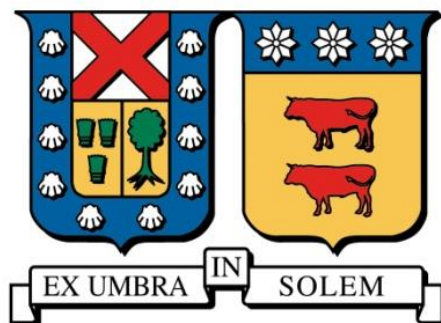


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



“DISEÑO DE NIVELES DE EXPLOTACIÓN POR
HUNDIMIENTO PARA CONSTRUCCIÓN MECANIZADA
Y MÍNIMA UTILIZACIÓN DE HORMIGÓN”

Presentado por

CONSTANZA NÚÑEZ ORELLANA

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

Profesor guía

SR. VICTOR ENCINA MONTENEGRO

MAYO, 2021

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia por darme la posibilidad de estudiar y por su apoyo incondicional durante todo este gran viaje de aprendizajes. Fueron años de altos y bajos, y una cantidad increíble de obstáculos por superar, pero su cariño y amor me ayudaron a sentir que pase lo que pase ellos estarán siempre a mi lado.

Agradezco a la vida por conocer a Andrés, por ser compañeros y avanzar juntos en esta carrera, agradezco su apoyo y sus buenos consejos, en especial el “no te preocupes, ocúpate”, un consejo invaluable que me permitió lograr llegar hasta este punto y realizar esta memoria.

Agradezco a todos mis profesores, en especial al profesor Víctor Encina por darme la oportunidad de desarrollar este tema como proyecto de memoria, tan interesante y que tanto disfrute realizar.

A pesar de todo aquí estoy más fuerte y sintiendo más orgullo que nunca al terminar esta gran travesía.

RESUMEN EJECUTIVO

La preparación minera es la mayor restricción al fijar la tasa de producción en minería subterránea. No es la excepción en block caving, de hecho, aproximadamente la mitad de su costo de operación se debe a la preparación de la mina.

Al estudiar a fondo el costo de la preparación minera en el método block caving, se puede observar que la mayor parte del costo y tiempo de preparación está relacionado con la construcción de pavimento y otras instalaciones especiales en los puntos de extracción. Debido a esto, la siguiente memoria de titulación presenta un diseño de preparación de block caving, que reduce la construcción de concreto al mínimo buscando una reducción significativa del tiempo y costo de la preparación minera.

ABSTRACT

Mining preparation is usually the main restriction when fixing the rate of production in underground mining. Block caving is not an exception, in fact, approximately one half of its operating cost is due to mine preparation.

Studying deeply the mining preparation cost in block caving method, it may be observed that most of the time and the cost of preparation is spent on construction of concrete pavement and other special installations at drawpoints.

This work presents a design on block caving preparation, that reduces the concrete construction to a minimum looking a significative reduction of time and cost of mine preparation.

GLOSARIO

NH: Nivel de hundimiento.

NP: Nivel de producción.

P&T: Perforación y tronadura.

TBM: Tunnel Boring Machines.

Grippers: Pinzas de apoyo de TBM.

Cutter head: Cabezal giratorio de TBM conformado por elementos de corte capaces de escarpar la roca.

Drift borer: Equipo de excavación mecanizada.

E: Estocadas.

CP: Calles de producción.

GZ: Galerías de zanja.

GH: Galerías de hundimiento.

PE: Punto de extracción.

LHD: Load-haul-dump.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 CONTEXTO DEL ESTUDIO	12
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 METODOLOGÍA	14
1.4 ALCANCE.....	14
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	16
2.1 BLOCK CAVING	16
2.2 PREPARACIÓN MINERA.....	17
2.3 MÉTODOS DE EXCAVACIÓN	18
2.3.1 Perforación y tronadura	18
2.3.2 Excavación mecanizada.....	19
2.4 OBRAS DE HORMIGON.....	22
CAPÍTULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO	23
3.1 DISEÑO DE PREPARACIÓN MINERA PARA CASO P&T.....	23
3.1.1 Diagramas de perforación.....	23
3.1.2 Diseño nivel de hundimiento.....	23
3.2 DISEÑO DE PREPARACIÓN MINERA PARA CASO <i>DRIFT BORER</i>	23
3.2.1 Diseño de diagramas de perforación	23
3.2.2 Diseño nivel de hundimiento.....	24

3.2.3	Diseño nivel de producción	24
3.2.4	Estabilidad de nivel de producción y hundimiento propuesto.....	25
3.3	DISEÑO DE NUEVAS OBRAS DE HORMIGÓN.....	26
3.4	CUBICACIÓN DE OBRAS DE AMBAS ALTERNATIVAS	27
3.5	COSTOS DE PREPARACIÓN	27
3.6	TIEMPO DE PREPARACIÓN	28
3.6.1	Cálculo del tiempo de preparación	28
3.6.2	Secuencia constructiva	29
CAPÍTULO 4. DISEÑO MINERO CASO P&T.....		30
4.1	DISEÑO DE DIAGRAMAS DE PERFORACIÓN	30
4.2	NIVEL DE HUNDIMIENTO.....	31
4.3	NIVEL DE PRODUCCIÓN	32
4.4	OBRAS DE HORMIGÓN.....	33
4.5	COSTOS DE PREPARACIÓN	36
4.6	TIEMPOS DE PREPARACIÓN	37
CAPÍTULO 5. DISEÑO MINERO CASO <i>DRIFT BORER</i>		40
5.1	DIAGRAMAS DE PERFORACIÓN	40
5.2	NIVEL DE HUNDIMIENTO.....	41
5.3	NIVEL DE PRODUCCIÓN	43
5.4	NUEVAS OBRAS DE HORMIGÓN.....	49
5.5	COSTOS DE PREPARACIÓN	51
5.6	TIEMPOS DE PREPARACIÓN	52
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS		56

6.1	SÍNTESIS DE IMPACTO TÉCNICO.....	56
6.2	SÍNTESIS DE IMPACTO ECONÓMICO.....	59
6.3	OPORTUNIDAD DE CAPTURA DE VALOR	61
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		62
7.1	DESARROLLO DEL DISEÑO ALTERNATIVO	62
7.2	FUNCIONALIDAD DEL DISEÑO PROPUESTO	62
7.3	VENTAJAS TECNICO-ECONOMICAS DE DISEÑO PROPUESTO	63
CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES		64
8.1	ACCIONES INMEDIATAS.....	64
8.2	TRABAJOS A FUTURO	64
CAPÍTULO 9. REFERENCIAS		65
ANEXOS		67
ANEXO A: RENDIMIENTO, CUADRILLAS Y DURACION DE CASO P&T		67
ANEXO B: RENDIMIENTO, CUADRILLAS Y DURACION DE CASO <i>DRIFT BORER</i>		68
ANEXO C: CUBICACIONES Y COSTOS DE PREPARACION PARA CASO P&T		69
ANEXO D: CUBICACIONES Y COSTOS DE PREPARACIÓN PARA CASO <i>DRIFT BORER</i>		70

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1. Esquema de trabajo.....	14
Ilustración 2.1. Esquema de block caving con estrategia de hundimiento previo (Brannon, Carlson, & Casten, 2011).	17
Ilustración 2.2. Ciclo de proceso de perforación y tronadura (elaboración propia).	18
Ilustración 2.3 TBM para túnel de exploración de Los Bronces (Brox, 2013).	19
Ilustración 2.4. Back-up TBM (Besalco, 2021).....	20
Ilustración 2.5. Esquema del método drift borer horizontal (Rostami, 2011).	22
Ilustración 3.1 Representación geométrica de área tributaria (elaboración propia).	25
Ilustración 4.1. Vista NS, corte B-B' de nivel de producción y hundimiento de caso P&T con sus dimensiones y respectivos pilares.	30
Ilustración 4.2. Diagramas de perforaciones del nivel de hundimiento y de producción para caso P&T (vista NS).	30
Ilustración 4.3. Diseño del nivel de hundimiento con perforación y tronadura.	31
Ilustración 4.4. Diseño base del nivel de producción.	33
Ilustración 4.5. Carpeta de rodado en calles de producción.	34
Ilustración 4.6. Carpeta de rodado en cabeceras NH y NP.....	34
Ilustración 4.7. Sección de punto de extracción.	35
Ilustración 4.8. Carta Gantt para caso P&T.....	39
Ilustración 5.1. Vista NS de nivel de producción y hundimiento para caso drift borer con sus dimensiones y respectivos pilares.....	40
Ilustración 5.2. Diagramas de perforaciones del nivel de hundimiento y de producción para caso drift borer (vista NS).	41

Ilustración 5.3. Diseño propuesto de nivel de hundimiento para construcción mecanizada, diferenciando los desarrollos con P&T (rosado) y drift borer (celeste), junto con la sección de estocada de inicio y galería de hundimiento.....	42
Ilustración 5.4. Diseño propuesto de nivel de producción para construcción mecanizada, diferenciando los desarrollos con P&T (rosado) y drift borer (celeste).	45
Ilustración 5.5. Sección de estocada de inicio y calle de producción.....	46
Ilustración 5.6. Sección de estocada de inicio y estocada.	46
Ilustración 5.7. Intersección entre estocada y calle de producción.	47
Ilustración 5.8. Intersección entre estocada y galería de zanja.....	47
Ilustración 5.9. Representación de dovela en calle de producción.....	49
Ilustración 5.10. Dimensiones de dovelas. A: Vista de frente de dovela. B: Vista de plano de dovelas.....	50
Ilustración 5.11. Dovela anclada a techo en punto de extracción.....	50
Ilustración 5.12. Carta Gantt para caso drift borer.	55
Ilustración 6.1. Ruta crítica para caso P&T.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Metodologías de cálculo para la resistencia de pilar.	26
Tabla 4.1. Dimensiones de galerías de nivel de hundimiento para caso P&T.	32
Tabla 4.2. Dimensiones de galerías de diseño base del nivel de producción.	32
Tabla 4.3. Cantidad de hormigón por obra utilizado para caso P&T.	35
Tabla 4.4. Cubicaciones de obras de excavación en nivel de hundimiento para caso P&T.	36
Tabla 4.5. Resumen de costos de caso P&T.	36
Tabla 4.6. Duración en días de cada actividad de preparación minera para caso P&T.	38
Tabla 4.7. Resumen de tiempos de preparación para caso P&T.	39
Tabla 5.1. Dimensiones de galerías de diseño propuesto en nivel de hundimiento.	41
Tabla 5.2. Datos de pilar y excavación.	42
Tabla 5.3. Resumen de valores obtenidos para resistencia de pilar y factor de seguridad para cada autor.	43
Tabla 5.4. Dimensiones de galerías de diseño alternativo en nivel de producción.	44
Tabla 5.5. Datos de pilar y excavación.	48
Tabla 5.6. Resumen de valores obtenidos para resistencia de pilar y factor de seguridad para cada autor.	48
Tabla 4.3. Cantidad de hormigón por obra utilizado para caso drift borer.	51
Tabla 5.7. Cubicaciones de obras de excavación en nivel de hundimiento para diseño propuesto.	51
Tabla 5.8. Resumen de costos de caso drift borer.	52
Tabla 5.9. Duración en días de cada actividad de preparación minera para caso drift borer.	54
Tabla 5.10. Resumen de tiempos de preparación para caso drift borer.	55

Tabla 6.1. Tiempo de preparación de NH, NP y total para caso P&T y caso drift borer. ...	56
Tabla 6.2. Tiempo de suministro y construcción de un punto de extracción para el caso P&T y el caso drift borer.	57
Tabla 6.3. Cubicación de obras de hormigón para caso P&T y drift borer.	58
Tabla 6.4. Comparación de costos de preparación para caso P&T y drift borer.	59
Tabla 6.5. Resumen de costos de preparación por tipo de obra para NH y NP de ambos casos.	60

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En minería subterránea la preparación minera es la etapa más importante previa a la entrada en producción, debido a que involucra el desarrollo de labores importantes para iniciar la explotación del yacimiento. Son estas labores las que permiten llegar al cuerpo mineralizado para realizar la posterior extracción y transporte del mineral de interés.

En el caso del método de explotación block caving la preparación minera contempla el desarrollo de labores en los diferentes niveles que conforman al método, entre ellos, la excavación de galerías y su fortificación, el desarrollo de infraestructuras de hormigón, como los puntos de extracción y la construcción de pavimento, entre otras obras civiles.

1.1 CONTEXTO DEL ESTUDIO

La capacidad de preparación es una de las principales restricciones del método de explotación block caving, siendo esta una variable crítica para efectos del aumento de la producción. La capacidad máxima de producción, esto es, la incorporación de nuevas áreas de producción en un hundimiento depende solo de la altura de la columna y de la tasa de socavación (Pesce & Ovalle, 2004). Entonces, considerando que la tasa de socavación es una variable clave para controlar la capacidad de producción en caving masivos, la tasa de preparación minera se convierte en un cuello de botella para aumentar la tasa de producción de minas subterráneas a la escala de minas a cielo abierto (Encina, Méndez, Caballero, & Osorio, 2010).

Equipos excavadores junto con módulos de hormigón prefabricados son una opción para evaluar en lo que respecta a la reducción de tiempo y costo que conllevan estas obras. Actualmente el desarrollo de las excavaciones se realiza mediante perforación y tronadura, involucrando la implementación de obras de hormigón, como carpetas de rodados o estructuras en los puntos de extracción, lo cual implica tiempos de elaboración prolongados, debido a que se su elaboración es in situ.

Es más, en obras civiles el uso de módulos de concreto prefabricados y equipos de excavación mecanizada para el desarrollo de túneles, como TBM, son una práctica habitual, por lo que es posible aprovechar estos métodos y tecnologías en la preparación minera de un block caving.

La siguiente memoria de titulación busca evaluar, en aspectos técnicos y económicos, un diseño de preparación de block caving que reduce la construcción de concreto al mínimo, buscando una reducción significativa del tiempo y costo de la preparación minera.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar los niveles de explotación del método de extracción block caving para una excavación mecanizada y de mínimo uso de hormigón.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un diseño alternativo de preparación minera con equipo *drift borer*.
- Comprobar la funcionalidad del diseño propuesto con respecto a uno convencional.
- Verificar las ventajas técnico-económicas del diseño de preparación.

1.3 METODOLOGÍA

El presente proyecto de memoria se ejecuta de acuerdo con el siguiente esquema de trabajo de Ilustración 1.1 Ilustración 1.1.

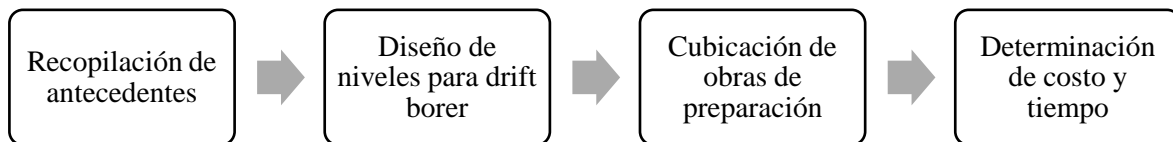


Ilustración 1.1. Esquema de trabajo.

1.4 ALCANCE

- La propuesta de diseño solo contempla el nivel de hundimiento y producción.
- La evaluación de estabilidad del diseño propuesto es aproximada considerando la metodología de área tributaria.
- Para la determinación de costos y tiempo entre el diseño propuesto y el convencional solo se contemplan las excavaciones mineras y su fortificación, las obras civiles desarrolladas en el nivel de hundimiento y producción como pavimentos y dovelas.
- No se considera dentro de la determinación de costos y tiempo el montaje de infraestructura, ni tampoco la tronadura de la socavación.
- El diseño propuesto y convencional no considera la construcción de desarrollos verticales, como las utilizadas para el traspaso del mineral de un nivel a otro.

- Se considera la perforación en el desarrollo de cabeceras, chimeneas piloto, apertura de zanjas y la socavación del nivel de hundimiento.
- Se dispone de dos equipos *drift borer* que solo realizan excavaciones horizontales en el nivel de hundimiento y de producción.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 BLOCK CAVING

El block caving es un método explotación subterránea por hundimiento, empleado en cuerpos mineralizados masivos, el cual utiliza la acción de la gravedad junto con los esfuerzos internos de la roca para fracturar el macizo rocoso.

El método consiste en generar el hundimiento de la columna mineralizada, para ello se debe realizar un corte o socavación basal, mediante perforación y tronadura, de esta forma se elimina el soporte de la columna de mineral. Luego, cierta cantidad de mineral es extraído desde el nivel de producción para crear un vacío y dar inicio al hundimiento (Brown, 2002). A medida que se extrae el mineral, se va fracturando el cuerpo mineralizado y hundiendo progresivamente.

El diseño minero de un block caving contempla el desarrollo de cuatro niveles principales, estos corresponden al nivel de hundimiento, producción, ventilación y transporte, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

A grandes rasgos las características de cada nivel son las siguientes:

- Nivel de hundimiento: Este nivel se encuentra sobre el nivel de producción, está constituido por galerías paralelas entre sí, ubicadas sobre las calles de producción del nivel de producción. Desde este nivel se realiza la socavación basal del cuerpo mineralizado.
- Nivel de producción: Contempla el desarrollo de calles de producción y galerías de zanja, existe una variedad de diseños de nivel de producción, uno de ellos corresponde a la malla teniente, conformada por galerías de zanja orientadas a 60° con respecto a las galerías de producción.
- Nivel de ventilación: Conformado por galerías y chimeneas, las cuales permiten inyectar o extraer el aire de los diferentes niveles.
- Nivel de transporte: El diseño de este nivel está determinado por el tipo de método de transporte, esto es, camiones, ferrocarril, correas o una combinación de estas.

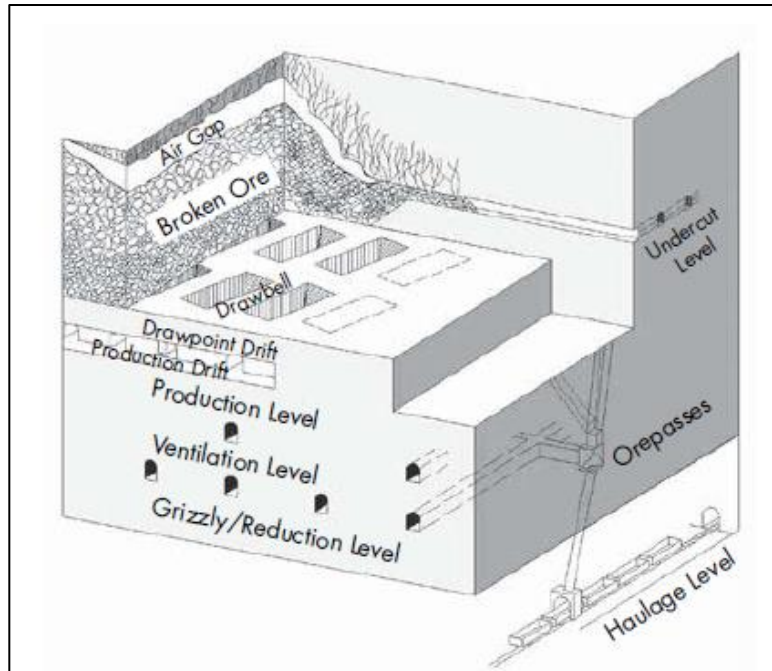


Ilustración 2.1. Esquema de block caving con estrategia de hundimiento previo (Brannon, Carlson, & Casten, 2011).

El funcionamiento del método, a modo general, consiste en que desde las galerías del nivel de hundimiento se socava la base de la columna mineral mediante la perforación de tiros radiales y posterior tronadura. Se realiza la apertura de bateas, las cuales conectan al nivel de producción con el nivel de hundimiento, conduciendo al mineral por gravedad hasta los puntos de extracción, desde donde un cargador frontal (LHD) carga el mineral y lo transporta hasta los puntos de vaciado. Estos puntos están conectados con el nivel de transporte permitiendo cargar el mineral al sistema de transporte por medio de buzones.

2.2 PREPARACIÓN MINERA

La preparación minera es la etapa previa a la explotación del cuerpo mineralizado, que contempla el desarrollo de la infraestructura requerida para comenzar con la producción. Dicha etapa está conformada por tres grandes áreas de trabajo, correspondientes a las excavaciones mineras, obras civiles y montaje de infraestructura (Camhi, 2012).

Las obras más predominantes en la preparación minera según Díaz & Morales (2008) corresponden a las siguientes:

- Desarrollo de galerías en los diferentes niveles.

- Construcción de piques de traspaso desde nivel de extracción a nivel de transporte.
- Construcción de obras civiles como puntos de extracción, de vaciado, chutes de carguío de mineral, vías férreas, entre otros.
- Ejecución del montaje y puesta en marcha de sistemas eléctricos, electrónicos y mecánicos requeridos en los sectores: implementación del sistema de control automático para LHD semiautónomos, control remoto para martillo rompedor, chutes, alimentadores de placa y ventilación auxiliar.
- Perforación y tronadura para llevar a cabo la socavación y la apertura de bateas para la incorporación del área a la producción.

2.3 MÉTODOS DE EXCAVACIÓN

El desarrollo de obras de excavación en la preparación minera puede ser llevada a cabo mediante perforación y tronadura o excavación mecanizada.

2.3.1 Perforación y tronadura

La perforación y tronadura es un método tradicional de excavación de obras de preparación en roca dura. Se utiliza tanto en el desarrollo de galerías, apertura de bateas y socavación basal del cuerpo mineral, como también en excavaciones verticales o inclinadas, esto es, piques de traspaso y chimeneas. Cada ciclo de perforación y tronadura sigue un patrón repetitivo esquematizado en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

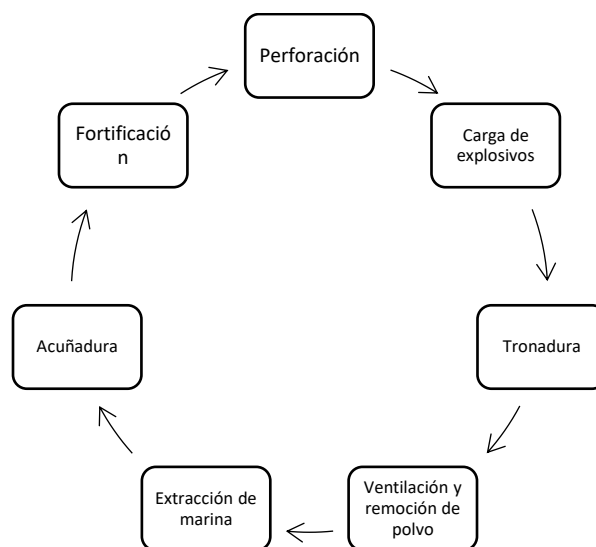


Ilustración 2.2. Ciclo de proceso de perforación y tronadura (elaboración propia).

2.3.2 Excavación mecanizada

2.3.2.1 TBM

Las tuneladoras han sido usadas como parte de expansiones o nuevos proyectos desde 1950. Algunos ejemplos de uso de TBM en Chile corresponden a la construcción del túnel de desvío de agua Río Blanco para suministrar agua a la Mina El Teniente y en la construcción de un túnel de exploración de 8 km en la mina Los Bronces de Anglo American (Brox, 2013). La Ilustración 2.3 muestra la tuneladora utilizada para el desarrollo de esta obra.



Ilustración 2.3 TBM para túnel de exploración de Los Bronces (Brox, 2013).

La excavación con TBM contempla un proceso continuo donde el escareado de la roca, la extracción de detritos y la instalación de soporte se realizan al mismo tiempo. El TBM funciona empujando contra la cara de la excavación una cabeza giratoria conformada por elementos de corte, la cual va escarpando la roca. Las fuerzas de corte son proporcionadas por la rotación del cabezal, mientras que las fuerzas normales son proporcionadas por el empuje de la máquina contra la cara del túnel. Para absorber la reacción de la cabeza de corte y hacer avanzar la tuneladora, esta se apoya a los costados del túnel mediante pinzas llamadas *grippers*, las cuales van siendo movidas a medida que se avanza con el desarrollo del túnel. La extracción de los detritos del escarpe de la roca se realiza mediante cangilones montados en la periferia del cabezal cortador, depositándolos en una cinta transportadora, la cual los transporta hasta la parte trasera del TBM para su extracción hacia el exterior.

La aplicación de TBM es apropiada para túneles largos y grandes, como los accesos principales e infraestructura de transporte en nuevas minas, pero no es práctico para la preparación minera, donde la extensión de las galerías es usualmente menor que 200 metros y las secciones transversales son menores que 30 m² (Encina, Méndez, Caballero, & Osorio, 2010).

Las aplicaciones de las tuneladoras en proyectos mineros comprenden largos de galerías mayores a 200 metros, con un diámetro mínimo de 4 metros (Brox, 2013). Como también son claves las condiciones geológicas, siendo propicio su uso en rocas duras de 150-250 MPa.

El uso de las tuneladoras incrementa las tasas de avance en comparación con las alcanzadas por P&T, siendo sostenibles en el tiempo para roca dura y de buena calidad, se requiere de menor fortificación, menos requisitos de ventilación y mejora las condiciones de salud de los trabajadores sin exposición al humo y vapores explosivos.

El equipo está conformado por grandes componentes que son difíciles de transportar, por lo que se necesita de vehículos especiales para su movilización, como se observa en Ilustración 2.4 el equipo presenta un sistema *back-up* modular. Específicamente el *back-up* de la tuneladora utilizada en Los Bronces presenta un largo de 70 metros.



Ilustración 2.4. Back-up TBM (Besalco, 2021).

Para alcanzar el empuje y el torque requerido por el equipo, los componentes son grandes y pesados, por ende, son difíciles de mover a través de galerías mineras ya existentes (Rostami, 2011).

Deben existir ubicaciones prácticas con suficiente área que faciliten el montaje de tuneladoras, por lo que es necesario realizar excavaciones más amplias para posicionar el equipo.

2.3.2.2 *Drift borer* horizontal

Este método permite el desarrollo de galerías horizontales de sección circular en roca competente, donde la perforación y tronadura está restringida o prohibida y los equipos tuneleros como TBM son muy grandes.

Para poder desarrollar la excavación el equipo realiza una perforación piloto horizontal entre dos cabeceras, una vez que la broca de perforación logra atravesar la roca se reemplaza por un escariador modular armable, el cual comienza a realizar la excavación en reversa hacia el equipo, como se observa en Ilustración 2.5, a medida que se va escariando la roca, la marina se extrae mediante un equipo LHD. Finalmente, se desarma el escariador y se retiran los equipos.

La aplicación del *drift borer* está restringida a roca dura y competente, que es exactamente el caso de las minas chilenas, donde la mayor parte del nivel de producción y hundimiento de minas de block caving, actualmente en funcionamiento, se encuentran en roca primaria, caracterizada como Clase II por la clasificación de macizo rocoso de Bieniawski (Encina, Méndez, Caballero, & Osorio, 2010). A su vez, las condiciones de la roca deben ser similares a lo largo de la excavación.

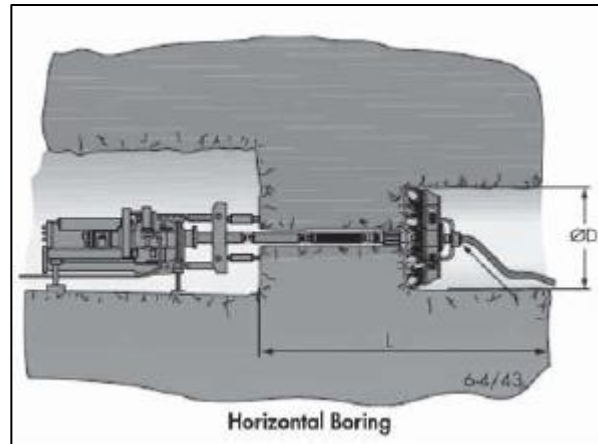


Ilustración 2.5. Esquema del método drift borer horizontal (Rostami, 2011).

Los típicos diámetros de galería que se logran con este equipo se encuentran dentro del rango 0,6 – 4,5 metros.

Las ventajas del uso del equipo *drift borer* involucra una tasa de avance más alta que P&T, requiere de menor fortificación, existe una reducción de la resistencia de la ventilación por las paredes lisas de las galerías y se mejoran las condiciones de salud y seguridad de los trabajadores.

El transporte y el montaje del equipo es fácil, presenta un diseño modular que permite el desmonte del equipo en componentes más pequeños, lo cual facilita el transporte.

2.4 OBRAS DE HORMIGÓN

La infraestructura de los puntos de extracción son una de las obras de hormigón que se desarrolla en la preparación minera, la construcción de estas obras comienza con la fortificación de la visera mediante la instalación de cables, luego se realiza el montaje de la armadura, la colocación del moldaje y el hormigonado del PE.

Las carpetas de rodado son otras obras de hormigón de la preparación minera, su construcción contempla un levantamiento topográfico, escarpe, limpieza de pisos y finalmente la colocación del hormigón. Conseguido el relleno se procede a la colocación de la carpeta respetando las pendientes de proyecto (Camhi, 2012).

Cabe destacar que si se construyen las galerías mineras mediante excavación mecanizada, las obras de hormigón pueden ser reemplazadas por módulos de hormigón prefabricado

originalmente utilizados en obras civiles. Por otro lado, para galerías desarrolladas con P&T se debe utilizar carpetas de rodado, debido a que para la utilización de módulos prefabricados es necesario que la sección de la galería sea circular.

CAPÍTULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO

3.1 DISEÑO DE PREPARACIÓN MINERA PARA CASO P&T

3.1.1 Diagramas de perforación

Los diagramas de perforación a diseñar corresponden a:

- Diagrama de perforación de socavación en nivel de hundimiento.
- Diagrama de perforación de apertura de bateas.

Se consideran los siguientes criterios:

- Hundimiento por socavación previa.
- Apertura de bateas completamente desde el nivel de producción.
- Ángulos de talud de zanja 50°.
- Altura de Crown pillar igual a 18 metros.
- Socavación de hundimiento con abanicos verticales traslapados.
- Ángulo de visera de 90°.

3.1.2 Diseño nivel de hundimiento

Se consideran los siguientes criterios para el diseño del nivel de hundimiento:

- Dos accesos, Norte y Sur.
- Galerías y cabeceras desarrolladas por P&T.

3.2 DISEÑO DE PREPARACIÓN MINERA PARA CASO *DRIFT BORER*

3.2.1 Diseño de diagramas de perforación

Los diagramas de perforación a diseñar corresponden a:

- Diagrama de perforación de socavación en nivel de hundimiento.

- Diagrama de perforación de apertura de zanja longitudinal.
- Diagrama de destace de bateas.

Se consideran los siguientes criterios:

- Socavación por hundimiento previo.
- Ángulos de talud de zanja 50°.
- Excavación de zanja longitudinal con abanicos a hundimiento.
- Burden y espaciamiento de 3 metros.
- Altura de Crown pillar igual a 18 metros.
- Socavación de hundimiento con abanicos verticales traslapados.
- La socavación, apertura y destace de zanja longitudinal se desarrolla mediante perforación radial.

3.2.2 Diseño nivel de hundimiento

Los siguientes criterios se consideraron para el diseño del nivel de hundimiento:

- Dos accesos, Norte y Sur.
- Galerías desarrolladas por *drift borer*.
- Cabeceras y estocadas de inicio desarrolladas por P&T.

3.2.3 Diseño nivel de producción

El diseño de nivel de producción base se modifica incorporando excavaciones de inicio necesarias para disponer al equipo *drift borer* y una galería de zanja entre calles de producción. Como también, se definen las áreas que son excavadas por P&T, y las que son excavadas por *drift borer*.

Para el diseño propuesto se considera lo siguiente:

- Cabecera de contorno y estocadas de inicio mediante P&T convencional.
- Calles y puntos de extracción perpendiculares.
- Zanja longitudinal tipo base de caserón.

3.2.4 Estabilidad de nivel de producción y hundimiento propuesto

Se determina si los diseños de nivel de hundimiento y producción propuestos cumplen con la condición de estabilidad, es decir, si son estables en relación con la resistencia de los pilares de soporte. Para ello se determina un factor de seguridad el cual se obtiene a partir de la relación entre el esfuerzo sobre el pilar y la resistencia de este.

El esfuerzo sobre el pilar de la roca se obtiene por medio de la Ecuación 1. Esta ecuación considera el área tributaria de un pilar, como se muestra en la Ilustración 3.1.

$$\sigma_p = p_{zz} \frac{(W_p + W_o) \times (L_p + L_o)}{W_p \times W_o}$$

Ecuación 1. Determinación de esfuerzo sobre el pilar de roca.

Donde:

- σ_p : Esfuerzo sobre el pilar de la roca.
- p_{zz} : Esfuerzo vertical in situ.
- W_p : Ancho de pilar.
- L_p : Largo de pilar.
- W_o y L_o : Distancia entre dos pilares contiguos.

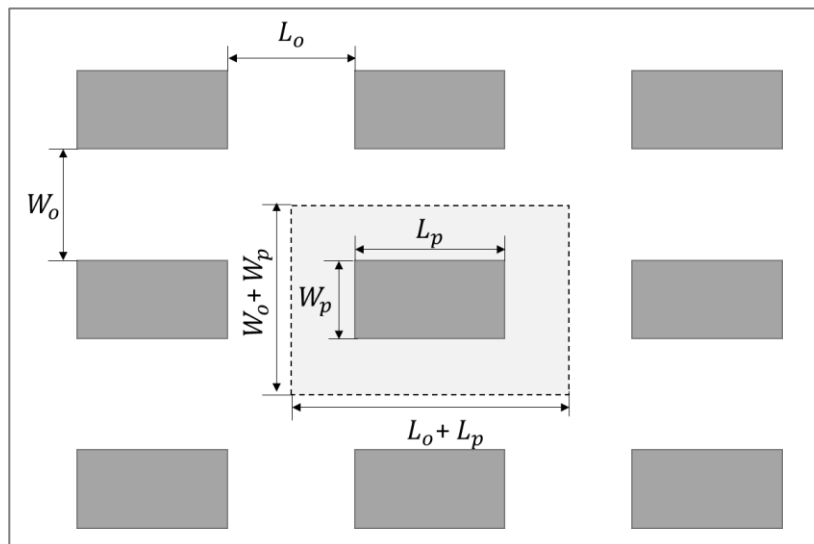


Ilustración 3.1 Representación geométrica de área tributaria (elaboración propia).

Posteriormente, se calcula la resistencia del pilar (S_p), para ello se hizo uso de los autores presentados en Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Metodologías de cálculo para la resistencia de pilar.

Autor	Ecuación
Sjoberg	$S_p = 0,308 \times UCS \times (0,778 + 0,222 \times \frac{W}{H})$
Krauland & Soder	$S_p = 0,354 \times UCS \times (0,778 + 0,222 \times \frac{W}{H})$
Lunder	$S_p = 0,44 \times UCS \times (0,68 + 0,53 \times k)$ $k = \tan \left(\arccos \left(\frac{1 - c_{pav}}{1 + c_{pav}} \right) \right)$ $c_{pav} = 0,46 \left[\log \left(\frac{W}{H} + 0,75 \right) \right]^{\frac{1,4}{W/H}}$
Obert-Duvall	$S_p = 0,778 \times UCS \times (0,778 + 0,222 \times \frac{W}{H})$
Bieniawski	$S_p = UCS \times (0,64 + 0,36 \frac{W}{H})$

Luego, para la evaluación de la estabilidad del pilar se utiliza el factor de seguridad (FS), el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{S_p}{\sigma_p}$$

Ecuación 2. Determinación de factor de seguridad.

Si $FS > 1,4$, entonces se está en presencia de un pilar estable.

3.3 DISEÑO DE NUEVAS OBRAS DE HORMIGÓN

En el caso del diseño propuesto, las galerías excavadas con el equipo *drift borer* tienen una sección circular, por lo que, es necesario diseñar nuevas obras de hormigón en reemplazo de las carpetas de rodado y de la infraestructura en los puntos de extracción.

Estas obras de hormigón son denominadas dovelas y presentan una geometría semicircular. Se destaca que son construidas con anterioridad y no in situ como las carpetas de rodado.

Para el diseño de las dovelas se consideran las secciones de las galerías excavadas y el cumplimiento de las normativas de seguridad, específicamente el Artículo 119 del Reglamento de Seguridad Minera, el cual indica que el ancho útil de la labor por la cual transiten los vehículos será tal, que deberá existir un espacio mínimo de cincuenta centímetros (0.50 m.) a cada costado del equipo y desde la parte más elevada de la cabina hasta el techo de la labor. (Decreto Supremo N° 132, 2004).

3.4 CUBICACIÓN DE OBRAS DE AMBAS ALTERNATIVAS

La cubicación contempla las mediciones de longitud, área y volumen efectivas de las obras a desarrollar en los niveles de hundimiento y producción, tanto del caso P&T como del caso *drift borer*. Para la cubicación de ambas alternativas se consideran las siguientes mediciones:

- Longitudes totales de los desarrollos a excavar, es decir, accesos, cabeceras y galerías.
- Longitudes lineales totales de perforaciones radiales.
- Longitudes totales de perforación de chimeneas.
- Volumen total de pavimento.
- Volumen de dovelas totales (solo para caso *drift borer*).
- Unidades de puntos de extracción (solo para caso P&T).
- Fortificación (malla, perno, shotcrete).
- Longitud total de cañerías.

3.5 COSTOS DE PREPARACIÓN

Esta etapa contempla la determinación de costos para la preparación del nivel de producción y del nivel de hundimiento, tanto para el caso P&T, como para el caso *drift borer*.

En Anexo C: Cubicaciones y costos de preparación para caso P&T y Anexo D: Cubicaciones y costos de preparación para caso *drift borer* se cuenta con los costos unitarios para cada obra de preparación minera, los que incluyen gastos generales, gastos por contratistas e instalación.

Para poder determinar los costos de cada obra de preparación se consideran las cubicaciones calculadas de preparación minera y los costos unitarios para cada obra, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo [US\$]} = \text{Entero} \left(\text{Costo Unitario} \left[\frac{\text{US\$}}{u} \right] \times \text{Total Obra [u]} + 0,5 \right)$$

Ecuación 3. Costo de preparación para cada obra de preparación minera.

Donde:

- Costo unitario: Costo de obra de preparación por unidad de medición (longitud, área o volumen).
- Total obra: Corresponde a longitud, área o volumen efectivo de la obra de preparación minera.

3.6 TIEMPO DE PREPARACIÓN

3.6.1 Cálculo del tiempo de preparación

Se determina el tiempo de construcción para la preparación del nivel de producción y del nivel de hundimiento para ambos casos. Para ello, se estima el rendimiento de una cuadrilla y la cantidad óptima de cuadrillas por obra. Luego, para la determinación del tiempo de preparación se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo por obra [días]} = \text{Entero} \left(\frac{\text{Total actividad [u]}}{\text{Rendimiento} \left[\frac{u}{d - N^\circ \text{ Cuadrillas}} \right] \times N^\circ \text{ cuadrillas}} \right) + 1$$

Ecuación 4. Tiempo de desarrollo de cada obra de preparación minera.

Donde:

- Total obra: Corresponde a longitud, área o volumen efectivo de la obra de preparación minera.
- Rendimiento: Corresponde al rendimiento que presenta una cuadrilla por día.
- N° cuadrillas: Cantidad de cuadrillas que trabajan en el desarrollo de la obra de preparación.

3.6.2 Secuencia constructiva

Calculados los tiempos de preparación para cada obra, se determina cuál es la secuencia constructiva, esto es, el orden del desarrollo de las obras en ambos niveles, estableciendo los sucesores y antecesores de cada actividad.

Una vez decidido este orden, se generan cartas Gantt para ambos diseños del caso P&T y *drift borer*, por medio del método CPM (Critical Path Method) que es el que aplica el software Microsoft Project.

CAPÍTULO 4. DISEÑO MINERO CASO P&T

4.1 DISEÑO DE DIAGRAMAS DE PERFORACIÓN

Se obtiene la siguiente disposición en el espacio del nivel de hundimiento y producción del caso P&T, representada en Ilustración 4.1, correspondiente al perfil B-B'.

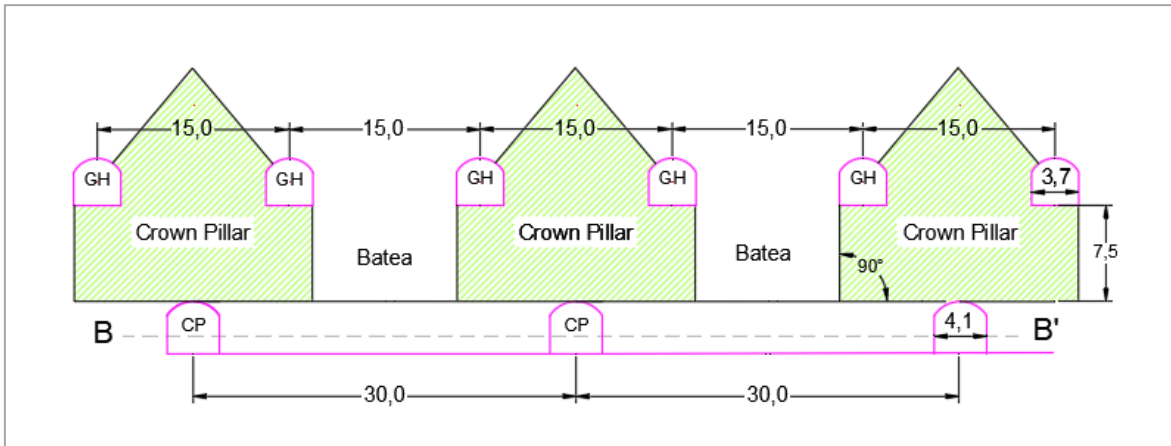


Ilustración 4.1. Vista NS, corte B-B' de nivel de producción y hundimiento de caso P&T con sus dimensiones y respectivos pilares.

Luego, en Ilustración 4.2 se representa el diagrama de perforación de socavación y de apertura de bateas. El diagrama de perforación contempla una altura de socavación de 10 metros, perforado mediante abanicos verticales traslapados, con espaciado y burden de 3 metros.

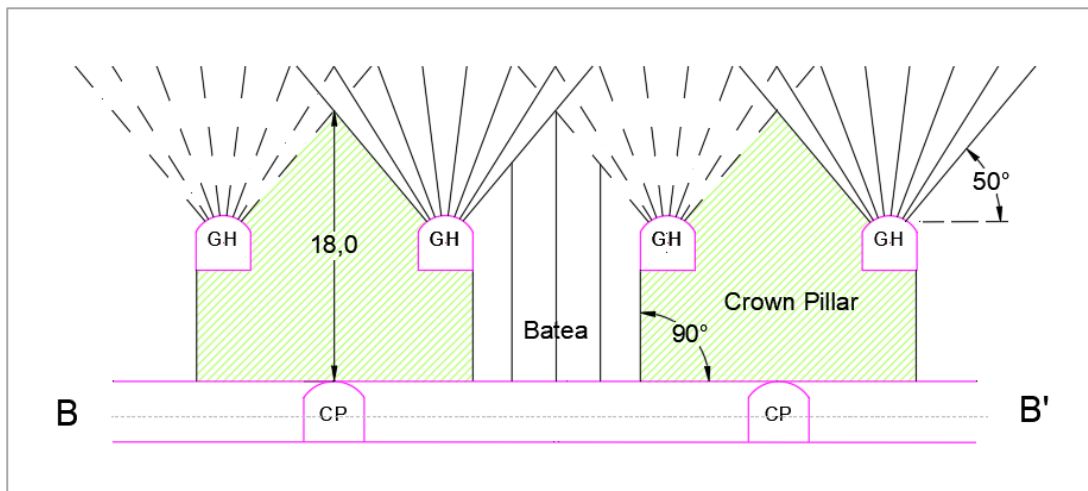


Ilustración 4.2. Diagramas de perforaciones del nivel de hundimiento y de producción para caso P&T (vista NS).

Considerando que la estrategia de hundimiento es por socavación previa, la apertura de la batea se ejecuta completamente desde el nivel de producción, por medio de perforaciones radiales desde las galerías de zanja con burden y espaciamiento de 3 metros, y una altura máxima de tiro de 18 metros que corresponde a la perforación central.

4.2 NIVEL DE HUNDIMIENTO

El nivel de hundimiento cuenta con 20 galerías espaciadas a 15 metros, con orientación S60E. Presenta 4 cabeceras (Norte, Sur, Este y Oeste) y dos accesos, uno al norte y otro al sur, como se muestra en Ilustración 4.3. El desarrollo de las galerías de este nivel se realiza mediante P&T.

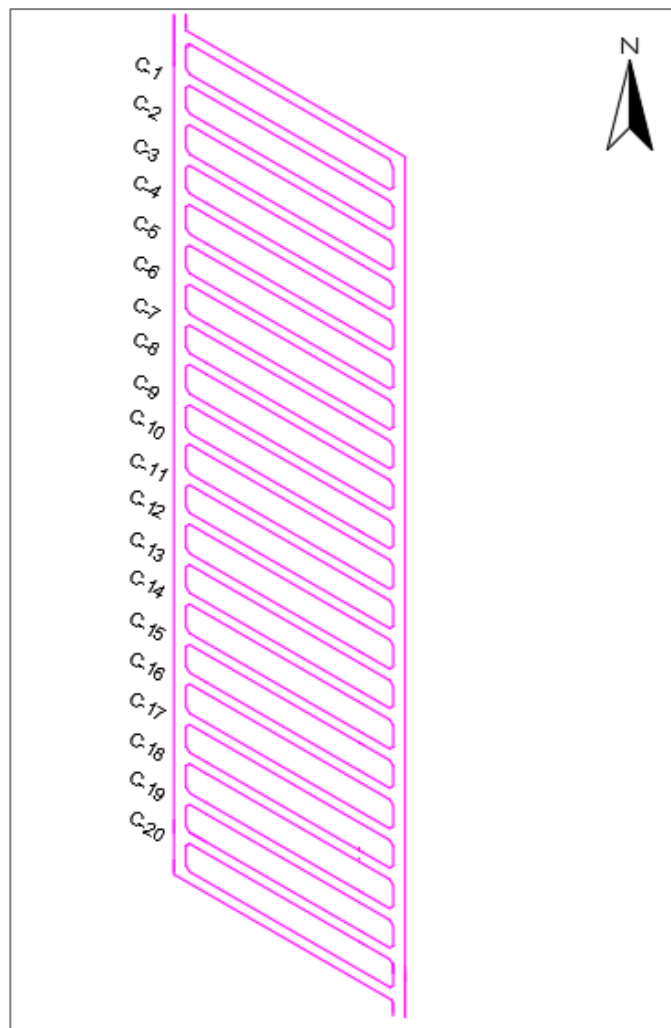


Ilustración 4.3. Diseño del nivel de hundimiento con perforación y tronadura.

El diseño de este nivel contempla las siguientes dimensiones de galerías, tanto para las cabeceras, como para las galerías de hundimiento.

Tabla 4.1. Dimensiones de galerías de nivel de hundimiento para caso P&T.

Galerías	Dimensiones	Unidad
Cabeceras NH	4,5 x 4,5	m
Galería de hundimiento	3,7 x 3,7	m

4.3 NIVEL DE PRODUCCIÓN

Como antecedente se tiene un diseño de nivel de producción para block caving (Ilustración 4.4), el cual contempla una malla de extracción tipo teniente 15 x 15, con $D_c//z$ y $D_z \perp z$ igual a 30 y 15 metros, respectivamente. Las galerías de este nivel presentaban las dimensiones descritas en Tabla 4.2.

Galerías	Dimensiones	Unidad
Cabeceras NP	4,5 x 4,5	m
Calles de producción	4,1 x 4,1	m
Galerías de zanja	4,1 x 4,1	m

Tabla 4.2. Dimensiones de galerías del caso P&T del nivel de producción.

El diseño contempla 9 calles de producción con orientación S60E y 6 zanjas con orientación NS. Como también, cuenta con 4 cabeceras (Norte, Sur, Este y Oeste), una rampa de acceso Oeste y 11 accesos Este. Todas las galerías de este nivel se desarrollan con P&T.

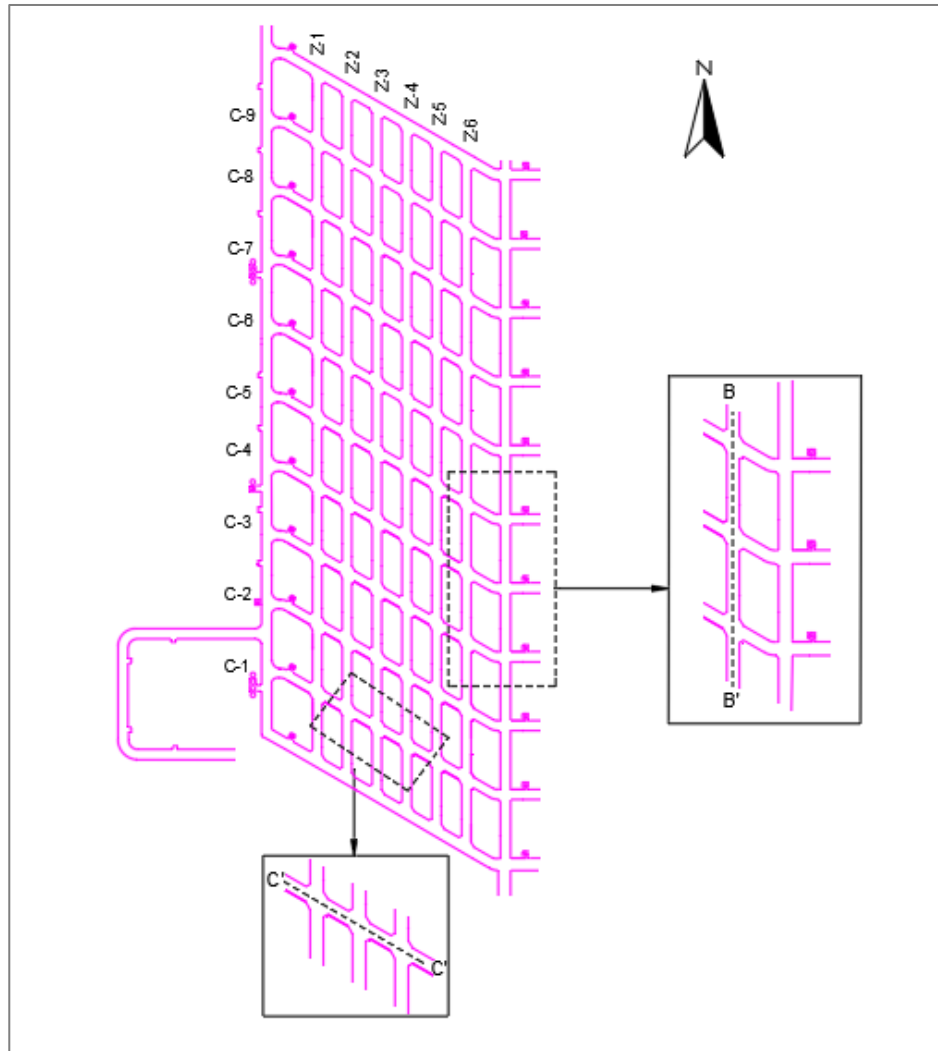


Ilustración 4.4. Diseño base del nivel de producción.

4.4 OBRAS DE HORMIGÓN

El caso P&T contempla la construcción de carpetas de rodados de 0,2 metros en calles de producción y cabeceras empleando un hormigón tipo H-35. La Ilustración 4.5 e Ilustración 4.6 muestran las secciones de estas galerías junto con la carpeta de rodado instalada.

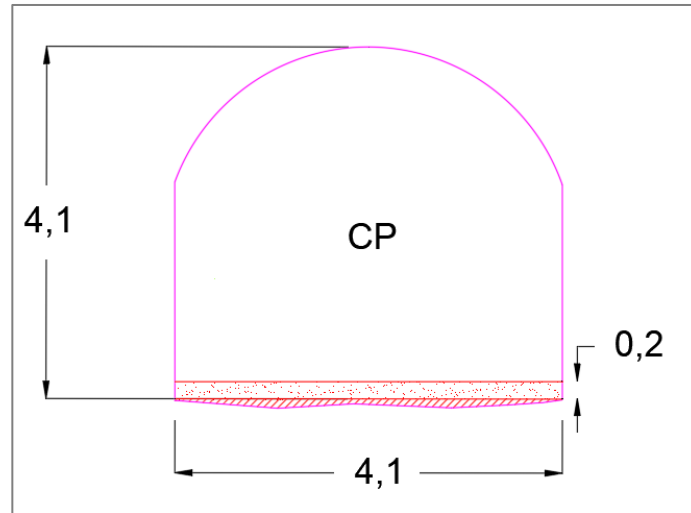


Ilustración 4.5. Carpeta de rodado en calles de producción.

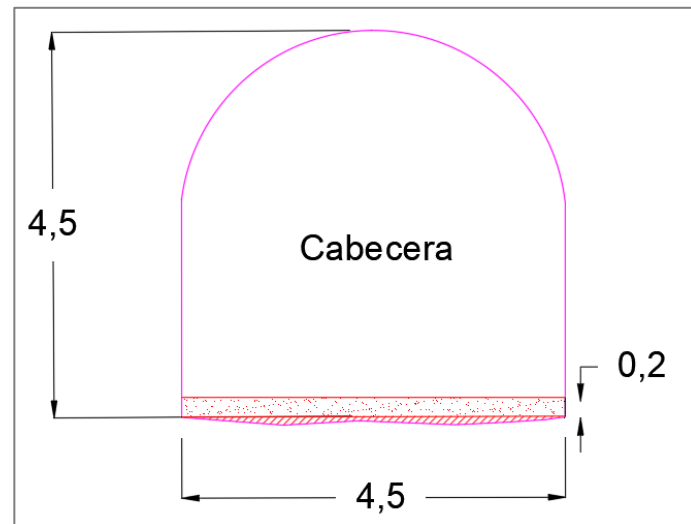


Ilustración 4.6. Carpeta de rodado en cabeceras NH y NP

La Ilustración 4.7 muestra una sección del punto de extracción, para su construcción se contempla el uso de hormigón de relleno tipo H-30 y una carpeta de rodado de 0,2 metros construida con hormigón tipo H-70.

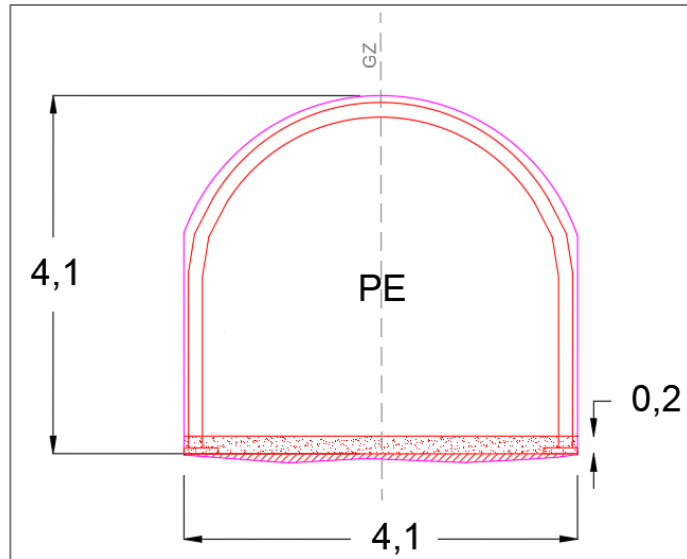


Ilustración 4.7. Sección de punto de extracción.

A continuación se presentan la cubicación del hormigón necesario para la construcción de las obras.

Tabla 4.3. Cantidad de hormigón por obra utilizado para caso P&T.

Obra	Caso P&T	Unidad
Construcción punto de extracción (Hormigón H-30)¹	3024	m ³
Carpeta de rodado en zanja (Hormigón H-70)	1140	m ³
Carpeta de rodado calles y cabeceras (Hormigón H-35)	1944	m ³
Total hormigón	6108	m ³ ¹

¹ Considerando que un punto de extracción requiere 25,2 m³ de hormigón tipo H-30 y se utiliza carpeta de rodado (Camhi, 2012).

4.5 COSTOS DE PREPARACIÓN

El resumen de la cubicación efectiva de las actividades de preparación del nivel de hundimiento y producción se muestra en Tabla 4.4, la tabla completa de cubicaciones se encuentra en Anexo C: Cubicaciones y costos de preparación para caso P&T.

Tabla 4.4. Cubicaciones de obras de excavación en nivel de hundimiento para caso P&T.

Descripción	Cantidad	Unidad
Nivel de hundimiento		
Desarrollo GH 3,7 x 3,7	1708	m
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	826	m
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	202	m
Perforación radial	55397	ml
Nivel de producción		
Desarrollo CP 4,1 x 4,1	1000	m
Desarrollo de galería de zanja	1800	m
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	1160	m
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	516	m
Pavimento H-35 con fibra en Calles y cabeceras	1944	m ³
Suministro y construcción de punto de extracción	120	un
Perforación zanjas	21254	ml

Los costos para el caso P&T se resumen en Tabla 4.5, con un costo por área preparada de 1523 US\$/m². Los costos de cada una de las actividades de preparación se encuentran en el Anexo C: Cubicaciones y costos de preparación para caso P&T.

Tabla 4.5. Resumen de costos de caso P&T.

Costo nivel de hundimiento	12,6	MMUS\$
Costo nivel de producción	26,4	MMUS\$
Costo Total	39,0	MMUS\$

4.6 TIEMPOS DE PREPARACIÓN

Para la determinación del tiempo total de preparación minera se determina la secuencia constructiva descrita a continuación:

- Nivel de hundimiento:
 1. Las cabeceras del nivel de hundimiento se desarrollan mediante P&T de forma simultánea con las del nivel de producción.
 2. Se excavan las galerías de hundimiento mediante P&T.
 3. Terminadas las galerías de hundimiento se procede a desarrollar la perforación radial de socavación, como también las chimeneas piloto.
- Nivel de producción:
 1. Las cabeceras del nivel de producción se desarrollan mediante P&T de forma simultánea con las del nivel de hundimiento.
 2. Desarrollo de las calles de producción del área sur.
 3. Desarrollo de las galerías de zanja del área sur.
 4. Desarrollo de las calles de producción del área norte.
 5. Desarrollo de las galerías de zanja del área norte.
 6. Perforación de chimeneas piloto.
 7. La instalación del pavimento en cabeceras y calles, y la construcción de puntos de extracción se realizan de forma simultánea, una vez terminado el desarrollo de las galerías de zanja sur.

Se determina la cantidad de cuadrillas a usar para cada actividad.

La excavación de las galerías se realiza con un total de 4 cuadrillas:

- Cabecera nivel de hundimiento 2 cuadrillas.
- Galerías de hundimiento: 2 cuadrillas (mismas utilizadas para la excavación de cabeceras).
- Cabecera nivel de producción: 2 cuadrillas.

- Galerías nivel de producción y zanja sur: 2 cuadrillas (mismas cuadrillas utilizadas para la excavación de las cabeceras del nivel de producción).
- Galerías nivel de producción y zanja norte: 2 cuadrillas (estas cuadrillas anteriormente desarrollaron las galerías de hundimiento).

Para la construcción de las obras de hormigón se cuenta con 6 cuadrillas en total:

- Puntos de extracción: 4 cuadrillas.
- Pavimento: 2 cuadrillas.

La perforación se realiza mediante 2 cuadrillas en total:

- Perforación de socavación: 2 cuadrillas.
- Perforación de zanja: 2 cuadrillas (mismas cuadrillas que perforaron la socavación).

Considerando los rendimientos que presenta una cuadrilla en el desarrollo de una actividad de preparación y la definición de la cantidad de cuadrillas por actividad, se obtuvo la duración en días para cada actividad detallada en Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Duración en días de cada actividad de preparación minera para caso P&T.

Descripción	Rendimiento Unidad/d-R	#R	Duración días
Nivel de hundimiento			
Desarrollo GH 3,7 x 3,7 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	123
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	60
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	20	1	5
Perforación radial	120	2	231
Nivel de producción			
Desarrollo CP 4,1 x 4,1 S con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	36
Desarrollo CP 4,1 x 4,1 N con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	36
Desarrollo de galería de zanja S con malla y perno 2,4 m	7	2	65

Desarrollo de galería de zanja N con malla y perno 2,4m	7	2	65
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	83
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m	20	1	26
Pavimento H-35 con fibra en Calles y Cabeceras	20	2	49
Construcción de punto de extracción	0,08	4	376
Perforación zanjas	120	2	89

Definida la secuencia constructiva y los tiempos de duración de cada actividad se obtiene la Carta Gantt de Ilustración 4.8.

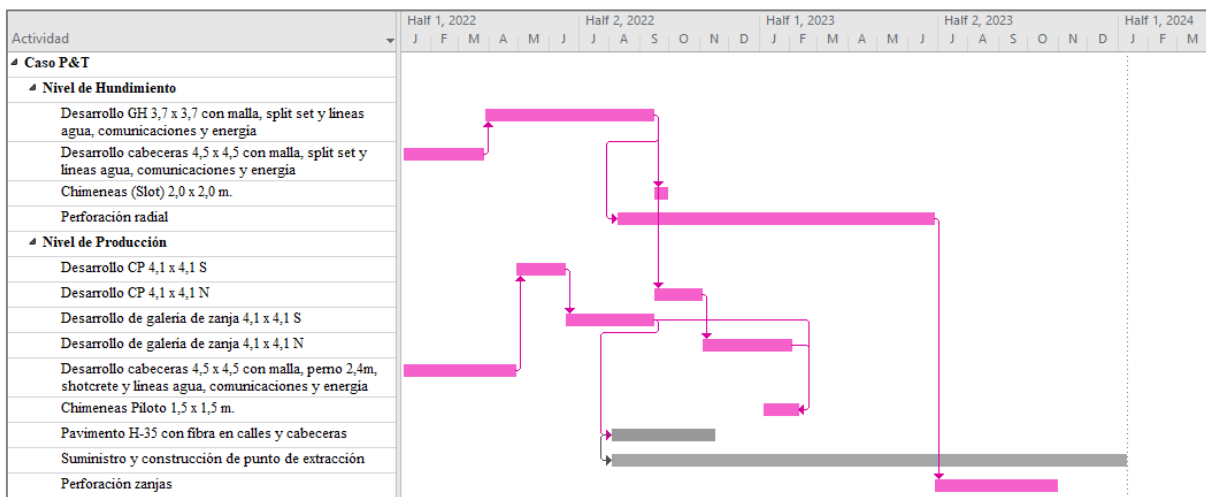


Ilustración 4.8. Carta Gantt para caso P&T.

En la carta Gantt se diferencian las diferentes actividades por colores. En rosado se encuentran las actividades desarrolladas por P&T y en gris las obras de hormigón.

Tabla 4.7. Resumen de tiempos de preparación para caso P&T.

Tiempo nivel de hundimiento	387	Días
Tiempo nivel de producción	528	Días
Tiempo Total	528	Días

CAPÍTULO 5. DISEÑO MINERO CASO *DRIFT BORER*

5.1 DIAGRAMAS DE PERFORACIÓN

Se obtuvo la disposición en el espacio del nivel de hundimiento y producción representada en Ilustración 5.1, correspondiente al perfil A-A'. Las galerías del nivel de hundimiento se encuentran a 7,5 metros de distancia del nivel de producción, medida desde techo de estocada a piso de galería de hundimiento. Las galerías de hundimiento se encuentran a 15 metros de distancia y se ubican de forma intercalada con respecto a las galerías del nivel de producción.

El ángulo de visera y el ángulo de talud batea corresponden a 90° y 50° , respectivamente.

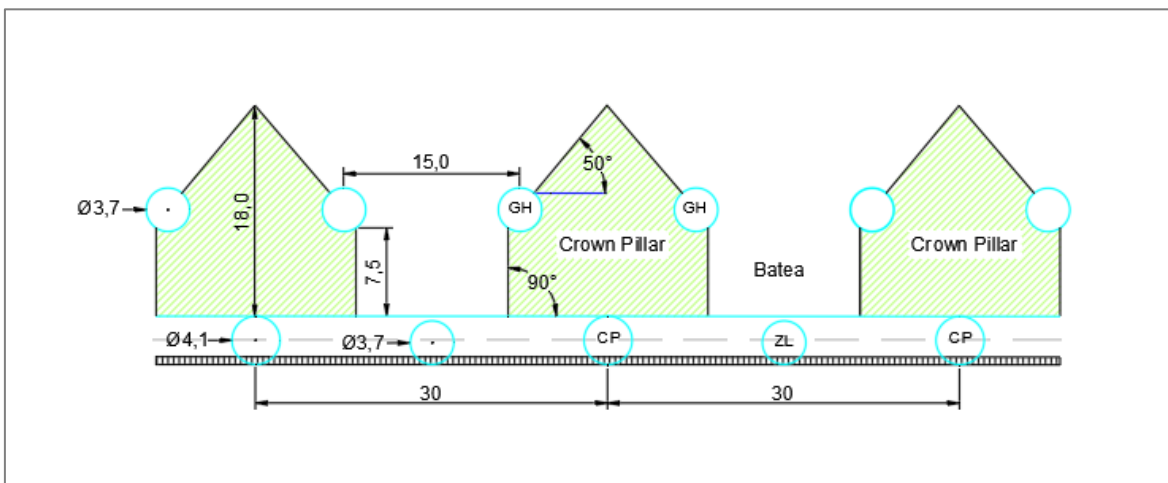


Ilustración 5.1. Vista NS de nivel de producción y hundimiento para caso drift borer con sus dimensiones y respectivos pilares.

La socavación basal en el nivel de hundimiento tiene una altura de 10 metros y se realiza a partir de tiros desde las galerías de hundimiento, con un espaciamiento y burden de 3 metros, como se puede observar en Ilustración 5.2. Cabe señalar que las líneas punteadas y continuas de estos tiros indican que la socavación de hundimiento se realiza con abanicos verticales traslapados.

La apertura de la zanja se ejecuta completamente desde el nivel de producción, por medio de perforaciones radiales desde las galerías de zanja con burden y espaciamiento de 3 metros, y a una altura máxima de tiro de 18 metros que corresponde a la perforación central. Por último, el destace de la batea se lleva a cabo mediante perforación radial desde la estocada.

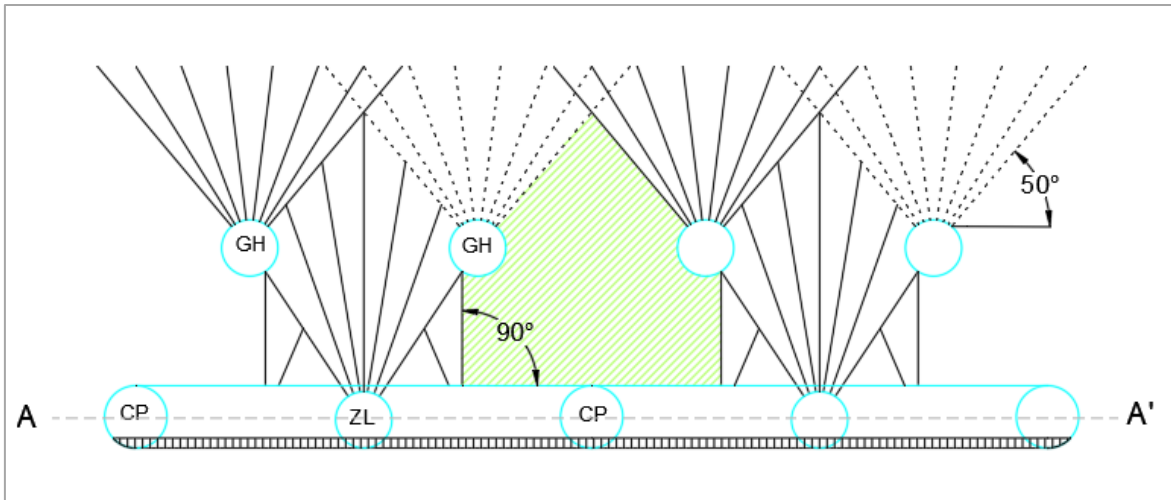


Ilustración 5.2. Diagramas de perforaciones del nivel de hundimiento y de producción para caso drift borer (vista NS).

5.2 NIVEL DE HUNDIMIENTO

El nivel de hundimiento cuenta con 20 galerías espaciadas a 15 metros con orientación S60E, presenta 4 cabeceras (Norte, Sur, Este y Oeste) y dos accesos, uno al norte y otro al sur, como se muestra en Ilustración 5.3.

Las dimensiones de las galerías de este nivel se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Dimensiones de galerías de diseño propuesto del nivel de hundimiento.

Galerías	Dimensiones	Unidad
Cabeceras NH	4,5 x 4,5	m
Galería de hundimiento	3,7 Ø	m

En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las secciones de las estocadas de inicio, realizadas con P&T y las galerías de hundimiento escariadas con el equipo *drift borer*. Cabe señalar que las estocadas de inicio presentan dimensiones mayores para facilitar el montaje del equipo.

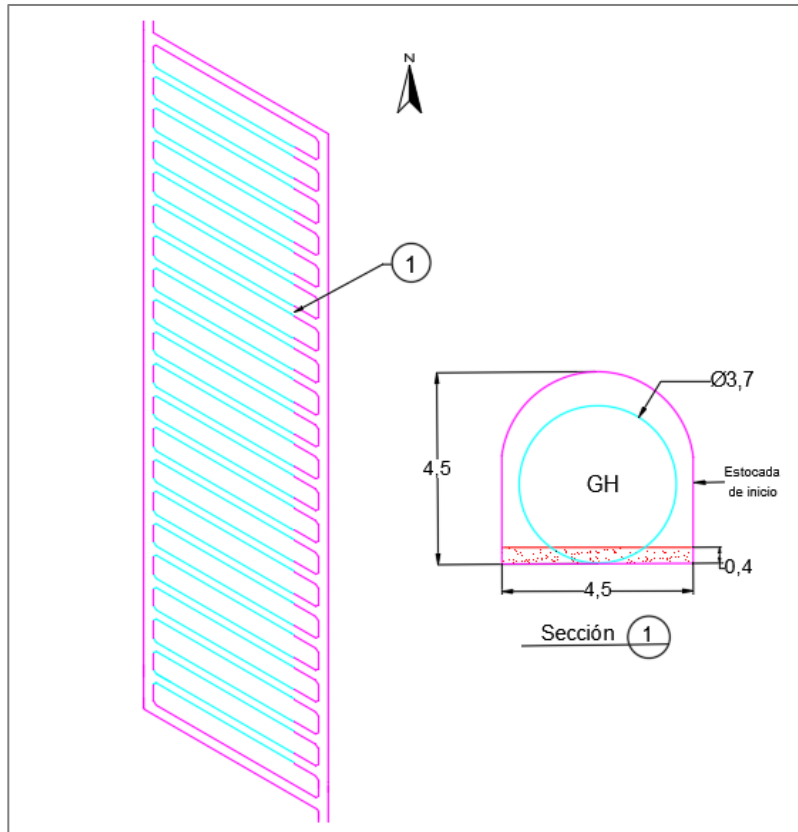


Ilustración 5.3. Diseño propuesto de nivel de hundimiento para construcción mecanizada, diferenciando los desarrollos con P&T (rosado) y drift borer (celeste), junto con la sección de estocada de inicio y galería de hundimiento.

La estabilidad del nivel de producción es calculada por medio del método de área tributaria, para ello, se considera un esfuerzo in situ vertical de 26 MPa y una resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de 190 MPa.

A partir de los datos presentados en Tabla 5.5, junto con la Ecuación 1, se calcula el esfuerzo sobre el pilar, obteniendo un esfuerzo (σ_p) igual a 39,0 MPa.

Tabla 5.2. Datos de pilar y excavación.

Dato	Sigla	Valor	Unidad
Largo de Pilar	Lp	89,4	m
Ancho pilar	Wp	11,1	m
Altura pilar	H	4,1	m

Largo de excavación	Lo	4,5	m
Ancho de excavación	Wo	4,7	m

Por otro lado, para la determinación de la resistencia del pilar (S_p), se hace uso de las ecuaciones propuestas por diferentes autores indicados en Tabla 3.1. Luego, considerando la Ecuación 2 se obtiene el factor de seguridad para cada autor.

Tabla 5.3. Resumen de valores obtenidos para resistencia de pilar y factor de seguridad para cada autor.

Autores	Sp	FS
Sjoberg	80,7	2,1
Krauland & Soder	92,8	2,4
Lunder	132,3	3,4
Overt-Duvall	262,0	6,7
Bieniawski	296,5	7,6

Los valores de factor de seguridad de Tabla 5.3, indican que los pilares del nivel de producción cumplen con la condición de estabilidad, son mayores que 1,4.

5.3 NIVEL DE PRODUCCIÓN

El diseño de nivel de producción contempla cabeceras (Norte, Sur, Este, Oeste), calles de producción y galerías de zanja en dirección S60E, estocadas en dirección NS y excavaciones de inicio en el ingreso Este a calles de producción, que permiten posicionar el equipo *drift borer* para su operación.

La Ilustración 5.4 diferencia los desarrollos que se realizan con P&T y extracción mecanizada. Mediante P&T se llevan a cabo las cabeceras, accesos y excavaciones de inicio, mientras que las áreas donde se utiliza el *drift borer* corresponden a las calles de producción, estocadas y galerías de zanja.

Con respecto al diseño en sí, la distancia entre calles de producción es de 30 metros, mientras que entre estocadas es de 15 metros y, tanto las calles de producción, como las galerías de zanja se encuentran a 60° de las estocadas.

Las galerías de zanja presentan menor diámetro que las calles de producción y estocadas, esto debido a que es un desarrollo temporal e ingresan equipos de menores dimensiones para el retiro de marina al momento de desarrollar la galería con el equipo *drift borer* y, para la apertura de la zanja longitudinal.

Tabla 5.4. Dimensiones de galerías del nivel de producción para caso drift borer.

Galerías	Dimensiones	Unidad
Cabeceras NP	4,5 x 4,5	m
Calles de producción	4,1 Ø	m
Galería de zanja	3,7 Ø	m
Estocadas	4,1 Ø	m

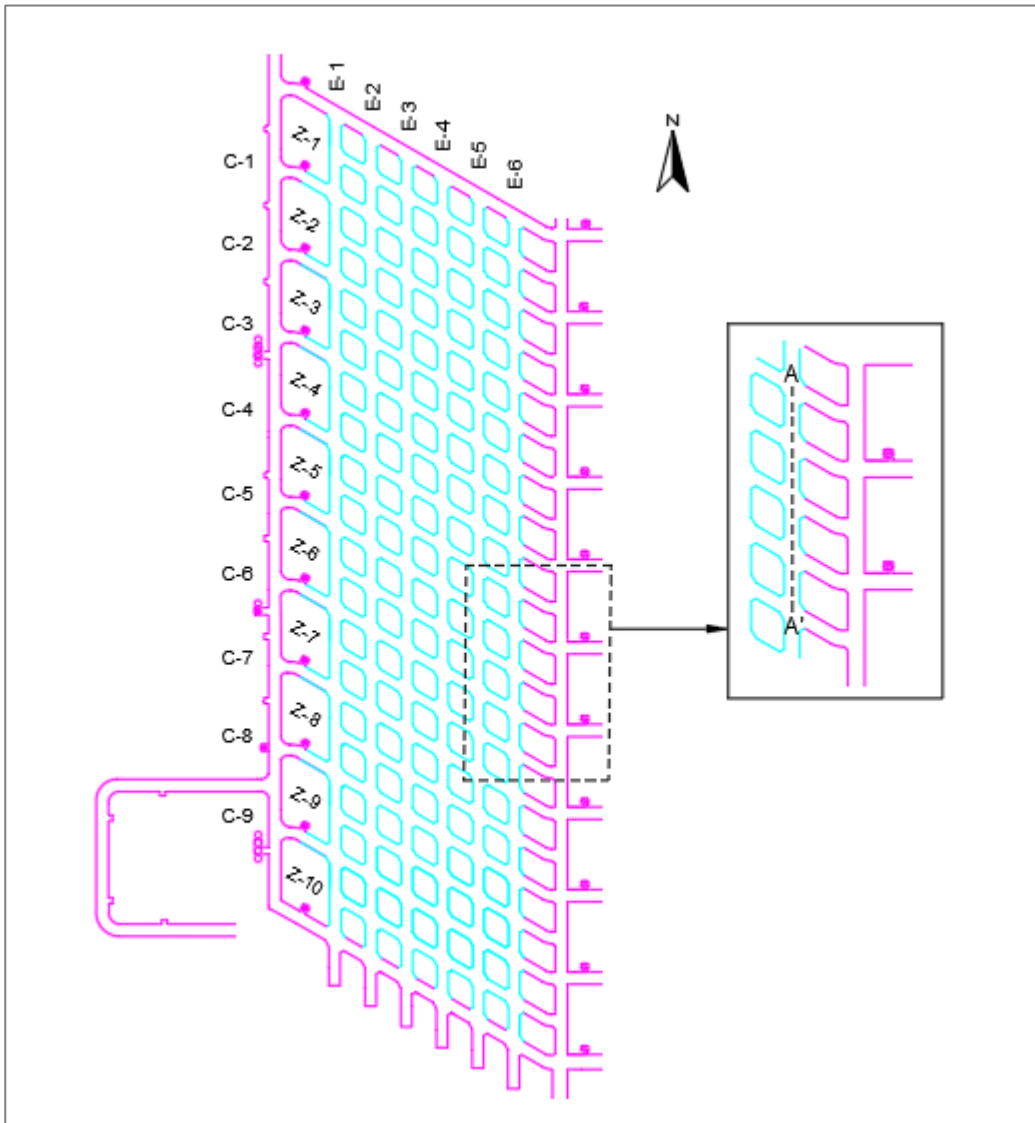


Ilustración 5.4. Diseño propuesto de nivel de producción para construcción mecanizada, diferenciando los desarrollos con P&T (rosado) y drift borer (celeste).

Las siguientes ilustraciones muestran las secciones de las estocadas de inicio y de las galerías excavadas *con drift borer*. Como se observa, las estocadas de inicio son galerías con paredes rectas y techo circular al estar excavadas por P&T, mientras que las CP, E, GZ son de sección circular al excavar con el equipo *drift borer*. Las dimensiones de las estocadas de inicio son mayores para facilitar el montaje del equipo.

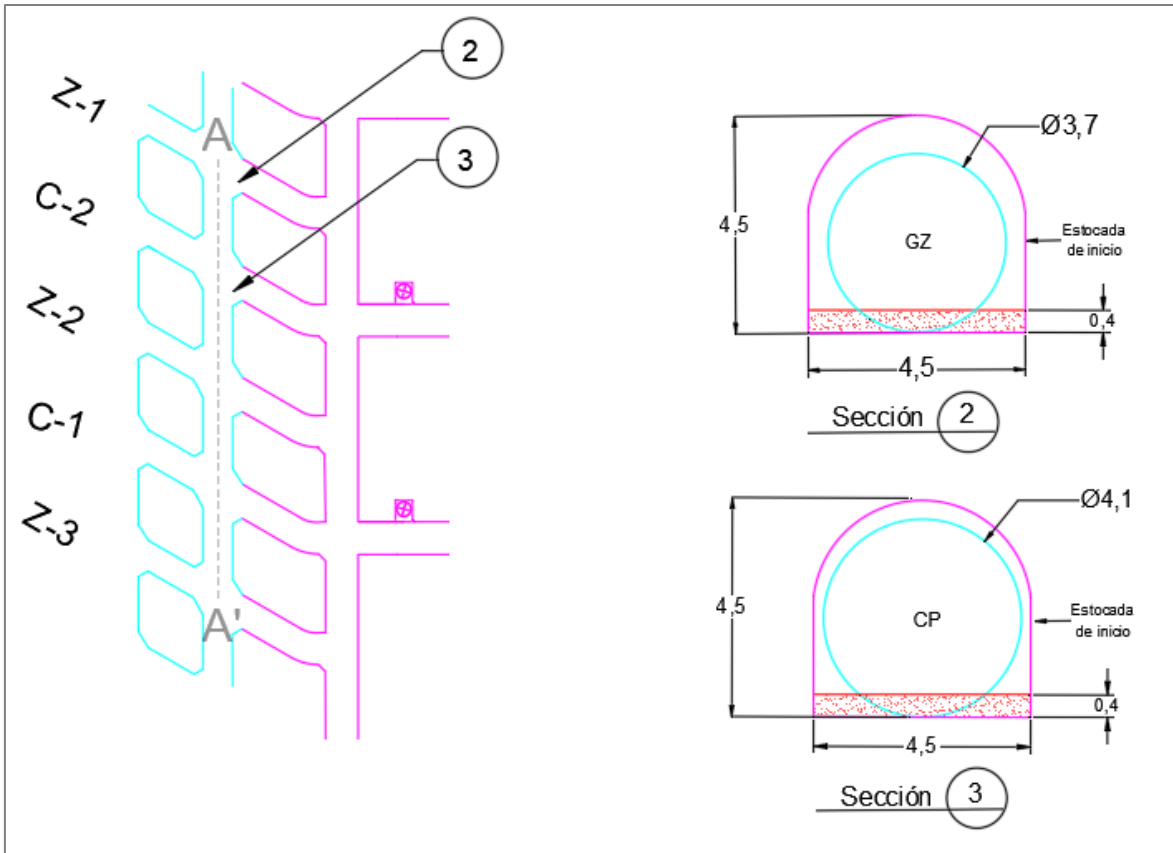


Ilustración 5.5. Sección de estocada de inicio y calle de producción.

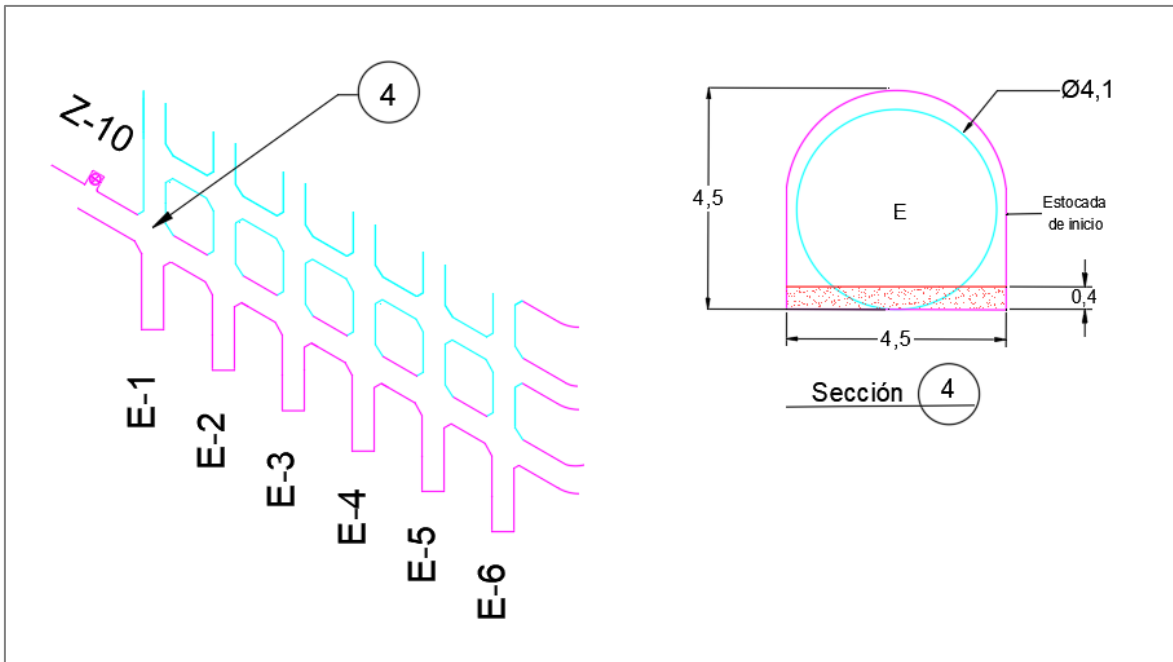


Ilustración 5.6. Sección de estocada de inicio y estocada.

Por otro lado, el diámetro del escariado se reduce dependiendo del tipo de galería a excavar, como se observa en la Ilustración 5.7 e Ilustración 5.8, donde las calles de producción presentan un diámetro de 4,1 metros y las galerías de zanja de 3,7 metros.

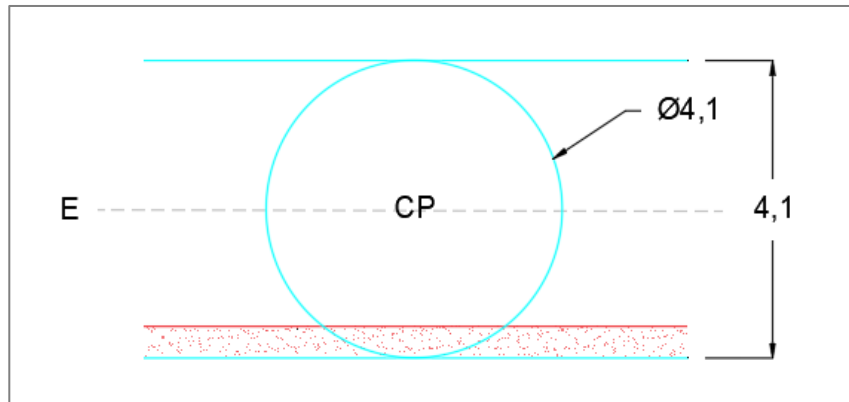


Ilustración 5.7. Intersección entre estocada y calle de producción.

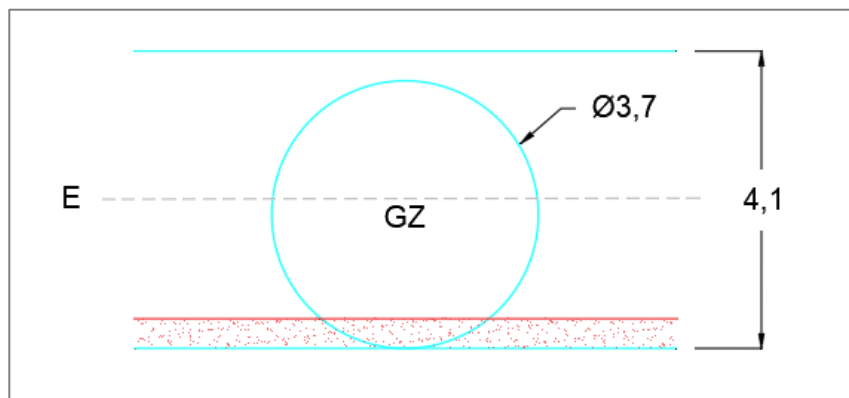


Ilustración 5.8. Intersección entre estocada y galería de zanja.

Al momento de realizar un diseño de nivel de block caving es importante considerar la estabilidad de los pilares que quedan entre excavaciones permanentes y temporales, debido a que son estos los que deben soportar la carga superior que ejerce el macizo rocoso, evitando el colapso del nivel.

Para realizar una evaluación y análisis simple de la estabilidad de los pilares, como primera aproximación se utiliza el método de área tributaria, obteniendo una predicción del comportamiento del pilar. Para este análisis se considera un esfuerzo in situ vertical de 26 MPa y una resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de 190 MPa.

A partir de los datos presentados en Tabla 5.5 junto con la Ecuación 1 , se calcula el esfuerzo sobre el pilar, obteniendo un esfuerzo (σ_p) igual a 54,3 MPa.

Tabla 5.5. Datos de pilar y excavación.

Dato	Sigla	Valor	Unidad
Largo de Pilar	Lp	8,9	m
Ancho pilar	Wp	10,5	m
Altura pilar	H	4,1	m
Largo de excavación	Lo	4,1	m
Ancho de excavación	Wo	4,5	m

Por otro lado, para la determinación de la resistencia del pilar (S_p), se hace uso de las ecuaciones propuestas por diferentes autores indicados en Tabla 3.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Luego, considerando la Ecuación 2 se obtiene el factor de seguridad para cada autor.

Tabla 5.6. Resumen de valores obtenidos para resistencia de pilar y factor de seguridad para cada autor.

Autores	Sp	FS
Sjoberg	78,8	1,5
Krauland & Soder	90,6	1,7
Lunder	129,6	2,4
Overt-Duvall	255,8	4,7
Bieniawski	287,0	5,3

Los valores de factor de seguridad de Tabla 5.6, indican que los pilares del nivel de producción cumplen con la condición de estabilidad, debido a que son mayores que 1,4.

5.4 NUEVAS OBRAS DE HORMIGÓN

Dentro de las actividades de preparación a realizar se encuentra la instalación de estructuras de hormigón prefabricadas denominadas dovelas (Ilustración 5.9). Estas estructuras permiten a los equipos mineros transitar por las galerías de sección circular, específicamente por las calles de producción y estocadas.

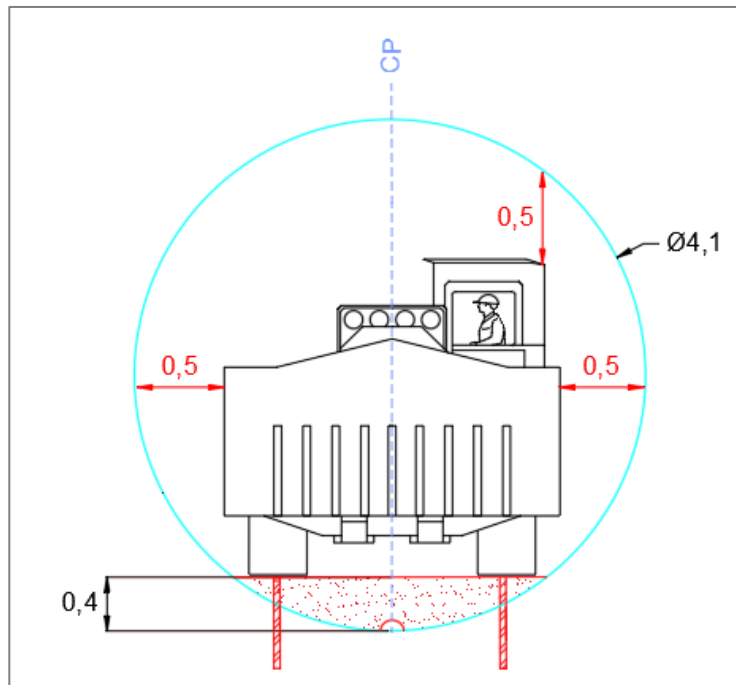


Ilustración 5.9. Representación de dovela en calle de producción.

Las dovelas son estructuras prefabricadas que presentan una altura de 0,4 metros, con un ancho de 2,5 metros y un espesor de 0,5 metros. Como se puede observar en Ilustración 5.10-A, la dovela presenta una canaleta semicircular en la parte inferior como vía de escurrimiento de agua. Para su instalación las dovelas deben ser transportadas por cargadores que las posicionen en las calles de producción y estocadas, para luego ser ancladas.

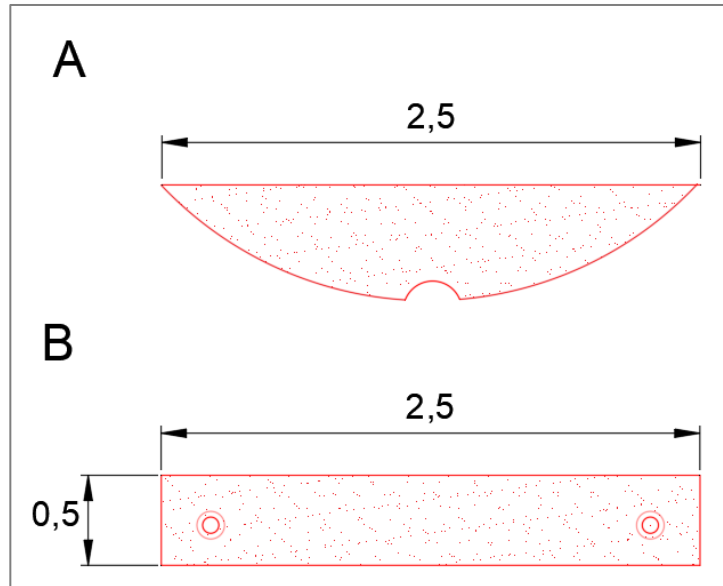


Ilustración 5.10. Dimensiones de dovelas. A: Vista de frente de dovela. B: Vista de plano de dovelas.

Por otro lado, la infraestructura en los puntos de extracción también corresponde a dovelas (Ilustración 5.11), pero invertidas, anclándose al techo en el punto de extracción. Igualmente el espesor de la dovela en estos puntos corresponde a 0,5 metros.

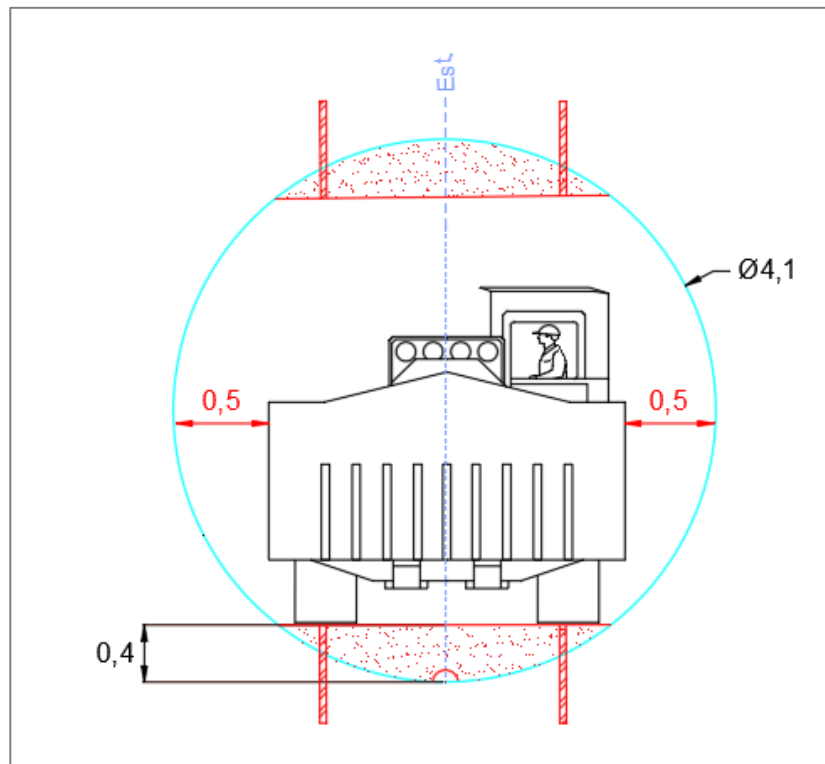


Ilustración 5.11. Dovela anclada a techo en punto de extracción.

A continuación se presentan la cubicación del hormigón necesario para la construcción de las obras.

Tabla 5.7. Cantidad de hormigón por obra utilizado para caso drift borer.

Obra	Caso drift borer	Unidad
Carpeta de rodado en PE (Hormigón H-70) más dovelas techo	606	m ³
Carpeta de rodado en cabeceras (Hormigón H-35)	2960	m ³
Dovelas en calles de producción	663	m ³
Total hormigón	4229	m ³

5.5 COSTOS DE PREPARACIÓN

Se realiza una cubicación efectiva de las actividades de preparación del nivel de hundimiento y producción, obteniendo los resultados de Tabla 5.8. Esta tabla muestra un resumen de las actividades de preparación a realizar considerando mayoritariamente las excavaciones mineras. La tabla completa de cubicaciones se encuentra en ANEXO D: Cubicaciones y costos de preparación para caso *drift borer*.

Tabla 5.8. Cubicaciones de obras de excavación en nivel de hundimiento para caso drift borer.

Descripción	Cantidad	Unidad
NIVEL HUNDIMIENTO		
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	1034	m
Desarrollo GH d = 3,7 m	1500	m
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	202	m
Perforación radial	55397	ml
NIVEL DE PRODUCCIÓN		
Desarrollo de cabeceras 4,5 x 4,5	1530	m

Desarrollo CP d = 4,1 m	822	m
Desarrollo de estocadas d = 4,1	1332	m
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	750	m
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	184	m
Dovela en CP	606	m ³
Pavimento H-35 con fibra en cabecera	2960	m ³
Construcción de punto de extracción (dovelas)	663	m ³
Perforación zanja longitudinal	24752	ml
Perforación destace batea	4320	ml

A partir de la cubicación se obtienen los costos para el caso *drift borer* de Tabla 5.9, con un costo por área preparada de 1.424 US\$/m².

Tabla 5.9. Resumen de costos de caso *drift borer*.

Costo nivel de hundimiento	12,2	MMUS\$
Costo nivel de producción	24,3	MMUS\$
Costo Total	36,5	MMUS\$

5.6 TIEMPOS DE PREPARACIÓN

Para la determinación del tiempo total de preparación minera se determina la secuencia constructiva que se describe a continuación:

Nivel de hundimiento:

1. Las cabeceras del nivel de hundimiento se desarrollan mediante P&T de forma simultánea con la del nivel de producción.
2. Ingresa un equipo *drift borer* a excavar las galerías de hundimiento.
3. Terminadas las cabeceras del nivel de hundimiento se procede a desarrollar la perforación radial de socavación.
4. Se realiza la perforación de las chimeneas piloto.

Nivel de producción:

1. Las cabeceras del nivel de producción se desarrollan mediante P&T de forma simultánea con las del nivel de producción.
2. Terminadas las cabeceras del nivel de producción se procede a pavimentar estas galerías.
3. Se excavan las galerías de zanja con el equipo *drift borer* utilizado para excavar las galerías de hundimiento del NH.
4. Ingresa un nuevo equipo *drift borer* a excavar las calles de producción.
5. Terminadas las excavaciones de las calles de producción y galerías de zanja, se comienzan a excavar las estocadas utilizando dos equipos *drift borer*.
6. Terminada la excavación de las galerías de zanja se realiza la perforación de la zanja longitudinal.
7. Se instalan las dovelas en las calles de producción en forma simultánea con la excavación de galerías.
8. Se construye el punto de extracción (dovelas techo y piso)
9. Se perforan las chimeneas piloto.
10. Terminada la perforación de la galería de zanja se procede a destazar las bateas.

Se determina la cantidad de cuadrillas a usar para cada actividad.

La excavación de las cabeceras se realiza con P&T con un total de 4 cuadrillas:

- Cabecera nivel de hundimiento 2 cuadrillas.
- Cabecera nivel de producción: 2 cuadrillas.

Para la excavación de las galerías se utilizan 2 cuadrillas con 1 equipo *drift borer* para cada cuadrilla:

- Galerías de hundimiento: 1 cuadrillas.
- Galería de zanja: 1 cuadrilla (misma cuadrilla utilizada para la excavación de la galería de hundimiento)
- Calle de producción: 1 cuadrilla (ingresa nueva cuadrilla).
- Estocadas: 2 cuadrillas (mismas cuadrillas que excavan las calles de producción y la galería de zanja).

Para la construcción de las obras de hormigón se cuenta con:

- Dovelas en piso de galería: 1 cuadrilla.
- Dovela en punto de extracción: 1 cuadrillas (misma cuadrilla que instala las dovelas en el piso de las galerías).
- Pavimento en cabeceras: 2 cuadrillas.

La perforación se realiza mediante 2 cuadrillas en total:

- Perforación de socavación: 2 cuadrillas.
- Perforación de zanja longitudinal: 2 cuadrillas (mismas cuadrillas que perforaron la socavación).

Considerando los rendimientos que presenta una cuadrilla en el desarrollo de una actividad de preparación y la definición de la cantidad de cuadrillas por actividad, se obtuvo la duración en días para cada una de ellas detallada en Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Duración en días de cada actividad de preparación minera para caso drift borer.

Descripción	Rendimiento Unidad/d-R	#R	Duración días
Nivel de hundimiento			
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	15	1	101
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	74
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	20	1	11
Perforación radial	120	2	231
Nivel de producción			
Desarrollo CP d=4,1	15	1	55
Desarrollo de estocadas d = 4,1	15	2	45
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	15	1	51
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	7	2	110
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m	20	1	10

Dovelas en CP	22,5	1	74
Pavimento H-35 con fibra en Cabeceras	20	2	74
Construcción de punto de extracción (dovelas)	22,5	1	81
Perforación zanja longitudinal	120	2	104
Perforación destace batea	120	2	19

Definida la secuencia constructiva y los tiempos de duración de cada actividad se obtiene la Carta Gantt de Ilustración 5.12.

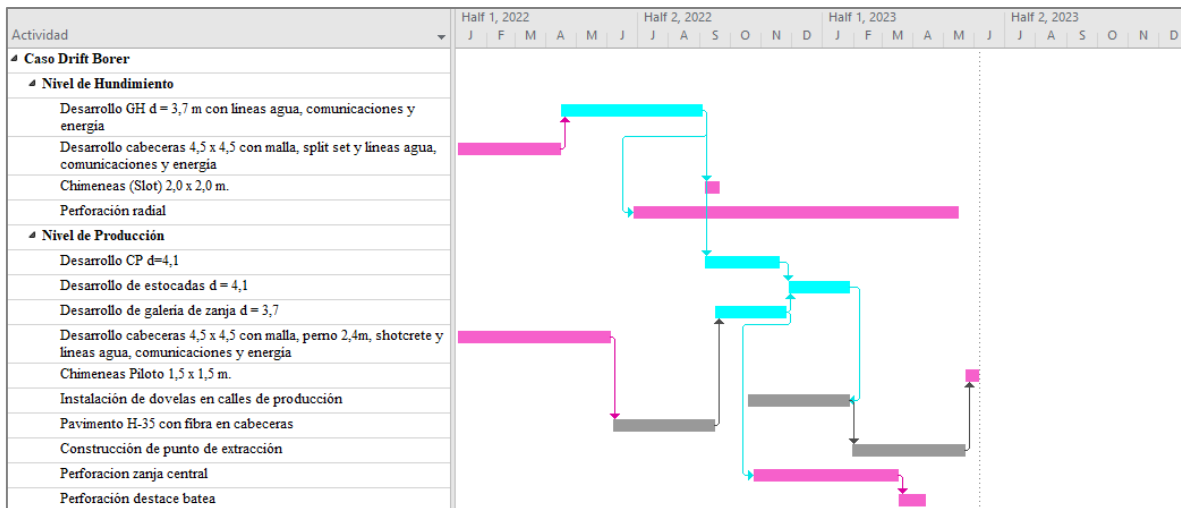


Ilustración 5.12. Carta Gantt para caso drift borer.

En la carta Gantt se diferencian las actividades por colores, en rosado se encuentran las actividades desarrolladas por P&T, en celeste las actividades de excavación con *drift borer* y en gris las obras de hormigón.

Tabla 5.11. Resumen de tiempos de preparación para caso drift borer.

Tiempo Nivel Hundimiento	356	Días
Tiempo Nivel de Producción	371	Días
Tiempo Total	371	Días

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 SÍNTESIS DE IMPACTO TÉCNICO

La diferencia del tiempo de preparación entre ambos casos es de 157 días, esto quiere decir que la preparación minera del caso *drift borer* demora un 30% menos que la preparación del caso P&T.

Tabla 6.1. Tiempo de preparación de NH, NP y total para caso P&T y caso *drift borer*.

	Caso P&T	Caso <i>drift borer</i>	Unidad
Tiempo nivel de hundimiento	387	356	Días
Tiempo nivel de producción	528	371	Días
Tiempo total	528	371	Días

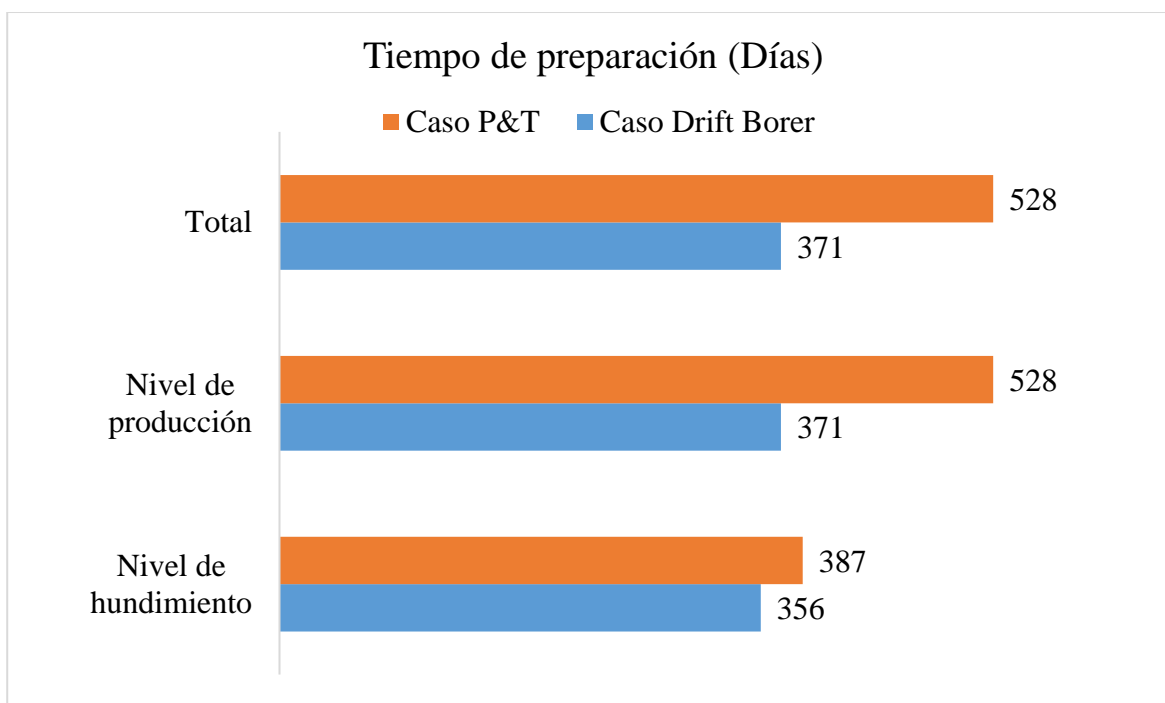


Gráfico 1. Tiempo de preparación de nivel de hundimiento y producción para caso P&T y *drift borer*.

Según Tabla 6.1 el tiempo de preparación del nivel de producción para el caso P&T toma 528 días mientras que para el caso *drift borer* solo 371 días. Esto se debe a cómo se

construyen los puntos de extracción en el caso P&T, puesto que se realiza in situ, involucrando un procedimiento que extiende el tiempo de la actividad, como es la construcción de la infraestructura del PE, la cual considera la disposición de una armadura, colocación de un molde y el relleno con hormigón, como también la instalación de la carpeta de rodado. Diferente es la construcción de los puntos de extracción del caso *drift borer*, ya que se utilizan dovelas las cuales son transportadas por medio de equipos de carga y luego son ancladas al piso y al techo del punto de extracción, reduciendo el tiempo de desarrollo de la obra significativamente, como se observa en Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Tiempo de suministro y construcción de un punto de extracción para el caso P&T y el caso *drift borer*.

Descripción	Tiempo	Unidad
Construcción de PE en 1 punto (P&T)	3,1	Días
Construcción de PE en 1 punto (Drift Borer)	0,7	Días

La Ilustración 6.1 muestra la ruta crítica para el caso P&T, siendo el suministro y construcción de puntos de extracción una variable crítica determinante en el tiempo que demora la preparación de ambos niveles.

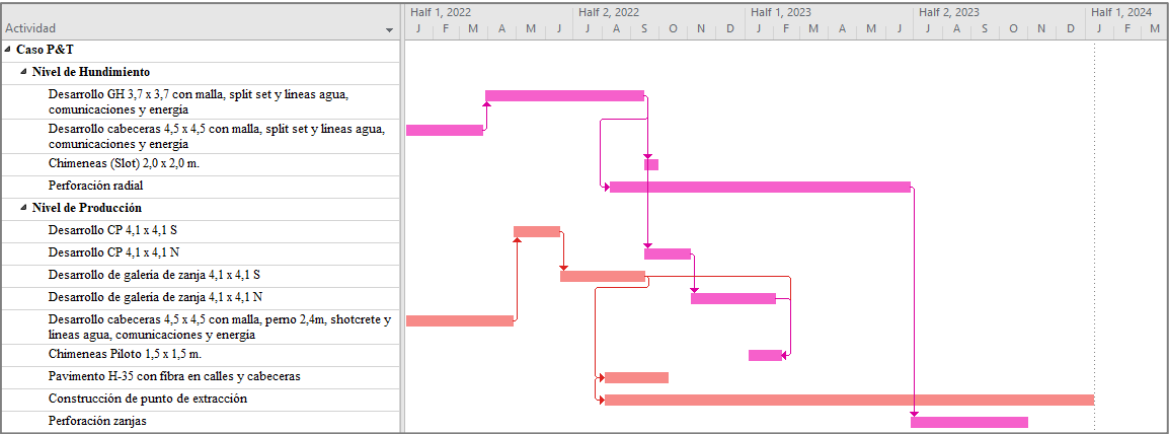


Ilustración 6.1. Ruta crítica para caso P&T.

Un aspecto técnico relevante tiene relación con las obras de hormigón, como se aprecia en Tabla 6.3 la cantidad de hormigón utilizado en el caso P&T es mayor que para el caso *drift*

borer, debido a la menor cantidad de hormigón utilizado en la construcción del punto de extracción.

Tabla 6.3. Cubicación de obras de hormigón para caso P&T y *drift borer*.

	Caso P&T	Caso <i>drift borer</i>	Unidad
Construcción punto de extracción (carpeta + infraestructura en PE)	4164	606	m ³
Pavimento H-35 con fibra²	1944	2960	m ³
Dovelas en CP	-	663	m ³
Total	6108	4229	m ³

Por otro lado, la preparación del nivel de hundimiento en el caso P&T demora 31 días más que en el caso *drift borer*, a pesar de que el diseño del nivel para ambos y la cantidad total de metros de galerías de hundimiento y cabeceras sean las mismas, la diferencia se explica porque las galerías de hundimiento en el caso *drift borer* se realizan con el equipo *drift borer* el cual posee un rendimiento de $15 \left[\frac{m}{d-N^{\circ}cuadrilla} \right]$, mayor que el rendimiento de P&T igual a $7 \left[\frac{m}{d-N^{\circ}cuadrilla} \right]$.

² En el caso *drift borer* se utiliza el hormigón H-35 solo en cabeceras y en el caso P&T se utiliza en cabeceras y calles de producción.

6.2 SÍNTESIS DE IMPACTO ECONÓMICO

Desde el punto de vista del impacto económico, el costo total del caso *drift borer* es un 7% menor que el costo del caso P&T.

Tabla 6.4. Comparación de costos de preparación para caso P&T y *drift borer*.

	Caso P&T	Caso <i>drift borer</i>	Unidad
Costo nivel de hundimiento	12,6	12,2	MMUS\$
Costo nivel de producción	26,4	24,3	MMUS\$
Costo Total	39,0	36,5	MMUS\$

El costo del nivel de producción del caso *drift borer* es menor que el caso P&T debido al tipo de galería que desarrolla el equipo, ya que al excavar galerías circulares no se requiere de fortificación. En el caso *drift borer* solo se fortifican las cabeceras, puesto que se excavan mediante perforación y tronadura. Las calles de producción, estocadas y zanjas longitudinales no se fortifican, como se puede ver en Anexo D: Cubicaciones y costos de preparación para caso *drift borer*.

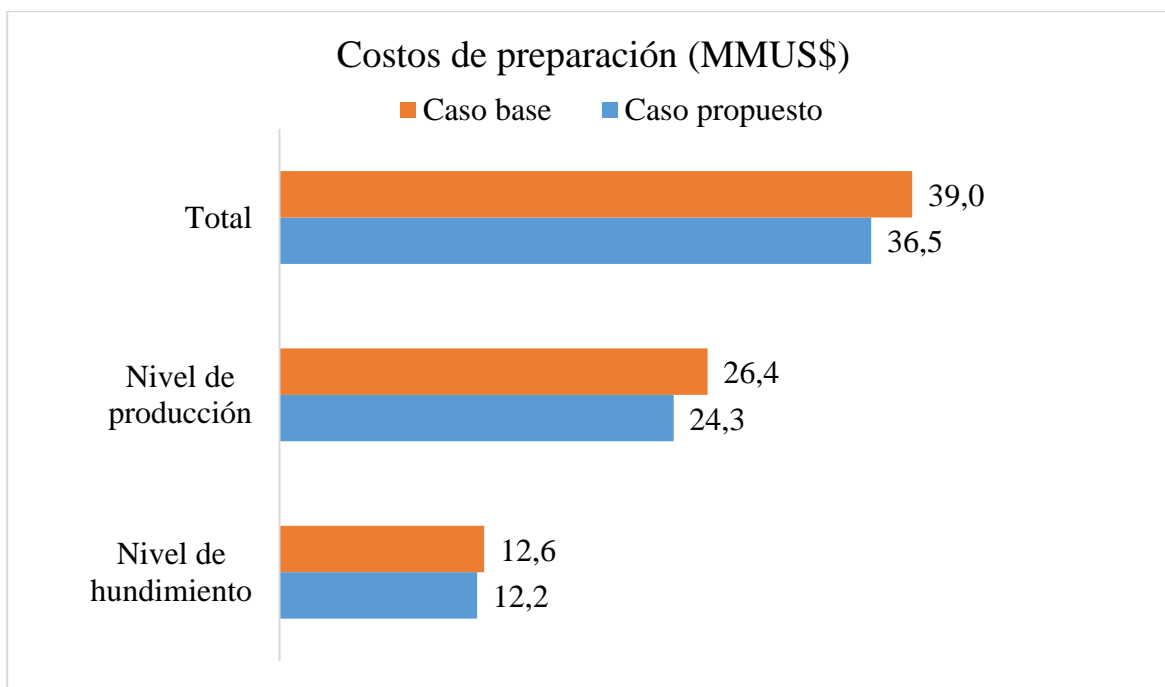


Gráfico 2. Costo de preparación de nivel de hundimiento y producción para caso P&T y *drift borer*.

En Tabla 6.5 se desglosan los costos por tipo de obra, para el caso *drift borer* el costo de excavación de galerías contempla las realizadas por P&T y *drift borer*.

Tabla 6.5. Resumen de costos de preparación por tipo de obra para NH y NP de ambos casos.

	Caso <i>drift borer</i>	Caso P&T	Unidad
Excavación galerías	24,8	21,4	MMUS\$
Fortificación	5,4	8,9	MMUS\$
Perforaciones	2,6	3,2	MMUS\$
Obras de hormigón	3,7	5,5	MMUS\$
Costo total de preparación	36,5	39,0	MMUS\$

El costo de excavación de las galerías es mayor para el caso *drift borer* debido a la incorporación de galerías de zanja longitudinal en el NP y por el costo que conlleva la excavación de galerías con el equipo *drift borer*. Por otro lado, el caso *drift borer* presenta una reducción en el costo de fortificación ya que solo se fortifican las cabeceras. Al final, los costos de preparar las galerías y fortificarlas son similares, siendo de 30,2 MMUS\$ para el caso *drift borer* y 30,3 MMUS\$ para el caso P&T.

El costo de las perforaciones realizadas en el caso P&T es mayor que para el caso *drift borer*, debido a la mayor cantidad de chimeneas piloto que se deben perforar en las zanjas del nivel de producción, correspondientes a 60, mientras que para el caso *drift borer* son solo 10 producto de la incorporación de las zanjas longitudinales.

Por último, el costo de obras de hormigón del caso P&T es mayor, siendo estas obras las que marcan la diferencia en el costo total. Esto ocurre debido a que en el caso P&T las obras de hormigón se realizan in situ, encareciéndose su costo por la mano de obra que debe realizar la limpieza previa del sitio.

6.3 OPORTUNIDAD DE CAPTURA DE VALOR

Existen tres oportunidades de valor, la primera de ellas corresponde al ahorro de tiempo de la preparación del nivel de hundimiento y producción, esto implica una oportunidad de reducción de gastos fijos de contratos.

La segunda oportunidad se relaciona con el uso del equipo *drift borer* en el desarrollo de las galerías, debido a que estas no requieren fortificación. Como también, el uso de drift borer involucra la modificación del diseño del NP al incorporar una zanja longitudinal, lo cual conlleva a una disminución de metros de perforación de chimeneas piloto, presentando la oportunidad de disminuir los costos totales.

Y la última oportunidad corresponde a la menor cantidad de hormigón utilizado en el caso *drift borer*, debido al reemplazo de la infraestructura del punto de extracción por una dovela anclada al techo.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1 DESARROLLO DEL DISEÑO ALTERNATIVO

Se logra desarrollar un diseño alternativo de preparación minera para block caving, que considera el nivel de hundimiento y producción, teniendo en cuenta que la preparación de las galerías, a excepción de las cabeceras, se utiliza un equipo *drift borer*, siendo la mayor modificación en el diseño de un nivel de producción convencional la incorporación de galerías de zanja de diámetro 3,7 metros con la misma orientación que las calles de producción, ubicándose entre ellas, denominada galería de zanja longitudinal.

Las galerías al ser de sección circular contemplan el reemplazo de ciertas estructuras de hormigón como lo son las carpetas de rodado y los puntos de extracción, logrando reemplazarlas por estructuras de hormigón prefabricado, las cuales permitieron disminuir la cantidad de hormigón con respecto a lo utilizado en un diseño de preparación minera convencional.

7.2 FUNCIONALIDAD DEL DISEÑO PROPUESTO

El diseño propuesto para *drift borer* logra ser funcional con respecto a un diseño convencional en relación con las operaciones unitarias que se llevan a cabo en un block caving.

El diseño permite realizar la socavación del cuerpo mineralizado mediante diagramas de perforación de socavación de geometría tipo “V”, perforadas desde las galerías de hundimiento con ángulo de 50° y con abanicos de perforación traslapados.

A su vez, se logra extraer el mineral por medio de la zanja longitudinal diseñada, tipo base de caserón, mediante una excavación que permite el paso del mineral desde el nivel de hundimiento hasta los puntos de extracción.

Con respecto al manejo de materiales, el carguío del mineral se realiza desde las estocadas, al igual que en el diseño convencional, por lo que es necesario diseñar una nueva infraestructura en los puntos de extracción con la finalidad de disminuir el uso de hormigón

y el tiempo que se consume el desarrollo de la construcción de estos puntos, por lo que se incorporan dovelas en el techo. Sin embargo, es necesario realizar un estudio de la funcionalidad y comportamiento de estas dovelas.

Para poder transportar el mineral se diseñan nuevas obras de hormigón en reemplazo del pavimento, con la finalidad de permitir el tránsito de los equipos de carguío, a través de las calles de producción de sección circular.

7.3 VENTAJAS TECNICO-ECONOMICAS DE DISEÑO PROPUESTO

El costo total del caso *drift borer* es un 7% menor que el del caso P&T, siendo el costo de las obras de hormigón y el costo de fortificación variables claves en esta diferencia. Ya que se reduce en un 31% el uso del hormigón al reemplazar la infraestructura del punto de extracción por dovelas, y al utilizar equipos *drift borer* no se requieren fortificar las galerías del NP, a excepción de las cabeceras.

Utilizando equipos drift borer el tiempo de preparación minera se reduce en 157 días, la actividad más influyente en esta reducción es la construcción de los puntos de extracción, siendo esta una actividad crítica en el caso P&T.

Se concluye que el diseño propuesto de preparación minera con *drift borer* es una buena alternativa ya que se logra disminuir el tiempo de preparación minera otorgando un valor agregado al proyecto, debido a que impacta positivamente en la capacidad de producción de la mina, puesto que al aumentar la capacidad de preparación se aumenta la capacidad de producción. Finalmente el proyecto logra una reducción de los costos totales de preparación por lo que es conveniente y por ende existe una oportunidad de negocio.

CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES

8.1 ACCIONES INMEDIATAS

Demostradas las ventajas técnico-económicas de este proyecto se recomienda pasar a resolver los aspectos operativos. Los cuales son:

- Promover una alianza estratégica de proveedores y compañías mineras para hacer una prueba industrial demostrativa de la excavación y fortificación de un sitio en una mina de dichas compañías.
- En el intertanto, modelar en detalle (con elementos discretos) las dovelas para obtener el diseño óptimo y seguro.
- Realizar un análisis de estabilidad exhaustivo del nivel de hundimiento y producción del diseño propuesto, puesto que se realiza un análisis aproximado.
- Determinación por medio de un estudio experimental si efectivamente los diagramas de perforación logran la socavación, como también realizar un estudio de flujo gravitacional.
- Realizar un análisis experimental del comportamiento de la dovela utilizada en reemplazo de la infraestructura típica de los puntos de extracción.

8.2 TRABAJOS A FUTURO

Las experiencias del uso del equipo *drift borer* en la excavación de galerías son escasas, como también son escasos los proveedores de estos equipos y la información sobre la utilización de ellos en proyectos, por lo que se necesita realizar pruebas piloto experimentales para estudiar el funcionamiento en detalle de estos.

Realizar la prueba industrial demostrativa descrita en las acciones inmediatas, para lo cual es necesario: diseñar, construir y probar la efectividad la preparación diseñada para *drift borer*.

CAPÍTULO 9. REFERENCIAS

- Besalco. (23 de 04 de 2021). Obtenido de Besalco Construcciones:
<http://www.besalco.cl/construcciones/galeria-tunel-los-bronces>
- Bieniawski, Z. (1972). Propagation of brittle fracture in rock. En *Proc. 10th Symp. Rock Mechanics*. (págs. 409-427). Nueva York: American Rock Mechanics Association.
- Brannon, C., Carlson, G., & Casten, T. (2011). Block Caving. En M. a. Society for Mining, *SME Mining Engineering Handbook* (págs. 1437-1451). U.S: SME.
- Brown, E. (2002). *Block Caving Geomechanics*. Queensland: JKMRC.
- Brox, D. (2013). Technical considerations for TBM tunneling for mining. En *2013 Transactions of the society for mining, metallurgy, and exploration Vol. 334* (págs. 498-505). Vancouver: Society for mining, metallurgy, and exploration.
- Camhi, J. (11 de Diciembre de 2012). *Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de Block Caving. Caso estudio mina El Teniente Codelco Chile*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114467>
- Decreto Supremo N° 132. (7 de Febrero de 2004). *Reglamento de Seguridad Minera*. Santiago , Chile.
- Díaz, G., & Morales, E. (2008). Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day - El Teniente. En *MassMin 2008 - 5th International Conference and Exhibition on Mass* (págs. 83-96). Luleå, Sweden: Luleå University of Technology Press.
- Encina, V., Méndez, C., Caballero, C., & Osorio, H. (2010). New approach for rapid preparation of block cavings mines. En *Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving* (págs. 166-167). Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Hormazabal, E., Alvarez, R., Russo, A., & Acevedo, D. (2018). Influence of the undercut height on the behaviour of pillars at the extraction level in block and panel caving operations. En Y. Potvin, & J. Jakubec, *Proceedings of the Fourth International*

- Symposium on Block and Sublevel Caving* (págs. 351-362). Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Krauland, N., & Soder, P. (1987). Determining pillar strength from pillar observation. En *Engineering and Mining Journal* (págs. 34-40).
- Lunder, P., & Pakalnis, R. (1997). Determination of the strength of hard-rock mine pillars. *Bull. Can. Inst. Min. Metall*, 51-59.
- Obert, L., & Duvall, W. (1967). *Rock mechanics and the design of structures in rock*. New York: Wiley.
- Pesce, J., & Ovalle, A. (2004). *Production capacity of a mass caving*. Santiago: Massmin .
- Revista BiT . (2014). Tuneladora en túnel sur, Los Bronces. *Revista BiT N°96* , 30-31.
- Rostami, J. (2011). Mechanical Rock Breaking. En M. a. Society for Mining, *SME Mining Engineering Handbook* (págs. 417-434). U.S: SME.
- Soberg, J. (1992). Failure modes and pillar behaviour in the Zinkgruvan mine. En *The 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics* (págs. 491-500). Santa Fe, New Mexico: American Rock Mechanics Association.
- Tuck, M. (2011). Underground Horizontal and Inclined Development Methods. En M. a. Society for Mining, *SME Mining Engineering Handbook* (págs. 1179-1202). U.S: SME.

ANEXOS

ANEXO A: RENDIMIENTO, CUADRILLAS Y DURACION DE CASO P&T

Duración de días de cada obra con respecto a la cubicación de obras, rendimientos y cuadrillas para caso P&T.

DESCRIPCIÓN	Unidad	Total Obra	Rend (un/d-R)	#R (cuadrillas)	Duración (Días)
NIVEL DE HUNDIMIENTO					
Desarrollo GH 3,7 x 3,7 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	m	1708	7	2	123
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	m	826	7	2	60
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	m	202	20	1	11
Perforación radial	ml	55397	120	2	231
NIVEL DE EXTRACCIÓN					
Desarrollo CP 4,1 x 4,1 S	m	500	7	2	36
Desarrollo CP 4,1 x 4,1 N	m	500	7	2	36
Desarrollo de galería de zanja S	m	900	7	2	65
Desarrollo de galería de zanja N	m	900	7	2	65
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	m	1.160	7	2	83
Chimeneas piloto 1,5 x 1,5 m.	m	516	20	1	26
Pavimento H-35 con fibra en calles y cabeceras	m3	1944	20	2	49
Suministro y construcción de punto de extracción	un	120	0,08	4	376
Perforación zanjas	ml	21254	120	2	84

ANEXO B: RENDIMIENTO, CUADRILLAS Y DURACION DE CASO *DRIFT BORER*

Duración de días de cada obra con respecto a la cubicación de obras, rendimientos y cuadrillas para caso drift borer.

DESCRIPCIÓN	Unidad	Total obra	Rend (un/d-R)	#R (cuadrillas)	Duración (Días)
NIVEL DE HUNDIMIENTO					
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía	m	1500	15	1	101
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	m	1034	7	2	74
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	m	202	20	1	11
Perforación radial	ml	55397	120	2	231
NIVEL DE EXTRACCIÓN					
Desarrollo CP d=4,1	m	822	15	1	55
Desarrollo de estocadas d = 4,1	m	1332	15	2	45
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	m	750	15	2	51
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	m	1530	7	2	110
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	m	184	20	1	10
Dovela en CP	un	1644	22,5	1	74
Pavimento H-35 con fibra en cabeceras	m3	1377	20	2	74
Construcción de punto de extracción (dovelas)	un	1800	22,5	1	81
Perforación zanja longitudinal	ml	24752	120	2	104
Perforación destace batea	ml	4320	120	2	19

ANEXO C: CUBICACIONES Y COSTOS DE PREPARACION PARA CASO P&T

Detalle de costos de preparación de nivel de hundimiento y producción para caso P&T.

DESCRIPCIÓN	Unidad	Total Obra	Costo US\$/Unidad	Costo total MUS\$
NIVEL DE HUNDIMIENTO				
Desarrollo GH 3,7 x 3,7 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	m			6505
Desarrollo GH 3,7 x 3,7	m	1708	2648	4522
Malla Bizcocho 100x100x6 para GH	m ²	13664	50	678
Pernos Split Set L=2,4 m GH	un	13664	78	1062
Cañerías de agua 2" GH	ml	1708	142	243
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía	m			4300
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	m	826	3917	3236
Malla Bizcocho 100x100x6 para Cabeceras	m ²	7436	50	369
Pernos Split Set L=2,4 m Cabecera	un	7436	78	578
Cañerías de agua 2" Cabeceras	ml	826	142	118
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	m	91	1761	356
Perforación radial	ml	55397	26	1458
NIVEL DE PRODUCCION				
Desarrollo CP 4,1 x 4,1 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	m		-	5617
Desarrollo CP 4,1 x 4,1	m	1000	3251	3251
Malla bizcocho 100x100x6 CP	m	8199	50	407
Pernos 22 mm Acero A44-28H-Lechado L=2,4 m CP	m	10999	86	941
Hormigón proyectado (shotcrete) CP	m	675	1299	877
Cañería agua 2" CP	ml	1000	142	142
Desarrollo de galería de zanja con malla y perno 2,4m	m		-	6398
Desarrollo de galería de zanja	m	1800	3251	5852
Malla bizcocho 100x100x6 GZ	m ²	3240	50	161
Pernos 22 mm Acero A44-28H-Lechado L=2,4 m GZ	m	4500	86	385
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	m		-	7509
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	m	1160	3917	4544
Malla bizcocho 100x100x6 Cabeceras	m	10443	50	518
Pernos 22 mm Acero A44-28H-Lechado L=2,4 m Cabeceras	m	12763	86	1091
Hormigón proyectado (shotcrete) Cabecera	m	783	1299	1017
Cañería agua 4"	ml	1160	291	337
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	m	516	1439	743
Pavimento H-35 con fibra en Calles y cabeceras	m ³	1944	1014	1972
Construcción de punto de extracción	un	120	29568	3548
Perforación zanjas	ml	21254	28	603
Total MU\$				39007
US\$/m²				1523

ANEXO D: CUBICACIONES Y COSTOS DE PREPARACIÓN PARA CASO *DRIFT BORER*

Detalle de costos de preparación de nivel de hundimiento y producción para caso drift borer.

DESCRIPCIÓN	Unidad	Total obra	Costo US\$/Unidad	Costo total MUS\$
NIVEL DE HUNDIMIENTO				
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, split set y líneas agua, comunicaciones y energía				5456
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	m	1034	3917	4050
Malla Bizcocho 100x100x6	m	9308	50	462
Pernos Split Set L=2,4 m	un	9308	78	724
Línea de agua 2"	ml	1034	142	147
Suministro e instalación cable radiante	ml	1034	71	74
Desarrollo GH d = 3,7 m con líneas agua, comunicaciones y energía				4903
Desarrollo GH d = 3,7 m	m	1500	3127	4690
Línea de agua 2"	ml	1500	142	213
Chimeneas (Slot) 2,0 x 2,0 m.	m	202	1761	356
Perforación radial	ml	55397	26	1458
NIVEL DE PRODUCCIÓN				
Desarrollo CP d = 4,1 m con líneas agua, comunicaciones y energía				2965
Desarrollo CP d =4,1 m	m	822	3465	2848
Cañería agua 2"	ml	822	142	117
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5 con malla, perno 2,4m, shotcrete y líneas agua, comunicaciones y energía	m			9638
Desarrollo cabeceras 4,5 x 4,5	m	1530	3917	5992
Malla Bizcocho 100 x 100 x 6	m ²	13766	50	683
Pernos 22 mm Acero A44-28H-Lechado L=2,4 m	un	13766	86	1177
Hormigón proyectado (shotcrete)	m ³	1032	1299	1341
Cañería de agua 4"	ml	1530	291	445
Desarrollo de estocadas d = 4,1	m	1332	3465	4615
Desarrollo de galería de zanja d = 3,7	m	750	3127	2345
Chimeneas Piloto 1,5 x 1,5 m.	m	184	1439	265
Dovelas en CP	m ³		507	307
Pavimento H-35 con fibra en cabecera	m ³	2960	1014	3002
Construcción de punto de extracción (dovelas)	m ³	663,2	507	336
Perforación zanja longitudinal	ml	24752	28	702
Perforación destace batea	ml	4320	28	122
Total MUS\$				36470
US\$/m2				1424

