ (Rango menor)	-					2 · 10 <sup>-6</sup>
In-Situ (Rango mayor)						1 · 10 <sup>-5</sup>
Fracturado (Rango menor)	2.5	0,05	1 · 10 <sup>-6</sup>	1 · 10 <sup>-9</sup>	9,8	8 · 10 <sup>-3</sup>
Fracturado (Rango mayor)	7.5	0,08				1 · 10 <sup>-2</sup>

Tabla 14 Resumen de parámetros en estimación indirecta de permeabilidades

Como se observa en la tabla anterior, el cálculo de permeabilidades se realiza en un rango, de manera de mejor representar la variabilidad de los parámetros presentes en el macizo rocoso.

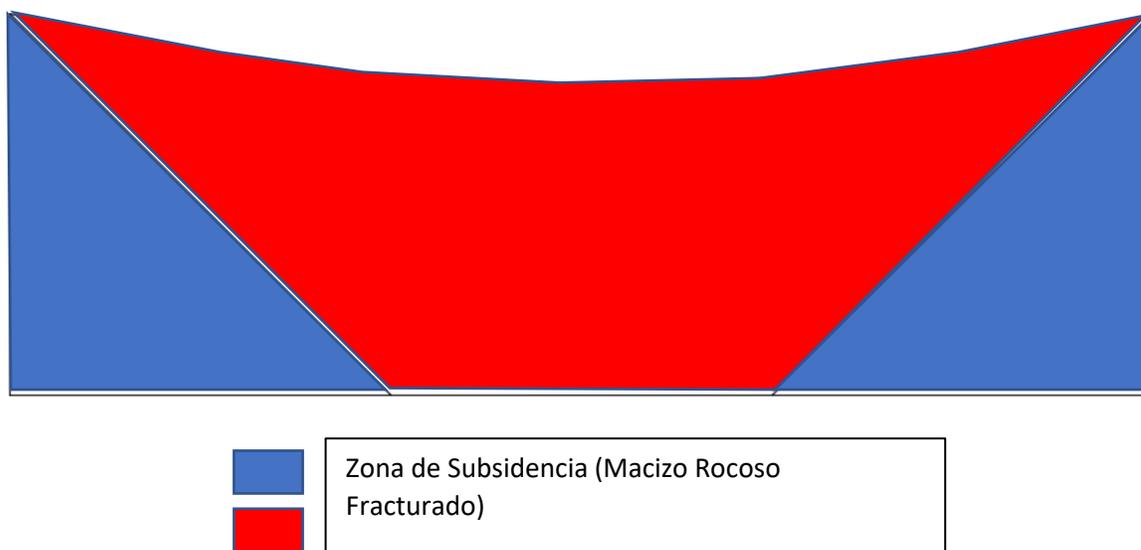
Luego, utilizando los métodos expuestos (Lianyang, 2016) se obtienen los siguientes valores de permeabilidad:

- Macizo Rocoso In-Situ (antes de ser afectado por hundimiento y subsidencia):
  - Permeabilidad macizo rocoso in-situ:  $K_D = 2 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$
- Macizo Rocoso Fracturado (hundimiento conectado a superficie):
  - Permeabilidad macizo rocoso fracturado:  $K_D = 8 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$

### 5.3.2. Definición de zonas de permeabilidad

A modo de comparar los resultados obtenidos mediante ambos modelos, se definen zonas de permeabilidad diferida de acuerdo con el avance de la socavación. Para esto, se diseña el área socavada según los parámetros de bibliografía de ángulos de subsidencia, tomando como referencia un ángulo de  $50^\circ$ , el que denota un valor conservador y acorde a los alcances del presente trabajo.

A continuación, se presenta el modelo analítico mostrando dicha zonificación:

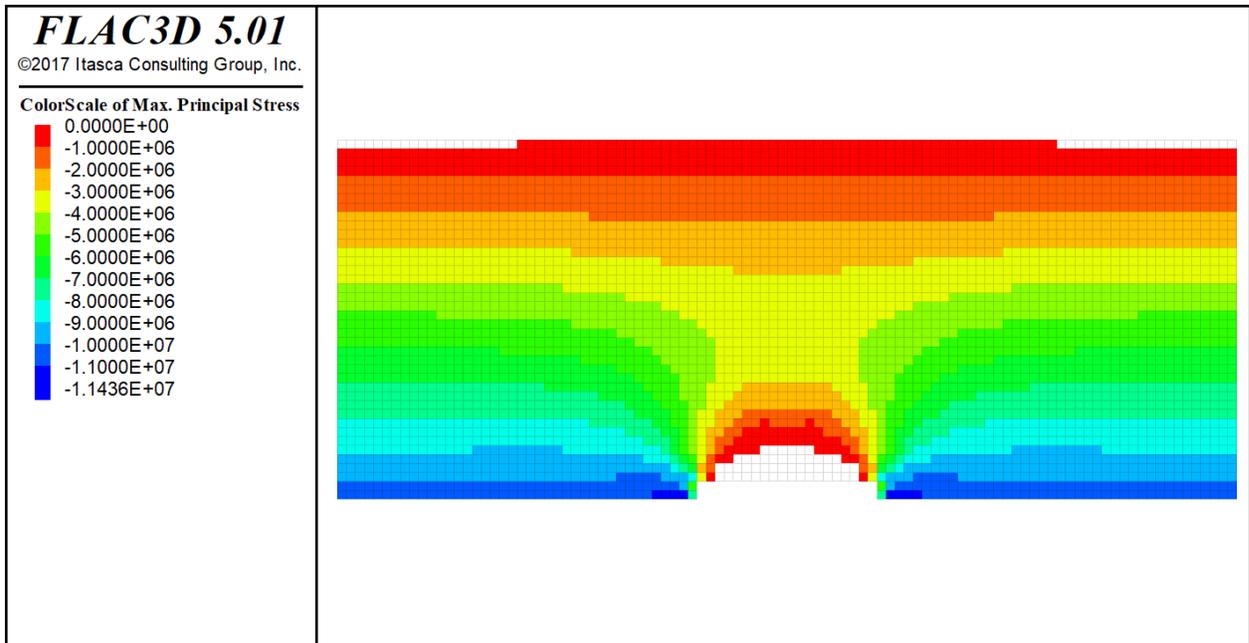


*Ilustración 33 Zonificación de Permeabilidad en Modelo Empírico*

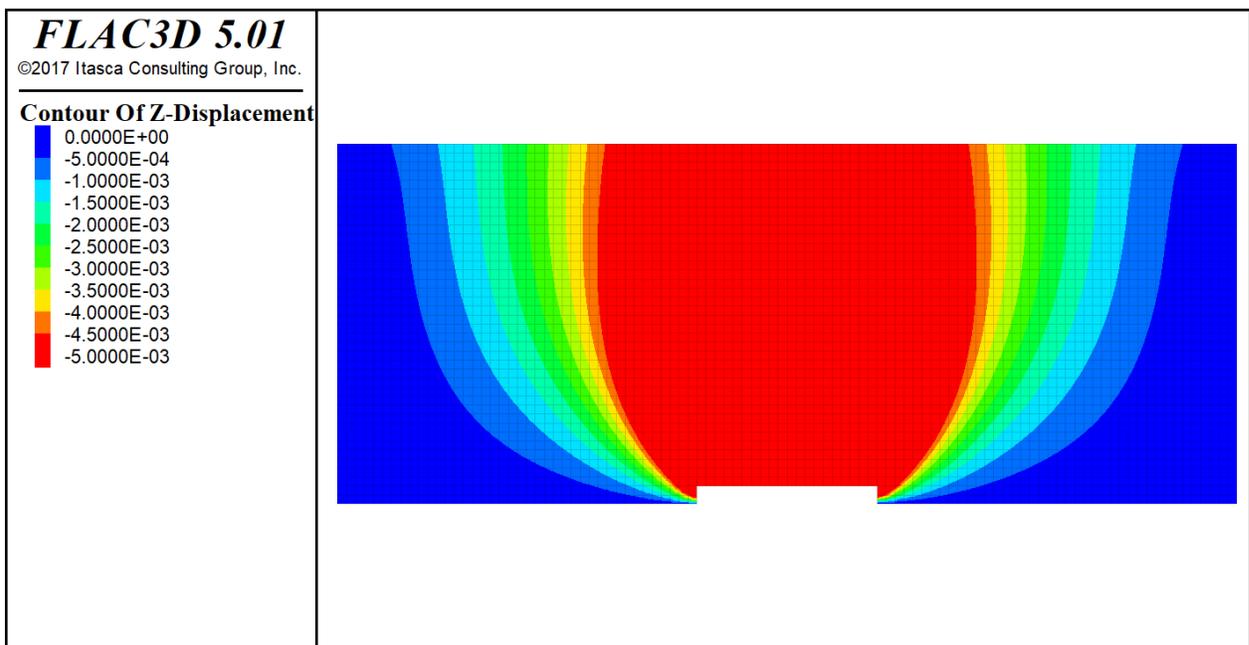
## 6. MODELO NUMÉRICO o PROPUESTA DE METODOLOGÍA

### 6.1. Análisis de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelamiento numérico en FLAC3D, en las siguientes ilustraciones:



*Ilustración 34 Resultados Modelo Isotrópico sin Presencia de Fallas - Distribución Esfuerzo Principal*



*Ilustración 35 Resultados Modelo Isotrópico sin Presencia de Fallas - Distribución Desplazamientos*

Lo primero que podemos observar es que los resultados obtenidos son los esperados según lo propuesto en los modelos conceptuales. Entre los modelos con y sin falla implícita, se observa el efecto de deformación que genera la discontinuidad en la distribución de esfuerzos y desplazamientos, siendo claramente una zona de deformaciones mayores a la del entorno.

Además, podemos definir zonas de permeabilidad diferida, respecto a la apertura de discontinuidades, según las deformaciones observadas, según se ve en la siguiente ilustración:

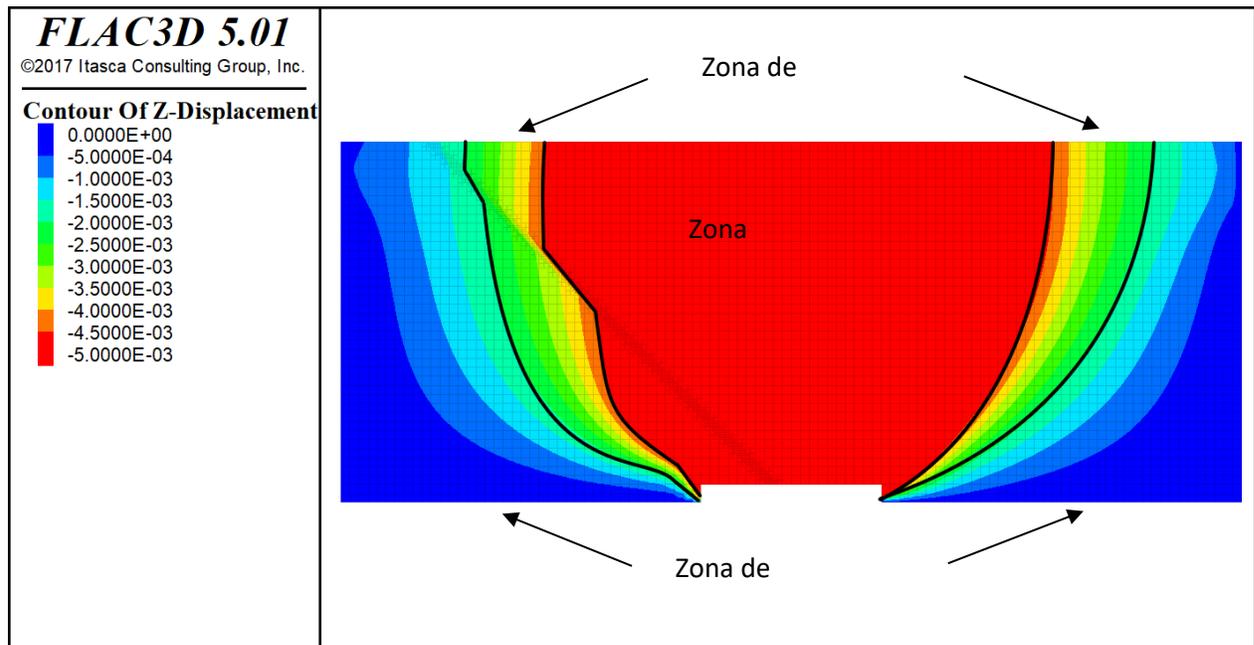


Ilustración 36 Distribución de permeabilidad (Zonas de permeabilidad)

Se definen 3 zonas de permeabilidad:

- Zona de Influencia, donde las deformaciones aún no permiten generar apertura en las discontinuidades, manteniéndose las propiedades in-situ de la roca.
- Zona de Transición, donde las discontinuidades tienen deformaciones de magnitud tal que las discontinuidades presentan una separación suficiente para permitir el flujo de agua de infiltración.
- Zona Quebrada, donde los bloques de roca se encuentran totalmente separados, y el medio donde fluye el agua de infiltración se asume como saturado.

Utilizando las definiciones de permeabilidad considerando parámetros geotécnicos, podemos calcular las permeabilidades diferidas en las 3 zonas definidas:

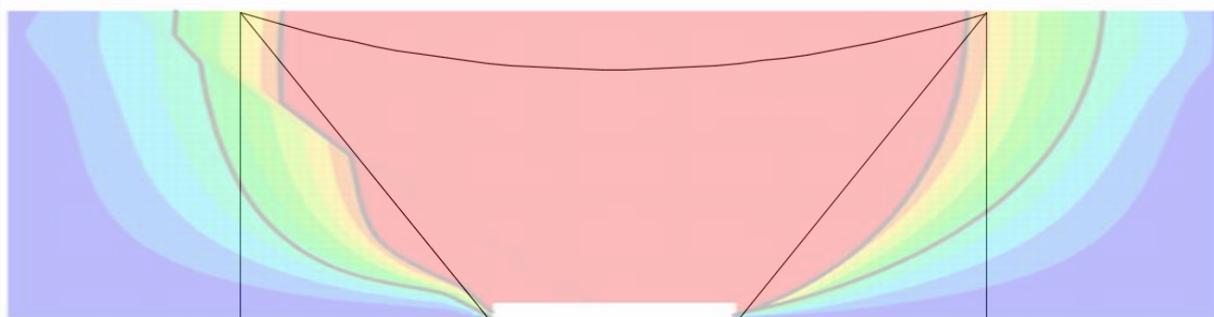
- Permeabilidad de Zona de Influencia:  $K = 10^{-6}$  cm/s.
- Permeabilidad de Zona de Transición:  $K = 10^{-3}$  cm/s.
- Permeabilidad de Zona Quebrada:  $K = 10^{-2}$  cm/s.

Además, considerando el efecto de la falla implícita como medio preferente de flujo, la permeabilidad de la zona de falla será  $K = 10^{-2}$  cm/s.

## 6.2. Comparación y validación con secciones obtenidas del modelo analítico y numérico

Para realizar la comparación y validación de ambos modelos, se utilizará como resultado final la zonificación realizada según los distintos valores de permeabilidad dentro de la zona afectada por el proceso de socavación.

En la siguiente figura comparativa se presentan los resultados obtenidos del modelo analítico y del modelo numérico:



*Ilustración 37 Comparación de Zonificación de Permeabilidad en ambos métodos*

Se puede observar el grado de precisión que se alcanza, con una simplificación considerable de la problemática, con el modelo numérico, pudiendo obtenerse lo siguiente:

- Un mejor entendimiento de la propagación del caving y su efecto en la separación de los bloques (por propagación de fracturas) y, a su vez, en la permeabilidad del macizo rocoso.
- La obtención de zonas de permeabilidad mejor definidas y a mayor detalle en el modelo numérico, utilizando la gradación de los desplazamientos inducidos por la minería.
- Visualización gráfica del efecto de la fábrica estructural (fallas explícitas) en la propagación del hundimiento, lo que permite un estudio de posibles mecanismos de inestabilidad que se puedan crear en la pared de contacto.

## **7. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES**

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis comparativo de los casos modelados y su comparación con los resultados obtenidos mediante métodos empíricos:

- El uso del software de modelamiento numérico FLAC3D resulta ser una herramienta muy útil, independiente de la cantidad de información disponible al momento de crear los modelos. Se obtienen resultados similares a los vistos con el enfoque tradicional, respecto a la influencia de las zonas fracturadas en el aumento de permeabilidad.
- Como se predijo en los modelos conceptuales, se observa el efecto de las estructuras mayores (fallas) como mecanismos preferenciales de infiltración, obteniéndose valores más altos de permeabilidad que la roca de caja. Es por esto que es de suma importancia la
- Se observa que, considerando la deformación de los elementos finitos, se encuentra una relación entre este cambio en las propiedades de la roca y la permeabilidad del medio, pudiendo estimar de manera temprana el tiempo de respuesta hasta que el flujo de agua de infiltración aparezca en los niveles de producción.
- Se recomienda el uso de modelos numéricos simplificados, en etapas tempranas de un proyecto minero donde no se cuenta con grandes cantidades de información, para la estimación de permeabilidades y tiempos de infiltración.
- Se recomienda crear modelos anisotrópicos con presencia de estructuras mayores a manera de revisar el efecto de agregar complejidad al modelo y su impacto en la calidad de los resultados. Así como incorporar en las propiedades del modelo información real de propiedades de roca obtenidas en campañas históricas o en procesos de exploración.

## **8. PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA**

Considerando las limitaciones antes expuestas del presente trabajo, se proponen las siguientes mejoras en investigaciones futuras:

- Aplicación de metodología en minas en operación, donde se encuentre presencia de afloramiento de agua.
- Análisis de sensibilidad respecto a los parámetros utilizados, y así obtener los parámetros críticos en el cálculo de permeabilidad.
- Estudio de la relación entre apertura de discontinuidades y desplazamientos en modelo numérico.
- Creación de modelos numéricos más complejos, para evaluar el efecto en la confiabilidad de los resultados.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, N. (1995). The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1976) Rock Mass Classification in Rock Engineering. Bieniawski, Z.T., Ed., Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering, 1, 97-106.
- BRADY, Barry HG; BROWN, Edwin T. Rock mechanics: for underground mining. Springer science & business media, 2013.
- ELMO, D., et al. A hybrid FEM/DEM approach to model the interaction between open-pit and underground block-caving mining. En 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2007.
- FLORES, G.; KARZULOVIC, A. Geotechnical guidelines for a transition from open pit to underground mining. Benchmarking Rep, 2002.
- KIM, Boon; CAI, M; KAISER, P; S. YANG, H. (2007). Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Nonpersistent Joints. Rock Mechanics and Rock Engineering - ROCK MECH ROCK ENG.
- LAUBSCHER, D. H. Cave mining-the state of the art. Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1994, vol. 94, no 10, p. 279-293.
- MUÑOZ, E. 2002. Riesgos en la minería subterránea. Sernageomin (Inédito): 70 pp. Santiago.
- PALMSTRÖM, A. Measurement and characterization of rock mass jointing. 49-97, 2001.
- PRIEST, Stephen Donald. Discontinuity analysis for rock engineering. Springer Science & Business Media, 2012.
- READ, John; BEALE, Geoff (ed.). Guidelines for evaluating water in pit slope stability. CSIRO Publishing, 2013.
- READ, John; STACEY, Peter. Guidelines for open pit slope design. CSIRO publishing, 2009.
- YARAHMADI, Reza; BAGHERPOUR, Raheb; SOUSA, Luís; TAHERIAN, Sayed. (2015). How to determine the appropriate methods to identify the geometry of in situ rock blocks in dimension stones. Environmental Earth Sciences.
- VYAZMENSKY, Alexander. Numerical modelling of surface subsidence associated with block cave mining using a finite element/discrete element approach. Fraser University, 2008.
- ZHANG, Lianyang. Engineering properties of rocks. Butterworth-Heinemann, 2016.