

## 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