

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

# **DESAFÍOS GEOMECÁNICOS PARA EL USO DE TBM EN MINERÍA MASIVA DE CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**CAMILO EDUARDO RODRIGUEZ TORO**

**PROFESOR GUÍA:**

**LUIS ORELLANA ESPINOZA**

**PROFESOR CO-GUÍA:**

**GIORGIO PIAGGIO MUÑOZ**

**COMISIÓN:**

**HANS GÖPFERT HIELBIG**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2020**

## RESUMEN

El presente trabajo se focaliza en la investigación del método de excavación mecanizada utilizado en la construcción de túneles a gran profundidad, altos esfuerzos y roca dura. Estas condiciones desafiantes, se estudian detalladamente en conjunto con proyectos que a lo largo de la historia han utilizado la tecnología de Tunnel Boring Machine (TBM) en el desarrollo de sus proyectos. El objetivo principal de la memoria es estudiar las condiciones geomecánicas y de operación para el uso de TBM en minería masiva de Chile.

En primer lugar, se realiza un estudio bibliográfico de proyectos que han utilizado TBM para la construcción de túneles a gran profundidad, con filtración de agua, estallidos de roca, terrenos blocosos, entre otras variables que se analizan en detalle junto a todos los desafíos geomecánicos que ocurrieron en cada uno de los proyectos en estudio.

En segundo lugar, se analiza la propuesta de utilizar la TBM como una opción viable para la construcción de túneles en minería masiva de Chile. Este análisis, se centra en las variables de diseño de los túneles (longitud, diámetro, radio de curvatura, pendiente) para el uso de una TBM en un proyecto minero.

La última parte de este trabajo considera la estimación del rendimiento de una TBM doble escudo para la construcción de un túnel en minería subterránea, utilizando la información de 3 sondajes que cubren 1.6 km de un total de 9 km del túnel. Para la elaboración de la estimación de rendimiento, se realiza una simulación Monte Carlo que considera 10000 iteraciones, utilizando el modelo semiteórico de Colorado School of Mines, (Piaggio, 2011).

Como resultado de la simulación se puede inferir que el rendimiento de la TBM doble escudo se encuentra dentro del rango esperado de rendimientos que puede tener esta tecnología en la construcción de túneles en minería.

Es importante que cualquier proyecto minero que considere la posibilidad del uso de TBM en el desarrollo de sus túneles, deba incluir en la planificación, los túneles que podrían ser construidos en términos de las dimensiones y diseño minero, ya que de esa manera se contará con el tiempo y detalle necesario para la elección correcta del método de construcción.

Finalmente, la aplicación de máquinas TBMs a proyectos mineros requiere de una cuidadosa evaluación de muchas variables y consideraciones, algunas de las cuales son técnicas y otras no. El aprendizaje tomado de proyectos mineros anteriores en donde fueron utilizadas máquinas TBMs, establece que cada proyecto de túneles y condiciones de terreno son únicas y particulares en términos geológicos, de acceso, cobertura de roca, experiencia de los contratistas y requerimientos específicos para el término del proyecto, por lo cual nunca se debe generalizar los resultados de un proyecto para después utilizarlo en otro.

## **ABSTRACT**

This work focuses on the investigation of tunnel boring machines that are used in the construction of tunnels at great depth, high stresses and hard rock. These challenging conditions are studied in detail in conjunction with projects that throughout history have used the Tunnel Boring Machine (TBM) in the development of their projects. The main objective of the report is to study the geomechanical and operating conditions for the use of TBM in mass mining in Chile.

Firstly, a bibliographic study of projects that have used TBM for the construction of tunnels at great depth, with water filtration, rock bursts, blocky terrain, among other variables that are analyzed in detail together with all the geomechanical challenges that are occurred in each of the projects under study.

Secondly, the proposal to use the TBM as a viable option for the construction of tunnels in mass mining in Chile is analyzed. This analysis focuses on the design variables of the tunnels (length, diameter, radius of curvature, slope) for the use of a TBM in a mining project.

The last part of this work considers the estimation of the performance of a double shield TBM for the construction of a tunnel in underground mining, using the information from 3 drill holes that cover 1.6 km of a total of 9 km of the tunnel. For the elaboration of the performance estimate, a Monte Carlo simulation is performed that considers 10,000 iterations, using the Colorado School of Mines semitoric model.

As a result of the simulation it can be inferred that the performance of the double shield TBM is within the expected range of performances that this technology can have in the construction of tunnels in mining.

It is important that any mining project that considers the possibility of the use of TBM in the development of its tunnels, should include in the planning, the tunnels that could be built in terms of the dimensions and mining design, since that way there will be the time and detail necessary for the correct choice of construction method.

Finally, the application of TBMs machines to mining projects requires a careful evaluation of endless variables and considerations, some of which are technical and some of which are not. The learning taken from previous mining projects where TBMs machines were used, establish that each tunnel project and terrain conditions are unique and particular in terms of geology, access, rock cover, experience of contractors and specific requirements for the completion of the project, so you should never generalize the results of one project and then use it in another.

*A mi madre, hermano,  
abuelos y tíos.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Oriana por su gran sacrificio y dedicación durante todos mis años de vida. Gracias a ella he podido salir adelante, crecer como persona y lograr mis objetivos. Me siento muy agradecido de mi mamá por el gran esfuerzo que ha hecho para educarme y entregarme siempre lo mejor. Ha sido muy sacrificado, puesto que has cumplido el rol de madre y padre a la misma vez, pero pucha que lo has hecho bien. Te quiero mucho mamá, gracias por regalarme un hermanito tan lindo. Mi Tomasito me ha dado muchas alegrías y fuerzas para terminar mi Universidad.

A mi queridos abuelitos, Angelica y Sergio, por cuidarme durante mi niñez, por su gran preocupación y cariño que me han entregado siempre. Abuelita muchas gracias por todo tu apoyo, por tu fidelidad, por enseñarme a ver las cosas de una manera distinta, gracias por darme tu tranquilidad y paz, gracias por todos tus detallitos. Eres la mejor abuelita que puede existir en el mundo, estoy muy agradecido por tenerte aún con vida. Este trabajo te lo dedico con mucho amor y cariño.

A mis tíos, Ximena y Francisco, por el gran apoyo profesional que me entregaron durante todo el tiempo que viví con ustedes, por recibirme y aceptarme durante muchos años. Ustedes fueron un pilar fundamental en muchas de las decisiones que tuve que tomar durante mi vida Universitaria, sin ustedes esto no hubiera sido posible.

A mi Estrellita, Isidora Haziby, gracias por tu enorme paciencia y apoyo incondicional durante todo mi proceso de memoria. Gracias por ser una persona increíble, siempre tuviste la mejor disposición para ayudarme, darme tu opinión y diferentes puntos de vista. Muchas gracias por ser quién eres, por tu amor y cariño. Te amo mucho.

A mi tío Tito, por enseñarme desde pequeño a tener espíritu de superación y apoyarme en mis estudios. Su motivación y experiencia de vida me ha enseñado a salir adelante y a luchar cada día.

A mi profesor Luis Felipe y Giorgio Piaggio, por darme la oportunidad de desarrollar mi memoria con ustedes, por el gran aprendizaje que me entregaron y el tiempo que se tomaron para ayudarme.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO .....	2
1.3	ALCANCES.....	2
1.4	ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	3
2	ANTECEDENTES .....	4
2.1	TIPOS DE TBM PARA ROCA DURA.....	4
2.1.1	Gripper.....	5
2.1.2	Escudo Simple .....	6
2.1.3	Doble Escudo.....	7
2.2	EXPERIENCIA DE TBM EN ROCA.....	8
2.2.1	Túnel de Base de San Gotardo .....	9
2.2.2	Hidroeléctrica Jinping II.....	10
2.2.3	Túnel de exploración Los Bronces .....	12
2.2.4	Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo .....	14
2.2.5	Túnel Acueducto Río Blanco, El Teniente.....	15
2.2.6	Proyecto Túnel Los Olmos .....	16
2.2.7	San Manuel .....	17
2.2.8	StillWater.....	18
2.2.9	Caso El Teniente.....	19
2.2.10	Resumen de proyectos .....	20
2.3	VARIABLES CRÍTICAS DEL USO DE TBM EN MINERÍA MASIVA DE CHILE.....	21
2.4	CONSIDERACIONES GEOMECÁNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES CON TBM EN ROCA DURA Y GRANDES PROFUNDIDADES. ....	27
2.4.1	Terrenos débiles.....	27
2.4.2	Terrenos sometidos a altos esfuerzos .....	28
2.4.3	Terrenos blocosos y fracturados .....	31
2.4.4	Presencia de agua.....	35
2.4.5	Zonas de Fallas .....	35
2.4.6	Desafíos enfrentados en terreno .....	40
2.5	ESTADO DEL ARTE SOBRE LA EXCAVABILIDAD DE TÚNELES EN ROCA DURA .....	47
2.5.1	Colorado School of Mines (CSM).....	49
2.5.2	Q TBM.....	54
2.5.3	RME (Rock Mass Excavability).....	57
2.6	VARIABILIDAD GEOTÉCNICA .....	63
2.6.1	Distribución de probabilidad .....	65
2.6.2	Método Monte Carlo .....	65
3	METODOLOGÍA.....	67

3.1	EXPERIENCIA EN TBM .....	68
3.2	DESAFÍOS DE LA TBM EN MINERÍA.....	68
3.3	MODELOS PREDICTIVOS DE RENDIMIENTO .....	68
3.4	SIMULACIÓN MONTE CARLO.....	69
3.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	71
4	RESULTADOS .....	73
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	77
5.1	MODELOS PREDICTIVOS DE RENDIMIENTO .....	77
5.2	SIMULACIÓN.....	78
5.2.1	Chuquicamata Subterráneo.....	80
6	CONCLUSIONES.....	83
6.1	RECOMENDACIONES .....	84
7	BIBLIOGRAFÍA.....	86
8	ANEXO .....	89
8.1	ANEXO A: RESUMEN EXTENDIDO.....	89
8.2	ANEXO B: EXPERIENCIA DE TBM EN ROCA DURA.....	95
8.2.1	Túnel de base de San Gotardo .....	95
8.2.2	Hidroeléctrica Jinping II.....	95
8.3	ANEXO C: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN .....	96
8.3.1	Importación de librerías.....	96
8.3.2	Declaración de constantes .....	96
8.3.3	Datos de las distribuciones .....	97
8.3.4	Creación de funciones .....	97
8.3.5	Simulación.....	98
8.3.6	Gráfica de AR[m/día] .....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Características de la TBM Robbins, (Winston H. Diaz, 2019). .....	17
Tabla 2.2.	Tabla comparativa de los proyectos estudiados que utilizan TBM para la excavación de túneles, elaboración propia. ....	21
Tabla 2.3.	Valor de m1 en base al valor de Q. (Barton, 2000, 2018). .....	56
Tabla 2.4.	Referencia para determinar el factor A en base al largo del túnel excavado (Bieniawski C. G., 2008). .....	59
Tabla 3.1.	Parámetros de la distribución normal para cada tramo del túnel.....	69
Tabla 3.2.	Parámetros de la TBM Escudo Doble. ....	69
Tabla 3.3.	Reducción porcentual para cada tipo de zona de falla, que experimenta una TBM Gripper, (Paltrinieri, 2015). ....	72

Tabla 4.1. Resultados del avance de la TBM para los cuatro tramos que componen los 1.6 km del túnel estudiado, elaboración propia. ....	76
Tabla 4.2. Rendimiento de la TBM para los cuatro tramos del túnel, considerando las distintas posibles zonas de fallas. ....	76
Tabla 5.1. Valores de empuje, torque y potencia correspondientes a una TBM doble escudo operando en terreno. ....	78

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Factor de carga modificado, (Deere et al. 1969). ....	39
Ecuación 2.2. Fuerza total actuando en el disco cortador. ....	50
Ecuación 2.3. Ángulo del área de contacto con la frente de excavación. ....	50
Ecuación 2.4. Fuerza normal actuando en el disco cortador. ....	50
Ecuación 2.5. Fuerza tangencial actuando en el disco cortador. ....	50
Ecuación 2.6: Empuje total actuando en el cabezal. ....	51
Ecuación 2.7: Torque total actuando en el cabezal. ....	51
Ecuación 2.8. Potencia total de la TBM. ....	51
Ecuación 2.9. Fórmula para determinar la velocidad de corte de la TBM. ....	52
Ecuación 2.10. Fórmula para determinar la velocidad de avance según el modelo CSM. ....	52
Ecuación 2.11. Fórmula para determinar la tasa de penetración. ....	53
Ecuación 2.12. Fórmula para determinar la tasa de penetración de la TBM considerando el efecto de las fracturas. ....	54
Ecuación 2.13. Fórmula para determinar el Q de Barton. ....	54
Ecuación 2.14. Fórmula para determinar la velocidad de penetración. ....	55
Ecuación 2.15. Fórmula para determinar la velocidad de avance. ....	55
Ecuación 2.16. Fórmula para determinar el tiempo de la excavación. ....	56
Ecuación 2.17. Fórmula para determinar el valor del gradiente de desaceleración. ....	56
Ecuación 2.18. Relación entre la velocidad de avance promedio real y la teórica. ....	59
Ecuación 2.19. Fórmula para determinar el factor FE. ....	60
Ecuación 2.20. Fórmula para determinar el impacto del diámetro de la excavación. ....	60
Ecuación 2.21: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM escudo simple. ....	61
Ecuación 2.22: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM doble escudo. ....	61
Ecuación 2.23: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM escudo simple. ....	61
Ecuación 2.24: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM doble escudo. ....	61



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1. Clasificación de Máquinas TBM, (Zheng, 2016).....	4
Ilustración 2.2. Esquema TBM Gripper, (Zheng, 2016). ....	6
Ilustración 2.3. Esquema TBM Escudo Simple, (Zheng, 2016).....	7
Ilustración 2.4. Esquema TBM Doble Escudo, (Zheng, 2016). ....	8
Ilustración 2.5. Utilización de TBM en minería, (D. Brox, G.Piaggio, 2013). ....	9
Ilustración 2.6. Tipos de rocas y longitud de los tramos del perfil geológico del túnel de San Gotardo, (Herrenknecht, 2010).....	10
Ilustración 2.7. Fallas geológicas del túnel de San Gotardo, (Herrenknecht, 2010). ....	10
Ilustración 2.8. Vista Isométrica de los túneles de la Hidroeléctrica Jinping II, (W. Shiyong, X.Feng, L. Ribeiro e Sousa, 2010).....	11
Ilustración 2.9. Layout túneles Jinping II, (W. Shiyong, X.Feng, L. Ribeiro e Sousa, 2010).....	11
Ilustración 2.10. Perfil geológico Jinping II, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).....	12
Ilustración 2.11. Perfil del túnel de exploración Los Bronces, (P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles, 2012). ....	12
Ilustración 2.12. TBM Doble Escudo utilizada en la construcción del túnel Los Bronces, (P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles, 2012).....	13
Ilustración 2.13. Caracterización geomecánica del macizo rocoso del túnel Sur de Los Bronces, (P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles, 2012).....	14
Ilustración 2.14. TBM utilizada en el Proyecto Alto Maipo, (Strabag, s.f.). ....	14
Ilustración 2.15. Perfil geológico proyecto Alto Maipo (túnel El Volcán y Alfalfal II). ....	15
Ilustración 2.16. Perfil geológico del túnel acueducto Río Blanco, (Budini 1994).....	16
Ilustración 2.17. Perfil geológico del túnel Olmos dividido en sus diferentes zonas de construcción, (Winston H. Diaz, 2019). ....	17
Ilustración 2.18. Ruta que siguió la TBM para la construcción de los túneles de 4.6 m de diámetro en los 2 niveles, (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001). ....	18
Ilustración 2.19. Layout de los túneles que fueron construidos por las 2 TBMs, (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001). ....	19
Ilustración 2.20. Ejemplo de cómo se puede acceder a un yacimiento masivo a través de túneles construidos con TBM, (Ofiara, 2017). ....	23
Ilustración 2.21. Alternativa de sistema de correa que se utilizará para transportar el material excavado con una pendiente de 15.4% en Oz Minerals, para una mina de cobre y oro que se encuentra a 1500 m de profundidad en el Sur de Australia (R. Gratias, C. Allan, D. Willis, 2016). ....	24
Ilustración 2.22. Ejemplo de un trazado con curvas adaptado para la construcción con TBM, (D. Ofiara, G. Watson, 2016).....	24
Ilustración 2.23. Trayectoria del túnel a construir, (D. Ofiara, G. Watson, 2016).....	26
Ilustración 2.24. Modos de fallas inducidos por esfuerzos, (Gong et al, 2012). ....	29

Ilustración 2.25. Estallido de roca en el proyecto Jinping II, (Zheng, 2016).	30
Ilustración 2.26. Frente blocosa frente a los deslizamientos de la roca, (Zheng, 2016).	33
Ilustración 2.27. TBM doble escudo avanzando en una frente blocosa, (Q. Gong, L. Yin, H. MA, J. Zhao, 2016).	33
Ilustración 2.28. Clasificación de fallas según Meteorización y grado de Fracturamiento, (Paltrinieri, 2015).	37
Ilustración 2.29. Dificultades en la construcción del túnel en una zona de roca triturada: a) la excavación enfrenta inestabilidad; b) descompresión y bloqueo de la TBM; c) fenómeno de fluencia (Habimana et al., 2002).	38
Ilustración 2.30. Respuesta inmediata de rocas débiles en la construcción de túneles (Klein, 2001).	40
Ilustración 2.31. Infiltración de agua a alta presión durante el desarrollo del proyecto Jinping II, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).	41
Ilustración 2.32. Resultado del estallido de roca, durante la construcción del túnel de drenaje, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).	42
Ilustración 2.33. Preparativos para la reconstrucción de la estación multifuncional de Faido debido al Squeezing, (Herrenknecht, 2010).	43
Ilustración 2.34. Sellado de la falla con cemento, (Ehrbar, 2008).	43
Ilustración 2.35. Distribución de estallidos de roca versus avance promedio por año, (Winston H. Diaz, 2019).	45
Ilustración 2.36. División del túnel en zonas de estallidos de baja, media y alta intensidad, (Winston H. Diaz, 2019).	45
Ilustración 2.37. Inestabilidad en la cara del túnel de la autopista Pinglin, Taiwán, después de Barla y Pelizza (2000).	46
Ilustración 2.38. Atasco de la TBM como consecuencia del sobreesfuerzo y un movimiento de bloque de 25 cm de la pared lateral derecha en el túnel Pont Ventoux, Italia, Barla y Pelizza (2000).	47
Ilustración 2.39. Test de laboratorio aplicado a los discos cortadores para estimar la fuerza normal y de rodadura en distintos tipos de roca, (Rostami, 1993, 2008, 2013).	49
Ilustración 2.40. Variación de la velocidad de penetración y avance de la TBM con respecto al tipo de macizo rocoso, (Barton, 2000, 2018).	55
Ilustración 2.41. Tabla de parámetros para asignar puntaje al RME (Bieniawski C. G., 2008).	58
Ilustración 2.42. Ranking de puntajes que se asignan a cada uno de los factores que componen FE, (Bieniawski C. G., 2008).	60
Ilustración 2.43. Pasos para la cuantificación de incertidumbre en propiedades del macizo rocoso (modelo de Haldar y Mahadevan 2000).	64
Ilustración 3.1. Metodología adoptada para el desarrollo de la memoria.	67
Ilustración 3.2. Disminución de la tasa de avance con respecto a los 4 tipos de fallas, (Paltrinieri, 2015).	72
Ilustración 5.1. Simulación de dos casos, para justificar el fenómeno bimodalidad que se presenta en los resultados del túnel simulado producto de la variación del UCS.	79
Ilustración 5.2. Vista de perfil del Layout del proyecto Chuquicamata Subterráneo,	
Práctica profesional III.	81

Ilustración 5.3. Vista lateral del diseño de Chuquicamata Subterráneo Nivel I, Práctica profesional III. ....	81
Ilustración 8.0.1. Perfil geológico detallado del túnel de Base de San Gotardo, (Herrenknecht, 2010). ....	95
Ilustración 8.0.2. Perfil del túnel Jinping II, donde se revelan los puntos más relevantes en los cuales se produjeron los estallidos de rocas, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016). ....	95

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1. Distribución de la resistencia a la compresión simple en base al largo del túnel de la tabla 3.1, elaboración propia. ....	73
Gráfico 4.2. Histograma del avance de la TBM con respecto a los primeros 400 m, Elaboración propia. ....	74
Gráfico 4.3. Resultados de la simulación Monte Carlo para el tramo entre los 400 y 800 m del túnel, elaboración propia. ....	74
Gráfico 4.4. Resultados de la simulación Monte Carlo para el tramo entre los 800 y 1200 m del túnel, elaboración propia. ....	75
Gráfico 4.5. Resultados de la simulación Monte Carlo para el tramo entre los 1200 y 1600 m del túnel, elaboración propia. ....	75

# 1 INTRODUCCIÓN

La minería en Chile ha ido evolucionando con el pasar de los años y uno de los cambios que ha experimentado, es la expansión de explotación de algunos yacimientos de minerales, pasando de una minería a cielo abierto a subterránea. Esta transición se debe a que los recursos en superficie se han agotado y los costos mina han ido en aumento; este es el caso de la mina a rajo abierto más grande del mundo, Chuquicamata, que tras 100 años de explotación a cielo abierto ha pasado a ser una mina subterránea.

Debido a la necesidad de las compañías mineras de poder extraer el mineral que se encuentra a grandes profundidades, nace la alternativa de poder construir los túneles de acceso, ventilación y de transporte de minerales con máquinas tuneladoras en yacimientos de grandes dimensiones. Si bien la Tunnel Boring Machine (TBM) se ha utilizado en túneles de obras civiles durante muchos años, su potencial en las aplicaciones mineras permanece en gran medida sin explotar. Sin embargo, con crecientes historias de éxito y nuevas tecnologías, la industria minera está yendo en busca de nuevas alternativas de construcción mecanizada como la TBM.

La industria de la excavación mecanizada ha logrado un progreso notable desde el último auge de la aplicación de la TBM en la minería a nivel mundial, desde el año 1970, pero el inicio del uso de esta tecnología en la minería de Chile comenzó en el año 2000. Desde 1990, la construcción de túneles con TBM en minas de roca dura, comenzó a mejorar y la longitud promedio por túnel aumentó a más de 7000 m, ya que actualmente se tiene más información geológica y geomecánica de los túneles a construir y TBMs con más tecnologías. Hasta ahora, más de 220 km de túneles han sido excavados por 100 TBM en aproximadamente 60 minas en todo el mundo.

El uso de TBM aparece como una alternativa competitiva para la construcción de infraestructura en minería subterránea masiva. La TBM puede incrementar las tasas de avance de tal manera de adelantar los flujos de caja, así como también reducir los costos operacionales cuando se comparan con los métodos de construcción de túneles convencionales de tipo perforación y tronadura, además de proporcionar altos índices de seguridad. Adicionalmente, el uso de la TBM puede adelantar la llegada del acceso principal a los niveles de producción y comenzar antes su explotación.

La técnica es muy interesante en la explotación de depósitos pórfidos cupríferos masivos, ya que sus largas dimensiones son adecuadas para la construcción intensa de túneles. Sin embargo, las condiciones geológicas de la roca pueden ser complejas y adversas para la TBM, lo cual presenta un gran desafío para su operación exitosa. En esta memoria se estudia el impacto de las condiciones de la roca y de operatividad en el rendimiento de avance de una TBM en minería masiva de Chile.

## **1.1 Objetivo General**

- El propósito principal, es estudiar las condiciones geomecánicas y de operación para el uso de Tunnel Boring Machine en minería masiva de Chile.

## **1.2 Objetivo Específico**

- Determinar la velocidad de avance de una TBM doble escudo en un tramo de 1.6 km de un túnel de 9 km de longitud que se encuentra a 1700 m de profundidad, cuyo diámetro es de 4.5 m.
- Generar una discusión acerca del uso de excavación mecanizada en minería masiva de Chile, en base a los desafíos geomecánicos.

## **1.3 Alcances**

El estudio se centra en la búsqueda de información bibliográfica de proyectos que han utilizado TBM para el desarrollo de túneles a gran profundidad y en condiciones geológicas y geomecánicas desafiantes. Los modelos predictivos de rendimiento que se utilizan son: CSM, RME, Q TBM.

Con respecto a la operatividad de la TBM a simular, no se considera el desglose de la operación (excavación, mantención, fortificación, cambios de turno), sino que, se selecciona un porcentaje de utilización de la TBM del ciclo total de excavación.

La información geológica y geomecánica con la que se cuenta para este estudio corresponde a la resistencia a la compresión simple, resistencia a la tracción y las litologías del terreno de 3 sondajes que cubren 1.6 km de largo.

## **1.4 Estructura de la memoria**

El presente estudio, se basa en siete capítulos ordenados de manera lógica para cumplir con los objetivos propuestos.

- Capítulo 1: Introducción, objetivos, alcances del estudio.
  
- Capítulo 2: Se construye una base de datos de proyectos que han utilizado TBM en condiciones de roca dura y gran profundidad. En segundo lugar, se estudian los desafíos geomecánicos que deben enfrentar las TBMs durante su excavación. La última parte de este capítulo se enfoca en la revisión de los métodos predictivos de rendimiento para su posterior simulación de acuerdo con el método de Monte Carlo.
  
- Capítulo 3: Se describe detalladamente cada uno de los pasos a seguir y las consideraciones adoptadas para cumplir con los objetivos de la memoria.
  
- Capítulo 4: Se presentan los resultados del estudio, principalmente de la simulación Monte Carlo y los ajustes para zonas de fallas.
  
- Capítulo 5: Los análisis y discusiones del estudio.
  
- Capítulo 6: Como parte final de la memoria se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## 2 ANTECEDENTES

En este capítulo se resume la información necesaria para el sustento de la presente memoria. Se incluye la revisión de proyectos, consideraciones geomecánicas para el uso de TBM en túneles a gran profundidad, discusión acerca del estado del arte de modelos predictivos de rendimiento y finalmente una revisión de desafíos en la construcción de túneles en roca.

### 2.1 Tipos de TBM para roca dura

Las TBMs se pueden dividir según su uso para suelo, roca dura o condiciones mixtas. La Ilustración 2.1 muestra un esquema donde se puede visualizar la diferencia entre cada una de las TBMs, dependiendo de las condiciones del terreno. Este estudio se enfoca en la discusión del uso de TBMs en condiciones de roca dura, donde se analizarán muestras que provienen de yacimientos minerales masivos que se encuentran a gran profundidad.

Las TBMs para roca dura se pueden dividir en abierta (Gripper), escudo simple (Single Shield) y escudo doble (Double Shield). El uso de cada una de ellas depende netamente de las condiciones geológicas y geomecánicas que se presentan en lugar de construcción del túnel.

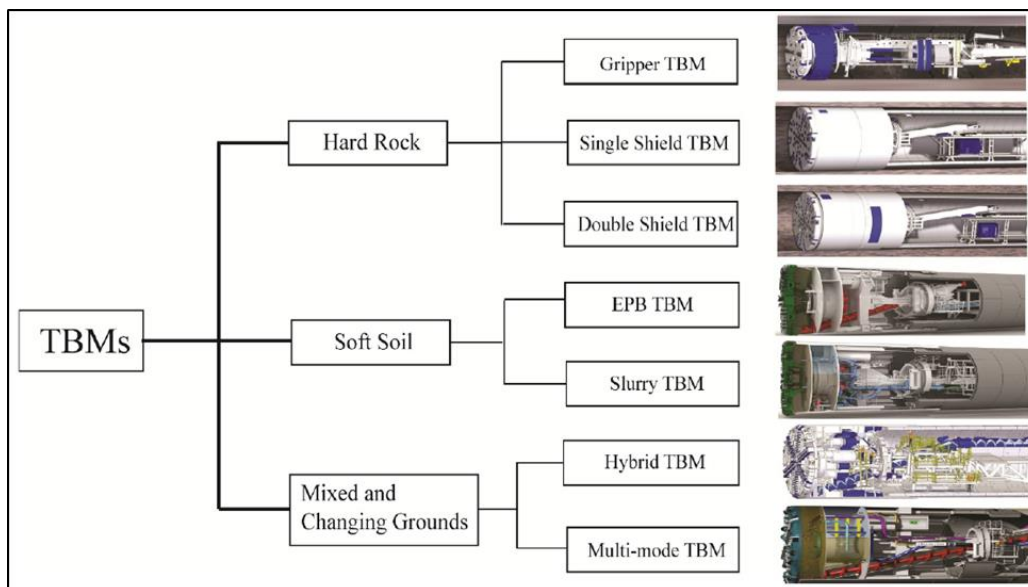


Ilustración 2.1. Clasificación de Máquinas TBM, (Zheng, 2016).

### 2.1.1 Gripper

Diseñadas para terrenos de roca dura y estable, estas máquinas son relativamente simples. La parte delantera de la máquina conforma la cabeza de corte giratoria del diámetro nominal del túnel a excavar. La cabeza de corte aloja los discos cortadores que se sitúan en base a la planificación y retiro de estos. Mientras gira el cabezal, un sistema de cilindros de empuje presiona a los cortadores contra la roca. La transmisión de estos altos empujes a la roca a través de los cortadores hace que esta se fracture, creándose lascas de roca que se desprenden del frente de excavación. El sistema de zapatas laterales se apoya sobre las paredes del túnel y permanecen estacionarios mientras se extienden los cilindros de empuje, lo que permite a la TBM ejercer el empuje sobre la frente.

La máquina puede guiarse de modo continuo, mientras se produce el anclaje a las paredes del túnel que reacciona al empuje de la perforación. Los baldes existentes en el cabezal depositan la marina en una cinta transportadora alojada en la viga principal. La marina es transportada hacia la parte trasera de la máquina para su evacuación del túnel. Al final del ciclo de excavación se extienden las patas de soporte posterior de la tuneladora hasta el suelo y se retraen los cilindros de empuje y las zapatas. La retracción de los cilindros de empuje provoca que las zapatas se sitúen en posición para el siguiente ciclo de excavación; una vez finalizado este paso, las zapatas se apoyan nuevamente sobre el macizo rocoso, se levantan las patas de soporte posterior y la excavación comienza de nuevo.

El diseño de una TBM de tipo abierta permite el acceso rápido a la parte trasera de la cabeza de corte para la instalación de elementos de sostenimiento del terreno (malla, marcos metálicos y hormigón proyectado), lo que hace que esta máquina sea ideal para túneles en donde se espera poco revestimiento. En la Ilustración 2.2 se muestran los componentes de una TBM abierta.



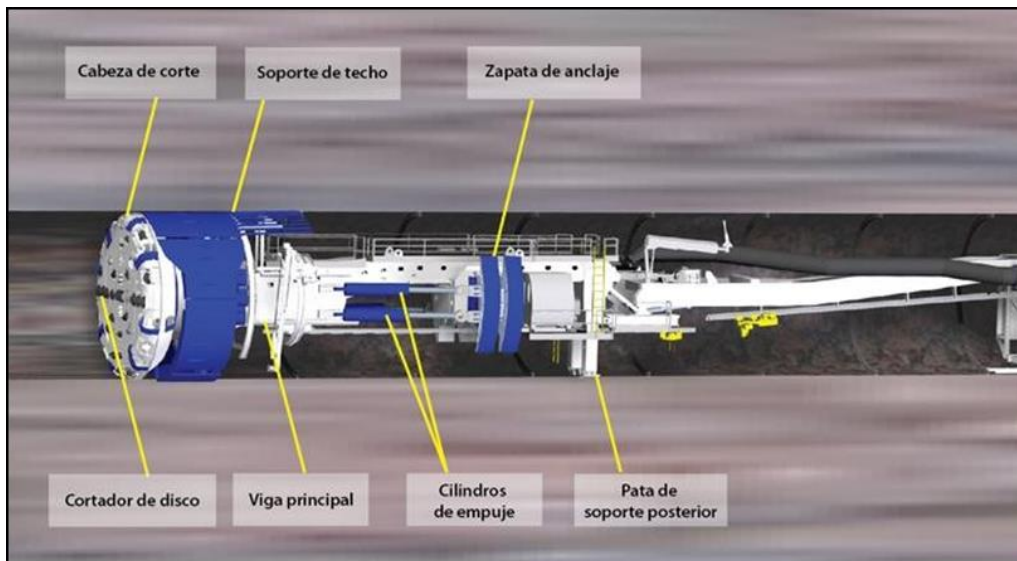


Ilustración 2.2. Esquema TBM Gripper, (Zheng, 2016).

### 2.1.2 Escudo Simple

Están diseñadas para terrenos de roca dura y macizos rocosos fracturados susceptibles de sufrir desprendimientos de cuñas. Su nombre lo recibe de la necesidad de incorporar un escudo cilíndrico protector detrás del cabezal y la posterior instalación de un anillo de hormigón prefabricado para el sostenimiento del túnel y protección de los trabajadores y el equipo. Estas máquinas son utilizadas también en proyectos en donde se requiere una terminación rápida y uniforme (como túneles carreteros y en algunos casos hidráulicos) independiente de si el macizo es masivo o fracturado.

El cuerpo de la máquina está rodeado por un escudo cilíndrico de diámetro ligeramente inferior al de la excavación del túnel. La cabeza de corte plana y sin protuberancias minimiza las perturbaciones en el frente de túnel mientras se excava y evita el desprendimiento de bloques grandes de roca que podrían provocar sobreesfuerzos de perforación. Mientras gira la cabeza un conjunto de cilindros hidráulicos dispuestos en forma de anillo, empujan a la máquina reaccionando contra el último anillo prefabricado instalado.

La transferencia de empuje a través de los discos cortadores genera fracturas en la roca, de la que se desprenden pequeñas lascas. La perforación y el revestimiento del túnel se llevan a cabo de forma secuencial. El guiado de la máquina se consigue orientando la cabeza de corte articulada en la dirección deseada.

En la Ilustración 2.3 se muestran los componentes de la TBM escudo simple.

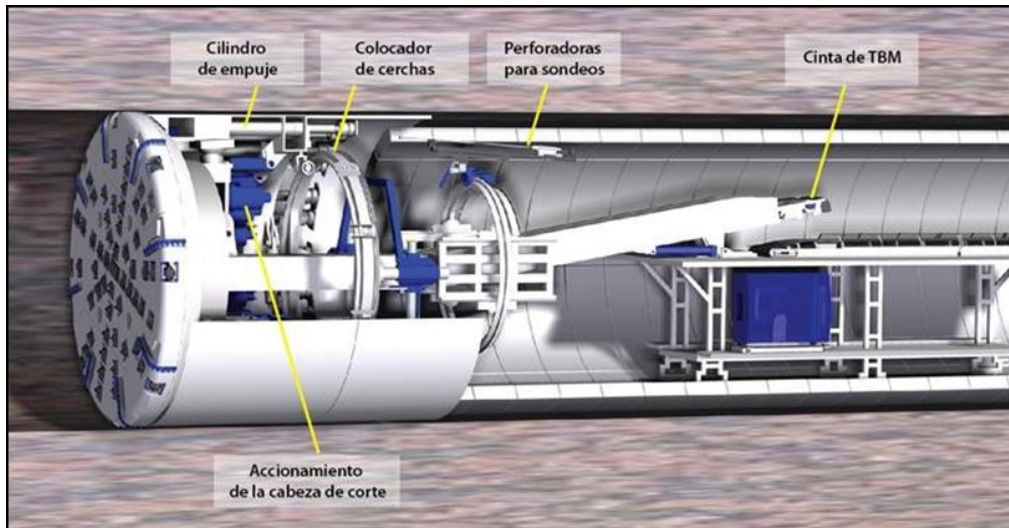


Ilustración 2.3. Esquema TBM Escudo Simple, (Zheng, 2016).

### 2.1.3 Doble Escudo

Las máquinas doble escudo, permiten excavar en roca buena o en macizos de baja calidad. La TBM consiste en dos partes, el escudo delantero equipado con la cabeza de corte y con los cilindros principales de empuje, mientras que en el escudo trasero se encuentran los cilindros auxiliares, los grippers de apoyo y el sistema erector de dovelas. Entre ambos escudos, se desliza un escudo telescópico de menor diámetro, que permite avanzar al escudo delantero manteniendo la máquina cubierta y protegida del terreno durante el avance de excavación.

Cuando la condición del terreno es buena la TBM funciona como un doble escudo (o modo abierto), donde los grippers son los encargados de resistir el empuje del avance y el torque producido por el giro del cabezal. La fijación segura de la parte trasera por parte de los grippers, permite la colocación simultánea de un segmento de anillos en la cola del escudo mientras la excavación se encuentra en progreso. En casos de que la roca sea muy estable, la colocación de revestimiento prefabricado puede ser omitida.

En terrenos inestables, donde los grippers no encuentran la resistencia necesaria para apoyarse en el macizo rocoso, esta TBM funciona como escudo simple. Los grippers se cierran y el empuje necesario para el avance puede ser soportado por el último anillo de dovelas colocado. Los escudos delantero y trasero se retraen y avanzan juntos, empujados por los cilindros de empuje auxiliares apoyados en el

revestimiento. En este caso, no es posible realizar de forma simultánea la excavación y el montaje del anillo de dovelas como revestimiento.

En la Ilustración 2.4 se presenta un esquema con las partes principales de una TBM doble escudo.

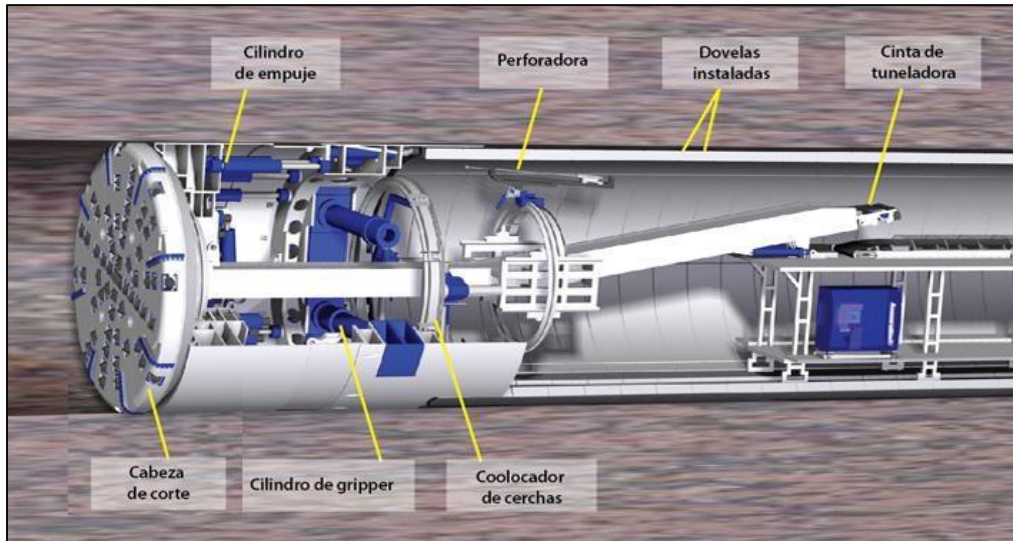


Ilustración 2.4. Esquema TBM Doble Escudo, (Zheng, 2016).

## 2.2 Experiencia de TBM en roca

A partir de la década de los 50 las TBMs han sido utilizadas para distintos propósitos en proyectos mineros (nuevos o de expansión), incluyendo accesos, transporte de mineral, drenaje, exploración y conducción de aguas. Sin embargo, el uso de estas máquinas en minería no es un asunto de fácil discusión, ya que su aplicación está sujeta principalmente al riesgo geológico, geomecánico y a las geometrías exigidas por cada explotación minera particular.

Inicialmente, el uso de TBMs para minería se orientó para la exploración de minerales y construcción de accesos, así como para el desarrollo mina en proyectos de expansión en donde se requería de una excavación rápida, (Zheng, 2016).

El uso de TBMs en proyectos mineros ofrece importantes beneficios relacionados con el programa de construcción, lo cual es una atractiva ventaja económica tomando en consideración las altas tasas de avance en este tipo de excavación (de 10 a 12 m como promedio), especialmente en proyectos en donde el tiempo es crucial para avanzar en los desarrollos subterráneos y asegurar la puesta en marcha de la operación. A continuación, se mencionan algunos proyectos internacionales

(no necesariamente mineros), y especialmente en Chile donde se centra este estudio.

La Ilustración 2.5 muestra una lista de proyectos ejecutados y que utilizaron máquinas TBM en minería.

PROYECTO	UBICACIÓN	AÑO <sup>1</sup>	LONGITUD, KM	DIMENSIÓN, M
Step Rock Iron	Canadá	1957	0,30	2,74
Nchanga	Zambia	1970	3,2	3,65
Oak Grove	EEUU	1977	0,20	7,4
Blyvoor	Sud África	1977	0,30	1,84
Fosdalen	Noruega	1977	670	3,15
Blumenthal	Alemania	1979	10,6	6,5
Westfalen	Alemania	1979	12,7	6,1
Donkin Morien	Canadá	1984	3,6	7,6
Autlan	México	1985	1,8	3,6
Kiena	Canadá	1986	1,4	2,3
Stillwater EB	EEUU	1988-91	6,4	4
Fraser (CUB)	Canadá	1989	1,5	2,1
Rio Blanco	Chile	1992	11,0	5,7
San Manuel	EEUU	1993	10,5	4,6
Cigar Lake	Canadá	1997	> 20	4,5
Port Hedland	Australia	1998	1,3	5,0
Stillwater EB	EEUU	1998-01	11,2	4,6
Mineral Creek	EEUU	2001	4,0	6,0
Amplats	Sud Africa	2001	0,35	2,4
Monte Giglio	Italia	2003	8,5	4,9
Tashan Coal	China	2007		4,9
Ok Tedi	PNG	2008	4,8	5,6
Los Bronces	Chile	2009	8,0	4,2
Stillwater Blitz	EEUU	2012-13	6,8 <sup>2</sup>	5,5
Grosvenor Coal	Australia	2013	1,0 <sup>2</sup>	8,0
Oz Minerals	Australia	2013	11,0 <sup>2</sup>	5,8
Northparkes	Australia	2013	2,0 <sup>2</sup>	5,0
El Teniente	Chile	2014	6,0 <sup>2</sup>	10,0

1. Año de comienzo del proyecto. / 2. Excavación planeada con TBM.

Ilustración 2.5. Utilización de TBM en minería, (D. Brox, G.Piaggio, 2013).

### 2.2.1 Túnel de Base de San Gotardo

El Túnel de base de San Gotardo es un túnel ferroviario que se encuentra bajo los Alpes en Suiza y que conecta Alemania con Italia a través de un túnel ferroviario que disminuye los tiempos de viaje. Su construcción se debe al aumento del tránsito vehicular y ferroviario al cruzar los Alpes en el eje Norte-Sur de Europa. La construcción del túnel genera un medio más rápido de cruzar los Alpes donde trenes de pasajeros pueden circular con una velocidad de hasta 250 km/h. Este túnel corresponde a uno de los más largos y profundos del mundo llegando a medir 57 km de longitud. Está formado por dos túneles paralelos de 9 a 9.5 m de diámetro cuyo pilar entre ellos es de 40 m y que están conectados por galerías transversales cada 325 m.

Para la construcción del túnel se utilizaron 4 TBMs tipo Gripper de la compañía Alemana Herrenknecht. Estas tuneladoras estuvieron a cargo de la construcción de más de 85 km de túneles, entre el año 2003 y año 2011, donde se excavaron más de 13.5 millones de metros cúbicos de roca. La construcción se dividió en 3 etapas de las cuales una es por el Norte (Gabi y modificación de Gabi) y 2 TBMs por el lado Sur (Sissi y Heidi).

Ilustración 2.6 La Ilustración 2.6 muestra el perfil longitudinal del túnel base de San Gotardo junto a las diferentes unidades geológicas.

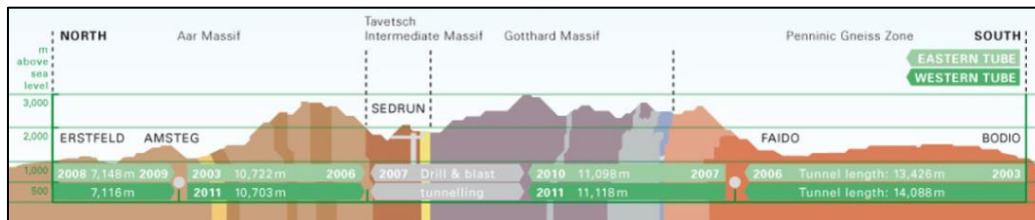


Ilustración 2.6. Tipos de rocas y longitud de los tramos del perfil geológico del túnel de San Gotardo, (Herrenknecht, 2010).

La Ilustración 2.7 muestra las zonas de fallas geológicas que enfrentó la TBM.

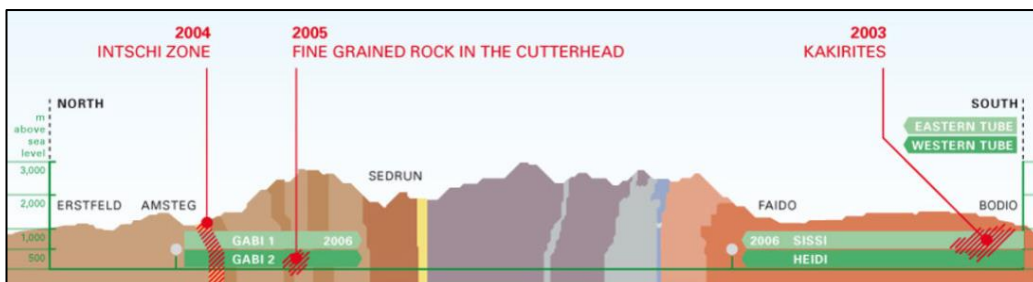


Ilustración 2.7. Fallas geológicas del túnel de San Gotardo, (Herrenknecht, 2010).

Las tuneladoras obtuvieron rendimientos máximos de 560 m/mes a una tasa de penetración de 12 mm/rev, así como también en zonas muy desafiantes lograron sólo 140 m/mes a una tasa de penetración de 3 mm/rev.

## 2.2.2 Hidroeléctrica Jinping II

El proyecto se encuentra ubicado en el río Yalong, en Shichuan en el suroeste de China. Jinping posee un gran complejo subterráneo que tiene una capacidad instalada de 4800 Mw, para producir 24 TWh al año. Este proyecto consiste en la construcción de un túnel de acceso y exploración en conjunto con 4 túneles de alta presión (T1, T2, T3, T4) de los cuales sólo T1 y T3 son excavados con TBM.



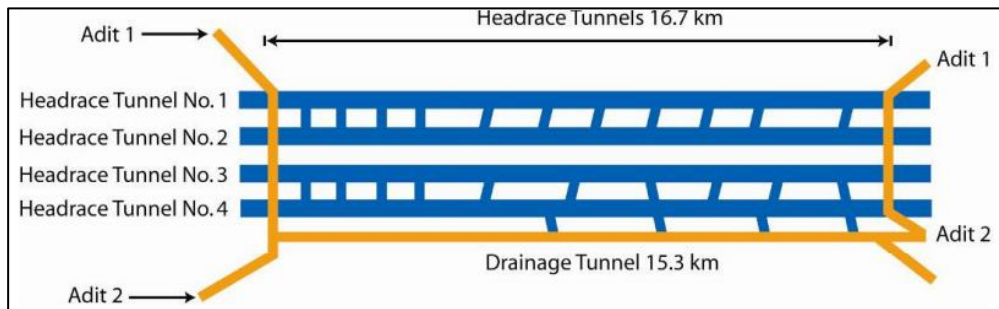
El túnel T1 se excavó con una TBM Robbins del tipo abierta con un diámetro de 12.43 m y para el túnel T3 se utilizó una TBM Herrenknecht con un diámetro de 12.44 m. Los túneles T2 y T4 se construyen a través del método convencional de perforación y tronadura.

La Ilustración 2.8 muestra la distribución de los túneles de la Hidroeléctrica Jinping II.



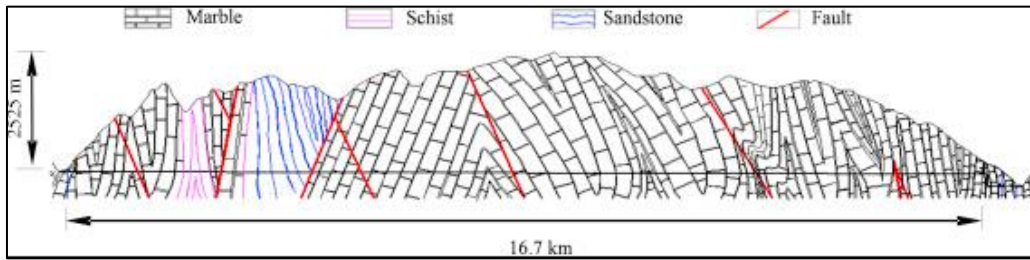
**Ilustración 2.8. Vista Isométrica de los túneles de la Hidroeléctrica Jinping II, (W. Shiyong, X.Feng, L. Ribeiro e Sousa, 2010).**

La Ilustración 2.9 muestra el layout del proyecto Jinping II donde se puede apreciar el trazado y longitud de los túneles.



**Ilustración 2.9. Layout túneles Jinping II, (W. Shiyong, X.Feng, L. Ribeiro e Sousa, 2010).**

La roca se compone principalmente de mármol macizo en bloques con arenisca y esquistos de clorita. La formación rocosa proporciona condiciones relativamente buenas para la excavación. La resistencia a la compresión uniaxial de las muestras de roca saturada varía de 50 a 85 MPa, con un módulo de deformación de aproximadamente 8 a 16 GPa. La Ilustración 2.10 muestra el perfil geológico de los cuatro túneles del proyecto Jinping.



**Ilustración 2.10. Perfil geológico Jinping II, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).**

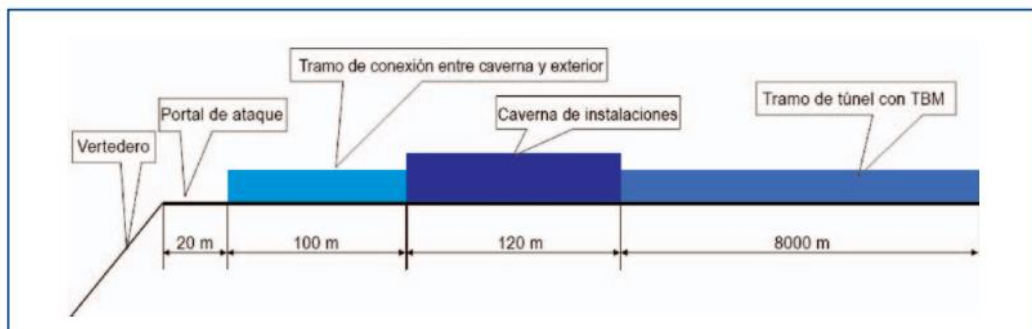
El macizo rocoso circundante tuvo una buena estabilidad después de la excavación del túnel, sin embargo, hay dos problemas que presentaron un gran desafío para la construcción de los 4 túneles. En primer lugar, existió un gran flujo de agua de entrada de alta presión que fluyó hacia el túnel durante el trabajo de la excavación. En segundo lugar, los estallidos de roca ocurrieron como resultado del alto estrés in situ causado por una alta sobrecarga.

### 2.2.3 Túnel de exploración Los Bronces

Este proyecto se encuentra ubicado en la división Los Bronces a 65 km de Santiago a 3500 msnm, en Chile. La construcción del túnel Sur nace en el año 2009 como una iniciativa de la compañía minera Anglo American para explorar un yacimiento de sulfatos.

El túnel tiene una longitud de 8.125 m y se construye desde un portal ubicado a 3068 msnm. La excavación se realiza a través de un solo frente por lo cual el desarrollo de esta obra tiene grandes desafíos tanto geológicos como logísticos.

La Ilustración 2.11 revela la propuesta para el proyecto Túnel de exploración Sur Los Bronces.



**Ilustración 2.11. Perfil del túnel de exploración Los Bronces, (P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles, 2012).**

La tuneladora utilizada para excavar este túnel es del tipo TBM doble escudo híbrida acondicionada para realizar un ciclo de excavación de 1.4 m, con un diámetro de 4.5 m y 90 m de longitud incluyendo el sistema back-up. Las marinas de la excavación fueron llevadas a la superficie por una cinta transportadora, el sistema logístico se realizó a través de una vía férrea montada sobre dovelas de piso de hormigón prefabricado usando locomotoras diésel con sistemas de filtros de contaminantes de alta tecnología. La fortificación del túnel fue compuesta por pernos de anclaje y malla de acero en terreno de buena calidad, mientras que en los sectores con terrenos de mala calidad geomecánica, se utilizaron dovelas metálicas para evitar la caída de roca fracturada.

La Ilustración 2.12 muestra la TBM que se utilizó en la construcción del túnel Sur.



**Ilustración 2.12. TBM Doble Escudo utilizada en la construcción del túnel Los Bronces, (P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles, 2012).**

La TBM doble escudo alcanzó un rendimiento máximo de 35 m/día y 12 m/día como promedio. Es importante señalar que este tipo de TBM permite utilizar la máquina como escudo simple o abierta dependiendo de la condiciones geológicas y geomecánicas que se vayan presentando a medida que se avanza con la excavación.

La Ilustración 2.13 revela las características de la roca que se presentaron durante la construcción de la excavación.



TIPO DE ROCA	Longitud Total (m)	UCS (Mpa)	Densidad (ton/m <sup>3</sup> )	Q <sub>TBM</sub> medio	Q <sub>TBM</sub> más frecuente	CU
Cuarzomonzonita	3150	200	2,75	12,45	35,6	10
Andesita	1700	80-150	2,75 - 2,8	2,14	2,61	55
Pórfido Riodacítico	1300	130-200	2,55 - 2,75	8,66	8,33	10
Brecha Turmalina	1850	75-150	2,55 - 2,75	11,16	17,81	10
Brecha Clorita / Brecha Biotita	100	125	2,75	11,16	12,5	25
Fallas	25 (6 fallas)	25-100	2,6	0,13	0,06	15

**Ilustración 2.13. Caracterización geomecánica del macizo rocoso del túnel Sur de Los Bronces, (P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles, 2012).**

## 2.2.4 Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

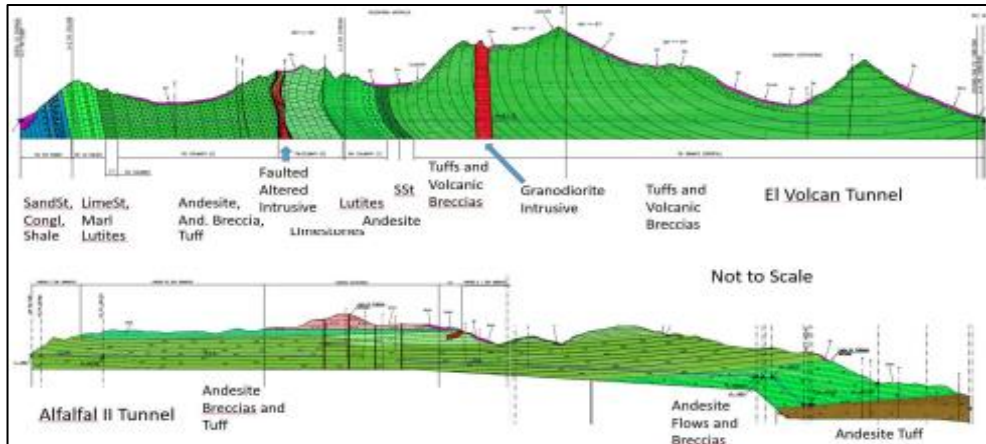
El Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo, ubicado en la región Metropolitana, corresponde a dos centrales hidroeléctricas de paso al interior del Valle del Cajón del Maipo. Constituye un gran desafío en cuanto a construcción subterránea, ya que requiere de la excavación de 75 km de túneles para la captación y descarga de las aguas de los ríos.

Los túneles se excavan mediante dos métodos constructivos, el método convencional de perforación y tronadura en 38,9 km de longitud y mediante tuneladoras los 36,1 km restantes, para los cuales el proyecto Alto Maipo contempla seis TBMs (tres de tipo gripper, dos doble escudo y una escudo simple) de diámetros 4,1; 4,5, 6,9, 5,0, 7,7 y 5,0 metros respectivamente, construidas por Herrenknecht, NFM-Borettec y The Robbins Company.

A modo de ejemplo se puede observar en la Ilustración 2.14 una de las TBMs utilizadas en el proyecto.



**Ilustración 2.14. TBM utilizada en el Proyecto Alto Maipo, (Strabag, s.f.).**



**Ilustración 2.15. Perfil geológico proyecto Alto Maipo (túnel El Volcán y Alfalfal II).**

Geológicamente, en el área del proyecto afloran, fundamentalmente, secuencias estratificadas de rocas volcánicas y sedimentarias continentales y marinas, intruidas por abundantes filones, mantos, lacolitos, diques y stocks (Ver Ilustración 2.15). En base a estas condiciones geológicas y la logística de la operación la TBM alcanzó un rendimiento máximo de 56 m/día y de 12 m/día promedio.

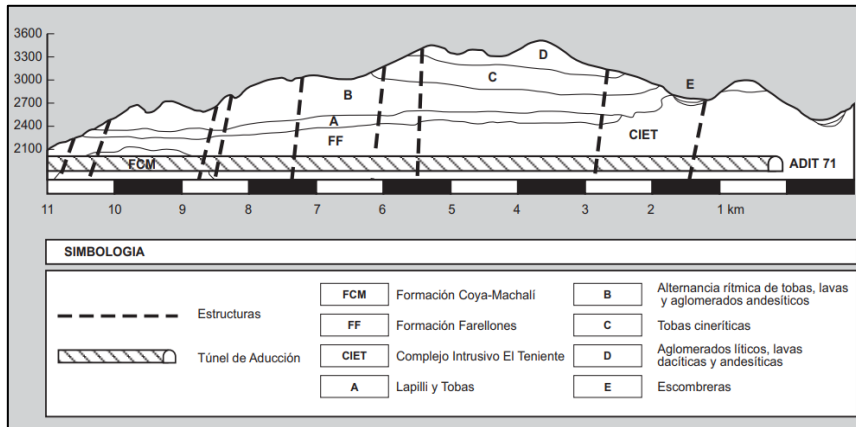
## 2.2.5 Túnel Acueducto Río Blanco, El Teniente

Este proyecto se encuentra ubicado en la Sexta Región, a 120 km al Sur de Santiago. La División El Teniente en el año 1991 decide realizar la construcción de un acueducto para proveer agua a la mina, cuya excavación comienza a través de una caverna.

El túnel tiene un diámetro de 4.6 m y una longitud de 11 km, de los cuales 10 km fueron construidos con una TBM abierta, del fabricante alemán Wirth. A lo largo del trazado del túnel se destacan tres tipos de unidades geológicas. Las formaciones que se encontraron en roca primaria diorita y andesita corresponden a un complejo intrusivo (mayoritariamente dioritas), a la formación Farellones (lavas andesíticas) y aglomerados volcánico clásticos. El perfil del túnel se puede visualizar en la Ilustración 2.16.

A los pocos meses de haber comenzado a operar la TBM, los cortadores debieron ser cambiados por el bajo desempeño de acuerdo con la calidad de la roca que

tenía una resistencia a la compresión simple de 200 MPa. El rendimiento máximo que alcanza la TBM abierta es de 365 m/mes con un promedio de 285 m/mes.



**Ilustración 2.16. Perfil geológico del túnel acueducto Río Blanco, (Budini 1994).**

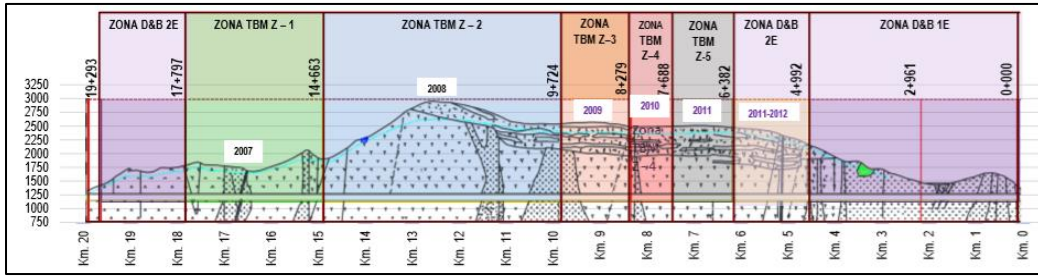
Parte del túnel colapsó, luego de que entrara en operación debido a la absorción de agua de lutitas y tobas rojas que contenían arcillas de la familia de esmectitas.

## 2.2.6 Proyecto Túnel Los Olmos

Este proyecto se encuentra ubicado en la región de Lambayeque al Norte del Perú, a 800 km de la ciudad de Lima. Corresponde a un proyecto multirregional el cual se desarrolla en tres regiones: Nacimiento del Río Huancabamba región de Piura, presa entrada túnel trasandino región de Cajamarca y entrega de las aguas trasvasadas en la región de Lambayeque.

El túnel trasandino tiene 20 km de longitud y 4.8 m de diámetro, de los cuales 12 km aproximadamente fueron construidos con una TBM abierta de la compañía Robbins y para los restantes 8 km se utilizó el método convencional de perforación y tronadura.

La Ilustración 2.17 muestra el perfil del túnel Los Olmos dividido en las zonas que utilizó la TBM.



**Ilustración 2.17. Perfil geológico del túnel Olmos dividido en sus diferentes zonas de construcción, (Winston H. Diaz, 2019).**

La TBM utilizada corresponde a una Gripper debido a las buenas condiciones de la roca y la estabilidad de la frente. El detalle de la TBM se puede visualizar en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Características de la TBM Robbins, (Winston H. Diaz, 2019).**

<b>Principales características</b>			
<b>Longitud</b>	320 m	<b>Torque Máximo</b>	2,800 Knm
<b>Peso</b>	1100 ton	<b>Peso Cabeza de Corte</b>	45 ton
<b>Avance (Boring Stroke)</b>	1.8 m	<b>Cortadores</b>	35 un
<b>Giro Variable del cabezal</b>	0 a 10 rpm	<b>Peso Unitario Cortador</b>	250 kg
<b>Potencia</b>	2,205 Kw	<b>Diámetro Cortador</b>	17 "
<b>Fuerza de Penetración</b>	10,270 Kn	<b>Ventanas</b>	6 un

Durante la construcción del túnel Los Olmos se produjeron algunos problemas como la gran cantidad de estallidos de roca (total de estallidos: 16.100) de los cuales un 49% fue de intensidad baja, un 34% de intensidad media y un 17 % de intensidad alta. Además, se presentaron altos esfuerzos de tensión horizontales paralelos al eje del túnel, lo cual generó una falla frágil en el rumbo del túnel.

En términos generales, la TBM Gripper tuvo un avance promedio de 7.85 m/día, logrando su máximo en la zona 2 en el año 2008 con un avance de 16.18 m/día.

## 2.2.7 San Manuel

La mina San Manuel utilizó el método block caving para explotar su cuerpo mineralizado, donde el mineral se acarrió a superficie con una correa transportadora. El plan de desarrollo de la mina requirió la excavación de 12.800m en 2 niveles (ver Ilustración 2.18). Luego de un largo estudio para el método de construcción de los túneles, se optó como mejor opción el uso de TBM (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001).

La TBM Robbins excavo en un perfil estable de cuarzo monzonita, donde el UCS variaba entre 150 a 180 MPa. Uno de los problemas que se presentó durante la excavación, fue la arcilla que tapó el cabezal de la TBM impidiendo su movimiento normal. Existieron otros problemas que implicaron el cambio de algunos componentes de la TBM permitiendo de esa manera aumentar su rendimiento, llegando a 22 m/día.

En general, esta fue una aplicación exitosa de TBM en minería profunda en roca dura, permitiendo a la mina cumplir con su cronograma acelerado para el desarrollo del nuevo yacimiento.

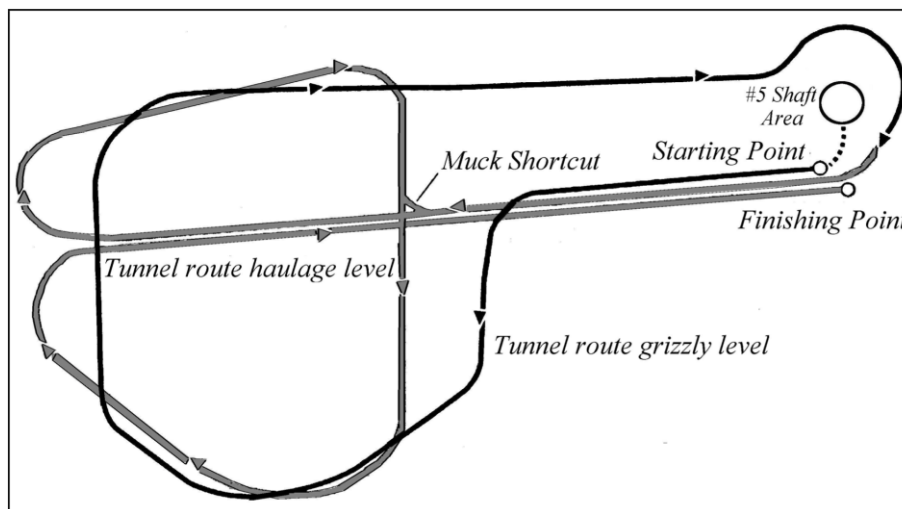


Ilustración 2.18. Ruta que siguió la TBM para la construcción de los túneles de 4.6 m de diámetro en los 2 niveles, (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001).

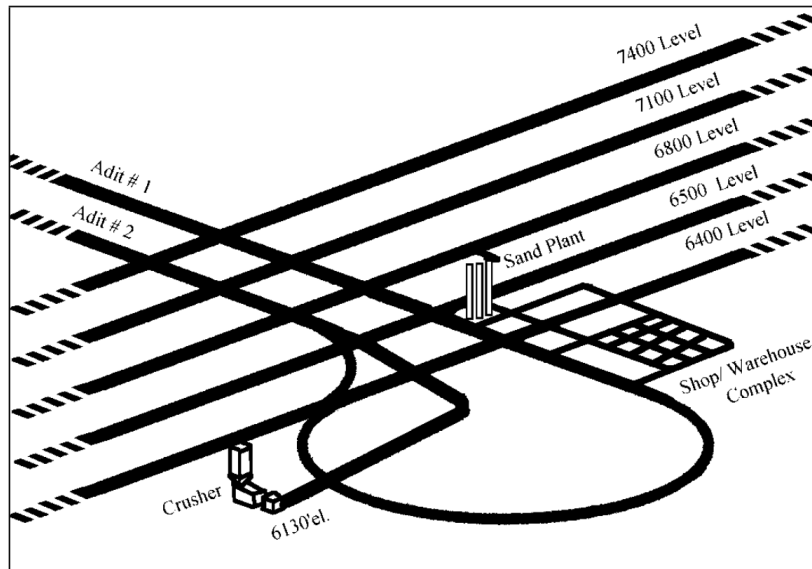
## 2.2.8 StillWater

Stillwater Mining Company (SMC) desarrolló una segunda mina subterránea de paladio y platino a unos 21 km al oeste de su operación actual en Montana. La compañía minera requiere un túnel de 5.650 m para obtener acceso al cuerpo mineralizado (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001).

Debido a sus éxitos anteriores con el uso de TBM, la mina Stillwater decidió utilizar una TBM para todos los desarrollos de la mina (ver Ilustración 2.19). El elemento más esencial en la aceleración del cronograma del proyecto fue establecer un segundo medio de acceso y la ventilación requerida para el desarrollo subterráneo (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001). Se utilizaron 2 TBMs, una

para el Adit 1 y otra para el Adit 2 (la misma TBM que se utilizó en San Manuel con algunas remodelaciones)

El túnel de acceso (Adit 1) de 4.6 m de diámetro se construyó con 0.5% de pendiente con un largo de 5.650 m hasta llegar al mineral, donde mayoritariamente el UCS de la roca variaba entre 60 y 190 MPa. En base a estas condiciones la TBM alcanzó un rendimiento promedio de 13 m/día.



**Ilustración 2.19.** Layout de los túneles que fueron construidos por las 2 TBMs, (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001).

### 2.2.9 Caso El Teniente

Dos túneles de acceso fueron planificados de 10 km de largo cada uno para proporcionar acceso a una nueva área de trabajo de la mina. El desarrollo de esta nueva construcción es fundamental para la operación futura de las labores de esta mina (D. Ofiara, G. Watson, 2016). Uno de los túneles tiene como finalidad el tráfico de buses que se utilizaría para llevar la fuerza laboral a la mina y el otro para la correa transportadora principal que transportaría el mineral hacia afuera de la mina.

El perfil de los túneles muestra que se encuentran en diversas condiciones de roca y profundidad (hasta 1500 metros bajo superficie). Los contratistas podrían licitar la excavación del túnel mediante perforación y tronadura o TBM. El contratista eligió usar el método convencional de perforación y tronadura, ya que este método

puede realizar la excavación desde varias frentes simultáneamente y se pensó que permitiría una excavación más versátil y menos riesgosa.

Debido a la alta profundidad y altos esfuerzos, se produjeron muchos estallidos de roca. Como las labores se convirtieron muy lentas, el contratista pidió a Robbins realizar un estudio para el uso de TBM para completar la construcción de los túneles (D. Ofiara, G. Watson, 2016).

Existen grandes riesgos para utilizar una TBM en esas condiciones, pero con un soporte especial (sistema McNally) sí se puede llevar a cabo, tal como el túnel Los Olmos que se construyó en condiciones similares.

La TBM podría desplegarse rápidamente a través de los túneles construidos con perforación y tronadura existentes. La TBM ofrecía altas tasas de avance y seguridad en las condiciones que se presentaban, sin embargo, el avance de los túneles se encontraba a la mitad cuando comenzó el estudio de la posibilidad de usar TBM.

En retrospectiva, si se hubiera considerado desde las primeras etapas de planificación, el programa general de tunelización probablemente mejoraría significativamente.

### **2.2.10 Resumen de proyectos**

Finalmente, después de realizar el estudio de cada uno de los proyectos más relevantes con TBM en roca dura y gran profundidad, se realiza una comparación entre parámetros considerados relevantes como resultado de cada tipo de excavación.

La Tabla 2.2 muestra cada uno de los proyectos analizados con los parámetros estudiados. Se puede desprender que el Túnel de Base de San Gotardo, es el túnel más largo construido y que se encuentra a mayor profundidad, teniendo resultados muy positivos y demostrando de esa manera que la TBM es una excelente tecnología que permite realizar excavaciones en condiciones desafiantes.

**Tabla 2.2. Tabla comparativa de los proyectos estudiados que utilizan TBM para la excavación de túneles, elaboración propia.**

Parámetro	El Teniente	San Manuel	StillWater	San Gotardo	Los Olmos	Jinping II	Los Bronces	Alto Maipo
Ø túnel [m]	4.6	4.62	4.6, 5.5	9-9.5	4.8	12.43, 12.44	4.5	4.1, 4.5, 6.9, 5,0, 7,7
Largo perforado [Km]	10	12.8	5.6	57	12	16	8	40
UCS [MPa]	200	150-180	60-190	90-200	50-225	50-120	75-200	70-180
Profundidad [m]	1200	2500	1800	3000	2000	2500	1000	800
Tipo de TBM	Gripper	Gripper	Gripper	Gripper	Gripper	Gripper	D. Escudo	Gripper, SS, DS
Rend. máx [m/día]	12	44	30	18	16	30	35	30
Rend.prom [m/día]	9.5	22	13	10	7.85	10	12	12

## 2.3 Variables críticas del uso de TBM en minería masiva de Chile

Chile se destaca por ser uno de los mayores productores de cobre en el mundo y a la misma vez por tener minas subterráneas de gran tamaño. Debido a que proyectos actuales han agotado sus minerales en superficie, están yendo en búsqueda de nuevos recursos minerales que se encuentran a mayor profundidad, lo cual implica pasar de una minería en superficie a subterránea.

Generalmente los túneles que se construyen en minería no son tan largos o se desarrollan en fases más cortas, con diferentes frentes de excavación. La TBM y sus componentes son grandes y pesados. No es fácil movilizar una TBM bajo tierra, se deben hacer mejores esfuerzos para hacer práctico el transporte y la movilización de la TBM dentro de la mina. Esto incluye consideraciones para caminos con rampas empinadas y otras secciones transversales restringidas dentro de la mina.

Las TBMs son altamente productivas, pero requieren mucha energía (6-8 MW), ventilación, refrigeración y servicios de soporte. Estos deben ser parte del plan minero para que la TBM tenga el sustento necesario y pueda proporcionar el beneficio completo. El personal operativo con las habilidades adecuadas también es esencial, si se introduce una TBM en un entorno minero, el personal de la mina



necesita capacitación o motivación adecuada para la TBM. Todo el sistema minero debe adecuarse a las exigencias de la TBM, por ejemplo, transporte de material, movimiento de una frente a otra y tasa de avance.

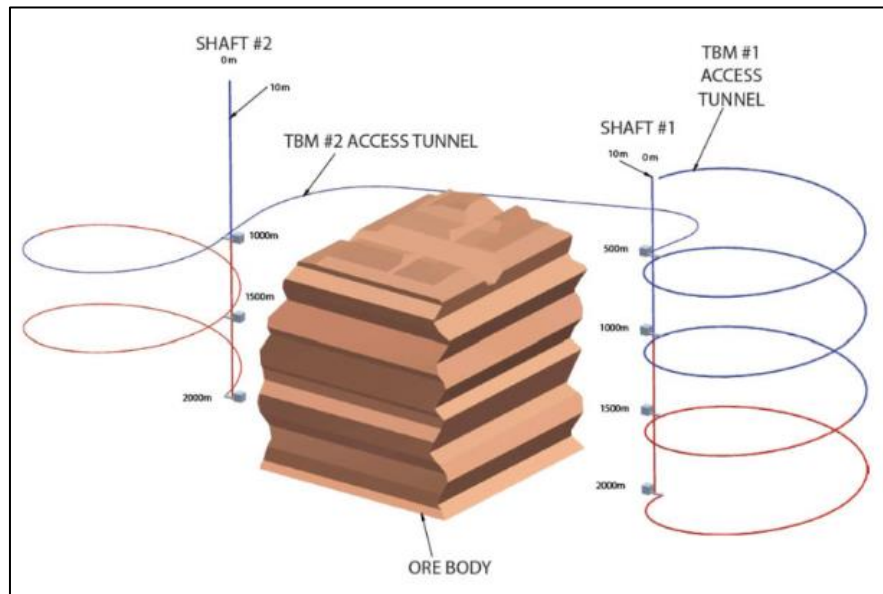
Los planificadores de minas y los diseñadores de equipos TBM, deben trabajar juntos en una etapa temprana de planificación de la mina, para determinar el compromiso óptimo entre el plan de la mina más deseable y la aplicación más beneficiosa del equipo TBM. Es necesario un buen enfoque de asociación en la etapa de planificación, así como en la etapa de operación, para permitir la aplicación más eficiente del equipo TBM a las necesidades de la mina, (Ofiara, 2017).

Los túneles tipo galería y rampas siguen típicamente una sección de arco medio punto (tipo D) y los accesos o nivel transporte principal generalmente están diseñados con forma de herradura. Las minas a menudo no aceptan el perfil circular creado por la TBM, esto puede no ser adecuado para ciertas aplicaciones de minería en particular para drifts de transporte, pero hay opciones disponibles para resolver este problema. Una alternativa es utilizar la marina generada por la excavación de la TBM, para rellenar detrás de la máquina y de esa manera proporcionar un suelo plano.

Otra opción es montar un conjunto de anillos cortadores en los lados de la TBM, para producir una entrada en forma de herradura, (M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir, 2001).

Los planes de minería a menudo tienen túneles con pendientes pronunciadas y curvas con radio de curvaturas pequeños. En pendientes pronunciadas (hasta 12-15 grados), el transporte más eficiente suele ser por correa transportadora, sin embargo, el sistema de correa no es efectivo si hay radios de giro pequeños, ya que la curvatura de la TBM es limitada. En consecuencia, se pueden hacer diseños especiales de TBM que permitan la excavación en curvas cerradas (ver Ilustración 2.20).

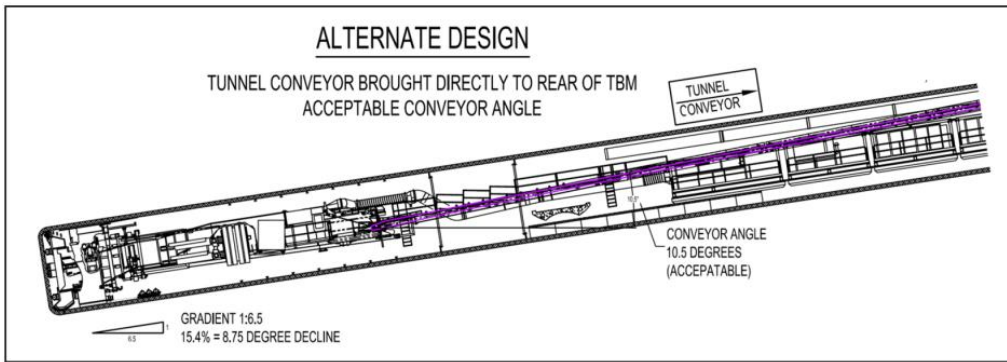
La mayoría de las TBMs que se usan en minería necesitan de una correa transportadora para sacar el material excavado, hasta un 15 % de pendiente como máximo, para disminuir el riesgo. Se pueden considerar sistemas con rieles, pero para una TBM con gran capacidad de avance, se requiere utilizar un sistema continuo para mover el material (ver Ilustración 2.21).



**Ilustración 2.20. Ejemplo de cómo se puede acceder a un yacimiento masivo a través de túneles construidos con TBM, (Ofiara, 2017).**

A menudo, los túneles de acceso a la mina se realizan de manera convencional, como caminos de rampa en espiral o rampas en zig-zag para llegar al mineral. Estos túneles casi siempre tienen radios de curvatura pequeños, por lo cual es necesario planificar túneles con curvas especiales para TBM. Los sistemas de transporte continuo para remover el material excavado de la TBM se han desarrollado altamente y pueden superar radios de curvaturas inferiores, sin embargo, estos sistemas de correa transportadora consumen mucha energía, ya que los rodillos que guían la correa causan cierta resistencia en los bordes de la correa cuando pasan por una curva.

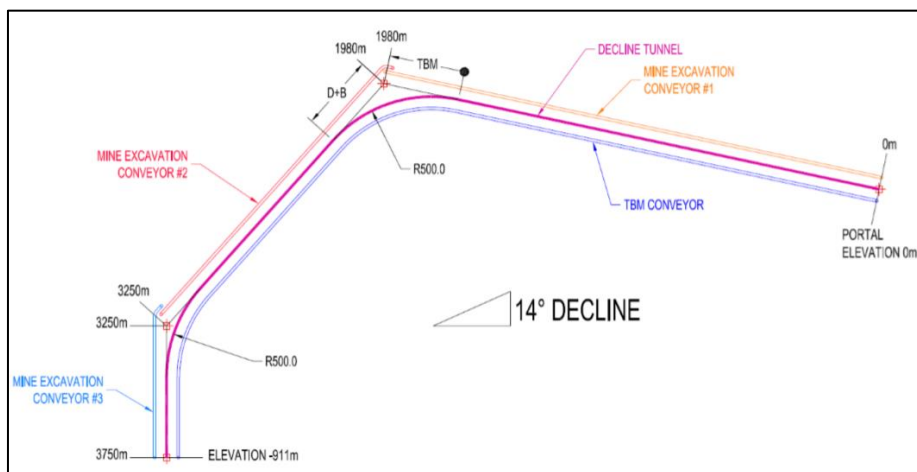
Los túneles con una combinación de gradiente empinado y curvas cerradas son un desafío para el sistema de acarreo continuo. Transportar el material cuesta arriba y arrastrar el rodillo consume mucha energía. Sin embargo, para los sistemas de transporte de alta potencia, se prefiere la correa de cable de acero, ya que este tipo de correas pueden usarse con tensiones y potencia mucho más altas. Existe una desventaja, al ser una correa más rígida es más difícil de maniobrar en las curvas.



**Ilustración 2.21. Alternativa de sistema de correa que se utilizará para transportar el material excavado con una pendiente de 15.4% en Oz Minerals, para una mina de cobre y oro que se encuentra a 1500 m de profundidad en el Sur de Australia (R. Gratias, C. Allan, D. Willis, 2016).**

El plano del túnel que se muestra a continuación (ver Ilustración 2.22) se diseñó con pendientes pronunciadas y cambios direccionales bruscos en las curvas. Esto podría ser posible si se usa la excavación convencional, pero no es práctico para una TBM con el sistema de correa transportadora.

Generalmente el tiempo de uso de la correa transportadora no es tan grande como la correa de producción, la cual transportará el mineral durante toda la vida de la mina. Por lo tanto, es importante planificar los radios de giro más generosos pensando en el futuro para el uso de la correa de producción. Otra opción de diseño es pensar en la combinación entre excavación con TBM y la metodología convencional para radios de curvaturas pequeños. En este caso la excavación del túnel se realizaría con un sistema de transporte de marina curvo, pero el sistema de transporte principal para el mineral sería con una correa recta, con puntos de transferencias en las curvas cerradas (D. Ofiara, G. Watson, 2016).

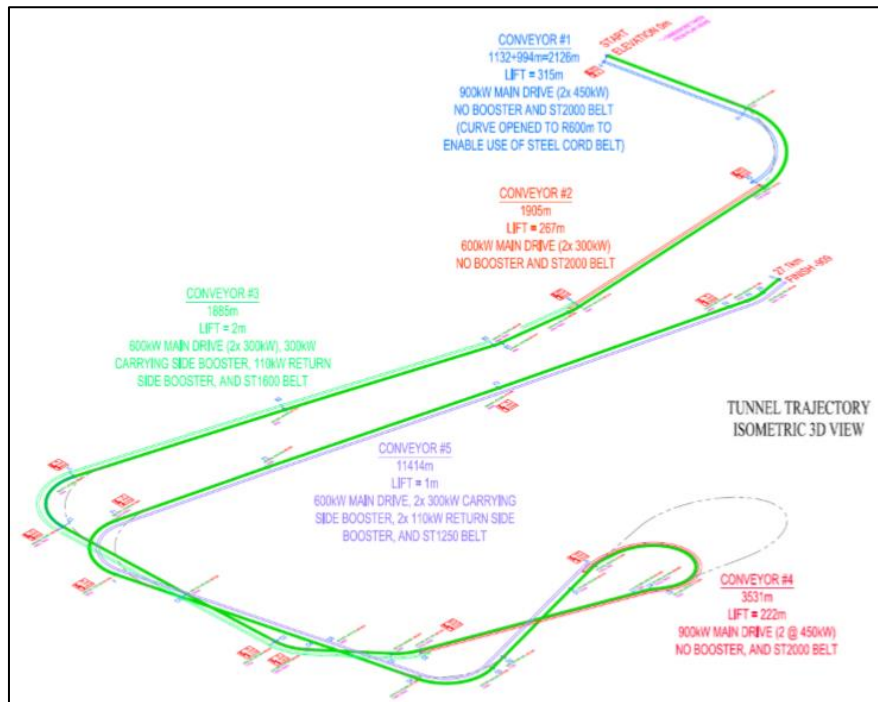


**Ilustración 2.22. Ejemplo de un trazado con curvas adaptado para la construcción con TBM, (D. Ofiara, G. Watson, 2016).**

Las correas transportadoras tienen un rol muy relevante en la producción de la mina, algunas correas pueden llegar a tener anchos de 2 a 2.5 m. Es importante considerar este sistema de transporte, ya que para minas subterráneas de gran tamaño que utilizan métodos block panel caving, requieren de un sistema de transporte de alta capacidad, que pueda alimentar la planta sin inconvenientes en términos de continuidad y seguridad. La minería es un negocio que requiere mucho tiempo y altas inversiones, eso implica cumplir con los plazos de construcción, para poder desarrollar el proyecto a tiempo y de esa manera llegar al mineral de forma más rápida.

Es tentador instalar de forma inmediata el sistema de transporte principal de mineral cuando se construye el túnel con TBM, pero esto depende del diseño original que se ha considerado para la construcción del túnel (diámetro del túnel), es decir, si las dimensiones del túnel a construir son aptas para el tamaño de la correa principal, entonces se debe construir una estación de transferencia entre la correa de la TBM y la correa principal del túnel. Esta estación debe ser móvil, ya que la TBM avanza.

Una mina de metales preciosos que se encuentra en operación está considerando construir un túnel muy largo para proporcionar acceso a cuatro cuerpos minerales diferentes. El túnel ha sido diseñado con una entrada de portal cerca de la infraestructura de superficie existente de la mina. La trayectoria del túnel tiene una pendiente de 15% para llegar al nivel de transporte existente en la mina (ver Ilustración 2.23).



**Ilustración 2.23. Trayectoria del túnel a construir, (D. Ofiara, G. Watson, 2016).**

La trayectoria ha sido diseñada con varias curvas para colocar el túnel en la mejor proximidad a los cuerpos minerales y la infraestructura minera existente. La longitud total del túnel es de 27 km y la profundidad máxima alcanza los 920 m.

Dado que la trayectoria del túnel tiene pendientes pronunciadas y curvas significativas, la TBM debe retraerse varias veces para realizar intersecciones "Wye" (ó unión triangular) y recuperar la TBM al final del túnel.

El diseño de la curva se incrementó de un radio de 400 a 600 m para permitir el uso de una correa de mayor resistencia a la tracción. Incluso con la correa de alta tensión, se necesitarían cinco tramos separados de correas para proporcionar el transporte de los 27 km completos del túnel. Este sistema de transporte está diseñado para ser instalado dentro de los límites del túnel, con un corte mínimo para proporcionar espacio de paso para los vehículos de la mina. Las unidades de refuerzo son modulares y se pueden montar rápidamente (D. Ofiara, G. Watson, 2016). La potencia total del sistema de transporte es de aproximadamente 3900 kW. En la actualidad, la mina está terminando las evaluaciones finales de diseño y los estudios económicos.

## **2.4 Consideraciones geomecánicas para la construcción de túneles con TBM en roca dura y grandes profundidades.**

Desde la década de 1990 se ha logrado un mejor desempeño de las TBMs tanto en roca como en suelo. Dos de las aplicaciones más notables que fueron construidas en esa época son: StillWater PGM y San Manuel Copper Mine, ambas de Estados Unidos, donde se construyeron más de 10 y 12 km de túneles respectivamente (Cigla et al., 2001).

Los principales desafíos para la TBM incluyen terrenos débiles y con muchas discontinuidades, macizos rocosos blocosos, estallidos de roca, drenaje de agua y altos esfuerzos. A continuación, se realizará una revisión bibliográfica detallada de cada uno de los desafíos mencionados con anterioridad.

### **2.4.1 Terrenos débiles**

Los terrenos débiles hacen referencia a rocas del tipo areniscas, lutitas, limonitas, margas, tobas y aglomerados, así como también a rocas erosionadas (hidrotermales y químicas). Estos tipos de terrenos pueden ser formados por unión de discontinuidades y zonas de corte o fallas presentes en el macizo rocoso (Klein, 2001). La Sociedad de Mecánica de Rocas define rocas extremadamente débiles a débiles cuando la resistencia a la compresión simple varía entre 0.25 a 25 MPa.

Las inestabilidades de las frentes de excavación como los colapsos o derrumbes se producen debido a la baja resistencia del macizo rocoso y a la alta deformación de la roca débil. También existe una excesiva sobreexcavación del contorno del túnel (producto de la pérdida de agarre y posición de la TBM), posible atasco del cabezal y escudo de la TBM en terrenos que están sometidos a una alta compresión (Squeezing). Los grandes flujos de agua son uno de los problemas más comunes en terrenos débiles, (Ramoni, 2010), (Schubert, 2006) y (Zheng Y. G., 2014).

La perforación de sondajes de exploración durante el avance y el acondicionamiento del terreno, así como la instalación efectiva del soporte juegan un rol relevante en terrenos débiles y de alta compresión. Home (2009) recomienda realizar una perforación de exploración avanzada cada 30 a 40 metros de avance sobre la frente con una superposición de 10 m en una base de 360°. Una vez que se obtiene la información geológica/geomecánica, se puede llevar a cabo el acondicionamiento del terreno por drenaje, para reducir el nivel y presión de agua subterránea o por inyección de lechada (grouting) para consolidar el terreno,

aumentando la cohesión y rigidez, de esa manera se reduce la permeabilidad y deformación del terreno.

El soporte de la roca incluido el hormigón proyectado cerca del cabezal, la colocación de pernos, la malla de acero, revestimiento y el sistema McNally (uso exclusivo para máquinas Robbins) deben ser instalados en el menor tiempo posible (Home & Askilsrud, 2011).

## **2.4.2 Terrenos sometidos a altos esfuerzos**

Considerando la génesis del mineral especialmente para depósitos intrusivos y la profundidad de los yacimientos, existen altos esfuerzos in situ y alrededor del yacimiento que se encuentra a gran profundidad. Generalmente el esfuerzo vertical aumenta con la profundidad y el esfuerzo horizontal aumenta con el movimiento de las placas tectónicas (Larsson, 2004).

La excavación de un túnel rompe el estado de equilibrio de esfuerzos del terreno y genera su redistribución. En rocas duras competentes, la redistribución de los esfuerzos posiblemente genere estallidos de rocas, desprendimientos, deslizamientos en la frente y paredes del túnel.

El macizo rocoso sometido a altos esfuerzos (para rocas frágiles y duras), se puede clasificar en tres categorías en función de los modos de falla del macizo rocoso circundante (Q. Gong., L. Yin., H. Ma., J. Zhao., 2016):-

1. Macizo rocoso sometido a esfuerzos sin ocurrencia de falla durante la excavación.
2. Macizo rocoso sometido a esfuerzos con ocurrencia de falla durante la excavación.
3. Macizo rocoso sometido a esfuerzos con ocurrencia de estallidos de roca durante la excavación.

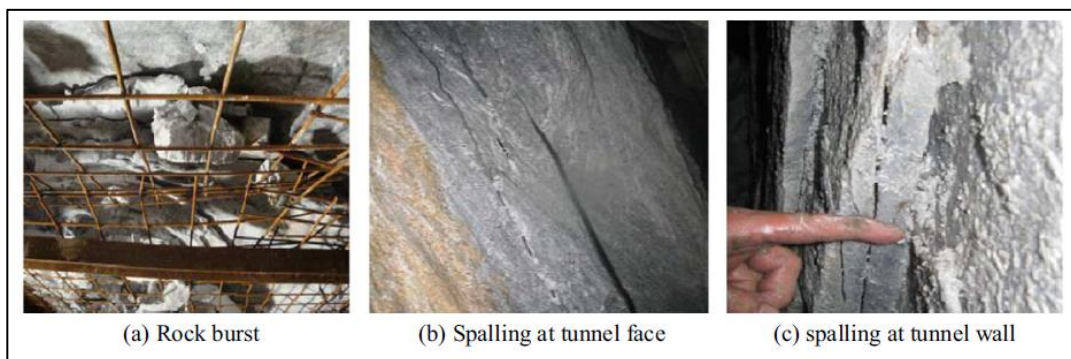
Para la categoría 1 el esfuerzo in situ simplemente aumenta el confinamiento. Con el incremento de los esfuerzos in situ, se restringe la fragmentación de la roca por los cortadores de la TBM y se necesita una mayor fuerza de empuje para romper el macizo rocoso de forma efectiva. En consecuencia, la tasa de penetración de una TBM disminuye al aumentar el esfuerzo in situ.

En el caso de la categoría 2, el desprendimiento inducido por el esfuerzo generalmente produce una gran cantidad de fracturas y discontinuidades adicionales delante de la cara del túnel. Se facilita la fragmentación del macizo rocoso por los cortadores de la TBM. El índice de perforabilidad del macizo rocoso disminuye, y la tasa de penetración de la TBM aumenta con el aumento del esfuerzo in situ.

Para la categoría 3 la influencia de los estallidos de roca en la excavación de la TBM es compleja, ya que afecta principalmente la tasa de avance de la TBM debido al desgaste anormal del cortador, la extracción de marina y los problemas de agarre. Por lo tanto, bajo esta condición de esfuerzos, se deben tomar medidas especiales para evitar la influencia de los estallidos de rocas en el túnel. Debido al frecuente y prolongado tiempo de inactividad causado por la extracción de marina y el daño al cabezal de corte, la tasa de avance se ve afectada bajo la categoría 3.

La excavación de túneles a menudo altera la condición de esfuerzos de un estado estable a uno adverso. Una vez que el esfuerzo inducido por la excavación es lo suficientemente alto, se genera una falla inducida por estos esfuerzos.

Durante la excavación del túnel en macizos rocosos sometido a altos esfuerzos, generalmente se encuentran los siguientes dos modos de falla: el estallido de roca y el desprendimiento no violento o planchoneos (Diederichs, 2007; Gong et al., 2012; Kaiser, 2006). A partir de experiencias de terreno, los dos modos de falla inducidos se han observado tanto en la cara del túnel como en la pared, tal como se aprecia en la Ilustración 2.24.



**Ilustración 2.24. Modos de fallas inducidos por esfuerzos, (Gong et al, 2012).**

Para el macizo rocoso con alto nivel de esfuerzos en la cara del túnel, las fallas inducidas por la tensión con o sin debilidades inherentes (foliaciones o joints) pueden causar degradación e inestabilidad de la cara del túnel. Los conjuntos de discontinuidades preexistentes pueden mejorar el proceso de degradación de la cara del túnel antes que los genere el cabezal de corte de la TBM.



Ortepp & Stacey (1994) dividieron el estallido de rocas en cinco tipos. Estallidos por deformación, pandeo, estallido de pilar, aplastamiento de la cara, ruptura por cizalle o falla. De los cinco tipos el más común encontrado en la construcción de túneles con TBM en altos esfuerzos corresponde al estallido de roca por deformación.

La Ilustración 2.25 revela un estallido de roca en la central Hidroeléctrica Jinping II en China, lo cual puede explicarse por el mecanismo de estallido (Home, 2009).



**Ilustración 2.25. Estallido de roca en el proyecto Jinping II, (Zheng, 2016).**

La liberación repentina de energía puede afectar en gran medida la instalación del soporte del túnel y la integridad estructural del túnel, así como también, dañar el cabezal de corte y la cinta transportadora. Se presentan dificultades para el agarre de la TBM y existen riesgos para los trabajadores (Gong, Q., M. Yin, L., J., Wu, S.Y., Zhao, J., Ting, Y., 2012).

Basado en los proyectos anteriores, que fueron construidos con TBM en macizos rocosos sometidos a altos esfuerzos, los principales problemas se pueden resumir de la siguiente manera (Blindheim, 1982, Myrvang y Johansen, 1995, Kjøgedal, 1981, Wu, 2010):

- Baja eficiencia de corte y alto consumo de los cortadores, debido a malas condiciones del terreno.
- Desgaste del cortador extremadamente alto, inducido por la inestabilidad de la cara del túnel y los bloques de roca en la frente del túnel.

- Daño a los cortadores de la máquina y bloqueo del cabezal inducido por estallidos de rocas.
- Dificultad de remoción de marina y daños en la cinta transportadora, causados por bloques irregulares formados por fallas inducidas, debido al esfuerzo de la cara o pared del túnel.

El estallido se puede mitigar mediante la adopción de un control cauteloso y medidas de mitigación apropiadas, como el monitoreo de las actividades micro sísmicas y la deformación del túnel. Los túneles piloto de perforación y tronadura pueden construirse para aliviar el alto esfuerzo in situ. Esto se ha demostrado como una medida muy efectiva en la central hidroeléctrica Jinping II (Wang et al., 2012).

Las soluciones para los problemas encontrados durante la construcción de túneles con TBM en macizos rocosos sometidos a altos esfuerzos, también se pueden resumir en tres aspectos: selección correcta de la TBM, modificación de las condiciones de terreno y optimización de la operación

Con respecto al acondicionamiento del terreno especialmente en macizos rocosos propensos a estallidos de roca es muy importante mantener la roca en su lugar, para controlar y limitar al máximo la perturbación del macizo rocoso (Home, 2009).

Existen algunas medidas efectivas para liberar los esfuerzos acumulados en el macizo rocoso, como perforaciones previas o túneles pilotos. También dependiendo el caso se hace necesario el requerimiento de malla de acero con pernos, anclajes en roca, marcos de acero, anillos metálicos o combinaciones de todo lo anterior.

### **2.4.3 Terrenos blocosos y fracturados**

Los terrenos blocosos y fracturados hacen referencia a macizos rocosos donde se generan grandes desprendimientos de rocas o eyecciones de la roca, desde la frente del túnel o paredes laterales como resultado de un efecto único o combinado de daño inducido por inestabilidad estructural (Delisio et al., 2013; Einstein, 2006).

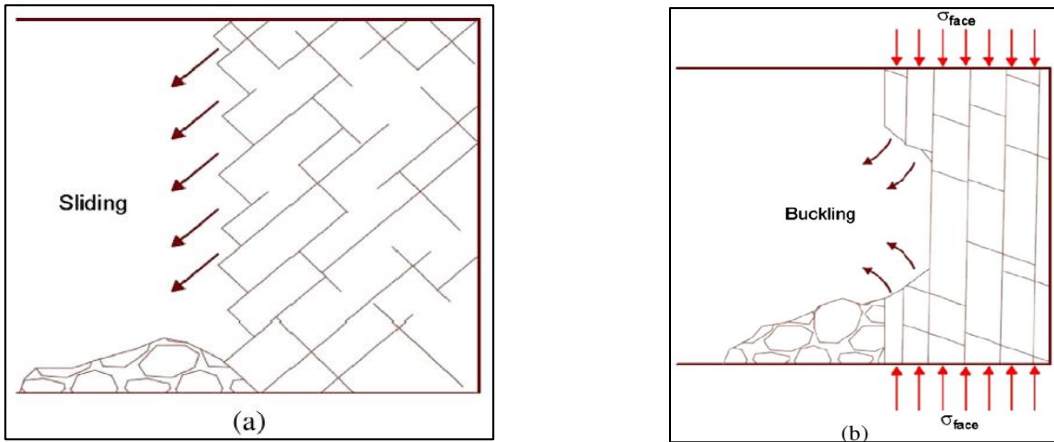
Delisio y col. (2013) estudiaron los mecanismos de inestabilidad de la frente del túnel, los cuales se muestran en la Ilustración 2.26. Dependiendo de la estructura presente en el macizo rocoso y el campo de esfuerzos se pueden generar deslizamientos de bloques a lo largo de discontinuidades o pandeo de losas producidas por discontinuidades sub-verticales paralelas a la frente del túnel.

Los macizos rocosos que se encuentran fracturados pueden clasificarse mediante una serie de índices, que incluyen RQD, GSI, espaciamiento entre fracturas, tamaño de bloque y recuento volumétrico de fracturas. Este tipo de macizos rocosos pueden clasificarse en tres tipos:|

1. Macizo rocoso blocoso, representando por la irregularidad de la frente del túnel, debido a las estructuras blocosas.
2. Macizo rocoso altamente fracturado, representado por un alto grado de fracturas y estrecho espaciamiento entre fracturas.
3. Zonas de falla y corte, a menudo representada por un estrato altamente desintegrado debido al corte. Estas zonas generalmente se asocian con materiales sueltos, blandos y aguas subterráneas.

Los problemas de la excavación de un túnel con TBM en macizos rocosos blocosos, altamente fracturados y con fallas pueden ser analizados desde tres puntos de vista: la frente del túnel, pared del túnel y entrada de agua. Cuando el macizo se encuentra altamente fracturado y contiene estructuras desfavorables se puede generar una frente de túnel blocosa tal como se muestra en la Ilustración 2.27.

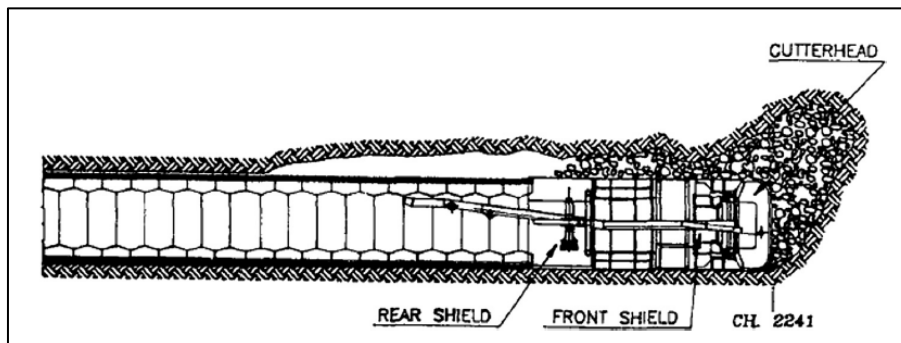
Durante la excavación pueden colapsar bloques de roca en la frente del túnel lo que resulta en daños a los cortadores y cabezal de corte, así como también atrapamientos del cabezal (Barton, 2000; Barla y Pelizza, 2000; Farrokh y Rostami, 2009).



**Ilustración 2.26. Frente blocosa frente a los deslizamientos de la roca, (Zheng, 2016).**

Los efectos negativos de una frente de túnel blocosa se pueden enumerar de la siguiente manera (Delisio, A., Zhao, J., Einstein, HH., 2013).

1. Grandes variaciones en la fuerza aplicada por los cortadores e impactos dinámicos con daño, debido a la forma irregular de la frente del túnel, conduciendo a un desgaste del cabezal y de los cortadores.
2. Las vibraciones frecuentes del cabezal de corte pueden agravar la inestabilidad de la cara del túnel.
3. Desgaste excesivo del sistema de extracción de material debido al tamaño y forma de los bloques de roca.



**Ilustración 2.27. TBM doble escudo avanzando en una frente blocosa, (Q. Gong, L. Yin, H. MA, J. Zhao, 2016).**

Los problemas y desafíos típicos de las TBM en zonas de fallas y cizalle son (Barton, 2000; Barla y Pelizza, 2000; Paltrinieri et al., 2016):

- Inestabilidad de la frente de la excavación, particularmente materiales sueltos en las zonas de fallas y cizalle.
- Excesivo quiebre del perímetro del túnel, debido a la existencia de discontinuidades y pocas estructuras en el macizo rocoso.
- Deformación excesiva, debido a la baja resistencia y la gran deformabilidad de macizos rocos de baja calidad y zonas de fallas débiles.
- Cambios frecuentes (magnitudes y direcciones) de esfuerzos y desplazamientos debido a la presencia de fallas.
- Entrada de grandes flujos de agua, principalmente asociadas a zonas de fallas que permiten el ingreso de agua subterránea.

Para la mejora de las condiciones de terrenos se han adoptado con éxito algunas medidas para la inestabilidad de la frente y la pared del túnel durante la excavación, por ejemplo, instalación de pernos, excavación de un by-pass con método convencional. Para el caso de sobre excavación en la frente del túnel se han utilizado espumas y resinas como bentonitas formando una especie de conglomerado artificial, evitando una carga desigual.

Para el caso de inestabilidad de la frente y la pared del túnel, los métodos de mejora de terreno se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Las paredes generalmente se estabilizan y reconstruyen inmediatamente detrás del cabezal de corte mediante el uso de marcos de acero y hormigón proyectado (en una TBM Gripper)
2. Acondicionamiento del macizo rocoso por delante de la frente de excavación a través de perforaciones de inyección.

#### **2.4.4 Presencia de agua**

El agua juega un factor importante en una excavación de túneles. Es importante conocer la geología del terreno, ya que, si el macizo rocoso se encuentra muy fracturado o presenta muchas discontinuidades, el flujo de agua llegará hasta el lugar de la excavación a través de estas fracturas. Si el terreno presenta arcillas de la familia de las esmectitas, esto puede generar un gran problema, ya que estas arcillas absorben el agua y posteriormente se hinchan, generando colapsos en el túnel.

Ante un incremento del flujo de agua, puede ser necesario un recálculo del sostenimiento empleado, o modificación del ritmo de avance, lo cual a largo plazo produce una demora.

Cuando se trabaja con máquinas tuneladoras y la filtración de agua es mayor a la esperada, ésta se puede acumular en la frente del túnel dependiendo del ángulo de inclinación del túnel, dificultando así las labores de limpieza de la zona de fortificación, colocación de dovelas de hormigón, colocación de rieles y movimiento de material con el puente grúa. Para esto se deben colocar bombas que extraigan el agua hacia el exterior.

Para hacer frente a los problemas del agua subterránea, se debe realizar un sondeo avanzado, un tratamiento del terreno y una instalación de soporte efectiva. Con el desarrollo de TBMs híbridas y multimodo, que pueden cambiar de un modo a otro en poco tiempo, el agua subterránea será más fácil de manejar.

#### **2.4.5 Zonas de Fallas**

Las zonas de falla son uno de los mayores desafíos a enfrentar durante la construcción de obras subterráneas. Por esta razón, una comprensión adecuada de su génesis y una evaluación exhaustiva de su estructura interna son requisitos previos para el desarrollo de un modelo geológico confiable que ayude a predecir mejor el comportamiento geomecánico de las rocas de falla.

Las fallas son extremadamente complejas y heterogéneas por naturaleza, debido a una combinación de componentes de roca débiles y fuertes que pueden variar

significativamente dentro de una misma zona de falla. El comportamiento mecánico de las fallas también es muy sensible al contenido de agua, estas zonas generalmente son sitios de circulación y / o acumulación sostenida de agua, lo que significa riesgos adicionales para la construcción del túnel.

Para los estudios geomecánicos, la caracterización de fallas, particularmente débiles (rocas altamente fracturadas y erosionadas) resulta ser muy difícil debido a la compleja estructura y la naturaleza heterogénea del material que es el resultado de una mezcla de componentes débiles y fuertes.

La nueva metodología de clasificación para describir el efecto de las zonas perturbadas en el rendimiento de la TBM tiene en cuenta el grado de fractura y el grado de meteorización del macizo rocoso como los factores más representativos (Paltrinieri, 2015). Las posibles entradas de agua y la profundidad se considerarán sólo como parámetros complementarios, ya que pueden afectar las operaciones de túneles (por lo tanto, el rendimiento del TBM) también fuera de una zona de falla.

(Paltrinieri, 2015) describe los siguientes tipos de clases en base al grado de fractura y meteorización (ver Ilustración 2.28):

### **Clase I: Macizo Rocosamente altamente fracturado**

La primera clase consiste en un macizo rocoso caracterizado por un alto grado de fractura sin signos visibles de desgaste del material. Aunque la roca original y las superficies de discontinuidad pueden verse afectadas por una leve decoloración, las propiedades geomecánicas de la roca intacta no están sujetas a ninguna alteración, por lo tanto, la "degradación mecánica" (es decir, la fractura y la apertura potencial de las discontinuidades) es el único proceso involucrado, mientras que la "meteorización química" (es decir, la alteración y descomposición de la roca) no afecta al macizo rocoso.

### **Clase II: Macizo Rocosamente erosionado altamente fracturado**

La segunda clase consiste en rocas altamente fracturadas con condiciones de erosión más significativas en la roca. El grado de meteorización puede influir en gran medida en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso y afectar su respuesta a la excavación. Las rocas han sufrido cierta alteración (en particular a lo largo de las diaclasas, se puede observar una decoloración significativa sin signos de descomposición del material) y por esta razón pueden tratarse como "rocas erosionadas".

### Clase III: Fallas cohesivas (macizo rocoso heterogéneo)

La tercera clase representa todas las zonas donde el comportamiento de la roca depende de la intensidad de la falla tectónica, por lo tanto, donde se produjo la cataclasis. Las rocas cataclásticas cohesivas de la clase III se caracterizan por fragmentos de roca originales (clastos) en una matriz de grano fino (Bürgi, 1999). Los parámetros principales que describen su comportamiento mecánico deben considerar la alteración significativa debido a la falla tectónica que transforma gradualmente la roca del estado intacto original a un material similar al suelo completamente triturado (Habimana, 1999; Habimana et al., 2002).

### Clase IV: Fallas no cohesivas

La última clase tiene en cuenta las rocas trituradas tectónicamente y el macizo rocoso desintegrado. Esta condición corresponde al más alto grado de tectonización que conlleva un comportamiento del material similar al del medio ambiente y puede caracterizarse por una naturaleza no cohesiva. Esta clase agrupa las rocas que encontraron el nivel más alto de procesos de degradación química y mecánica.

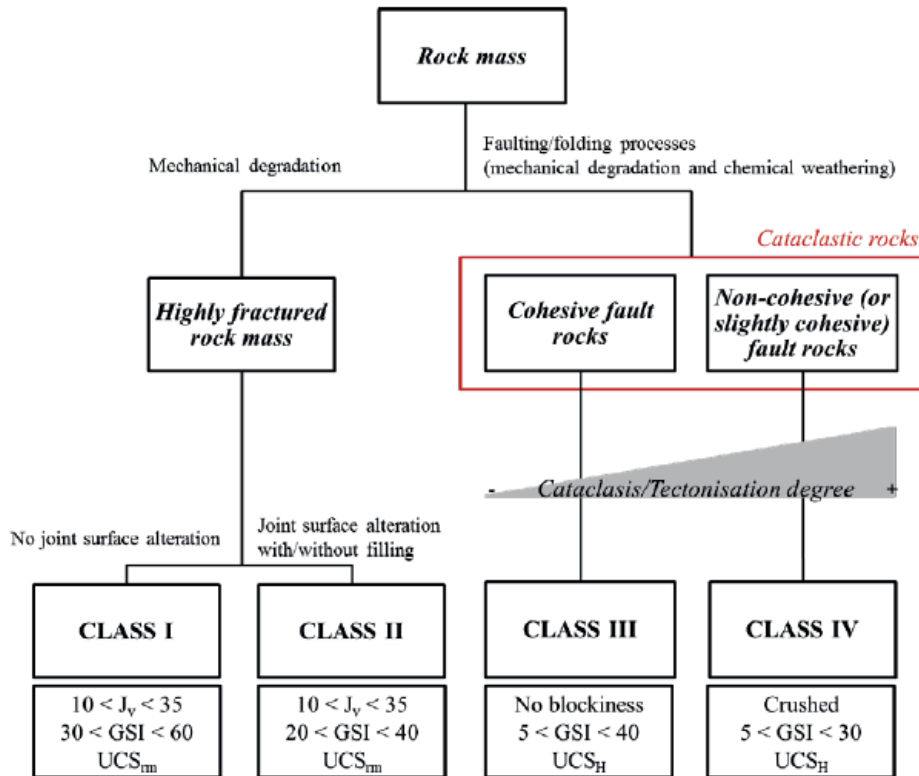


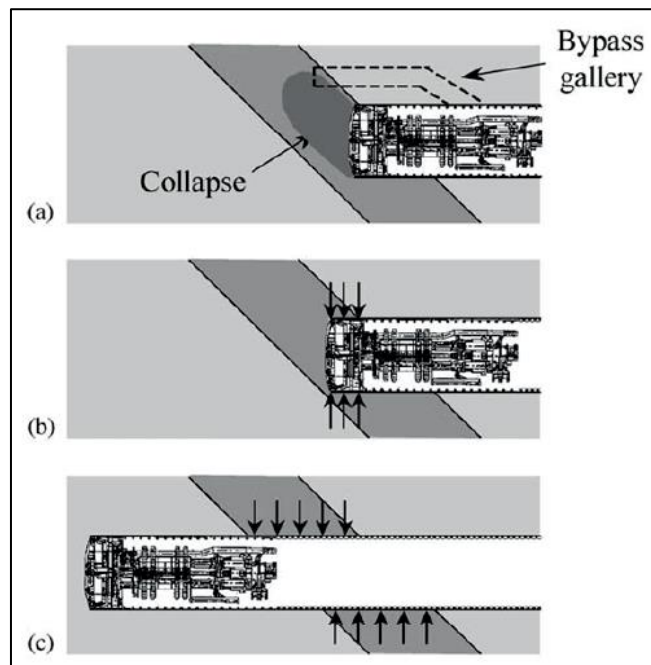
Ilustración 2.28. Clasificación de fallas según Meteorización y grado de Fracturamiento, (Paltrinieri, 2015).



Uno de los principales inconvenientes de los túneles con TBM en zonas con fallas es la reducción significativa de la velocidad de avance debido a los grandes retrasos de la construcción que generalmente están asociados a los siguientes problemas (Paltrinieri, 2015):

- A menudo se requieren acondicionamientos en el macizo rocoso, lo que causa retrasos importantes (la necesidad de detener el proceso de excavación) y aumento de costos.
- Se necesitan sistemas de drenaje e impermeabilización adicional para hacer frente a las entradas importantes de agua;
- La necesidad de liberar el cabezal de corte de la máquina (o escudo) si se atasca, especialmente en caso de desplazamientos en el túnel (esto también afecta enormemente la seguridad de la tripulación de la TBM).

La Ilustración 2.29 muestra esquemáticamente los problemas durante la construcción de un túnel y la estabilidad que se pueden encontrar cuando un TBM cruza zonas de falla (Habimana et al., 2002).



**Ilustración 2.29. Dificultades en la construcción del túnel en una zona de roca triturada: a) la excavación enfrenta inestabilidad; b) descompresión y bloqueo de la TBM; c) fenómeno de fluencia (Habimana et al., 2002).**

Para evitar y reducir las consecuencias de los problemas enumerados anteriormente, se hace necesaria una observación constante del comportamiento

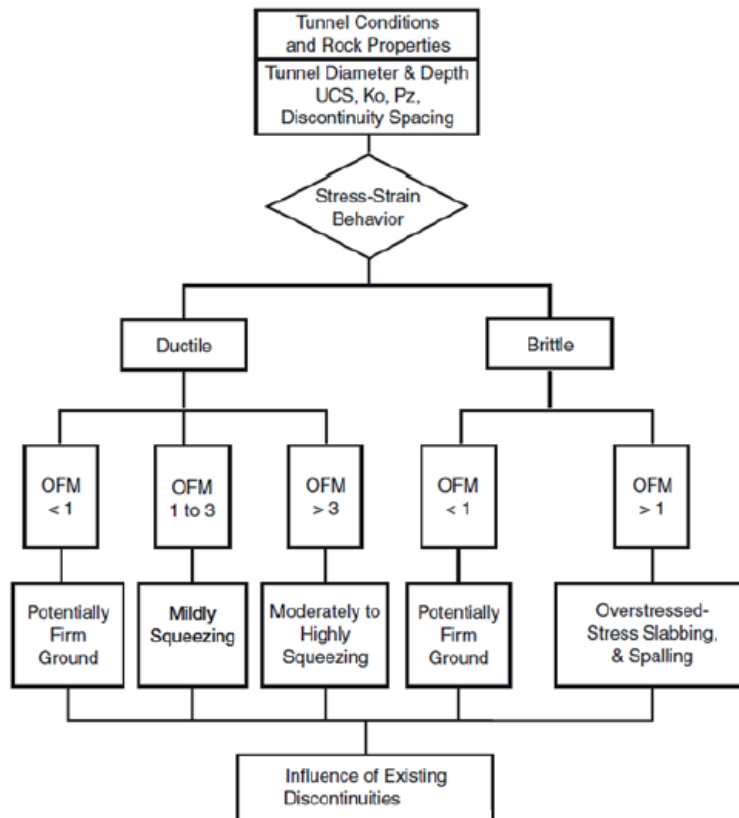
del macizo rocoso durante la construcción del túnel, así como una actualización constante del modelo de terreno teniendo en cuenta toda la información recopilada durante la excavación. Además de una actividad adecuada de investigación del terreno (es decir, antes y durante la excavación), la predicción del rendimiento de la TBM en condiciones difíciles del terreno se vuelve extremadamente importante, ya que permitirá una selección más adecuada del método de excavación, así como una mejor planificación de la construcción del túnel (Paltrinieri, 2015).

Para evaluar la respuesta inmediata de las rocas débiles al túnel, Klein (2001) desarrolló el diagrama de flujo que se informa en la Ilustración 2.30. Como es posible ver, definió el comportamiento del macizo rocoso como "una función de los esfuerzos que actúan sobre la roca que rodea el túnel y la resistencia de la roca". Para evaluar el potencial de condiciones de sobrecarga, se ha utilizado Modified Overload Factor (OFM), expresado por la Ecuación 2.1.

$$OFM = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{CI}}$$

**Ecuación 2.1. Factor de carga modificado, (Deere et al. 1969).**

Donde  $\sigma_{\theta}$  es el esfuerzo tangencial y  $\sigma_{CI}$  es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. Mediante esta ecuación es posible deducir condiciones de sobrecarga alrededor del túnel cuando OFM es mayor que uno, de lo contrario se esperan condiciones estables. Según Klein (2001), dependiendo principalmente de las características de deformación por tensión de las rocas, el comportamiento en condiciones de sobrecarga cambia: por ejemplo, las rocas caracterizadas por fallas frágiles (rocas de grano grueso como arenisca y conglomerado) se romperán, mientras que las rocas dúctiles (rocas de grano fino, como lutitas, margas y rocas desgastadas o alteradas) producirán convergencias en las paredes del túnel.



**Ilustración 2.30. Respuesta inmediata de rocas débiles en la construcción de túneles (Klein, 2001).**

## 2.4.6 Desafíos enfrentados en terreno

A continuación, se estudiarán los desafíos en terreno de cada uno de los proyectos del capítulo 2.2 y algunos casos adicionales.

### 2.4.6.1 Jinping II

La excavación se caracterizó por infiltración de agua a alta presión, grandes volúmenes y flujos variables. Durante la construcción de los diversos túneles se produjeron 42 puntos de infiltraciones, variando de los 0.05 m<sup>3</sup>/s (mejores casos) a 4.17 m<sup>3</sup>/s, lo cual afectó rotundamente el avance de la excavación, ya que se produjeron retrasos en el desarrollo de la construcción.

Para los puntos de infiltración que exhiben un flujo de agua subterránea de alta presión y gran volumen, se debe analizar si los esfuerzos de bloqueo por

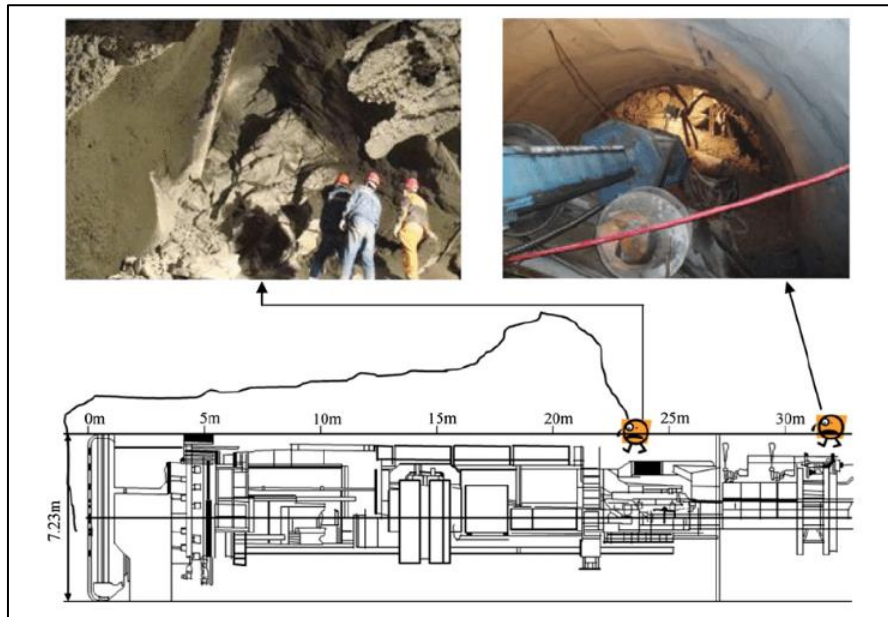
infiltración pueden cumplir o no con los requisitos del proyecto de construcción, y si los requisitos para el revestimiento de concreto se pueden cumplir para proporcionar condiciones para su posterior construcción. Además, también se debe considerar el efecto adverso del aumento del nivel del agua subterránea en la estabilidad de las rocas circundantes después del bloqueo de los grandes puntos de infiltración. La Ilustración 2.31 muestra el gran flujo de agua que afloraba por los puntos de infiltración.



**Ilustración 2.31. Infiltración de agua a alta presión durante el desarrollo del proyecto Jinping II, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).**

Otro gran problema con el que se tuvo que lidiar en el desarrollo de la excavación es el estallido de roca. Durante la excavación de los túneles se produjeron varios estallidos de roca extremadamente intensos que mataron a varios trabajadores y dañaron muchos equipos. Un ejemplo de ello ocurrió durante la construcción del túnel de drenaje, donde se produjeron dos estallidos de rocas de alta intensidad. Debido al gran impacto del estallido de roca todos los sistemas de soporte fueron destruidos. La máquina quedó completamente tapada en rocas, aproximadamente 30 m desde el cabezal como se muestra en la Ilustración 2.32. Además, la onda de choque rompió la puerta de la sala de servicio en el sistema de back up.

Los eventos sísmicos antes y durante la explosión de la roca se registraron utilizando un equipo de monitoreo micro sísmico, que indicó una magnitud de Richter de 2.0, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).



**Ilustración 2.32. Resultado del estallido de roca, durante la construcción del túnel de drenaje, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).**

#### **2.4.6.2 Túnel Base de San Gotardo**

A pesar de las numerosas investigaciones preparatorias, siempre pueden ocurrir dificultades inesperadas. Por ejemplo, al comienzo del túnel desde el lado sur del Gotardo en febrero de 2003, después de solo 200 metros, el trabajo fue interrumpido por rocas débiles o rocas no consolidadas. Las dos TBMs que partieron de Bodio, conocidos por los equipos de túneles como 'Sissi' (S-210) en el túnel oriental y 'Heidi' (S-211) en el túnel occidental, encontraron zonas de perturbación geológica conocidas como zonas de kakirita (roca cataclástica brechificada y laminada).

Dichas condiciones geológicas son demasiado blandas para las TBMs Gripper, que están diseñadas para rocas duras a muy duras, y hacen que el avance rápido del túnel sea casi imposible. Cada metro de túnel excavado debe asegurarse en un proceso complejo. Las máquinas no pudieron abandonar estas zonas de perturbación hasta agosto de 2003, después de unos 400 metros de túneles.

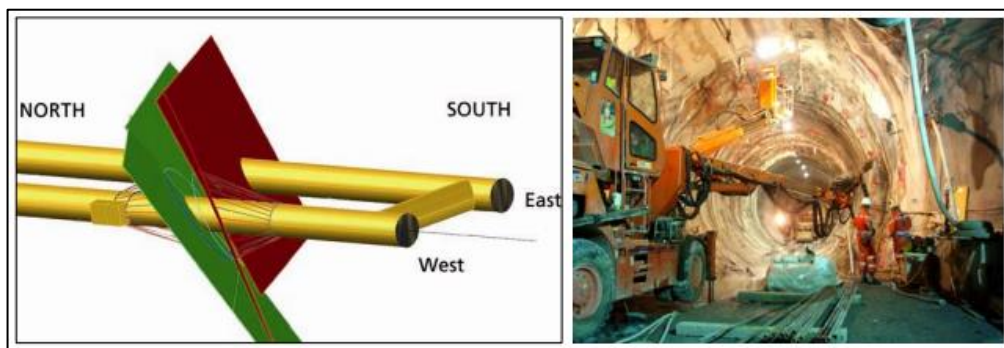
También ocurrieron fenómenos como Squeezing, esto ocurrió en la estación multifuncional Faido, ver Ilustración 2.33.



**Ilustración 2.33. Preparativos para la reconstrucción de la estación multifuncional de Faido debido al Squeezing, (Herrenknecht, 2010).**

En septiembre de 2006, se produjo una entrada de agua de inicialmente 13 lt/s cuando la excavación del tubo occidental del túnel de la base del Gotardo estaba cerca de los cimientos de la represa de Nalps. La zona permeable tuvo que ser sellada con cemento (ver Ilustración 2.34).

Se necesitaron 102 días hábiles para reducir la entrada de agua a un límite aceptable mediante la perforación de 12.800 m e inyectado 210 toneladas de mezcla de cemento en la roca, (Ehrbar, 2008).



**Ilustración 2.34. Sellado de la falla con cemento, (Ehrbar, 2008).**

### **2.4.6.3 Los Bronces**

Al igual que los casos anteriores, la construcción de este túnel tuvo grandes complicaciones sobre todo al inicio de la excavación, donde se tuvo que construir una caverna para realizar el ensamblaje de la TBM.

Desde el portal donde se inicia la construcción hasta los 500 m la roca era de mala calidad, es decir, fracturada o diaclasada, cuya litología era de origen ígneo. Para solucionar el problema de la mala calidad del macizo rocoso se utilizaron dovelas metálicas. Finalizados los 500 m la fortificación cambió a pernos y malla Acma, que deja la superficie del túnel expuesta, (Chapple, s.f.).

Adicionalmente a los 100 m, el proceso de excavación se encontró con una importante falla en el área de la caverna. En este caso la solución fue colocar hormigón proyectado para sellar, marcos de acero. Se tuvo que avanzar con el método tradicional de perforación y tronadura durante 185 m.

Otro gran desafío que surgió fue la aparición de una abundante napa subterránea de la que salían caudales entre 200 a 300 lt/s, la cual se utilizó en un futuro para las faenas al interior del túnel.

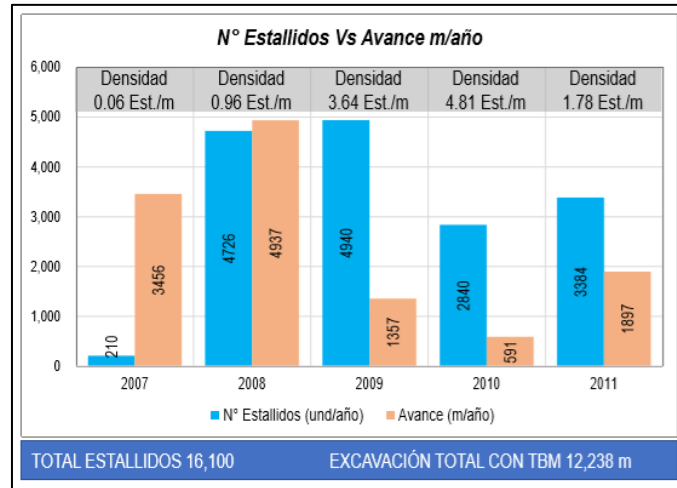
### **2.4.6.4 El Teniente**

Uno de los desafíos que surgieron durante la excavación fue el cambio de los discos cortadores de la TBM, ya que la roca tenía una gran dureza. Los problemas mayores surgieron posterior a la excavación y durante operación, donde se produjeron colapsos de las paredes, debido a las arcillas pertenecientes a la familia de las esmectitas presentes en las andesitas que absorbieron agua.

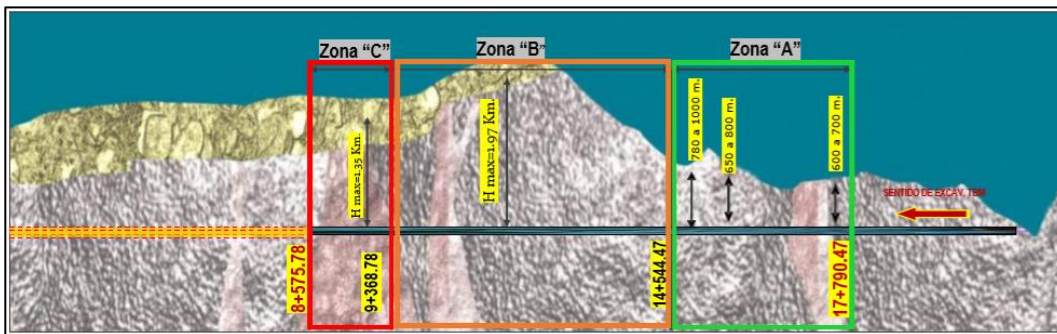
### **2.4.6.5 Los Olmos**

Uno de los grandes problemas que se generó en el desarrollo del túnel Los Olmos, fue la gran cantidad de estallidos de rocas que se produjeron, donde un 49 % fue de intensidad baja, un 34 % de intensidad media y un 17% de intensidad alta.

La Ilustración 2.35 muestra la distribución de estallidos de roca por año versus el avance por año, junto a la densidad de estallidos de roca que se producían por cada metro avanzado.



**Ilustración 2.35. Distribución de estallidos de roca versus avance promedio por año, (Winston H. Diaz, 2019).**



**Ilustración 2.36. División del túnel en zonas de estallidos de baja, media y alta intensidad, (Winston H. Diaz, 2019).**

De acuerdo con el fenómeno de estallido de roca, el túnel se dividió en tres zonas (ver Ilustración 2.36):

### ZONA A:

En esta zona no se tuvo la presencia de estallidos. En un pequeño tramo en presencia de filitas (rocas deformables) se tuvo deformaciones del perfil de excavación en rangos de hasta 0.20 m.



## **ZONA B:**

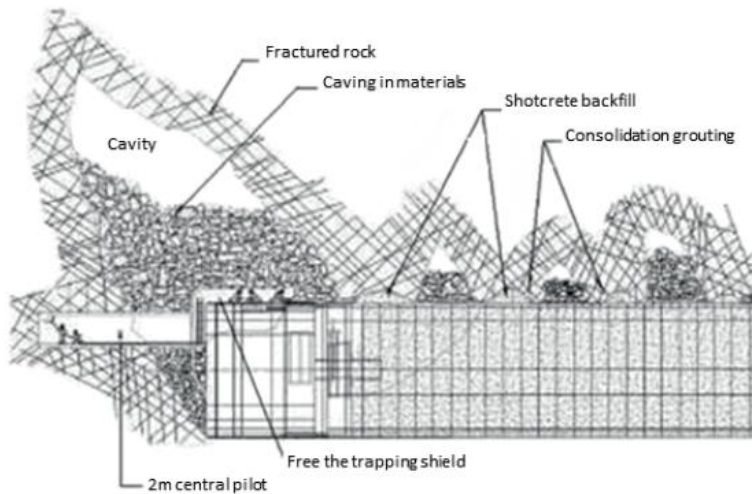
Básicamente esta zona se caracteriza por la presencia de planchoneos (slabbing) y estallidos de baja intensidad que no tuvieron grandes efectos en el perfil de excavación (0.20 m a 0.50 m).

## **Zona C:**

Zona con la presencia de estallidos de gran intensidad que provocaron deformaciones del perfil de excavación muy altas que van de 1.5 a 14 m con una frecuencia muy alta.

### **2.4.6.6 Autopista Pinglin**

El túnel de la autopista Pinglin en Taiwán es uno de los ejemplos del uso de TBM (en tres túneles paralelos), donde zonas de fallas implicaron grandes desafíos durante la construcción del túnel, como la gran cantidad de agua filtrada y colapsos en la frente del túnel. En la Ilustración 2.37 se observa varios derrumbes, que causaron atascos de la TBM, durante su excavación (Barla y Pelizza, 2000). En particular, los retrasos fueron tan importantes que en este caso se decidió abandonar la TBM y continuar la excavación utilizando el método de perforación y voladura. El túnel de 15 km de largo pudo completarse después de 12 años.

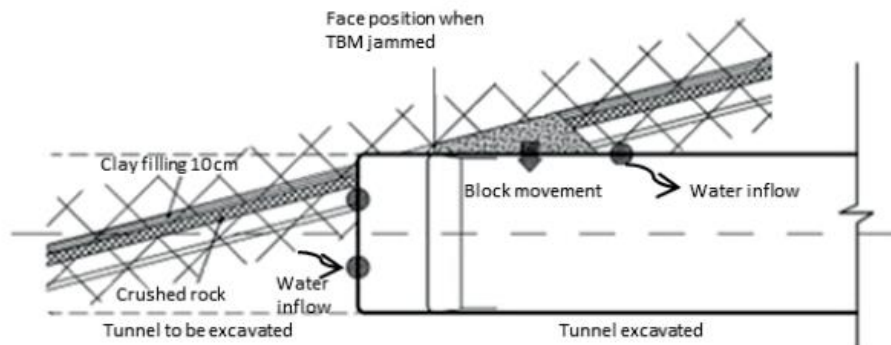


**Ilustración 2.37 Inestabilidad en la cara del túnel de la autopista Pinglin, Taiwán, después de Barla y Pelizza (2000).**

#### 2.4.6.7 Pont Ventoux

El túnel italiano Pont Ventoux HEP, excavado por una TBM Gripper, se caracterizó por varias zonas de falla que tuvieron resultados desastrosos en el progreso de la máquina (ver Ilustración 2.38). El mayor problema fue la combinación de presiones adversas de agua, erosión del material con fallas y la formación de sobre excavaciones debido a la orientación de la falla, generalmente sub-paralela.

El cabezal de corte estuvo atascado durante 6 meses, debido a la necesidad de sondear por delante de la cara del túnel, mapeando la extensión de zonas de fractura (mediante imágenes tomográficas) y luego decidir las medidas de estabilización a adoptar (Barla y Pelizza, 2000). Esto dio como resultado un avance de solo 20 m en 7 meses. Además, los grippers de la TBM representaron una complicación adicional debido a la presión ejercida sobre el revestimiento de acero continuo, que se instaló en condiciones de roca más adversa. Esta carga causó el aplastamiento de la forritficación de acero con la consiguiente inestabilidad de las paredes del túnel.



**Ilustración 2.38. Atasco de la TBM como consecuencia del sobreesfuerzo y un movimiento de bloque de 25 cm de la pared lateral derecha en el túnel Pont Ventoux, Italia, Barla y Pelizza (2000).**

## 2.5 Estado del arte sobre la excavabilidad de túneles en roca dura

Cuando se analiza el desarrollo de las tuneladoras y los hitos conseguidos en los últimos años, se comprueba que la utilización de las modernas tuneladoras para roca proporciona excelentes rendimientos y logros, pero también complejos desafíos y problemas para los diseñadores y constructores que deben hacer grandes

esfuerzos para comprender la interacción entre las características del macizo rocoso y el rendimiento de las TBMs.

Los modelos de predicción para el rendimiento de TBM, se usan actualmente desde el primer uso exitoso de discos cortadores en una TBM de roca dura a fines de 1950. La razón se debe a la gran importancia del cronograma y a los altos montos de inversión que conllevan estas máquinas. A medida que los contratos se vuelven más estrictos y los plazos más cortos, existe un fuerte deseo de ajustar los cronogramas y los costos al escenario más probable para un conjunto dado de características geológicas, geotécnicas y de las máquinas TBM, (Piaggio, 2011).

Por otro lado, debido al grado de incertidumbre y variabilidad especialmente en cuestiones geológicas, es imposible que el riesgo sea nulo. El propósito de estos modelos no es solo mostrar el tiempo y el costo, sino que también mostrar el efecto de esta incertidumbre en el proyecto, (Piaggio, 2011).

Hay que recordar que los métodos más modernos de clasificación de macizos rocosos (RQD, RMR, Q), originalmente estaban fundamentalmente dirigidos hacia los túneles construidos mediante perforación y tronadura, sin considerar los túneles construidos con TBMs.

Hoy en día esta situación ha cambiado, pues las TBMs por un lado han aumentado en potencia y tamaño, así como también han disminuido sus diámetros y radios de giro extendiéndose su campo de aplicación, de tal forma que su uso condiciona fuertemente el proyecto del túnel en términos de seguridad, diseño y plazos. La selección de una tuneladora para construir un túnel puede suponer un gran progreso debido a los excelentes rendimientos que se pueden conseguir, pero también es fuente de profundas decepciones cuando las características de la tuneladora no están bien adaptadas a las condiciones del terreno y la tuneladora queda atrapada durante meses.

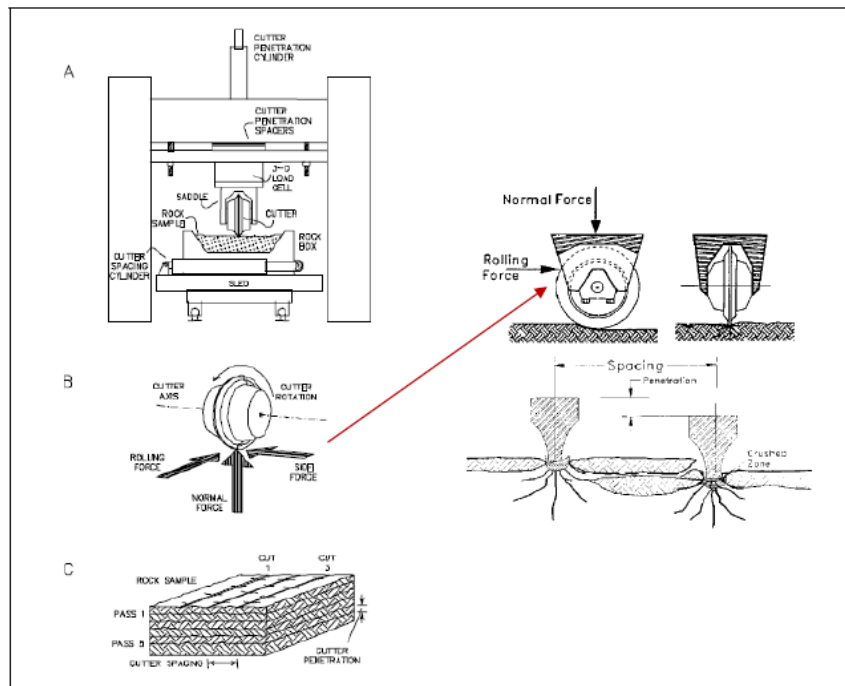
La excavabilidad, se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado y que se representa por varios índices operacionales, usualmente asociados al rendimiento de la TBM. La excavabilidad y los modelos para predecir el rendimiento de las tuneladoras han sido estudiados por (Rostami, 1993, 2008, 2013), (Bruland, 1998), (Barton, 2000, 2018), (Bieniawski, 2006), entre otros.

A continuación, se presentan los modelos más conocidos en la industria de la construcción de túneles para predecir el rendimiento de las TBMs en roca dura:

## 2.5.1 Colorado School of Mines (CSM)

Rostami y Ozdemir en el año 1993 presentan el modelo CSM. Este modelo se caracteriza por ser semi teórico para rocas duras, en el cual se realiza un balance de fuerzas de los discos cortadores a escala de laboratorio, donde posteriormente con estos valores se estima el empuje, torque y potencia de la TBM.

Este modelo es muy utilizado, debido a que los parámetros que se requieren para determinar el rendimiento de la máquina se obtienen con mayor facilidad del terreno. Es por esa razón que, en el presente estudio, se optó por utilizar este modelo para calcular el rendimiento de una TBM en un túnel de roca dura en minería masiva de Chile.



**Ilustración 2.39. Test de laboratorio aplicado a los discos cortadores para estimar la fuerza normal y de rodadura en distintos tipos de roca, (Rostami, 1993, 2008, 2013).**

CSM se desarrolla a partir de pruebas a escala real donde discos cortadores de diferentes tamaños son sometidos a una fuerza de corte en distintos tipos de rocas (ver Ilustración 2.39), para determinar una fuerza normal y tangencial a partir de las propiedades de roca intacta como la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción.

### 2.5.1.1 Fuerza total actuando en el cortador

El primer paso es calcular la fuerza que actúa en un solo disco cortador. En base a las múltiples pruebas que se les realizan a los discos se tiene la siguiente expresión:

$$F_t = C * T * R * \phi * \sqrt[3]{\frac{\sigma_c^2 * \sigma_t * S}{\phi * \sqrt{R * T}}}$$

**Ecuación 2.2. Fuerza total actuando en el disco cortador.**

Donde:

$F_t$ : Fuerza Total actuando en un disco cortador, [N]

C: Constante igual a 2.12

T: Ancho de la punta del cortador, [mm]

R: Radio del disco cortador, [mm]

$\sigma_c^2$ : Resistencia a la compresión simple, [MPa]

$\sigma_t$ : Resistencia a la tracción indirecta, [MPa]

P: Penetración básica, [mm/rev]

$\phi$ : Ángulo del área de contacto, estimado como:

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{R - P}{R} \right)$$

**Ecuación 2.3. Ángulo del área de contacto con la frente de excavación.**

El ángulo del área de contacto queda determinado por el valor de la penetración básica.

### 2.5.1.2 Fuerza normal y tangencial

El siguiente paso es descomponer la fuerza actuando en el disco cortador en dos fuerzas, una normal y otra tangencial, estas se determinan de la siguiente manera:

$$F_N = F_t * \cos \left( \frac{\phi}{2} \right)$$

**Ecuación 2.4. Fuerza normal actuando en el disco cortador.**

$$F_R = F_t * \sin \left( \frac{\phi}{2} \right)$$

**Ecuación 2.5. Fuerza tangencial actuando en el disco cortador.**

Donde:

$F_N$ : Fuerza normal actuando en el disco cortador, [N]

$F_R$ : Fuerza tangencial actuando en el disco cortador, [N]

### 2.5.1.3 Empuje, torque y potencia

Una vez determinadas la fuerza normal y de rodadura se puede calcular la fuerza de empuje, torque y potencia total de la máquina, cuyas variables quedan determinadas según las siguientes expresiones:

$$TH = N * F_N$$

**Ecuación 2.6: Empuje total actuando en el cabezal.**

$$TQ = 0.3 * N * F_R * D_{TBM}$$

**Ecuación 2.7: Torque total actuando en el cabezal.**

$$HP = \frac{\pi}{30} * TQ * RPM$$

**Ecuación 2.8. Potencia total de la TBM.**

Donde:

$TH$ : Fuerza de empuje total actuando en el cabezal, [N].

$TQ$ : Torque total actuando en el cabezal, [N-m].

$HP$ : Potencia total actuando en el cabezal, [kW].

$N$ : Número total de discos cortadores en el cabezal.

$D_{TBM}$ : Diámetro del cabezal, [m].

$RPM$ : Revoluciones por minuto del cabezal.

### 2.5.1.4 Penetración básica máxima

A partir de la penetración básica dada, se determinan los valores del torque, empuje y potencia de la TBM. La metodología para seleccionar la penetración básica máxima es cuando cada uno de los valores del torque, empuje o potencia obtenidos de terreno, se iguala a cada uno de los valores de torque, empuje o

potencia determinados con la penetración básica. Esto corresponde a un proceso iterativo donde la penetración básica va cambiando en cada iteración hasta que se cumpla la condición señalada anteriormente.

Conociendo la penetración básica máxima se puede calcular la velocidad de corte y la tasa de avance de la TBM de la siguiente manera:

$$CS = P_{max} * RPM$$

**Ecuación 2.9. Fórmula para determinar la velocidad de corte de la TBM.**

$$AR \left[ \frac{m}{día} \right] = \frac{60}{1000} * CS * S_t * S_n * U$$

**Ecuación 2.10. Fórmula para determinar la velocidad de avance según el modelo CSM.**

Donde:

Pmax: Penetración máxima [mm/rev].

CS: Velocidad de corte de la TBM [mm/min].

St: Horas en turno [h].

Sn: Número de turnos por día.

U: Factor de utilización [%].

La utilización corresponde a un porcentaje del tiempo en que la TBM realmente está realizando la excavación. Este porcentaje usualmente varía entre un 25 a 35%, pero pueden presentarse situaciones donde la TBM tenga una utilización muy alta sobrepasando el 50% o muy baja si las condiciones geológicas son muy desfavorables logrando una utilización bajo el 10%.

### **2.5.1.5 Consideraciones especiales**

A pesar de que este modelo de rendimiento es muy utilizado en la industria, hay algunas consideraciones que se deben tener en cuenta entre el rendimiento pronosticado y el rendimiento real en terreno, (Piaggio, 2011).

**Fragilidad o boreabilidad de la roca:** Como el modelo sólo incluye las propiedades de roca intacta de resistencia a la compresión simple y resistencia a la tracción indirecta, entonces es necesario tener presente estas propiedades que tienen relación con la textura y tamaño de los granos presentes en la roca.

**Anisotropía:** Esta característica tiene relación con la esquistosidad, foliación y planos de estratificación.

**Fracturas y estructuras en la roca:** Los planos de debilidad de la roca tienen una directa relación con los discos cortadores, variando la velocidad de corte dependiendo si el macizo rocoso es blocoso o masivo.

**Operatividad de la TBM:** En muchas ocasiones el operador a cargo de la TBM debe variar el empuje o torque de la máquina según las condiciones que se presentan en la excavación, por lo cual esto tiene un efecto directo en el cálculo de la tasa de avance pronosticada, ya que al variar el torque o empuje la penetración básica máxima cambiará, produciendo grandes errores en la determinación de la tasa de avance, debido a que este modelo asume que la TBM opera a capacidades máximas de torque y empuje.

Rostami en el año 2008 agregó una modificación al modelo CSM, donde a partir de la tasa de penetración del disco, determina la tasa de penetración de la TBM considerando el efecto de las fracturas.

La tasa de penetración queda determinada de la siguiente manera:

$$ROP \left( \frac{m}{h} \right) = p(mm) * RPM \left( \frac{1}{min} \right) * \frac{60}{1000}$$

**Ecuación 2.11. Fórmula para determinar la tasa de penetración.**

Donde:

P: Penetración [mm]

RPM: Revoluciones por minuto

Finalmente, la tasa de penetración de la TBM que considera los efectos de las fracturas queda determinada por la Ecuación 2.12, la cual se reemplaza en la Ecuación 2.9 para calcular la nueva velocidad de corte y la Ecuación 2.10 para encontrar el nuevo rendimiento de la TBM.



$$ROP_r \left( \frac{m}{h} \right) = \frac{CSM ROP^{0.561}}{EXP(0.00161 * Js + 0.00307 * |\alpha - 45| - 0.596)}$$

**Ecuación 2.12. Fórmula para determinar la tasa de penetración de la TBM considerando el efecto de las fracturas.**

Donde,

Js: Joint Spacing [cm].

$\alpha$ : Ángulo entre la superficie de los joints y el eje del túnel.

## 2.5.2 Q TBM

Barton en el año 2000, agregó más variables del macizo rocoso a su modelo para perforación y tronadura, creando un nuevo modelo de predicción de rendimiento para las máquinas tuneladoras.

Este modelo se caracteriza por considerar muchas variables del macizo rocoso y por lo mismo muy difíciles de obtener. Además, en la industria no se utiliza ya que sus resultados no son similares a la realidad debido a que existen parámetros de entrada erróneos y que no tienen relación con la tasa de avance. Las comparaciones hasta ahora indican muy poca correlación con los resultados obtenidos (A. Palmstrom., E. Broch., 2006).

La Ecuación 2.13 muestra el desglose de los parámetros que considera el modelo de Barton.

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_o}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} * \frac{\sigma}{\frac{F^{10}}{20^9}} * \frac{20}{CLI} * \frac{q}{20} * \frac{\sigma_\theta}{5}$$

**Ecuación 2.13. Fórmula para determinar el Q de Barton.**

Donde:

$RQD_o$ : RQD [%] en la dirección del túnel.

$J_n$ ,  $J_r$ ,  $J_w$ ,  $J_a$ , SRF: corresponden a las mismas variables del Q de Barton para excavaciones con perforación y tronadura.

$\sigma$ : Valor aproximado de la resistencia del macizo rocoso que varía entre 1 a 100 MPa. Dependiendo de la orientación de las discontinuidades puede considerarse también la resistencia a la tracción.

CLI: Índice de la vida de los cortadores.

q: Contenido de cuarzo normalizado por 20%.

$\sigma_\theta$ : Valor estimado del esfuerzo biaxial en la frente del túnel en MPa.

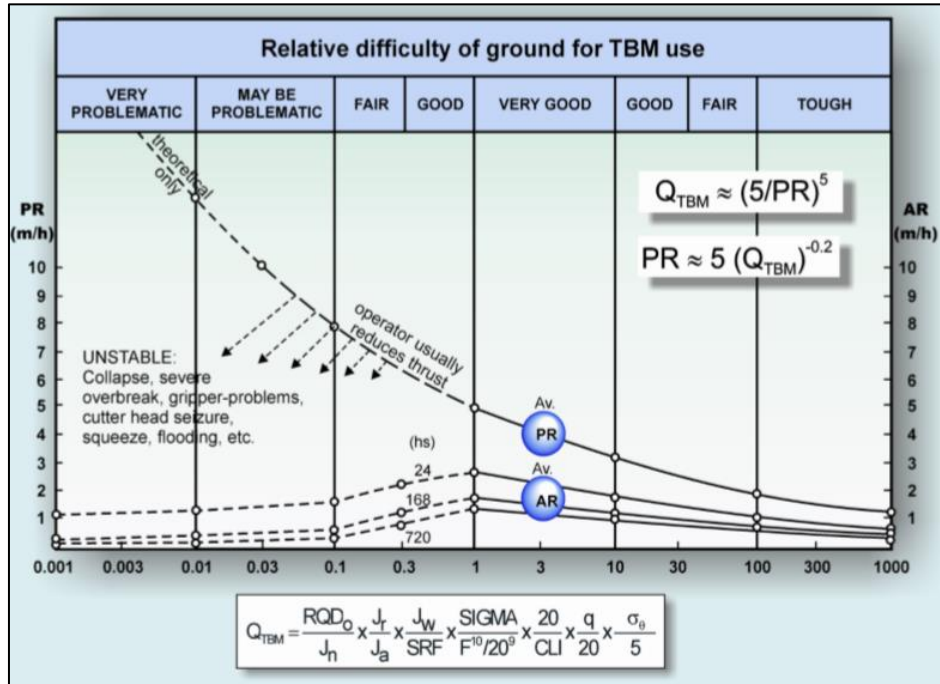


Ilustración 2.40. Variación de la velocidad de penetración y avance de la TBM con respecto al tipo de macizo rocoso, (Barton, 2000, 2018).

En la Ilustración 2.40 se puede visualizar el comportamiento tanto de la velocidad de penetración como el avance de la TBM en base al macizo rocoso y al valor de Q.

Barton a partir de las gráficas PR (penetration rate) y AR (advance rate), determina una ecuación que relaciona el Q con estas dos variables. De estas ecuaciones se obtiene lo siguiente:

$$PR \left[ \frac{m}{h} \right] \approx 5(Q_{TBM})^{-0.2}$$

Ecuación 2.14. Fórmula para determinar la velocidad de penetración.

$$AR \left[ \frac{m}{h} \right] \approx 5(Q_{TBM})^{-0.2} * T^m$$

Ecuación 2.15. Fórmula para determinar la velocidad de avance.

Donde:

T: Tiempo necesario para la excavación.

La Ecuación 2.16 muestra la manera de determinar el tiempo que dura la excavación.

$$T = 5 * \left( \frac{L}{PR} \right)^{\frac{1}{1+m}}$$

**Ecuación 2.16. Fórmula para determinar el tiempo de la excavación.**

Donde:

L: Largo del túnel.

m: coeficiente de avance.

El coeficiente de avance puede ser determinado en función de distintas propiedades de la roca. La Ecuación 2.17 revela los parámetros que son necesarios conocer para estimar el valor del gradiente de desaceleración.

$$m \approx m1 * \left( \frac{D(m)}{5} \right)^{0.2} * \frac{20^{0.15}}{CLI} * \left( \frac{q(\%)}{20} \right)^{0.1} * \left( \frac{n(\%)}{2} \right)^{0.05}$$

**Ecuación 2.17. Fórmula para determinar el valor del gradiente de desaceleración.**

Para determinar el valor de m1 es necesario utilizar la Tabla 2.3, donde se observan cada uno de los valores que toma m1 dependiendo del valor de Q.

**Tabla 2.3. Valor de m1 en base al valor de Q. (Barton, 2000, 2018).**

<b>Q</b>	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
<b>m1</b>	-0.9	-0.7	-0.5	-0.22	-0.17	-0.19	-0.21

Tal como se pudo apreciar en este modelo, los parámetros que se requieren para estimar la tasa de penetración y de avance son difíciles de obtener, como por ejemplo el esfuerzo biaxial en la frente del túnel. Cuando la TBM se encuentra en detención por mantención u otra operación, el espacio que queda entre la frente del túnel y el cabezal es muy pequeño para que un especialista obtenga el valor de ese parámetro, además de ser una labor muy arriesgada, poniendo en peligro la vida de la persona. Es por ello, que actualmente se han utilizado otros modelos para estimar la velocidad de avance, ya que los parámetros que se requieren se obtienen más fácilmente.

### **2.5.3 RME (Rock Mass Excavability)**

El RME fue específicamente creado para cuantificar la dificultad que presenta un macizo rocoso a ser perforado con una TBM. La primera versión del RME se efectuó en el año 2006 (Bieniawski, 2006) tras analizar 387 secciones de túnel excavado con TBM en roca dura. La última versión corresponde a la presentada en los congresos WTC 2008 y WTC 2009.

La longitud acumulada de túnel que suponen los 387 tramos estudiados es de 22,9 km, que han sido fundamentalmente excavados con tuneladoras escudo doble, trabajando en dos modos, como escudo doble y escudo simple.

Como resultado de este análisis, se encontró que los parámetros que tenían mayor influencia sobre la velocidad media de avance (ARA) de las tuneladoras, expresada en m/día, son: perforabilidad, espaciado de las discontinuidades y tiempo de autoestabilidad. A este grupo de parámetros más influyentes, estadísticamente, sobre el ARA se decidió incorporar otros dos para definir el comportamiento del terreno: resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta y caudal de agua infiltrada en la excavación, ya que en muchos casos estos parámetros tienen una gran influencia en el rendimiento de las tuneladoras.

La Ilustración 2.41 muestra los parámetros recién mencionados para el rating del RME, considerando los últimos dos parámetros básicos agregados dentro de la tabla de puntajes.

La suma de las evaluaciones de los parámetros de la Ilustración 2.41 varía entre 0 y 100 puntos y cuanto mayor es el RME más fácilmente resulta la excavación en terreno.

El promedio de tasa de avance resulta más apropiado para estimar el rendimiento de una TBM, ya que se obtiene de forma directa simplemente dividiendo la longitud del tramo entre los días que dura la construcción. Además, es una herramienta muy aplicable durante la fase de diseño para estimar los plazos de la obra.

Uniaxial compressive strength of intact rock [0 - 25 points]										
$\sigma_c$ (MPa)	<5	5-30	30-90	90-180	>180					
rating	4	14	25	14	0					
Drillability [0 – 15 points]										
DRI	>80	80-65	65-50	50-40	<40					
Rating	15	10	7	3	0					
Discontinuities in front of the tunnel face [0 – 30 points]										
Homogeneity			Number of joints per meter					Orientation with respect to tunnel axis		
Homogeneous		Mixed	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblique	Parallel
Rating	10	0	2	7	15	10	0	5	3	0
Stand up time [0 – 25 points]										
Hours	<5	5-24	24-96	96-192	>192					
Rating	0	2	10	15	25					
Groundwater inflow [0 – 5 points]										
Liters/sec	>100	70-100	30-70	10-30	<10					
Rating	0	1	2	4	5					

**Ilustración 2.41. Tabla de parámetros para asignar puntaje al RME (Bieniawski C. G., 2008).**

Es importante considerar que los tramos que se utilizan para determinar el ARA deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Su longitud debe ser superior a 30 m.
- A lo largo del tramo no se consideran reparaciones extraordinarias de mantenimiento de la TBM.
- A lo largo del tramo el tiempo dedicado a la excavación debe estar comprendido entre el 30 y el 60 % del ciclo del trabajo.
- A lo largo del tramo no deben producirse variaciones significativas de las condiciones geológicas.

Hay tres excepciones importantes en la aplicación del RME, la primera es tener presente que, sea cual sea el valor del RME asignado a un tramo, si alguno de los cinco parámetros de clasificación se califica con 0 se admite que el valor del ARA en ese tramo será inferior a 2 m/día. La segunda excepción que hay que tener en cuenta es que, si  $\sigma_{ci}$  es menor de 5 MPa en el caso de que se trate de una tuneladora escudada, que no utiliza grippers, la calificación correspondiente a este parámetro debe ser 1 en vez de 0, ya que las tuneladoras sin grippers tienen menos problemas

para anclarse en los terrenos débiles. Finalmente, la tercera excepción se refiere a la presencia de agua en los terrenos arcillosos o limolíticos, que se degradan muy rápidamente ante caudales moderados de agua. Es por esa razón que en estos terrenos se considera que la calificación referente a la presencia de agua debe ser 0 si se estima que la afluencia de agua en el túnel es mayor a 10 l/s.

El RME solo está pensado para evaluar la excavabilidad del terreno (Bieniawski C. G., 2008), es por esa razón que se consideran nuevos factores específicos importantes como el diámetro del túnel, el grado de adaptación de la tripulación al terreno, experiencia y eficacia de los operarios y el porcentaje de utilización en la excavación. En consecuencia, el ARA teórico es corregido por estas variables, donde se obtiene un nuevo ARA real expresado en la Ecuación 2.18.

$$ARA_{real} = ARA_{teórico} * FE * FA * FD$$

**Ecuación 2.18. Relación entre la velocidad de avance promedio real y la teórica.**

Donde:

FE: factor que valora la habilidad del equipo que tripula la tuneladora.

FA: factor que valora la adaptación al terreno excavado.

FD: factor que tiene en cuenta el diámetro de la excavación.

La Tabla 2.4 muestra que, dependiendo el largo del túnel, la TBM se va adaptando al terreno, y en consecuencia esto repercute en el valor que toma el factor FA.

**Tabla 2.4. Referencia para determinar el factor A en base al largo del túnel excavado (Bieniawski C. G., 2008).**

Largo del túnel excavado	Factor de adaptación
0.5	0.68
1	0.80
2	0.90
4	1.00
6	1.08
8	1.12
10	1.16
12	1.20

El factor FE queda determinado de la siguiente manera:

$$FE: 0.7 + FE1 + FE2 + FE3$$

**Ecuación 2.19. Fórmula para determinar el factor FE.**

La Ilustración 2.42 revela un ranking de puntajes que se le asignan a cada uno de los factores que componen FE y que permiten estimar este valor con mayor precisión.

EXPERIENCIA DEL CONTRATISTA	SIN EXPERIENCIA	1 a 5 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA	6 a 10 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA	11 a 20 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA	>21 T ÚNELES CONSTRUIDOS CON TUNELADORA
Valor de F <sub>E1</sub>	0	0,05	0,10	0,15	0,2
CUALIFICACIÓN DEL PERSONAL DE LA TUNELADORA	POCO ENTRENADO Y SIN EXPERIENCIA EN TUNELADORAS		ENTRENADO; PERO SIN EXPERIENCIA EN TUNELADORAS		ENTRENADO Y CON EXPERIENCIA EN TUNELADORAS
Valor de F <sub>E2</sub>	0		0,1		0,15
SUMINISTRO DE REPUESTOS	EXISTENCIA DE REPRESENTANTE LOCAL DEL FABRICANTE DE LA TUNELADORA			TIEMPO NECESARIO PARA RECIBIR REPUESTOS	
	SI	NO		≤ 1 MES	> 1 MES
Valor de F <sub>E3</sub>	0,075	0		0,075	0

**Ilustración 2.42. Ranking de puntajes que se asignan a cada uno de los factores que componen FE, (Bieniawski C. G., 2008).**

El factor FD queda determinado con la siguiente ecuación:

$$FD: \frac{10}{D[m]}$$

**Ecuación 2.20. Fórmula para determinar el impacto del diámetro de la excavación.**

El parámetro ARA se puede determinar dependiente el valor de la resistencia a la compresión, para ello existen dos criterios que se presentan a continuación:

- Criterio para macizos rocosos con  $\sigma_{ci} > 45$  MPa:

Considerando el criterio para estos tipos de macizos rocosos, se tiene que el ARA para una TBM escudo simple se define como:

$$ARA_T = 10 \ln(RME) - 13$$

**Ecuación 2.21: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM escudo simple.**

Para el caso de la TBM escudo doble el ARA total queda definido de la siguiente manera:

$$ARA_T = 0,422 * RME - 11,6$$

**Ecuación 2.22: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM doble escudo.**

Es importante considerar que para  $RME > 80$ , las TBMs abiertas son las que proporcionan un mejor rendimiento. Para RME entre 70 y 80, todas las TBMs tienen rendimientos similares.

Para RME entre 45 y 70, la escudo simple y escudo doble, son las mejores opciones. Para RME menores a 45 no se recomienda el uso de TBM.

- Criterio para macizos rocosos con  $\sigma_{ci} < 45$  MPa:

Para el caso contrario donde los macizos rocosos tienen una resistencia a la compresión simple menor se tiene lo siguiente:

$$ARA_T = 23 \left( 1 - 242^{\frac{45-RME}{17}} \right)$$

**Ecuación 2.23: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM escudo simple.**

La TBM doble escudo presenta la siguiente relación entre el ARA y RME:

$$ARA_T = 0,661 * RME - 20,4$$

**Ecuación 2.24: Fórmula para determinar el ARA total para una TBM doble escudo.**

En general el tipo de TBM más utilizado en estos casos corresponde a un doble escudo, independientemente del valor del RME. Para RME inferiores a 75, la mejor opción es el uso de un escudo simple, ya que en terrenos con esas características este tipo de máquina proporciona los mismos resultados que el doble escudo, es más fácil de usar y exige una menor inversión.



Dado que la gran mayoría de los terrenos donde se realizan la construcción de túneles presentan zonas de fallas, es importante considerar algunos aspectos para una buena realización del proyecto y cumplir con los plazos estipulados. El paso de las zonas de falla es el punto más débil de la utilización de las tuneladoras debido, en gran parte, a las grandes limitaciones que impone la cabeza de corte para inspeccionar el estado del frente y poner en práctica las medidas necesarias para estabilizarlo.

Por ello es muy frecuente que, al atravesar las zonas de falla, tuneladoras que han obtenido excelentes rendimientos vean dramáticamente frenado su avance con paradas prolongadas durante muchos días y que, en casos extremos, sea imposible reanudar el avance.

A continuación, se presentan algunos criterios a considerar para la utilización de TBM en zonas de fallas.

- Hacer los esfuerzos necesarios en la fase de proyecto para situar las fallas con precisión y evaluar correctamente su comportamiento mecánico.
- Equipar las tuneladoras con los medios mecánicos necesarios para inyectar espumas en la cámara de excavación y para construir con eficiencia paraguas de micropilotes.
- En el caso de las TBM abiertas es imprescindible que el sostenimiento pueda colocarse inmediatamente detrás de la cabeza de corte.
- Durante la excavación en la zona de falla hay que controlar que no se produzcan sobreexcavaciones. Para ello es preciso un control continuo del peso del terreno excavado, en relación con la penetración, e inspeccionar visualmente la cámara de excavación en cada avance.
- En cuanto se detecte una sobreexcavación en la cámara, un técnico experimentado debe evaluar el riesgo de que la sobreexcavación aumente y ante la más mínima duda, debe detenerse el avance e inyectar espumas entre la cabeza de corte y el terreno.

Para seleccionar uno u otro tipo de TBM debe tomarse en cuenta que normalmente el túnel deberá tener una gran longitud, esto equivale a decir varios kilómetros siendo previsible encontrar condiciones geotécnicas variables y la presencia de fallas de muy pobre calidad geomecánica.

Estas circunstancias poseen una importancia decisiva a la hora de elegir uno u otro tipo de TBM, pudiendo priorizarse dos estrategias distintas:

- **Estrategia de menor riesgo:** Seleccionando la TBM más adecuada a las peores condiciones previsibles.
- **Estrategia de menor plazo:** Seleccionando la TBM que arroje el mejor ARA, es decir el menor tiempo de construcción.

## 2.6 Variabilidad geotécnica

Uno de los principales riesgos en un proyecto es la incertidumbre y la variabilidad geológica y geotécnica durante la excavación. Las condiciones de terreno pueden ser muy variables, lo cual aumenta la probabilidad de que se produzcan interferencias durante la excavación, y en consecuencia se genera un aumento en los costos y retraso en los plazos pronosticados. Debido a la gran incertidumbre y con la finalidad de disminuir el riesgo del proyecto se desea realizar una caracterización probabilística de las propiedades de roca intacta.

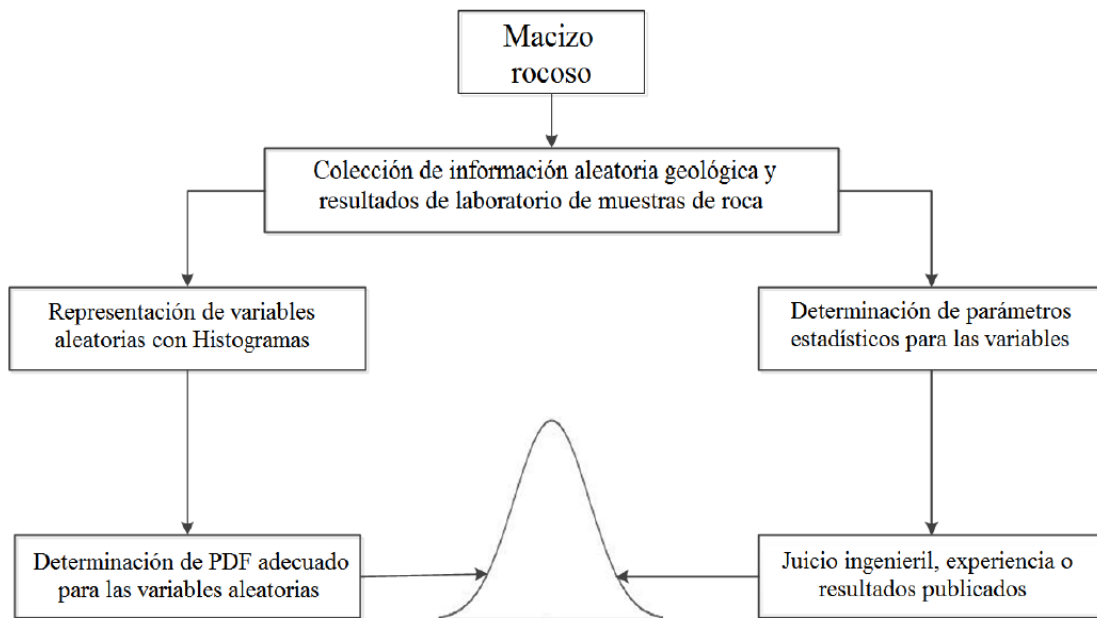
La incertidumbre asociada con las propiedades del macizo rocoso se puede dividir en dos categorías: la incertidumbre aleatoria y epistémica. La incertidumbre aleatoria es un resultado de la aleatoriedad natural en la roca debido a los procesos geológicos a los que ha sido sometida. Esto es evidente a partir de la variación espacial de las propiedades del macizo, como la resistencia a la compresión uniaxial dentro de una capa geológica nominalmente uniforme (Bedi, A., & Harrison, J., 2012).

Por otra parte, la incertidumbre epistémica se debe a la falta de conocimiento sobre una variable. Esto se puede deber a la falta de datos de terreno o de laboratorio, o falta de información sobre eventos y procesos geológicos.

Las incertidumbres que se encuentran en la recopilación de la información generalmente son epistémicas en lugar de aleatorias, debido a la falta de conocimiento sobre las propiedades de la roca (Christian, 2004).

Como la variabilidad está muy presente en la ingeniería geotécnica, durante el diseño y análisis de cualquier tipo de excavación en la roca, los parámetros de entrada afectados por la incertidumbre deben ser tratados como variables aleatorias en lugar de ser tratados como un solo valor. Las variables aleatorias son consideradas como un rango dentro del cual ciertos valores pueden ocurrir con más frecuencia que otros y estas variables tienen que ser cuantificadas con tal de usarlas como input en cualquier análisis probabilístico geotécnico.

La cuantificación de la incertidumbre envuelve la determinación de los momentos estadísticos, especialmente de la media y la varianza de las variables aleatorias y también de la determinación de la distribución de probabilidad de las variables. La Ilustración 2.43 resume los pasos para la cuantificación de la incertidumbre geológica epistémica, en materiales geotécnicos como los macizos rocosos.



**Ilustración 2.43. Pasos para la cuantificación de incertidumbre en propiedades del macizo rocoso (modelo de Haldar y Mahadevan 2000).**

## 2.6.1 Distribución de probabilidad

La densidad de probabilidad (PDF), es una función que define una variable aleatoria continua. Describe la probabilidad relativa de que una variable aleatoria asuma un valor particular (Hoek *et al.*, 1995).

Básicamente, la variabilidad en los datos recogidos puede representarse gráficamente en un histograma, el cual muestra la frecuencia con la que se encuentran los datos dentro de los intervalos especificados. Con el fin de adaptar una PDF teórica para el histograma, las curvas PDF se superponen en el histograma y luego se comparan estadísticamente para saber cuál se ajusta mejor a los datos.

Existen variados tipos de PDF, sin embargo, los más utilizados en mecánica de rocas son:

- Distribución normal o Gaussiana: es la distribución de probabilidad más común y se utiliza generalmente para estudiar probabilidades en ingeniería geotécnica a menos que se tengan buenas razones para seleccionar otra distribución (Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F., 1995).
- Distribución lognormal: en ingeniería geotécnica, cuando las variables aleatorias deben ser no-negativas, una distribución lognormal es más apropiada para eliminar cualquier posibilidad de valores negativos (Haldar, A., & Mahadevan, S., 2000).

## 2.6.2 Método Monte Carlo

Para toda excavación subterránea es importante tener una estimación confiable de las características del macizo rocoso en cuanto a su resistencia, caracterización geológica y geomecánica. Sin embargo, esto se ve dificultado por la inherente variabilidad de las propiedades de la roca debido a la cantidad de procesos geológicos a los que ha estado sometida. Por esta razón, se deben usar métodos estadísticos y probabilísticos para establecer adecuadamente los parámetros de la roca en el lugar donde se está estudiando la excavación (Harr, 1987). También se recomienda la utilización del método Monte Carlo para establecer la distribución

de probabilidad de las variables, puesto que utiliza los datos medidos en terreno como base para su desarrollo (Harr, 1987).

En la literatura existe un limitado número de estudios que consideran estimaciones estocásticas de las características de resistencia del macizo rocoso (Kim, 1995), (Sari, 2009), (Sari, M., Karpuz, C., & Ayday, C., 2010). Estos estudios mencionan que es altamente recomendable hacer uso de análisis probabilísticos para los parámetros geotécnicos, debido a que de esa forma se refleja la naturaleza aleatoria de propiedades geotécnicas en el macizo.

(Kim, 1995) estimaron las características mecánicas del macizo rocoso usando simulaciones de Monte Carlo. El estudio se enfocó en el módulo de deformación, y también en la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. Para ello, primero establecieron los datos a utilizar para cada variable y luego aplicaron simulaciones de Monte Carlo para ajustar adecuadamente una distribución de probabilidad. Sus resultados demostraron la inherente variabilidad de la roca y la importancia de asumir distribuciones para los parámetros de macizo rocoso. Además, propusieron el método de Monte Carlo como una alternativa confiable para realizar este estudio, tal y como lo había propuesto (Harr, 1987).

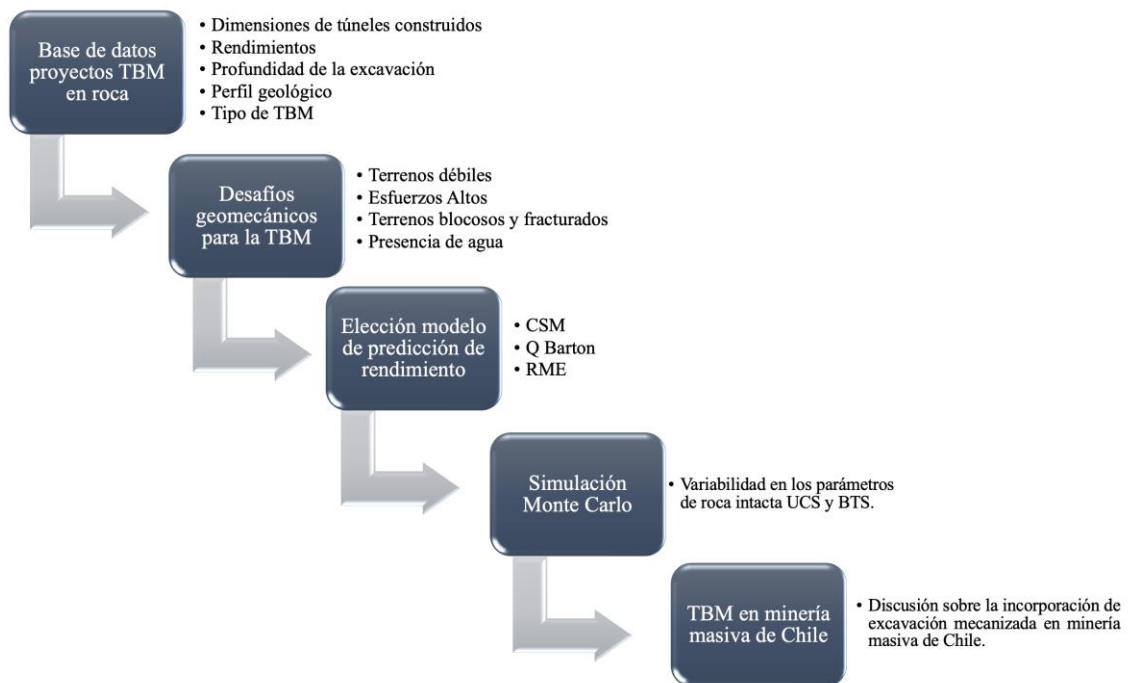
SAFETY GALLERY OF THE FREJUS TUNNEL PROJECT: “Prediction Models for TBM Performance” es un estudio que utiliza la simulación Montecarlo para macizos rocosos y en particular, para TBM (Piaggio, 2011).

# 3 METODOLOGÍA

El presente trabajo se divide en cinco partes principales (ver Ilustración 3.1). En primera instancia se construye una base de datos de proyectos donde se ha utilizado la TBM en condiciones desafiantes de roca dura y gran profundidad. En segundo lugar, se presentan los tipos de desafíos en los que una TBM puede encontrarse durante la construcción de una excavación.

Una vez que se tiene una robusta revisión bibliográfica sobre la TBM en roca y sus desafíos, se dan a conocer tres modelos de predicción de rendimiento, de los cuales se selecciona uno, para el desarrollo de una simulación Monte Carlo en minería subterránea. La simulación considera la variabilidad de la resistencia a la compresión simple y resistencia a la tracción.

Finalmente, en base a la simulación realizada y la información de los proyectos investigados, se genera una discusión acerca del uso de excavación mecanizada en minería masiva de Chile en términos de seguridad, diseño y rendimiento.



**Ilustración 3.1. Metodología adoptada para el desarrollo de la memoria.**

### **3.1 Experiencia en TBM**

Es necesario estudiar con gran detalle cada uno de los proyectos que se han realizado en condiciones extremas de esfuerzos, profundidad y cambios litológicos, ya que, a partir de la base de datos confeccionada, se puede elaborar una discusión acerca del uso de TBM en minería masiva de Chile. Es por ese motivo que, para cada proyecto, se realiza una revisión bibliográfica de cada una de las variables consideradas relevantes en la construcción de túneles, como la profundidad, parámetros de roca intacta, tipo de TBM, diámetro y longitud del túnel. Además, se estudian los desafíos a los cuales se enfrenta la TBM, como estallidos de roca, condición de agua, zonas de fallada, squeezing, entre otras problemáticas.

### **3.2 Desafíos de la TBM en minería**

Para encontrar buenos resultados al final de cada proyecto que utiliza el método de construcción TBM, se requiere una gran base de información acerca de las variables de terreno. Esto implica conocer en detalle los problemas que podría tener una TBM durante la construcción. Dicho lo anterior, se realiza una búsqueda bibliográfica de los problemas más frecuentes a los cuales se enfrentan estas máquinas y las soluciones que se pueden adoptar para evitar inconvenientes.

La seguridad, costos y plazos propuestos corresponden a los objetivos principales que busca cualquier compañía en el desarrollo de un proyecto. Al comprender y analizar cada una de las problemáticas a las cuales se puede enfrentar la TBM antes del inicio del proyecto, logrará ser una gran ventaja para el éxito del proyecto.

### **3.3 Modelos predictivos de Rendimiento**

Debido a la gran incertidumbre y variabilidad que existe en los parámetros geomecánicos, se requiere el uso de modelos predictivos de rendimiento, para estimar con mayor seguridad los posibles resultados de una TBM en el desarrollo de un proyecto.

El propósito de estos modelos no es solo mostrar el tiempo y el costo, sino que también mostrar el efecto de esta incertidumbre en el proyecto. En base a los modelos estudiados, se ha decidido seleccionar el modelo CSM debido a dos principales razones, la facilidad de acceso a los parámetros de la roca y el gran uso en la industria para determinar rendimientos de TBM.

### 3.4 Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo busca disminuir la incertidumbre de las variables de roca intacta, con el objetivo de conocer con mayor certeza el desempeño de una TBM durante la construcción de una excavación. La simulación es una herramienta muy relevante para el desarrollo de cualquier proyecto, puesto que permite acotar todos los posibles resultados y de esa manera disminuir el riesgo del proyecto.

La simulación consiste en la determinación de la tasa de avance de una TBM en la construcción de un túnel, siguiendo la metodología de (Piaggio, 2011). El perfil del túnel se divide en cuatro secciones de 400 m, en los cuales se presentan distintos tipos de litologías. La información de las variables de roca intacta se obtiene a partir de tres sondajes que abarcan 1.6 km de longitud de un total de 9 km de túnel. En base al modelo predictivo de rendimiento escogido y la estimación de los parámetros de la distribución normal (media y desviación estándar) para los cuatro tramos (ver Tabla 3.1), se realizan 10000 simulaciones para obtener un histograma con las velocidades de avance y la probabilidad acumulada de cada evento estocástico.

**Tabla 3.1. Parámetros de la distribución normal para cada tramo del túnel.**

		<b>0-400 m</b>	<b>400-800 m</b>	<b>800-1200 m</b>	<b>1200-1600 m</b>
UCS	<b>Media</b>	131,6	149,6	144,5	141,0
	<b>Desv E.</b>	47,7	39,2	30,6	46,0
BTS	<b>Media</b>	10,3	12,2	11,8	11,1
	<b>Desv E.</b>	1,6	2,2	1,9	1,9

Los parámetros y características de la TBM que se ingresan al modelo predictivo de rendimiento se obtuvieron a través de datos publicados en distintas fuentes bibliográficas de túneles construidos en condiciones similares a las del túnel en estudio (ver Tabla 3.2).

**Tabla 3.2: Parámetros de la TBM Escudo Doble.**

<b>Parámetros TBM</b>	
Cutter Tip Width [mm]	16
Cutter radius [mm]	241
Cut Spacing [mm]	72
Cutter numbers	32
Diameter [m]	4.5
RPM	3-5



Un aspecto muy relevante en este estudio es la información geológica del terreno en la cual se basa la construcción del proyecto. Para la simulación se cuenta con la siguiente información:

Durante los primeros 400 m se presenta un cuerpo intrusivo tipo pórfido stock de 200 m de ancho. El cuerpo muestra un color gris oscuro y posee variaciones texturales, en las zonas marginales tiene una textura porfídica con fenocristales de plagioclasa primaria, biotita y relictos de anfíboles, mientras que hacia el centro del cuerpo la textura es fanerítica. Además, el cuerpo se encuentra afectado por una alteración fílica, caracterizada por la asociación cuarzo-sericita-clorita (Cuadra, 1986). Su composición química es de carácter calcoalcalino, con un contenido de sílice que varía entre 63,6% y 64,2%.

Entre los 400 y 800 m al igual que los primeros 400 m se encuentra la misma información geológica. En menor cantidad se presentan brechas hidrotermales con distintas variedades de cementos y clastos de pórfidos dioríticos. Poseen fenocristales de plagioclasas, biotitas y en menor cantidad cuarzo, que conforman aproximadamente un 60% del total de la roca. Los pórfidos dioríticos se encuentran moderadamente alterados por una sucesión de alteraciones potásica, argílica y fílica (Cuadra, 1986).

Para el siguiente tramo entre los 800 y 1200 m predomina una brecha ígnea con clastos polimícticos de rocas intrusivas de composición félsica, máfica o de ambas, con matriz de biotita, turmalina, cuarzo, feldespato, clorita, anhidrita, yeso, apatito, calcopirita, bornita, pirita, rutilo y magnetita. La matriz se encuentra cortada por vetillas rellenas de anhidrita, cuarzo, biotita, feldespato y sulfuros (Cuadra, 1986).

Entre los 1200 y 1600 m se presenta la misma brecha ígnea que en el tramo anterior y sumado a ello un pórfido tipo stock al igual que en el primer tramo.

La simulación considera una utilización promedio de la TBM típica de terreno correspondiente a un 30% (juicio experto) la cual puede variar dependiendo de las situaciones que se puedan presentar durante cada operación y 3 turnos de 8 horas.

El código de la simulación se escribe en el lenguaje Python y para ello se utiliza la plataforma colaborativa de Jupyter Notebook.

### **3.5 Análisis de los resultados y discusión**

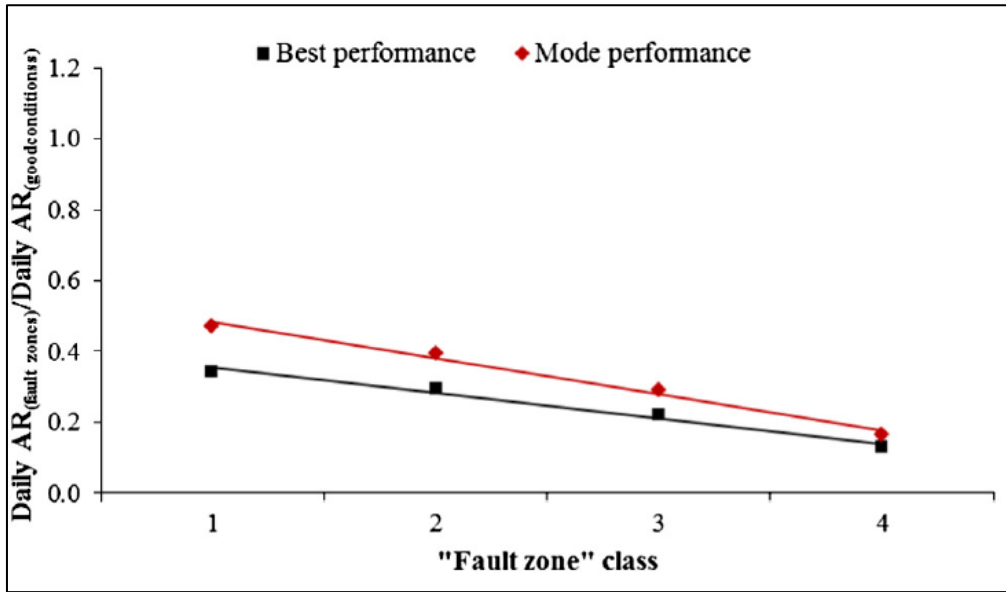
El análisis de los resultados se centra en la simulación Monte Carlo y la discusión sobre el uso de TBM en minería masiva de Chile, en base a los desafíos geológicos/geotécnicos, profundidad, radios de giro, dimensiones e inclinaciones de los túneles construidos con excavación mecanizada.

La simulación se enfoca en los resultados del rendimiento de una TBM Doble escudo en la construcción de un túnel que se encuentra a 1700 m de profundidad, perteneciente a una mina subterránea de Chile. Para su análisis se construye un perfil de la resistencia a la compresión simple a lo largo del túnel, para estudiar la variabilidad de este parámetro y de esa manera conocer la implicancia en el desgaste de los discos cortadores.

Para estimar la velocidad de avance de la TBM obtenida de los histogramas arrojados por la simulación, se considera una probabilidad acumulada del 50%, con la finalidad de asegurar con mayor probabilidad la certeza del valor buscado. Una vez estimada la velocidad de avance y el rendimiento de la TBM, se incorpora el efecto de posibles zonas de fallas que podrían presentarse durante la construcción del túnel. Este fenómeno repercutirá directamente en el desempeño de la TBM, disminuyendo los rendimientos obtenidos de la simulación Monte Carlo. Debido a que el modelo CSM no considera el efecto de las discontinuidades o fallas, es necesario agregar información con respecto al macizo rocoso, con la finalidad de obtener resultados con mayor exactitud.

La información que se utiliza para incorporar este fenómeno se obtiene de (Paltrinieri, 2015). En su estudio analiza la disminución de los parámetros principales del rendimiento de una TBM (RPM, PR, AR), en base a los desafíos que implican las zonas de fallas o macizos rocosos muy fracturados. Para ello, utilizó una base de datos de varios túneles a gran profundidad y que han sido construidos con TBMs tipo Gripper, Escudo Simple o Doble Escudo.

La Ilustración 3.2 revela el gráfico construido por (Paltrinieri, 2015), donde se muestra la disminución del rendimiento de una TBM Gripper con respecto a las distintas zonas de fallas. La gráfica de color rojo representa el rendimiento más frecuente y de color negro los mejores rendimientos alcanzados por la TBM.



**Ilustración 3.2. Disminución de la tasa de avance con respecto a los 4 tipos de fallas, (Paltrinieri, 2015).**

Los porcentajes de reducción obtenidos por (Paltrinieri, 2015) con respecto al avance diario de la TBM Gripper se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Reducción porcentual para cada tipo de zona de falla, que experimenta una TBM Gripper, (Paltrinieri, 2015).**

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Reducción porcentual del avance diario	10-70 %	10-60%	10-50%	10-40%

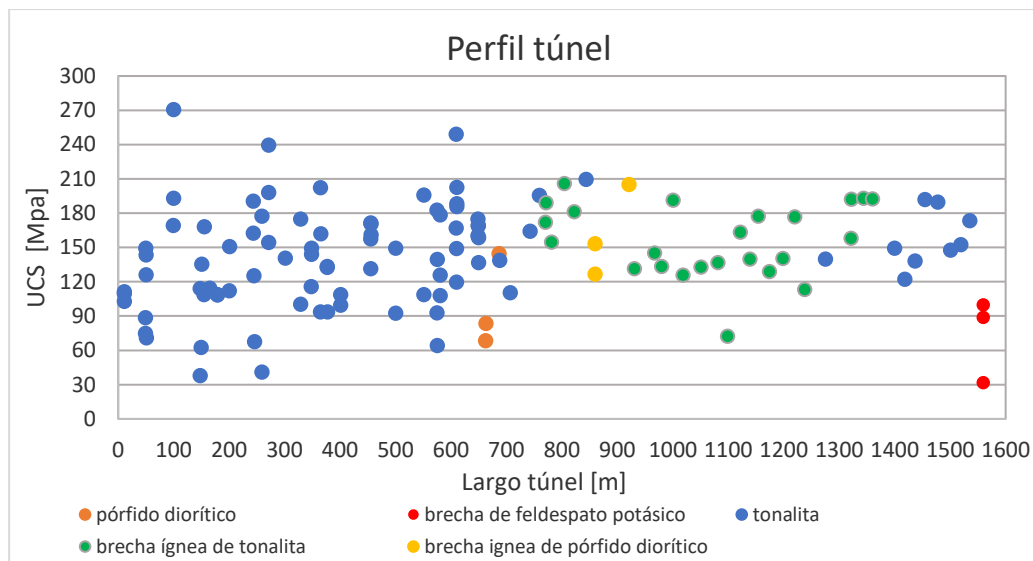
Los porcentajes de reducción de cada zona de falla (estudiados en el capítulo 2.3.5) se aplicarán a cada uno de los resultados obtenidos de la simulación Monte Carlo. Se considera el peor caso, es decir, se selecciona el mayor porcentaje de reducción del rendimiento diario de cada zona.

Finalmente se realiza una discusión sobre el uso de TBM en minería masiva, considerando aspectos de diseño (evaluación de los radios de giro, relleno del piso de la sección del túnel para el tránsito de vehículos motorizados, sistemas de acarreo para pendientes altas), desafíos geomecánicos y proyectos a futuro.

## 4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en base a la metodología descrita en el capítulo anterior. Principalmente los resultados para esta memoria corresponden a la simulación de la construcción de un túnel de 4.5 m de diámetro de 1.6 km de longitud (de un total de 9 km) a 1700 m de profundidad con una TBM Escudo doble.

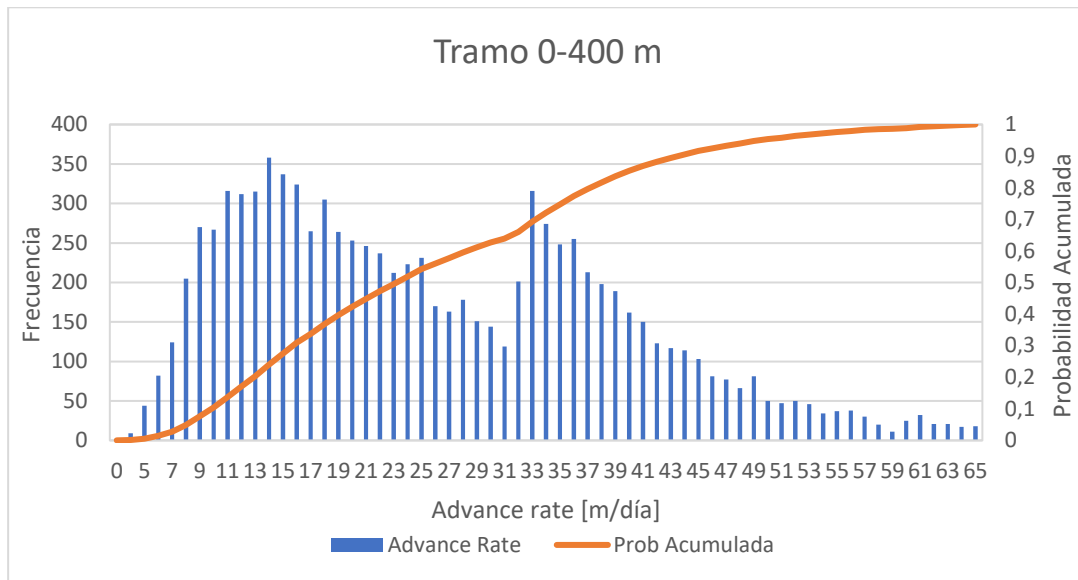
El Gráfico 4.1 revela la distribución de la resistencia a la compresión simple a lo largo de los 1.6 km de longitud del túnel. Se puede apreciar que en promedio el valor de UCS se sitúa en torno a los 140 MPa, cuyo valor se encuentra cercano a la mediana de 147 MPa. Con respecto a la desviación estándar esta tiene un valor de 74.7 MPa, demostrando los grandes cambios que tiene UCS a lo largo del túnel tal como se observa en las distintas litologías (representadas en colores).



**Gráfico 4.1. Distribución de la resistencia a la compresión simple en base al largo del túnel de la tabla 3.1, elaboración propia.**

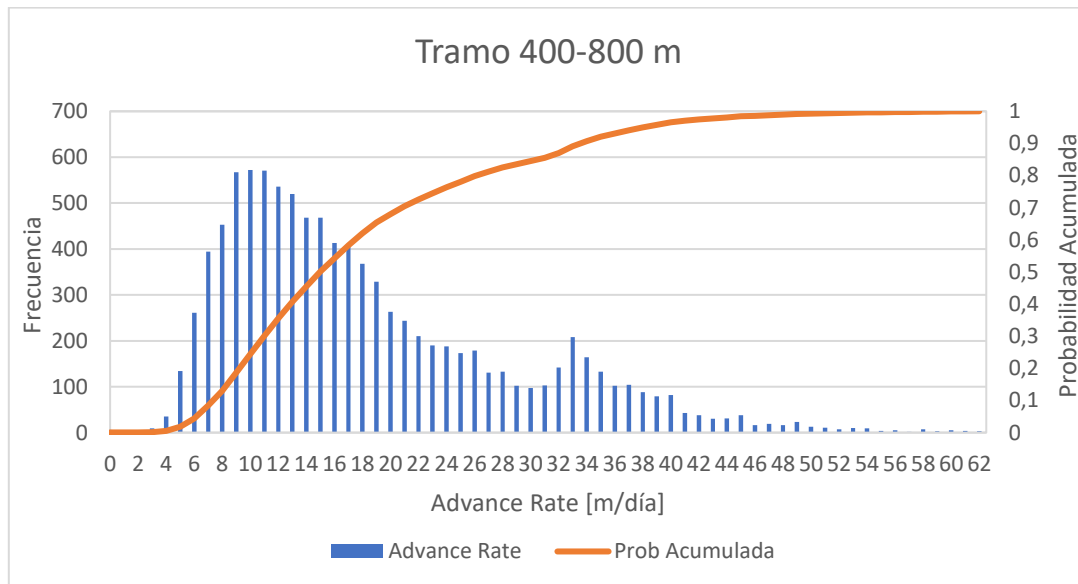
La simulación arroja un gráfico para cada sección del túnel, donde se muestra el avance de la TBM y la probabilidad acumulada para cada uno de los eventos estocásticos. Para una mejor comprensión de los resultados, se construye una tabla con todos los resultados para cada tramo (ver Tabla 4.1).

Para los primeros 400 m del túnel se tiene que con un 50 % de probabilidad la TBM avanza 23 m/día en la litología tonalita, esto se puede visualizar en el Gráfico 4.2.



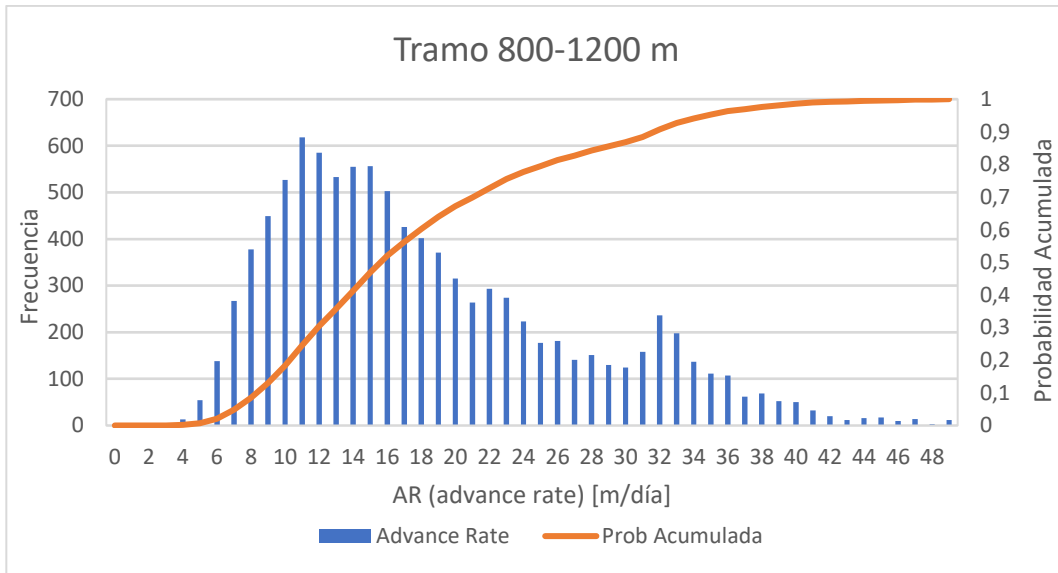
**Gráfico 4.2. Histograma del avance de la TBM con respecto a los primeros 400 m, Elaboración propia.**

Para el caso de la brecha ígnea de tonalita junto a la brecha ígnea de pórfido diorítico y la tonalita que se encuentran en el tramo dos, se observa un avance de 15 m/día con un 50 % de probabilidad tal como se aprecia en el Gráfico 4.3.



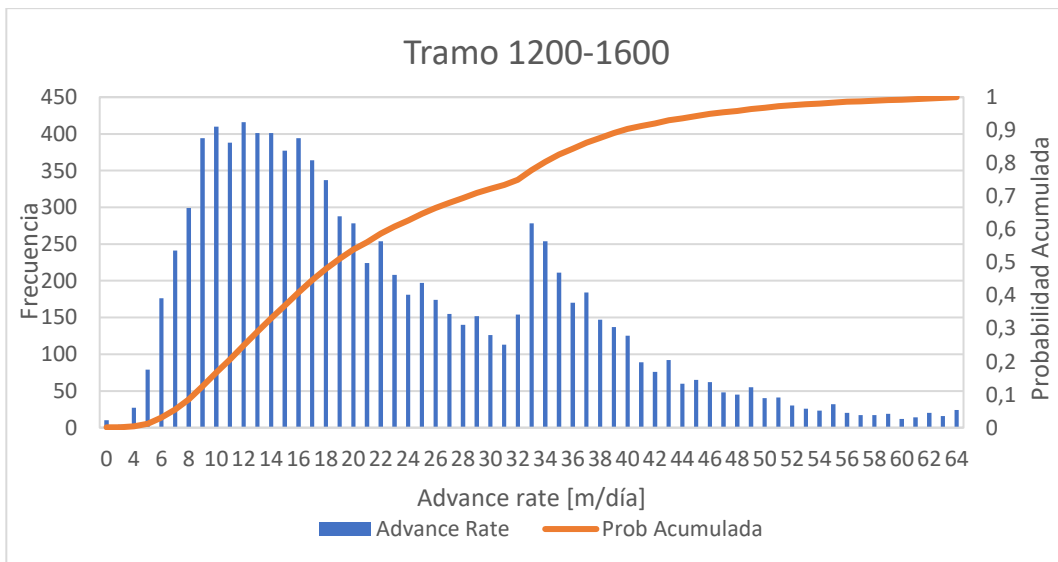
**Gráfico 4.3. Resultados de la simulación Monte Carlo para el tramo entre los 400 y 800 m del túnel, elaboración propia.**

Para el tercer tramo compuestos principalmente por brecha ígnea de tonalita, el avance obtenido es de 15 m/día con un 50% de probabilidad tal como se aprecia en el Gráfico 4.4.



**Gráfico 4.4. Resultados de la simulación Monte Carlo para el tramo entre los 800 y 1200 m del túnel, elaboración propia.**

Finalmente, para el último tramo se obtiene un avance de 19 m/día con un 50% probabilidad, esto se puede visualizar en el Gráfico 4.5.



**Gráfico 4.5. Resultados de la simulación Monte Carlo para el tramo entre los 1200 y 1600 m del túnel, elaboración propia.**

En resumen, los resultados para los cuatro tramos se pueden visualizar en la Tabla 4.1, donde los mejores resultados se obtienen en el primer y último tramo del túnel. Es importante mencionar que cada resultado tiene asociada una desviación estándar, por lo cual, el valor puede variar en base a esta variable.

**Tabla 4.1. Resultados del avance de la TBM para los cuatro tramos que componen los 1.6 km del túnel estudiado, elaboración propia.**

<b>Parámetro</b>	<b>0-400 m</b>	<b>400-800 m</b>	<b>800-1200 m</b>	<b>1200-1600 m</b>
<b>AR [m/día]</b>	23 ± 17	15 ± 11	15 ± 9	19 ± 15

Considerando el porcentaje de reducción más alto de cada zona de falla y aplicando estos resultados a los cuatro tramos de la Tabla 4.1, se obtienen los siguientes resultados (ver Tabla 4.2):

**Tabla 4.2. Rendimiento de la TBM para los cuatro tramos del túnel, considerando las distintas posibles zonas de fallas.**

<b>AR [m/día]</b>	<b>Zona 1</b>	<b>Zona 2</b>	<b>Zona 3</b>	<b>Zona 4</b>
<b>Tramo 1</b>	7 ± 5	9 ± 7	12 ± 9	14 ± 10
<b>Tramo 2</b>	5 ± 3	6 ± 4	8 ± 6	9 ± 7
<b>Tramo 3</b>	5 ± 3	6 ± 4	8 ± 5	9 ± 5
<b>Tramo 4</b>	6 ± 5	8 ± 6	10 ± 8	11 ± 9

Los resultados muestran una clara disminución producto de las posibles zonas de fallas que podrían afectar el desempeño normal de la TBM. Es importante este resultado, ya que acerca el rendimiento de la tuneladora a la realidad.

# 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo se divide en dos partes principales. En primera instancia se analizarán los resultados de la simulación Monte Carlo, para posteriormente realizar un análisis y discusión en base a los resultados obtenidos y la revisión bibliográfica.

## 5.1 Modelos predictivos de rendimiento

En base a los modelos estudiados en el capítulo 2.5 se puede discernir que Q TBM es un modelo muy completo que engloba muchas variables del macizo rocoso, pero que en la industria no se utiliza. Su gran desventaja son los parámetros de entrada, puesto que son muy difíciles de obtener. En base a lo mencionado anteriormente, este modelo es complejo de aplicar en el día a día, ya que implica un desafío muy grande acceder a todos los parámetros.

El modelo RME es un modelo muy completo y también se ha aplicado a muchos proyectos que buscan conocer la tasa de avance de una TBM, pero este modelo no considera el estudio de los discos cortadores, empuje y torque necesario para el funcionamiento de la TBM. Conocer estas variables es de gran importancia para el desarrollo del proyecto, ya que el operador de la TBM debe tener en conocimiento en qué momento cambiar el empuje de la TBM y modificar muchas variables a la misma vez. Al igual que Q TBM se requiere un conocimiento amplio de los parámetros del macizo rocoso y tal como se mencionó en el alcance de este estudio, sólo se tiene en conocimiento de los principales parámetros de roca intacta, pero siendo el modelo CSM uno de los más utilizados en la industria, lo cual respalda el uso de éste en el presente estudio.

La elaboración y propuesta de ambos modelos (Q TBM y RME) se basa en la construcción de varios kilómetros de túneles, que a diferencia del modelo CSM, éste se genera a partir de ensayos a escala de laboratorio realizado a distintos tipos de roca, donde las fuerzas normales y de rodadura que se calculan en base a los parámetros de la TBM (diseño de los discos cortadores, espaciamiento entre discos, RPM, penetración básica). Muchas veces en los proyectos se asumen condiciones de terreno que pueden ser totalmente distintas, por lo cual se recomienda siempre tener la información detallada del proyecto que se elaborará



y en base a ello generar un estudio con respaldo bibliográfico ajustado a las condiciones especiales de dicho proyecto.

## 5.2 Simulación

Para la realización de la simulación Monte Carlo se escogió el modelo de Colorado School of Mines, en base a dos criterios. El Primer criterio, se basa en el gran uso que tiene en la industria, por lo cual está probado en el mercado y funciona de buena manera. El hecho de que sea muy utilizado en el desarrollo de proyectos, lo hace un método más realista y confiable. En segundo lugar, los parámetros que considera en su evaluación son de fácil acceso, como la resistencia a la compresión uniaxial y resistencia a la tracción. Este modelo considera dos parámetros de roca intacta, pero también se debe conocer el empuje, torque y potencia de la TBM en terreno, para poder realizar las iteraciones y de esa manera encontrar la penetración máxima. Se utilizaron los siguientes valores de una TBM doble escudo (ver Tabla 5.1), en condiciones similares a las presentadas en este estudio y considerando los mismos parámetros de la Tabla 3.2 revisada en metodología.

**Tabla 5.1. Valores de empuje, torque y potencia correspondientes a una TBM doble escudo operando en terreno.**

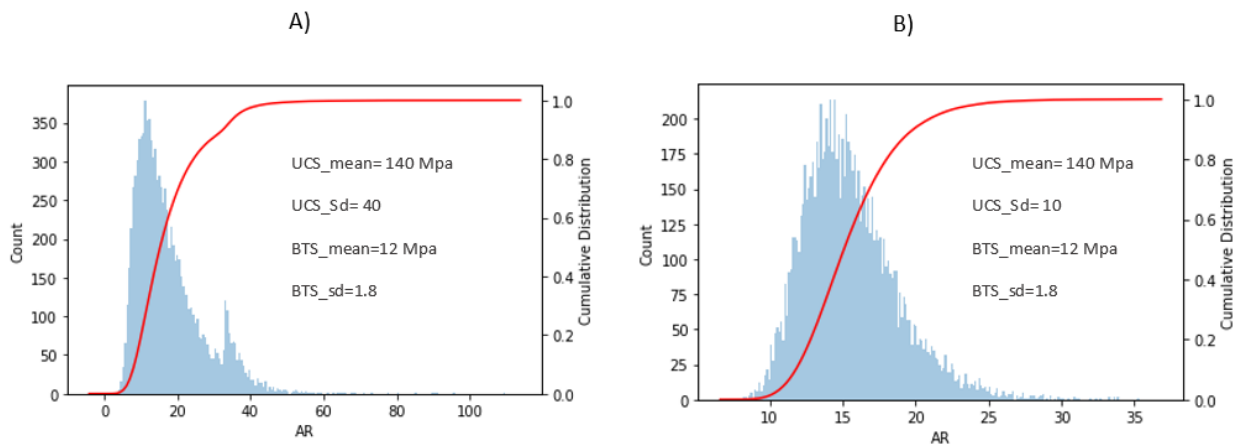
<b>Empuje [KN]</b>	9240
<b>Torque [KN-m]</b>	2612
<b>Potencia [Kw]</b>	1575

Cabe señalar que estos valores son los obtenidos en terreno de una TBM doble escudo en condiciones similares a las del túnel en estudio, que permiten realizar la simulación Monte Carlo de 1.6 km de longitud del túnel. Estos valores son variables y dependen de las condiciones del macizo rocoso, pero en este caso se asume y considera el promedio de cada uno de los parámetros en el rango de 1.6 km. Es esencial contar con los valores de cada parámetro en cada avance que realiza la TBM, con el objetivo de conocer con precisión y exactitud estos parámetros a lo largo del túnel y la relación que tienen éstos con la velocidad de corte, tal como se realizó en el trabajo de (Piaggio, 2011).

Es necesario estudiar la variabilidad de la resistencia a la compresión uniaxial que se obtuvo en el perfil longitudinal del túnel. Se debe cuantificar la variación de este parámetro, debido al cambio en el desgaste que pueden llegar a experimentar los discos cortadores en ciertos sectores del túnel. Si se llega a presentar este comportamiento, donde los discos cortadores sufren desgastes en ciertos sectores del túnel, entonces el avance de la TBM se verá afectado, puesto que el empuje no

será el mismo en toda la sección del túnel, obligando a los operadores a cambiar los discos en ciertos tramos, cuya operación repercutirá en la detención del avance de la TBM. Es necesario conocer en detalle cada uno de los cambios en el UCS, ya sea por su variabilidad o valores altos. En este caso el mayor valor que alcanza el UCS es de 270 MPa, requiriendo mayor torque y empuje por parte de la TBM para poder batir la fractura a la tracción. La desviación estándar tiene un valor de 75 MPa, lo que indica una alta variabilidad del UCS a lo largo del túnel, por lo tanto, implicará una variación en el desgaste de los discos cortadores durante el desarrollo de la construcción.

Debido a la gran variación del UCS en el tramo del túnel simulado, es posible observar en los cuatro tramos como resultado de la simulación, que existe una bimodalidad en el avance de la TBM (puede ser observada en los gráficos 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5). Esta segunda moda se presenta entre los 32 a 35 m/día reiterativamente en los cuatro tramos, lo cual a primera vista llama mucho la atención. Para poder encontrar respuesta a dicho comportamiento, se realiza un análisis de sensibilidad a las variables que más impactan en la determinación de la penetración máxima, la cual en base al modelo CSM, es la que permite determinar la velocidad de corte y posteriormente la tasa de avance de la TBM. Dicho esto, la variable que más impacto tiene corresponde al UCS, puesto que al calcular la fuerza total para cada disco cortador (fuerza base del modelo), todas las otras fuerzas se ven afectadas implícitamente. El motivo principal de la existencia de los dos puntos de mayor frecuencia donde la TBM tiene su máximo desempeño se debe a la gran variación que tiene el UCS en el trazado del túnel. A modo de ejemplo y para justificar lo recién mencionado, a continuación, se muestran dos casos simulados (utilizando el mismo modelo CSM y los mismos parámetros de la TBM en estudio), donde existe una variación en el UCS. El primer caso corresponde al gráfico A, donde se puede visualizar el mismo fenómeno que ocurre con los resultados de la sección 4, donde el UCS promedio es de 140 Mpa y la desviación estándar de 40. Para el segundo caso, grafico B, el UCS promedio toma el mismo valor que el caso A,



**Ilustración 5.1. Simulación de dos casos, para justificar el fenómeno bimodalidad que se presenta en los resultados del túnel simulado producto de la variación del UCS.**

pero con la diferencia que la desviación estándar para este caso es de 10. Tal como se puede observar, el caso B presenta un comportamiento completamente gaussiano, donde el máximo se obtiene entre los 13 a 15 m/día.

Es importante analizar este fenómeno, ya que dependiendo de los valores del UCS la TBM podría tener diferentes desempeños. Cabe mencionar que existen muchas otras variables del macizo rocoso que afectan directamente el desempeño de la TBM, pero con respecto al modelo CSM, el UCS es la variable principal dentro del presente estudio.

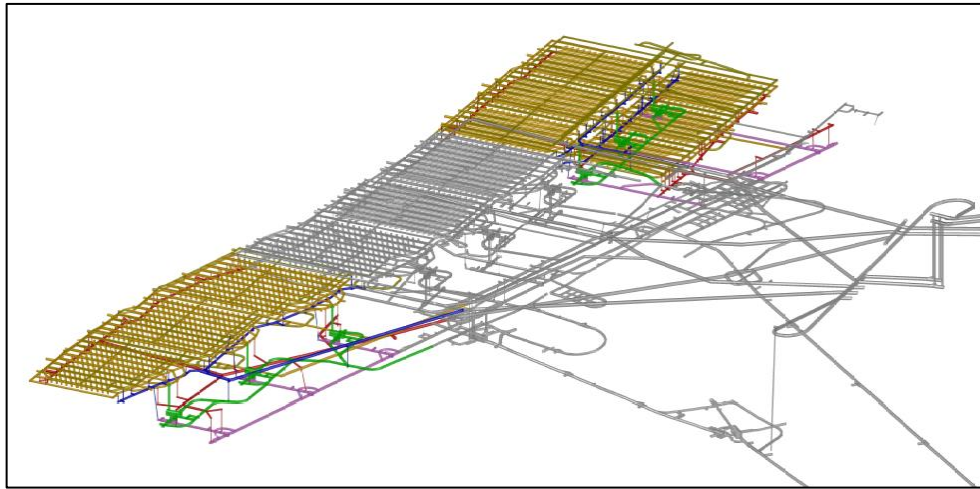
Con respecto a la velocidad de avance, se puede concluir que los resultados arrojados por la simulación se encuentran dentro del rango de las tasas de avance promedio con respecto a los proyectos revisados en el capítulo 2.2 y más específicamente los casos de la mina Stillwater junto con San Manuel.

Cada resultado tiene asociado una incertidumbre por la variación de la resistencia a la compresión y tracción que viene inserta en la variabilidad geotécnica de estas variables. La finalidad de la búsqueda de varios proyectos que utilizan TBM para la construcción de túneles, es asegurar que los resultados esperados se encuentran dentro de un rango confiable y además generar una discusión del uso de la excavación mecanizada en minería masiva de Chile.

### **5.2.1 Chuquicamata Subterráneo**

Chuquicamata Subterráneo es uno de los proyectos más grandes que tiene Codelco hoy en día y que aún se encuentra en desarrollo. Una vez que entre en producción, si alcanza las 140 tpd será la mina subterránea más productiva del mundo.

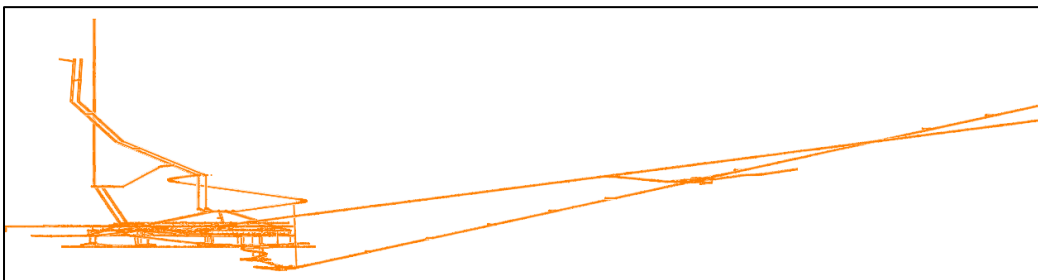
Dada las dimensiones de la mina, se presenta la posibilidad de construir los túneles principales del nivel 1 y nivel 2 con TBM. La Ilustración 5.2 revela las grandes dimensiones del diseño, en conjunto con la gran cantidad de túneles que se deben construir.



**Ilustración 5.2. Vista de perfil del Layout del proyecto Chuquicamata Subterráneo, Práctica profesional III.**

Debido a que los túneles de ventilación y acceso principal ya se construyeron, se propone la opción del uso de TBM para el nivel 2, donde se pueden desarrollar los túneles de acceso y transporte de mineral, así como también otros túneles que son necesarios al interior de la mina, como por ejemplo el túnel de la correa colectora Norte y Sur, que recopila todo el mineral proveniente de los chancadores de cada Macrobloque.

La pendiente del túnel de la correa Overland es de 15% (ver Ilustración 5.3), por lo cual se encuentra en el límite para la construcción con TBM, siendo factible dada las grandes dimensiones de los túneles (diámetro y longitud).



**Ilustración 5.3. Vista lateral del diseño de Chuquicamata Subterráneo Nivel I, Práctica profesional III.**

Es importante considerar el ajuste entre el diseño minero y la TBM, ya que, si se considera desde la etapa inicial de la planificación, el beneficio final puede ser muy satisfactorio dado los buenos rendimientos de avance que puede llegar a tener una TBM.

Como se pudo apreciar existe la tecnología necesaria para la construcción de túneles con TBM a gran profundidad y con terrenos desafiantes. Proyectos de grandes dimensiones como PMCHS, El Teniente y el paso de Minera Escondida a Subterránea son factibles de construir en un mediano plazo con excavación mecanizada por los altos índices de seguridad y rendimiento que pueden llegar alcanzar las TBMs.

Los desafíos geomecánicos más comunes que ocurren en minería subterránea están relacionados con los estallidos de roca, filtración de agua, arcillas, fallas geológicas y terrenos blocosos, por lo cual se recomienda seguir los pasos descritos en el capítulo 2.4, para cada una de las problemáticas que pudieran existir, con el objetivo de adelantarse al desafío y poder enfrentarlo de manera óptima. La calidad de la información obtenida de terreno es muy relevante para este tipo de desafíos, ya que permitirá elaborar una planificación de la construcción con mayor exactitud sobre las zonas de fallas geológicas, cambios litológicos, filtración de agua, zonas de altos esfuerzos, Abrasividad, terrenos débiles y blocosos.

## 6 CONCLUSIONES

La TBM es una tecnología muy factible de aplicar a la minería si se realiza un estudio detallado del terreno, ya que de esa manera se puede conocer cada una de las propiedades importantes del macizo rocoso, como la dureza de la roca, esfuerzos, calidad geotécnica, posibles zonas de falla, aguas subterráneas, arcillas y profundidad. Además del estudio detallado de terreno, se debe considerar el diseño de la mina, para saber con exactitud los radios de giro que la TBM tiene permitido, inclinación de los túneles, la ventilación requerida y método de acarreo para extraer el material excavado. Con toda esa información se puede encontrar el tipo de TBM y sistema de fortificación más adecuado al proyecto, es decir, es un conjunto de información que se debe tener al comienzo de cualquier proyecto, con el objetivo de tener la mayor certeza de que la TBM es el método más rápido y seguro para construir una excavación.

La aplicación de máquinas TBMs a proyectos mineros requiere de una cuidadosa evaluación de un número importante de variables y consideraciones, algunas de las cuales son técnicas y otras no. Las lecciones claves que pueden ser recogidas de proyectos mineros anteriores en donde fueron utilizadas máquinas TBMs, establecen que cada proyecto de túneles y condiciones de terreno son únicas y particulares en términos geológicos, de acceso, cobertura de roca, experiencia de los contratistas y requerimientos específicos para el término del proyecto.

La industria minera se ha visto profundamente afectada por la situación actual con precios bajos de los metales y una demanda reducida. El mundo continuará consumiendo energía y recursos minerales, es por esto, que se necesitan métodos mineros cada vez más eficientes y seguros para que una mina sea un negocio exitoso y rentable. Las TBMs pueden excavar a velocidades avanzadas y con gran seguridad, sin embargo, las TBMs implican gran capital de inversión y largos plazos de entrega de la TBM. Para poder implementarse con éxito con todas sus ventajas, esta tecnología debe considerarse desde el principio en la planificación de la mina.

Se pueden concebir, diseñar y poner en marcha TBMs de minería muy especiales, sin embargo, las aplicaciones más exitosas en minería han sido con tecnología TBM, que fueron probadas exitosamente en el sector civil, pero especialmente adaptadas a las necesidades de la mina.

Con respecto al modelo CSM, se puede concluir que es un modelo sencillo de utilizar, considera tanto aspectos de terreno como de diseño de la TBM, puesto que, para poder obtener la velocidad de corte y tasa de avance, se iteró en base a fuerzas de empuje y torque que provienen de terreno en condiciones similares a las que se realizó la simulación. La incertidumbre principal radica en los valores de la resistencia a la compresión simple y resistencia a la tracción que son los parámetros de roca intacta que se consideran para el modelo. Es por ese motivo que, para cubrir la incertidumbre, se consideraron las 10000 simulaciones y las funciones de distribución de probabilidad, con el objetivo principal de disminuir el riesgo y aumentar la certeza del valor buscado. El rendimiento que se obtuvo de la TBM en los 1.6 km, se encuentra dentro del rango esperado. Al comparar este resultado con los proyectos que han sido estudiados en esta memoria, se puede verificar que el rendimiento se asemeja al avance real de una TBM en terreno, lo cual demuestra que el modelo CSM pueden ser utilizado en una ingeniería de detalle.

## **6.1 RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar un estudio más profundo sobre las condiciones de terreno, como la calidad del macizo rocoso, condiciones de agua, caracterización geológica y estructural del túnel a construir, con el objetivo de utilizar otros modelos de predicción de rendimientos como Norwegian University of Science and Technology at Trondheim Prediction Model (NTNU), el cual está basado en la construcción de más de 230 km de túneles y que considera como factor relevante las fracturas presentes en el macizo rocoso. La finalidad de esta propuesta es comparar las tasas de avance arrojadas por cada modelo y confirmar con mayor certeza cual sería el rendimiento de una TBM a grandes profundidades con rocas de alta dureza.

La idea principal es simular el mismo túnel con distintos modelos predictivos de rendimiento, con el objetivo de acotar el rango de los resultados. Es importante incluir tanto modelos semiteóricos como empíricos, puesto que de esa forma se cubrirá un mayor espectro de variables de terreno y diseño de la TBM.

El modelo CSM modificado propuesto por (Rostami, 2008), considera el efecto de las discontinuidades presentes en el macizo rocoso, lo cual lo hace un modelo más robusto y que considera aspectos de terreno. Sería una muy buena alternativa considerar el modelo CSM modificado y realizar una nueva simulación para comparar el resultado de este modelo con respecto a los demás. Dentro de la incorporación del modelo CSM es importante conocer el empuje, torque y potencia de la TBM en terreno, a lo largo de toda la longitud del túnel para tener el detalle del comportamiento de la TBM y su relación con la velocidad de corte respecto de los parámetros mencionados, ya que de esa forma la simulación entregará resultados más exactos y cercanos a la realidad.

Un estudio detallado del túnel permitirá anticipar todos los riesgos que puedan existir durante la construcción del túnel, ya que muchas veces no se considera la cantidad de tiempo que puede estar detenida la TBM por problemas que no fueron estipulados con anterioridad.

Finalmente se recomienda considerar la curva de aprendizaje para los operadores de la TBM y especialmente para el contratista que se encuentra a cargo de la construcción. En cualquier tipo de proyecto es importante considerar ese tiempo en la planificación, ya que de esa forma se pueden cumplir los plazos propuestos, sobre todo en el mundo de la minería, donde se busca la extracción rápida del mineral, con el objetivo de aumentar el valor del negocio y recuperar las inversiones en el menor tiempo posible.



# 7 BIBLIOGRAFÍA

- A. Palmstrom., E. Broch. (2006). *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system Arild Palmstrom, Einar Broch.*
- Barton. (2000, 2018). Tunnels and Tunnelling International . *Employing the Q tbm prognosis model.*, 20-23.
- Bedi, A., & Harrison, J. . (2012). Dealing with epistemic uncertainty in fractured rock masses. *SRM International Symposium-EUROCK 2012.*
- Beinlich, E. (1970). Mechanical raise and tunnel-boring experience at the Mather Mine. Rapid Excavation-Problems and Progress. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 215-223.
- Bieniawski. (2006). Rock Mass Excavability Index.
- Bieniawski, C. G. (2008). New applications of the excavability index for selection of TBM types and. *World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety - India.*
- Bruland. (1998). TBM Applications – Pre-investigations and prediction for TBM Tunnelling. *The NTNU model.*
- C. Zhang, N. Liu, W. Chu. (2016). Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower station. *Journal Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 499-512.
- C. Zhang, N. Liu, W. Chu. (2016). Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower stationKey technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower station. *Journal of rock mechanics and geotechnical Engineering* , 499-512.
- Chapple, P. (s.f.). *Construcción minera y energía.* Obtenido de <https://www.construccionminera.cl/los-bronces-tuneladora-en-tunel-sur/#.Xo0VpYhKjIU>
- Christian, J. T. (2004). Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing? *ournal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(10), 985-1003.
- Cuadra, P. (1986). Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas. *Revista Geológica de Chile*, N° 27, 3-26.
- D. Brox, G.Piaggio. (2013). Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros. *Construcción Minera n° 3.*

- D. Ofiara, G. Watson. (2016). The next generation of TBMs for mining application. *TBMsinminingWTC2016*.
- Delisio, A., Zhao, J., Einstein, HH. (2013). Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Löttschberg Base Tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 33, 131-142.
- Ehrbar, H. (2008). Gotthard base tunnel, Switzerland experiences with different tunnelling method. *2º Congreso Brasileiro de túneles y estructuras subterráneas*.
- Gong, Q., M. Yin, L., J., Wu, S.Y., Zhao, J., Ting, Y. (2012). Rock Burst and Slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II Hydropower Station. *Eng. Geol.*, 124, 98-108.
- Haldar, A., & Mahadevan, S. (2000). Probability, reliability and statistical method in engineering design.
- Harr, M. E. (1987). Reliability-based design in civil engineering.
- Herrenknecht. (15 de Octubre de 2010). *Herrenknecht.com*. Obtenido de <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/gotthard-base-tunnel/>
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). Support of underground excavations in hard rock.
- Home, L. (2009). Improving advance rates of TBMs in adverse ground conditions . *Geomech. Tunn.*, 2(2), 157-167.
- Kim, K. &. (1995). Probabilistic approaches to estimating variation in the mechanical properties of rock masses. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 111-120.
- Klein. (2001). An Approach to the classification of weak rock for tunnel projects in: Hansmire, W.H. Gowing I.M. (Eds), Rapid Excavation and Tunneling Conference. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 793-805.
- M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir. (2001). Application of Tunnel boring machines in underground mine development. *Excavation Engineering & Earth mechanics Institute, Department of mining Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA*.
- Ofiara, D. (2017). *Robbins*. Obtenido de <https://www.therobbinscompany.com/tbm-equipment-mining-industry/>
- P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles. (2012). La construcción del túnel minero "Sur, Los Bronces" en los Andes, con TBM Doble Escudo. *Revista de Obras públicas*, nº 3.535.

- Paltrinieri, E. (2015). *Analysis of TBM tunnelling performance in faulted and highly fractured rocks*. Switzerland.
- Piaggio, G. (2011). *Safety Gallery of Frejus Tunnel Project*.
- Q. Gong, L. Yin, H. MA, J. Zhao. (2016). TBM tunnelling under adverse geological conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 4-17.
- Q. Gong., L. Yin., H. Ma., J. Zhao. ( 2016). *TBM tunnelling under adverse geological conditions*.
- R. Gratias, C. Allan, D. Willis. (2016). The next level: why deeper is better for TBMs in mining. *TBMsinMining\_WTC2016*.
- Ramoni, M. A. (2010). Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunn Undergr. Space Technol.*, 25. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 139-157.
- Rostami, O. (1993, 2008, 2013). CSM model. *A new model for performance prediction of hard rock TBMs*, Chapter 50.
- Sari, M. (2009). The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 613-626.
- Sari, M., Karpuz, C., & Ayday, C. (2010). Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation. *Ankara andesites. Computers & Geosciences*, 36(7), 959-969.
- Schubert, W. F. (2006). Tunnelling in fault zones- state of the art. In: Lee, I.-M., Yoo, C., You, K. (Eds), ITA-AITES World Tunnel Congress and 32nd ITA General Assembly, Seoul, South Korea. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*.
- SRK Consulting. (s.f.). Construcción de túneles con tuneladoras TBM Experiencias, desafíos y oportunidades en Chile.
- Strabag. (s.f.). *Túnel - Alto Maipo, Proyecto Hidroeléctrico, San José de Maipo, CHILE*. Obtenido de [https://www.strabag.cl/databases/internet/\\_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=F33735251E058693C125814E00317C14](https://www.strabag.cl/databases/internet/_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=F33735251E058693C125814E00317C14)
- W. Shiyong, X.Feng, L. Ribeiro e Sousa. (2010). Jinping II mega Hydropower project, China. *Conference on Hydroelectric Schemes in Portugal*.
- Winston H. Diaz, L. (2019). Simposio Internacional Excavación mecánica de túneles TBM-TBS. *Proyecto Túnel Olmos*. Santiago.
- Zheng. (2016). Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*.

# 8 ANEXO

## 8.1 ANEXO A: RESUMEN EXTENDIDO

### DESAFÍOS GEOMECÁNICOS PARA EL USO DE TBM EN MINERÍA MASIVA DE CHILE

Camilo Rodriguez Toro<sup>1</sup>, Luis Felipe Orellana<sup>2</sup>, Giorgio Piaggio<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM - Universidad de Chile

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM - Universidad de Chile

<sup>3</sup>Gerente de Construcción Túneles y Obras Civiles – Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo

#### **Contacto:**

Camilo Rodriguez Toro ([camilorodriguez@ug.uchile.cl](mailto:camilorodriguez@ug.uchile.cl))

#### **Ideas Claves:**

- Desafíos geomecánicos para TBM en minería
- Simulación Monte Carlo
- Uso de TBM en minería masiva de Chile

## **Resumen**

El presente trabajo se focaliza en la investigación de tuneladoras que se utilizan en la construcción de túneles a gran profundidad, altos esfuerzos y roca dura. Estas condiciones desafiantes, se estudian detalladamente en conjunto con proyectos que a lo largo de la historia han utilizado Tunnel Boring Machine (TBM) en el desarrollo de sus proyectos. El objetivo principal de la memoria es estudiar las condiciones geomecánicas y de operación para el uso de TBM en minería masiva de Chile.

En primer lugar, se realiza un estudio bibliográfico de proyectos que han utilizado TBM para la construcción de túneles a gran profundidad, con filtración de agua, estallidos de roca, terrenos blocosos, entre otras variables que se analizan en detalle junto a todos los desafíos geomecánicos que ocurrieron en cada uno de los proyectos en estudio.

En segundo lugar, se analiza la propuesta de utilizar la TBM como una opción viable para la construcción de túneles en minería masiva de Chile. Este análisis, se centra en las variables de diseño de los túneles (largo, diámetro, radio de curvatura, pendiente) para el uso de una TBM en un proyecto minero.

La última parte de este trabajo considera la estimación del rendimiento de una TBM doble escudo para la construcción de un túnel en minería subterránea, utilizando la información de 3 sondajes que cubren 1.6 km de un total de 9 km de del túnel. Para la elaboración de la estimación de rendimiento, se realiza una simulación Monte Carlo que considera 10000 iteraciones, utilizando el modelo semiteórico de Colorado School of Mines.

Como resultado de la simulación se puede inferir que el rendimiento de la TBM doble escudo se encuentra dentro del rango esperado de rendimientos que puede tener esta tecnología en la construcción de túneles en minería.

Es importante que cualquier proyecto minero que considere la posibilidad del uso de TBM en el desarrollo de sus túneles, deba incluir en la planificación, los túneles que podrían ser construidos en términos de las dimensiones y diseño minero, ya que de esa manera se contará con el tiempo y detalle necesario para la elección correcta del método de construcción.

Finalmente, la aplicación de máquinas TBMs a proyectos mineros requiere de una cuidadosa evaluación de un sin fin de variables y consideraciones, algunas de las cuales son técnicas y otras no. El aprendizaje tomado de proyectos mineros anteriores en donde fueron utilizadas máquinas TBMs, establecen que cada proyecto de túneles y condiciones de terreno son únicas y particulares en términos geológicos, de acceso, cobertura de roca, experiencia de los contratistas y requerimientos específicos para el término del proyecto, por lo cual nunca se debe generalizar los resultados de un proyecto para después utilizarlo en otro.

## **Abstract**

This work focuses on the investigation of tunnel boring machines that are used in the construction of tunnels at great depth, high stresses and hard rock. These challenging conditions are studied in detail in conjunction with projects that throughout history have used the Tunnel Boring Machine (TBM) in the development of their projects. The main objective of the report is to study the geomechanical and operating conditions for the use of TBM in mass mining in Chile.

Firstly, a bibliographic study of projects that have used TBM for the construction of tunnels at great depth, with water filtration, rock bursts, blocky terrain, among other variables that are analyzed in detail together with all the geomechanical challenges that are occurred in each of the projects under study.

Secondly, the proposal to use the TBM as a viable option for the construction of tunnels in mass mining in Chile is analyzed. This analysis focuses on the design variables of the tunnels (length, diameter, radius of curvature, slope) for the use of a TBM in a mining project.

The last part of this work considers the estimation of the performance of a double shield TBM for the construction of a tunnel in underground mining, using the information from 3 drill holes that cover 1.6 km of a total of 9 km of the tunnel. For the elaboration of the performance estimate, a Monte Carlo simulation is performed that considers 10,000 iterations, using the Colorado School of Mines semitoric model.

As a result of the simulation it can be inferred that the performance of the double shield TBM is within the expected range of performances that this technology can have in the construction of tunnels in mining.

It is important that any mining project that considers the possibility of the use of TBM in the development of its tunnels, should include in the planning, the tunnels that could be built in terms of the dimensions and mining design, since that way there will be the time and detail necessary for the correct choice of construction method.

Finally, the application of TBMs machines to mining projects requires a careful evaluation of endless variables and considerations, some of which are technical and some of which are not. The learning taken from previous mining projects where TBMs machines were used, establish that each tunnel project and terrain conditions are unique and particular in terms of geology, access, rock cover, experience of contractors and specific requirements for the completion of the project, so you should never generalize the results of one project and then use it in another.

## Referencias

- A. Palmstrom., E. Broch. (2006). *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system Arild Palmstrom, Einar Broch.*
- Barton. (2000, 2018). Tunnels and Tunnelling International . *Employing the Q tbm prognosis model.*, 20-23.
- Bedi, A., & Harrison, J. . (2012). Dealing with epistemic uncertainty in fractured rock masses. *SRM International Symposium-EUROCK 2012.*
- Beinlich, E. (1970). Mechanical raise and tunnel-boring experience at the Mather Mine. Rapid Excavation-Problems and Progress. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 215-223.
- Bieniawski. (2006). Rock Mass Excavability Index.
- Bieniawski, C. G. (2008). New applications of the excavability index for selection of TBM types and. *World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety - India.*
- Bruland. (1998). TBM Applications – Pre-investigations and prediction for TBM Tunnelling. *The NTNU model.*
- C. Zhang, N. Liu, W. Chu. (2016). Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower station. *Journal Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 499-512.
- C. Zhang, N. Liu, W. Chu. (2016). Key technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower stationKey technologies and risk management of deep tunnel construction at Jinping II hydropower station. *Journal of rock mechanics and geotechnical Engineering* , 499-512.
- Chapple, P. (n.d.). *Construcción minera y energía.* Retrieved from <https://www.construccionminera.cl/los-bronces-tuneladora-en-tunel-sur/#.Xo0VpYhKjIU>
- Christian, J. T. (2004). Geotechnical engineering reliability: How well do we know what we are doing? *ournal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(10), 985-1003.
- Cuadra, P. (1986). Geocronología K-Ar del yacimiento El Teniente y áreas. *Revista Geológica de Chile*, N° 27, 3-26.
- D. Brox, G.Piaggio. (2013). Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros. *Construcción Minera n° 3.*
- D. Ofiara, G. Watson. (2016). The next generation of TBMs for mining application. *TBMsinminingWTC2016.*

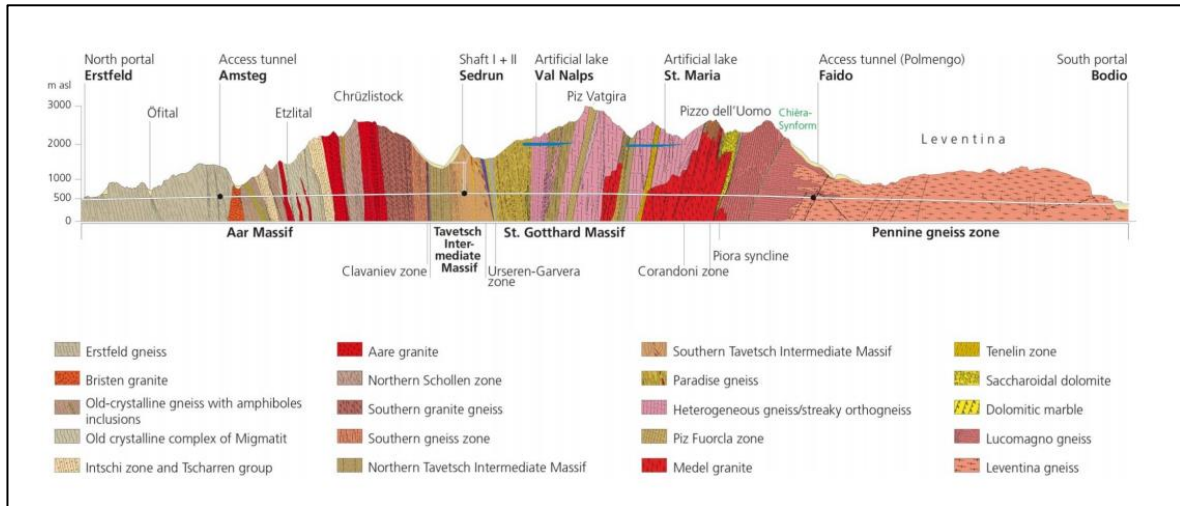
- Delisio, A., Zhao, J., Einstein, H.H. (2013). Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Löttschberg Base Tunnel. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 33, 131-142.
- Ehrbar, H. (2008). Gotthard base tunnel, Switzerland experiences with different tunnelling method. *2º Congreso Brasileiro de túneles y estructuras subterráneas*.
- Gong, Q., Yin, L., J., Wu, S.Y., Zhao, J., Ting, Y. (2012). Rock Burst and Slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II Hydropower Station. *Eng. Geol.*, 124, 98-108.
- Haldar, A., & Mahadevan, S. (2000). Probability, reliability and statistical method in engineering design.
- Harr, M. E. (1987). Reliability-based design in civil engineering.
- Herrenknecht. (2010, Octubre 15). *Herrenknecht.com*. Retrieved from <https://www.herrenknecht.com/en/references/referencesdetail/gotthard-base-tunnel/>
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). Support of underground excavations in hard rock.
- Home, L. (2009). Improving advance rates of TBMs in adverse ground conditions . *Geomech. Tunn.*, 2(2), 157-167.
- Kim, K. &. (1995). Probabilistic approaches to estimating variation in the mechanical properties of rock masses. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 111-120.
- Klein. (2001). An Approach to the classification of weak rock for tunnel projects in: Hansmire, W.H. Gowring I.M. (Eds), Rapid Excavation and Tunneling Conference. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 793-805.
- M. Cigla, S. Yagiz, L. Ozdemir. (2001). Application of Tunnel boring machines in underground mine development. *Excavation Engineering & Earth mechanics Institute, Department of mining Engineering, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA*.
- Ofiara, D. (2017). *Robbins*. Retrieved from <https://www.therobbinscompany.com/tbm-equipment-mining-industry/>
- P. Ruiz Parrilla, J. Espinoza, A. Palma, E. Fernández Gonzáles. (2012). La construcción del túnel minero "Sur, Los Bronces" en los Andes, con TBM Doble Escudo. *Revista de Obras públicas*, nº 3.535.
- Paltrinieri, E. (2015). *Analysis of TBM tunnelling performance in faulted and highly fractured rocks*. Switzerland.
- Piaggio, G. (2011). *Safety Gallery of Frejus Tunnel Project*.



- Q. Gong, L. Yin, H. MA, J. Zhao. (2016). TBM tunnelling under adverse geological conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 4-17.
- Q. Gong., L. Yin., H. Ma., J. Zhao. ( 2016). *TBM tunnelling under adverse geological conditions*.
- R. Gratias, C. Allan, D. Willis. (2016). The next level: why deeper is better for TBMs in mining. *TBMsinMining\_WTC2016*.
- Ramoni, M. A. (2010). Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunn Undergr. Space Technol.*, 25. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 139-157.
- Rostami, O. (1993, 2008, 2013). CSM model. *A new model for performance prediction of hard rock TBMs*, Chapter 50.
- Sari, M. (2009). The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 613-626.
- Sari, M., Karpuz, C., & Ayday, C. (2010). Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation. *Ankara andesites. Computers & Geosciences*, 36(7), 959-969.
- Schubert, W. F. (2006). Tunnelling in fault zones- state of the art. In: Lee, I.-M., Yoo, C., You, K. (Eds), ITA-AITES World Tunnel Congress and 32nd ITA General Assembly, Seoul, South Korea. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*.
- SRK Consulting. (n.d.). Construcción de túneles con tuneladoras TBM Experiencias, desafíos y oportunidades en Chile.
- Strabag. (n.d.). *Túnel - Alto Maipo, Proyecto Hidroeléctrico, San José de Maipo, CHILE*. Retrieved from [https://www.strabag.cl/databases/internet/\\_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=F33735251E058693C125814E00317C14](https://www.strabag.cl/databases/internet/_public/content30.nsf/web30?Openagent&id=F33735251E058693C125814E00317C14)
- W. Shiyong, X.Feng, L. Ribeiro e Sousa. (2010). Jinping II mega Hydropower project, China. *Conference on Hydroelectric Schemes in Portugal*.
- Winston H. Diaz, L. (2019). Simposio Internacional Excavación mecánica de túneles TBM-TBS. *Proyecto Túnel Olmos*. Santiago.
- Zheng. (2016). Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Zheng, Y. G. (2014). A review of the applications of tunnel boring machines in mines. In: 15 th Australasian Tunnelling Conference 2014. *Challenges and Opportunities of using tunnel boring machines in mining*, 388-400.

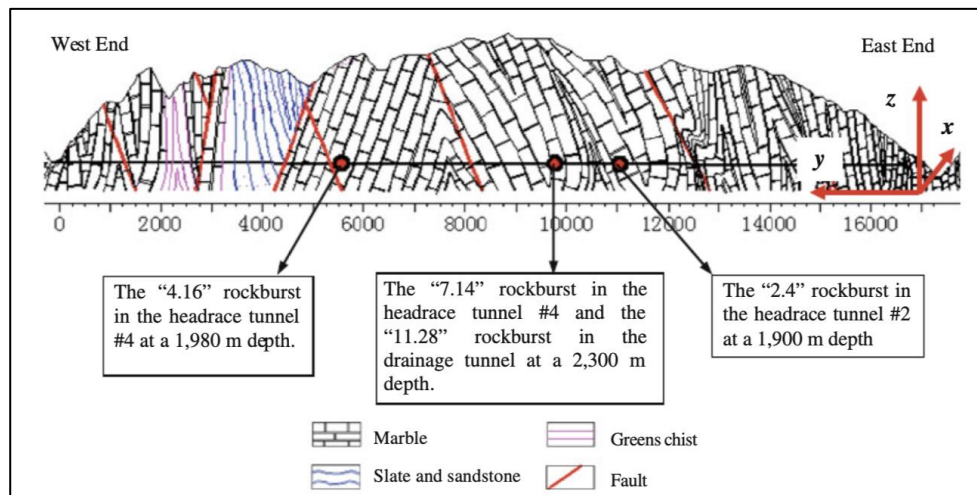
## 8.2 ANEXO B: EXPERIENCIA DE TBM EN ROCA DURA

### 8.2.1 Túnel de base de San Gotardo



**Ilustración 8.0.1. Perfil geológico detallado del túnel de Base de San Gotardo, (Herrenknecht, 2010).**

### 8.2.2 Hidroeléctrica Jinping II



**Ilustración 8.0.2. Perfil del túnel Jinping II, donde se revelan los puntos más relevantes en los cuales se produjeron los estallidos de rocas, (C. Zhang, N. Liu, W. Chu, 2016).**

## 8.3 ANEXO C: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

Este código se escribió en Python a través de la plataforma Jupyter Notebook.

### 8.3.1 Importación de librerías

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from google.colab import files
```

### 8.3.2 Declaración de constantes

C = Constante del modelo CSM  
T = Cutter Tip Width  
R = Cutter Radius  
S = Cut Spacing  
N = Cutters number  
D\_tbm = TBM Diameter  
K =  $\text{np.pi}/30$  Conversion factor  
RPM = RPM (TBM) variable  
TH\_terreno = Total thrust acting in the cutterhead [KN]  
TQ\_terreno = Total torque acting in the cutterhead [KN-m]  
HP\_terreno = Total cutterhead power [Kw]  
H\_turno = Horas en turno  
TPD = Turnos por dia  
Util = Utilization factor

### 8.3.3 Datos de las distribuciones

UCS\_mean = promedio resistencia a la compresión simple

UCS\_sd = desviación estandar resistencia a la compresión simple

BTS\_mean = promedio resistencia a la tracción

BTS\_sd = desviación estandar resistencia a la tracción

### 8.3.4 Creación de funciones

```
def Force_tot(C, T, R, phi, UCS, BTS, S):
```

```
    # Fuerza total
```

```
    result = C * T * R * phi * ((UCS**2 * BTS * S)/(phi * np.sqrt(R * T)))**(1/3)
```

```
    return(result/1000)
```

```
def phi_ang(R, p):
```

```
    # Ángulo de contacto
```

```
    result = np.arccos((R-p)/R)
```

```
    return(result)
```

```
def Force_N(F_t, phi):
```

```
    result = F_t * np.cos(phi/2)
```

```
    return(result)
```

```
def Force_R(F_t, phi):
```

```
    result = F_t * np.sin(phi/2)
```

```
    return(result)
```

```
def TH_fun(N, F_N):
```

```
    result = N * F_N
```

```
    return(result)
```

```
def TQ_fun(N, F_R, D_tbm):
```

```
    result = 0.3 * N * F_R * D_tbm
```

```
    return(result)
```

```
def HP_fun(K,TQ,RPM):
```

```
    result = K * TQ * RPM
```

```
    return(result)
```

```
def CS_fun(RPM, p_max):
```

```
    result = RPM * p_max
```

```
    return(result)
```

```
def AR_fun(CS, Hrs_turno, TPD, Utilization):
```

```
    result = 60/1000 * CS * Hrs_turno * TPD * Utilization
```

```
    return(result)
```

### 8.3.5 Simulación

```
simulaciones = 10000
```

```
PMAX = np.zeros(simulaciones)
```

```
ARs = np.zeros(simulaciones)
```

```
CSs = np.zeros(simulaciones)
```

```
valores_de_p = np.arange(1,100,.01)
```

```
error = 0.01
```

```

for i in range(simulaciones):
    UCS = np.random.normal(UCS_mean, UCS_sd)
    BTS = np.random.normal(BTS_mean, BTS_sd)

    for p in valores_de_p:
        phi = phi_ang(R,p)
        F_t = Force_tot(C, T, R, phi, UCS, BTS, S)
        F_N = Force_N(F_t, phi)
        F_R = Force_R(F_t, phi)
        TH = TH_fun(N, F_N)
        TQ = TQ_fun(N, F_R, D_tbm)
        HP = HP_fun(K, TQ, RPM)

        # break
        if abs(TH - TH_terreno)/TH_terreno <= error or abs(TQ -
TQ_terreno)/TQ_terreno <= error or abs(HP - HP_terreno)/HP_terreno <= error:
            p_max = p
            CS = CS_fun(RPM, p_max)
            AR = AR_fun(CS, H_turno, TPD, util)
            PMAX[i] = p_max
            CSs[i] = CS
            ARs[i] = AR
            Break

```

### 8.3.6 Gráfica de AR[m/día]

```
sns.distplot(data.AR, bins = 200, kde = False)

plt.ylabel('Count')

ax2 = plt.twinx()

sns.distplot(ARs, hist = False, hist_kws={'cumulative': True},
kde_kws={'cumulative': True}, ax = ax2, color = 'red')

plt.ylabel('Cumulative Distribution')

plt.show;
```