

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Contexto de la memoria	1
1.2	Motivación de la memoria.....	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo General	4
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
1.4	Alcances	4
1.5	Estructura de la memoria.....	5
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Tipos de Tunnel Boring Machine.....	6
2.1.1	Tipos de Tunnel Boring Machine en Roca Dura.....	7
2.2	Operatividad de la Tunnel Boring Machine	10
2.2.1	Sistema Back-Up.....	10
2.2.2	Manejo de Marinas.....	11
2.2.3	Sitio de Montaje	13
2.2.4	Retroceso desde el Túnel.....	14
2.2.5	Relleno con dovelas	14
2.2.6	Características Técnicas Tunnel Boring Machine.....	16
2.3	Terrenos Desafiantes para Tunnel Boring Machine.....	18
2.4	Estimación de Costos de una Tunnel Boring Machine	20
2.4.1	Costos de Adquisición.....	20
2.4.2	Costos de Montaje.....	21
2.4.3	Costos de Excavación y Sistema Back-up	22
2.4.4	Costos de Cortadores.....	23
2.4.5	Costos de Mano de Obra	24
2.4.6	Costo Mantenimiento y Reparación.....	24
2.4.7	Costos de Servicio.....	25
2.4.8	Costos de Energía.....	26
2.5	Proyectos con Tunnel Boring Machine.....	27
2.5.1	San Manuel, EE. UU.....	27
2.5.2	Stillwater, EE. UU.....	28
2.5.3	El Teniente, Chile.....	29
2.5.4	Los Bronces, Chile	30

2.5.5	Túnel de Base de San Gotardo	32
2.5.6	Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo	33
2.5.7	Resumen de Proyectos	34
2.6	Método de Explotación Block Caving	35
2.6.1	Descripción de la Explotación por Block Caving	35
2.6.2	Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea	37
3	METODOLOGÍA	42
3.1	Descripción de la Metodología	42
3.2	Parámetros Principales	43
3.2.1	Parámetros Perforación y Tronadura.....	43
3.2.2	Parámetros Tunnel Boring Machine.....	46
3.2.3	Simulación de Montecarlo	48
3.2.4	Lógica de la Simulación.....	50
3.2.5	Estimación Económica.....	51
3.3	Desarrollo de la Metodología.....	53
3.3.1	Diseños Nivel de Producción y Hundimiento Caso Base	53
3.3.2	Diseños Nivel de Producción Tunnel Boring Machine.....	54
3.3.3	Secuencia de Construcción Caso Base.....	56
3.3.4	Secuencia de Construcción Tunnel Boring Machine	57
4	Resultados	60
4.1	Simulación de Montecarlo	60
4.2	Programa de Preparación Caso Base.....	62
4.3	Programas de Preparación Simulación.....	63
4.4	Plan de Desarrollos Horizontales Caso Base	66
4.5	Plan de Desarrollos Horizontales Simulados	67
4.6	Estimación Económica.....	67
4.7	Evaluación Número de Frentes	69
5	DISCUSIÓN	70
5.1	Diseños Nivel de Producción	70
5.2	Tiempos de Preparación	71
5.3	Secuencia de Construcción.....	71
5.4	Costos de Construcción.....	72
5.5	Características Geomecánicas	74
5.6	Logística de Construcción.....	75
6	Conclusiones	77
6.1	Trabajo Futuro.....	78

7	BIBLIOGRAFÍA.....	79
8	ANEXO A.....	82
8.1	Resumen Extendido.....	82
9	Anexo B.....	86
9.1	Test de Bondad de Ajuste Kolmogorov-Smirnov.....	86
9.1.1	Tasa de Avance TBM.....	86
9.2	Programas de Preparación.....	87
9.3	Código de Programación.....	90
9.3.1	Variables.....	90
9.3.2	Código Diseño 1.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1:	Comparación entre el método de perforación y tronadura con la excavación mecanizada TBM (Gratias et al, 2014).....	2
Tabla 2.1:	Comparación de los proyectos que han utilizado TBM en roca dura (elaboración propia).....	34
Tabla 3.1:	Tiempo requerido para cada actividad de un ciclo de PyT para distintas secciones del túnel (Práctica Profesional III, 2020).....	44
Tabla 3.2:	Flota de equipos utilizados por nivel para las labores de desarrollo con perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).....	45
Tabla 3.3:	Costos por actividad de la perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020).....	45
Tabla 3.4:	Costo de los equipos utilizados en perforación y tronadura (Práctica Profesional III, 2020)....	46
Tabla 3.5:	Parámetros de TBM utilizados para el diseño de los niveles de producción (elaboración propia).....	46
Tabla 3.6:	Parámetros económicos utilizados para la evaluación económica (elaboración propia).....	52
Tabla 3.7:	Metros a construir por macrobloques para cada diseño del nivel de producción (elaboración propia).....	55
Tabla 4.1:	Tiempos y costos de preparación obtenidos de la simulación para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	61
Tabla 4.2:	Resumen de los costos totales actualizados para para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	62
Tabla 4.3:	Costos unitarios de la excavación con TBM y avances promedio y máximo obtenidos de las simulaciones del Diseño 1 y Diseño 2 (elaboración propia).....	67
Tabla 4.4:	Beneficios actualizados totales para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	68
Tabla 4.5:	Tiempos y costos de preparación al tener 2 frentes operativas para la PyT en el nivel de producción para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).....	69
Tabla 5.1:	Estimación del VAN para la preparación de todos los macrobloques del primer nivel de Chuquicamata Subterránea para el caso base, Diseño 1 y Diseño 2 (elaboración propia).....	73
Tabla 9.1:	Estadística de los datos de tasa de avance TBM.....	86
Tabla 9.2:	Parámetros test de Kolmogorov-Smirnov para la tasa de avance TBM.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de una TBM (Herrenknecht AG,2021).	1
Figura 1.2: Vista isométrica de un esquema típico de los niveles de una mina Block Caving (Paredes et al, 2018).	3
Figura 2.1: Clasificación de la TBM según tipo de terreno a excavar (Zheng et al, 2016).	6
Figura 2.2: Esquema detallado de las partes de una TBM Gripper (Robbins Company, 2021).	7
Figura 2.3: Esquema detallado de las partes de una TBM Escudo Simple (Robbins Company, 2021).	8
Figura 2.4: Esquema detallado de las partes de una TBM Doble Escudo (Robbins Company, 2021).	9
Figura 2.5: Sistema back-up de una TBM de escudo simple (Herrenknecht AG,2021).	11
Figura 2.6: Esquema del traspaso del material excavado en el túnel desde la correa transportadora del sistema back-up al camión de transporte (Komatsu, 2019).	12
Figura 2.7: Esquema del relleno del piso de túneles excavados con TBM (Bruland, 2000)	12
Figura 2.8: Caverna de montaje de la TBM en El Teniente (Ofiara et al, 2016).	13
Figura 2.9: Esquema del cabezal de corte de una TBM ensamblada en dos partes (Robbins, 2020).	14
Figura 2.10: Modelo 3D de una dovela de suelo de hormigón (Geoconsult, 2020).	15
Figura 2.11: Esquema de una planta de producción de dovelas en superficie (Herrenknecht, 2019).	15
Figura 2.12: Flat car utilizado para el transporte de dovelas (Lewis Group, 2019).	16
Figura 2.13: Ingreso de agua en el Túnel El Volcán de Alto Maipo (Robbins, 2020).	18
Figura 2.14: Roca altamente fracturada encontrada en el Túnel El Volcán de Alto Maipo (Robbins, 2020).	19
Figura 2.15: Daños generados en el túnel de excavación producto de eventos de estallido de roca en el Túnel Base San Gotardo (Rehbock-Sander & Jesel, 2018).	19
Figura 2.16: Costos de excavación de la TBM (Im= tasa de penetración) (Bruland, 2000).	22
Figura 2.17: Costos sistema back-up (Im= tasa de penetración) (Bruland, 2000).	22
Figura 2.18: Costo de los cortadores (dc = diámetro de los cortadores) (Bruland, 2000).	23
Figura 2.19: Costos mano de obra (Bruland, 2000).	24
Figura 2.20: Ruta del túnel en la mina San Manuel (Cigla et al, 2001).	27
Figura 2.21: Layout Proyecto Mina Stillwater (Cigla et al, 2001).	28
Figura 2.22: Mina Los Bronces (Barioffi et al, 2011).	30
Figura 2.23: Portal de la TBM y camino de acceso (Barioffi et al, 2011).	30
Figura 2.24: TBM Doble Escudo utilizada en Los Bronces (Barioffi et al, 2011).	31
Figura 2.25: Longitud de los tramos de túneles construidos en el proyecto Base de San Gotardo (Herrenknecht, 2010).	32
Figura 2.26: Sitio de montaje de la TBM Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (Robbins, 2020).	33
Figura 2.27: TBM Gripper utilizada en el Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (Robbins, 2020).	34
Figura 2.28: Esquema de los niveles de una mina Block Caving convencional (Flores & Catalan, 2019).	36
Figura 2.29: Esquema de la secuencia de construcción de Macrobloques (Vergara, 2014).	36
Figura 2.30: Configuración de la mina Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	37
Figura 2.31: Esquema del proceso de producción de Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	38
Figura 2.32: Diseño de los niveles de un Macrobloque en Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	39
Figura 2.33: Diseño del nivel de producción de Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	39
Figura 2.34: Secuencia de preparación de macrobloques en Chuquicamata Subterránea (Paredes et al, 2018).	40
Figura 2.35: Dirección de la explotación de los macrobloques de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).	41

Figura 2.36: Secuencia óptima de los macrobloques de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).	41
Figura 3.1: Metodología de la memoria (elaboración propia).	43
Figura 3.2: Sección de los túneles del nivel de producción y hundimiento (elaboración propia).	44
Figura 3.3: Sección del túnel construido por TBM (elaboración propia).	47
Figura 3.4: Esquema con las dimensiones de la caverna de montaje y la rampa de inicio de la TBM (elaboración propia).	47
Figura 3.5: Sección de la caverna de montaje de la TBM y los túneles de inicio de la excavación (elaboración propia).	48
Figura 3.6: Histograma de la estimación de la tasa de avance diaria de la TBM para un UCS de la roca promedio de 131.6 MPa (Rodríguez, 2020).	49
Figura 3.7: Diagrama de la lógica de la simulación de Montecarlo (elaboración propia).	50
Figura 3.8: Plan de producción de Chuquicamata Subterránea (Flores & Catalan, 2019).	51
Figura 3.9: Plan de producción del primer nivel de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).	51
Figura 3.10: Diseño nivel de producción de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).	53
Figura 3.11: Diseño nivel de hundimiento de Chuquicamata Subterránea (elaboración propia).	53
Figura 3.12: Diseños propuestos de los desarrollos de los niveles de producción de 4 macrobloques construidos con TBM (color rojo) y PyT (color gris) (elaboración propia).	54
Figura 3.13: Diseños de los desarrollos del nivel de producción de 1 macrobloque construidos con TBM (color rojo) y PyT (color gris) (elaboración propia).	55
Figura 3.14: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de producción del caso base (elaboración propia).	56
Figura 3.15: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de hundimiento del caso base (elaboración propia).	57
Figura 3.16: Desarrollos iniciales antes del inicio de la excavación de la TBM (elaboración propia).	58
Figura 3.17: Secuencia de construcción de los desarrollos del nivel de producción con TBM de los 4 macrobloques iniciales (elaboración propia).	58
Figura 3.18: Secuencia de construcción de las calles del nivel de producción con TBM de 2 macrobloques (elaboración propia).	59
Figura 4.1: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del caso base (elaboración propia).	63
Figura 4.2: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del caso base (elaboración propia).	63
Figura 4.3: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del Diseño 1 (elaboración propia).	64
Figura 4.4: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del Diseño 1 (elaboración propia).	64
Figura 4.5: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1 y Sur 1 del Diseño 2 (elaboración propia).	65
Figura 4.6: Programa de preparación de los macrobloques Norte 2 y Sur 2 del Diseño 2 (elaboración propia).	65
Figura 5.1: Correlación entre el UCS y la tasa de penetración de la TBM (Jain et al, 2016).	74
Figura 5.2: Índice de la vida de los cortadores por tipo de roca (Bruland, 2000).	75
Figura 9.1: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del caso base (elaboración propia).	87
Figura 9.2: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del Diseño 1 (elaboración propia).	88
Figura 9.3: Programa de preparación de los macrobloques Norte 1, Sur 1, Norte 2 y Sur 2 al tener dos frentes operativas para la PyT del Diseño 2 (elaboración propia).	89

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Costo de adquisición de la TBM (Bruland, 2000).....	20
Ecuación 2.2: Costo de adquisición del sistema back-up (Bruland, 2000).	20
Ecuación 2.3: Costos montaje de la TBM y sistema back-up (Bruland, 2000).	21
Ecuación 2.4: Costos de los cortadores promedio (Bruland, 2000).	23
Ecuación 2.5: Costos de mantenimiento y reparación de la TBM (Bruland, 2000).....	24
Ecuación 2.6: Costos de mantenimiento y reparación del sistema back-up (Bruland, 2000).	25
Ecuación 2.7: Factor de corrección del costo de mantenimiento (Bruland, 2000).....	25
Ecuación 2.8: Costos de servicios de la TBM (Bruland, 2000).	25
Ecuación 2.9: Costos de servicios del sistema back-up (Bruland, 2000).....	25
Ecuación 2.10: Costos del consumo de energía (Bruland, 2000).....	26
Ecuación 2.11: Factor de corrección del costo de energía (Bruland, 2000).....	26

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Histograma de los tiempos de preparación de 4 macrobloques del Diseño 1 y Diseño 2 obtenidos de la simulación (elaboración propia).....	60
Gráfico 4.2: Histograma de los costos de preparación actualizados de 4 macrobloques del Diseño 1 y Diseño 2 obtenidos de la simulación (elaboración propia).	61
Gráfico 4.3: Plan de desarrollos horizontales del nivel de producción y hundimiento del caso base para 4 macrobloques (elaboración propia).....	66
Gráfico 4.4: Plan de desarrollos horizontales del nivel de producción y hundimiento del Diseño 1 y Diseño 2 para 4 macrobloques (elaboración propia).....	67
Gráfico 4.5: Beneficios anuales actualizados para el caso base, el Diseño 1 y el Diseño 2 (elaboración propia).	68
Gráfico 5.1: Porcentaje de los costos totales por actividad para cada caso (elaboración propia).	73