



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

**CAPTURANDO LAS MEJORAS EN DISEÑO, PROCEDIMIENTOS Y
PLANIFICACION DE LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN –
PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA (PMCHS)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

LUCAS IGNACIO MARDONES OSSES

PROFESOR GUÍA:
KARL MÜHLENBROCK CARVAJAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DIEGO CORTÉS CUADRA
ALDO CASALI BACELLI

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Lucas Ignacio Mardones Osses
FECHA: 12/10/2020
PROFESOR GUÍA: Karl Mühlenbrock Carvajal

Resumen

Actualmente en el proceso de construcción del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), no existe un registro exhaustivo de las mejoras que se han llevado a cabo. Es por esto que el siguiente trabajo de título pretende abordar esta falta de registro.

Se evidencia que las palancas de mejoras que permitieron un mejor desempeño en las distintas actividades de preparación mina fueron:

- **Vigas Reguladoras:** la especialización de cuadrillas para el montaje de vigas, además de cambio en la forma de montaje (incorporación de pernos maniobras y machina) fueron la clave para alcanzar el buen ritmo constructivo requerido.
- **Pavimentos:** el aumento del área disponible para pavimentar y la incorporación de puntos de trasvasije cercano a las áreas de pavimentación permitieron alcanzar avances mensuales mayores a los 600 m.
- **Muros de confinamiento:** al igual que en las vigas reguladoras, la especialización de cuadrillas para el montaje de muros de confinamiento y el cambio de hormigonado de dos etapas a solo una etapa fueron las palancas de mejoras que tuvieron un mayor impacto en esta actividad constructiva.
- **Desarrollos Verticales (Blind Hole):** mejoramiento en la planificación de preparación de puntos para la instalación de Blind Hole (servicios y maniobras).
- **Desarrollos Horizontales:** la incorporación de metodología en base a las Unidades de Producción Básica (UPB) fue el gran acierto del PMCHS, el cual incorporando a esta metodología el concepto de “operador-mantenedor” permite que se cree la “Célula de Trabajo Autónomo” que tiene como objetivo, realizar la misma cantidad de metros mensuales obtenidos en el proyecto, pero con una cantidad reducida de recursos y, por ende, con un menor costo. Esta última metodología se colocó a prueba durante el segundo semestre del año 2020.

ABSTRACT

Currently in the construction process of the Chuquicamata Underground Mine Project (PMCHS), there is no exhaustive record of the improvements that have been carried out. This undergraduate thesis aims to solve this lack of registration.

It is evident that the improvement that allowed a better performance in the different mine preparation activities were:

- **Brow Beams:** the specialization of work crews for the assembly of beams, as well as the change in the assembly method (incorporation of bolts, maneuvers and “*machina*”) were the key to achieving the required construction pace.
- **Pavement Roads:** the increase in the area available for paving and the incorporation of transfer points close to the paving areas made it possible to achieve monthly advances greater than 600 m.
- **Confinement walls construction:** as in the brow beams, the specialization of crews for the assembly of confining walls and the change of concreting from two stages to only one stage were the improvement that had a greater impact on this construction activity.
- **Vertical Development:** improvement in the planning of preparation of points for the installation of Blind Hole (services and maneuvers).
- **Horizontal Development:** the incorporation of methodology based on Basic Production Units (BPU) was the great success of PMCHS, which incorporating into this methodology the concept of "operator-maintainer" allows the creation of the "Autonomous Work Cell" that has as the objective is to carry out the same number of meters per month obtained in the project, but with a reduced amount of resources and, therefore, at a lower cost. This last methodology was tested during the second half of 2020.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar por agradecer enormemente a mi madre, Jacqueline Osses, quien ha sido mi mentora y mi pilar fundamental durante toda mi vida, la persona que me ha entregado todos los valores y enseñanzas que me han llevado a ser la persona que hoy soy y con quien siempre he podido contar con lo que fuese necesario. Espero poder algún día entregar todo lo que tu entregas a tu entorno. Me siento muy orgullosos de la persona que eres y todos los días agradezco a la vida por tener la madre que tengo.

A Nicolas Valenzuela que, durante su estadía en este mundo, me enseñó a disfrutar todos los días aun cuando no hubiese nada por sonreír, ha nunca darse por vencido y ha valorar a las personas por lo que son.

También quiero agradecer a mi gran Familia, partiendo por mi papa, abuelos, Amara, primos y primas, tías y tíos, quienes de alguno u otra manera han sabido alegrar cada uno de mis días y me han entregado amor y compañía.

A mi familia putativa, los Machmar Caceres, quienes desde los conocí, me adoptaron como un hijo más de su familia y me han dado amor, compañía y valores.

A mis amigos del colegio, Benjamín, Macarena, Camila, Cristian, Ignacio, Yolanda, Luz, Mallcom, Adolfo y Franco, por entregarme el valor de la amistad.

A mis amigos del plan común de la universidad, Juan Pablo, Cristóbal, Exequiel (Pinga), Rodrigo (Dondo), Dario y Martin (Perroni) por hacer los dos primeros años de U, más amigables.

A mis amigos de minería, Carlos, Fabian, Alejandro, Maicol, Nicolas, Francisco, Rodrigo, Matías (Escudero) y Matías (Quiñones), quienes desde que entramos a la especialidad formamos una linda familia (mafia) y que mutuamente nos ayudamos, celebramos y salimos adelante en esta hermosa carrera.

A mis amigos y colegas de la VP, Claudia, Marcela, Diego, Yerko, Karl, Euro, Karina, Hugo, Claudio, Guido y Constanza. Gracias por haber confiado en mí e integrarme al equipo.

Y gracias a quien lea este trabajo. Espero que encuentres lo que necesites aquí.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	MOTIVACIÓN Y PROBLEMÁTICA.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
1.2.1	OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
1.3	ALCANCE.....	2
1.4	RESULTADOS ESPERADOS.....	3
Capítulo 2	METODOLOGIA DE TRABAJO.....	4
2.1	RESULTADOS ESPERADOS.....	5
Capítulo 3	ANTECEDENTES.....	6
3.1	VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS, CODELCO CHILE.....	6
3.2	PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA.....	7
3.2.1	UBICACIÓN.....	8
3.2.2	MÉTODO DE EXPLOTACIÓN.....	9
3.2.3	DISEÑO MINERO.....	11
3.2.4	SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES (SMM).....	12
Capítulo 4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1	MEJORAS CONSTRUCTIVAS Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO.....	16
4.2	PREPARACIÓN MINERA Y DESARROLLO.....	17
4.3	EXCAVACIONES MINERAS.....	19

4.3.1	DESARROLLO HORIZONTAL.....	19
4.3.2	DESARROLLO VERTICAL.....	22
4.4	PRE-ACONDICIONAMIENTO.....	24
4.5	DEBILITAMIENTO DINÁMICO CON EXPLOSIVOS (DDE).....	24
4.5.1	DISEÑO DDE PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA.....	25
4.5.2	METODOLOGÍA DE PERFORACIÓN Y ANCLAJE DDE.....	28
4.6	OBRAS CIVILES MINERIA.....	29
4.6.1	PUNTOS DE EXTRACCIÓN.....	29
4.6.2	MUROS DE CONFINAMIENTO DE PILARES.....	40
4.6.3	CARPETA DE RODADO O PAVIMENTO.....	45
Capítulo 5	DESARROLLO.....	48
5.1	PALANCAS DE MEJORAS DDE.....	48
5.1.1	PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN OCTUBRE 2018.....	49
5.1.2	PALANCA DE MEJORA N#2: IMPLEMENTACIÓN FEBRERO 2019.....	50
5.1.3	PALANCA DE MEJORA N#3: IMPLEMENTACIÓN ENERO 2019.....	52
5.1.4	CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.....	52
5.2	PALANCAS DE MEJORA VIGAS REGULADORAS.....	53
5.2.1	PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN ABRIL 2018.....	53
5.2.2	CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.....	55
5.3	PALANCAS DE MEJORA MARCOS DE ACERO.....	56
5.4	PALANCAS DE MEJORA PAVIMENTACIÓN.....	57

5.4.1	PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN MARZO 2018.	58
5.4.2	PALANCA DE MEJORA N#2: IMPLEMENTACIÓN AGOSTO 2018.....	59
5.4.3	CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.....	60
5.5	PALANCAS DE MEJORA MUROS DE CONFINAMIENTO	61
5.5.1	PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN DICIEMBRE 2018.....	62
5.5.2	PALANCA DE MEJORA N#2: IMPLEMENTACIÓN MARZO 2019.	63
5.5.3	CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.....	67
5.6	PALANCA DE MEJORA DESARROLLO VERTICAL BLIND HOLE	68
5.6.1	PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN DICIEMBRE 2017.....	69
5.6.2	CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.....	69
5.7	PALANCA DE MEJORA DESARROLLO HORIZONTAL	70
5.7.1	PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN FEBRERO 2017.....	70
5.7.2	CÉLULA DE TRABAJO AUTONOMA.....	72
Capítulo 6	CONCLUSIONES.....	83
Capítulo 7	BIBLIOGRAFÍA	84
	ANEXOS.....	87
	Anexo 1: PIEZAS MOLDAJE METÁLICO	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros para equipos involucrados en chancado, transporte intermedio y colectora.	14
Tabla 2 : Parámetros para equipos involucrados en transporte principal.	15
Tabla 3. Característica pozos DDE.....	25
Tabla 4: Recursos y rendimientos asociados a la instalación de vigas.....	34
Tabla 5: Recursos y rendimientos asociados a la instalación de PEX tipo marcos de acero.	39
Tabla 6: Recursos y rendimientos asociados a la instalación de muros de confinamiento.	44
Tabla 7: Recursos y rendimientos asociados a la pavimentación.....	47
Tabla 8: Palancas de mejora que ayudaron a la productividad del DDE.	52
Tabla 9: Palancas de mejora que ayudaron a la productividad de instalación de vigas reguladoras.	55
Tabla 10: Palancas de mejora que ayudaron a la productividad de la pavimentación.	60
Tabla 11: Palancas de mejoras que ayudaron a la productividad de la instalación de muros de confinamiento.	67
Tabla 12: Palancas de mejora que ayudaron a la calidad de los muros de confinamiento.	67
Tabla 13 Capacitaciones y objetivos para cuadrilla autónoma CTA.....	73
Tabla 14 Resumen resultados de CTA.	80

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Avance mensual de perforación (mb/mes).....	48
Gráfico 2: Demoras no programadas según avance mensual (min/m/mes).	48
Gráfico 3: N° tiros anclados mensual (un/mes).....	49
Gráfico 4: Número de vigas instaladas mensualmente (un/mes).	53
Gráfico 5: Número de marcos de acero instalados mensualmente (un/mes).....	56
Gráfico 6: Metros lineales pavimentados mensualmente (m/mes).....	57
Gráfico 7: N° de detalles de terminación mensualmente por metro lineal (dts/m*mes).....	57
Gráfico 8: Relación entre metros lineales pavimentados y n° de retroexcavadoras disponibles. .	58
Gráfico 9: Relación entre metros lineales pavimentados y n° de zanjas disponibles.....	58
Gráfico 10: Número de DT's según tipo (pavimentación).....	59
Gráfico 11: Número de muros de confinamiento instalados mensualmente (un/mes).....	61
Gráfico 12: Número de detalles de terminación mensual por unidad instalada relacionados a corte y retiro de fierro y reparación de shotcrete (dts/un*mes).....	61
Gráfico 13: Número de detalles de terminación mensual por unidad instalada relacionados a juntas frías, biselado, reparación de nidos y fisuras o grietas (dts/un*mes).	62
Gráfico 14: Metros verticales desarrollados mensualmente (m/mes).	68
Gráfico 15: Tiempo promedio entre finalización de escariado y comienzo de escariado nueva postura (días/mes).....	68
Gráfico 16: Metros horizontales desarrollados mensualmente (m/mes).	70
Gráfico 17: Avance diario CTA.	76
Gráfico 18: Rendimiento disparo CTA.	76
Gráfico 19: Horas efectivas turno semanal CTA.....	77
Gráfico 20: Horas hombre por metro de avance CTA.....	77
Gráfico 21: Disponibilidad y utilización de equipos críticos CTA	78
Gráfico 22: Detalles de terminación por metro de avance CTA.	78
Gráfico 23: Costo por metro CTA vs costo por precio unitario usado históricamente.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodología para la captura y registro de buenas prácticas.	4
Figura 2: Niveles de explotación PMCHS, CODELCO. Fuente: CODELCO (Chile), 2017.	8
Figura 3: Emplazamiento Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, CODELCO. Fuente: CODELCO (Chile), 2017.	9
Figura 4: Concepto de Macro Bloque, Unidad de explotación independiente. Fuente: CODELCO (Chile), 2017.	10
Figura 5: Diseño minero para la unidad básica de explotación PMCHS. Fuente: CODELCO (Chile), 2017.	12
Figura 6: Disposición espacial de las salas de chancado. Fuente: CODELCO (Chile), 2017.	13
Figura 7: Sistema de manejo de mineral PMCHS. Fuente: CODELCO, Chile 2017.	15
Figura 8: Metros de avance por mes en diferentes faenas (Fuente: Codelco [3]).	16
Figura 9: Procesos de preparación mina. Fuente: Camhi, 2012.	18
Figura 10: Ciclo minero para desarrollo horizontal de túneles clásico. Fuente: Lavado (2014)...	21
Figura 11: Proceso de Perforación Raise Borer. Fuente: Camhi, 2012.	23
Figura 12: Perforación máquina Blind Hole. Fuente: Master Drilling 2018.	24
Figura 13: Diagrama perforación pozos de DDE MB-S01/N01 PD y HD (medidas en metro). Fuente: CODELCO, 2019.	25
Figura 14: Configuración espacial pozo DDE y sus respectivos componentes (medidas en metros). Fuente: CODELCO, 2019.	26
Figura 15: Diseño de sistema de anclaje DDE (medidas en milímetros). Fuente: CODELCO, 2019.	27
Figura 16: Diseño viga reguladora de flujo de mineral PMCHS.	30
Figura 17; Instalación de puntos de izaje (viga).	30
Figura 18: Perforación, lechado e instalación de pernos de anclaje consola (vigas).	30
Figura 19: Instalación de moldaje y grouting (mortero).	31
Figura 20: Instalación y montaje de consola.	31
Figura 21: Instalación de consola con machina.	31
Figura 22: Alineación e instalación de planchuela y tuerca pernos de anclaje consola.	32
Figura 23: Instalación de cuerpo de viga.	32
Figura 24: Adosamiento y ajuste de viga de consola.	32

Figura 25: Instalación de mallas sobre viga.	33
Figura 26:Proyección de shotcrete de sello sobre viga.....	33
Figura 27: Componentes PEX tipo marco de acero.	35
Figura 28: Nivelación de piso para instalación de marcos (escarpe y nivelación).....	35
Figura 29: Perforación de pernos L y pernos de anclaje.	36
Figura 30: Montaje e instalación de pie derechos marcos.....	36
Figura 31: Alineación pie derechos e instalación de pernos tirantes.....	36
Figura 32: Montaje y alineación de coronas con pernos tirantes.	37
Figura 33: Instalación y lechado de pernos L.....	37
Figura 34: Instalación de enfierradura cajas.	37
Figura 35: Moldaje y hormigonado de cajas.	38
Figura 36: Instalación de enfierradura corona.....	38
Figura 37: Moldaje y hormigonado corona.	38
Figura 38: Diseño de muros de confinamiento. Fuente: CODELCO, 2018.....	40
Figura 39: Perforación para pernos cables y pernos corchetes.....	41
Figura 40: Desquinche y limpieza muros de confinamiento.	41
Figura 41: Instalación de enfierradura interior de FE.....	42
Figura 42: Instalación y lechado de cables pernos dobles y cables corchetes.....	42
Figura 43: Instalación de enfierradura exterior.	43
Figura 44: Instalación de moldajes para hormigonado.....	43
Figura 45: Hormigonado de muros de confinamiento.....	43
Figura 46: Esquema de pavimentación, nivelación y escarpe. Fuente: CODELCO, 2018.	45
Figura 47: Disposición de pavimentación calle zanja nivel de producción. Fuente: CODELCO, 2018.	45
Figura 48: Escarpe.	46
Figura 49: Nivelación.	46
Figura 50: Pavimentación carpeta definitiva.	46
Figura 51: Corte y sellado pavimento.....	47
Figura 52: Comparación sistema de barras y anclajes de HRI y CUBEX.	50
Figura 53: Sistema hidráulico de CUBEX.	50
Figura 54: Variables internas de perforación CUBEX.....	51

Figura 55: Implementación de cambio de diámetro de perforación en CUBEX y HRI.....	51
Figura 56: Mejoramiento en el sistema de anclaje.	52
Figura 57: Especialización de cuadrillas y tren constructivo para instalación de vigas.	54
Figura 58: Utilización de machina para colocación de consola viga.	54
Figura 59: Utilización de maniobras para la instalación de cuerpo de viga.	55
Figura 60: Proceso de corte y sellado.	59
Figura 61: Especialización de cuadrillas para la instalación de muros de confinamiento.	62
Figura 62: Cambio del tipo de hormigón en el proceso de instalación de muros de confinamiento.	63
Figura 63: operativización diseño paños de muros de confinamiento.....	63
Figura 64: Instalación de corrida inferior de moldajes.	64
Figura 65: Instalación de corrida superior de moldajes.....	64
Figura 66: Instalación de canal doble contra terreno 2000.....	65
Figura 67: Instalación de canal doble contra terreno 1500.....	65
Figura 68: Instalación de aplomador.	66
Figura 69: Instalación de pernos y planchuela.	66
Figura 70: Servicios necesarios para puesta en marcha de Blind Hole.	69
Figura 71: Distribución de operaciones unitarias en frentes de avance. Fuente: Cortes D (2018).	71
Figura 72: Distribución de UPB en nivel de producción y hundimiento. Fuente: Cortes D (2018).	71
Figura 73: Equipos y servicios necesarios por frente de avance. Fuente: Cortes D (2018).	72
Figura 74: Sectorización de CTA.	74
Figura 75: sectorización de operaciones unitarias CTA.....	75
Figura 76: Sectorización de dos o más CTA.	81
Figura 77: Rutas de apertura de frentes CTA.	82
Figura 78: Paño moldaje de acero típico.	87
Figura 79: Canaletas moldaje de acero típico.....	87
Figura 80: Aplomador típico moldaje acero.....	88
<i>Figura 81: Accesorios moldaje de acero.</i>	<i>88</i>

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y PROBLEMÁTICA.

Actualmente en el proceso de construcción del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), no existe un registro exhaustivo de las mejoras en el diseño, procedimientos o planificación tanto en las obras mineras, civiles o de pre – acondicionamiento que se han llevado a cabo en este proyecto. Estas mejoras han permitido un buen cumplimiento en los plazos de entrega, buen ajuste al presupuesto asignado y en la mayoría de las ocasiones, una buena calidad de las obras construidas; siempre manteniendo buenas prácticas enfocadas a la seguridad.

Esta falta de un registro exhaustivo, tiene como consecuencia que todo el aprendizaje obtenido en la construcción del PMCHS, no pueda ser traspasado a la construcción de futuras expansiones de este proyecto o a la construcción de futuros nuevos proyectos mineros, por lo que en estos nuevos proyectos o expansiones, no se contará con algún estándar constructivo ya probado que pudiese asegurar el éxito de las obras a desarrollar o no contarán con un caso base o de comparación para mejorar sus procesos constructivos según las características intrínsecas de sus yacimientos.

Es por esto que el siguiente trabajo de título pretende abordar esta falta de registro y levantamiento de las mejoras en el diseño, procedimientos o planificación de las diferentes obras construidas en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

1.2 OBJETIVOS.

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de esta memoria.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL.

Generar un levantamiento y registro de las mejoras en el diseño, procedimientos y/o planificación tanto en las obras mineras, civiles o de pre – acondicionamiento aplicadas en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, para traspasar el conocimiento a futuras expansiones del proyecto o futuros nuevos proyectos mineros.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Generar una metodología que permita realizar el levantamiento y registro de la información requerida.
- Encontrar y/o generar KPI's para cuantificar los tipos de mejoras en las distintas actividades.
- Encontrar las palancas de mejoras que permitieron el aumento o disminución de los KPI's según la actividad.
- Clasificar las palancas de mejoras según sean de procedimiento, diseño y/o planificación.
- Documentar las palancas de mejoras.

1.3 ALCANCE.

Este estudio se acota a la recopilación y registro de las mejoras en los procesos y diseños que ayudaron a mejorar la productividad y calidad en la construcción de las siguientes actividades.

- **Pre – acondicionamiento:**
 - Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE)
- **Obras civiles:**
 - Muros de confinamiento
 - PAV (carpeta de rodado)
 - PEX (punto de extracción)
 - i) Vigas
 - ii) Marcos
- **Obras mineras:**
 - Desarrollos horizontales
 - Desarrollos verticales
 - i) Blind-Hole

Estas actividades corresponden a las obras involucradas en el contrato CC-010, el cual considera los desarrollos de los subniveles superiores en MB's (macrobloques) y barrio industrial norte del nivel 1.

1.4 RESULTADOS ESPERADOS.

Los resultados esperados son los siguientes:

- Encontrar todas aquellas buenas prácticas que permitieron un aumento en la productividad, calidad y seguridad de las actividades según sea la naturaleza de esta.
- Cuantificar aquellas buenas prácticas que tuvieron un mayor impacto sobre la producción, calidad y seguridad.
- Generar un reporte con el detalle técnico de cada una de las buenas prácticas.

Capítulo 2 METODOLOGIA DE TRABAJO

Para la recopilación y registro de las mejoras en los procesos anteriormente mencionados se propone la siguiente metodología (figura 1).

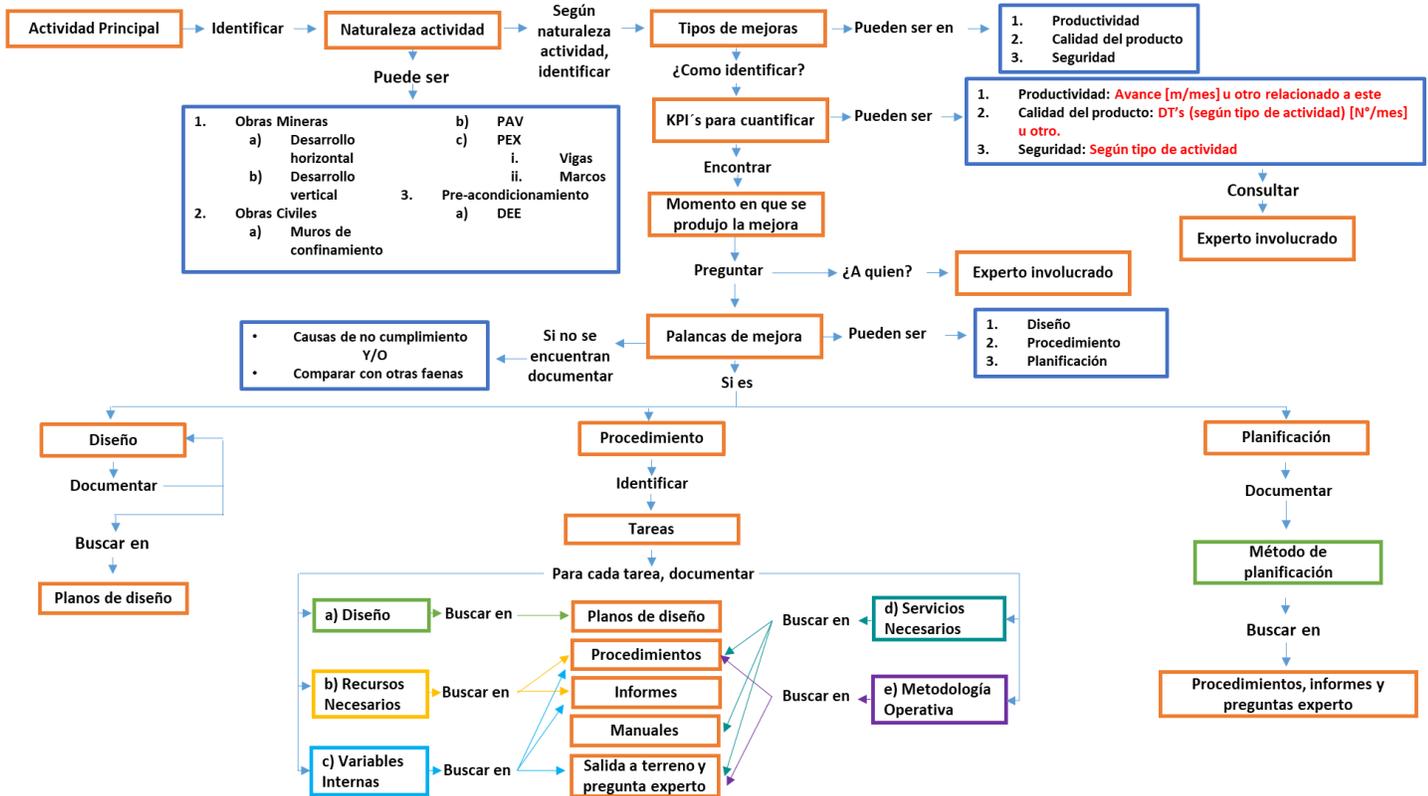


Figura 1: Metodología para la captura y registro de buenas prácticas.

La metodología consiste en para cada actividad, se identifica la naturaleza de esta (obras mineras, obras civiles o de pre - acondicionamiento). Para cada una de estas actividades se debe encontrar los tipos de mejoras, estos tipos de mejoras pueden ser en productividad, calidad y seguridad.

Los tipos de mejoras se cuantifican y se identifican a través de los KPI's, de tal forma de poder evidenciar la evolución de estos en el tiempo.

Con la evolución del KPI's en el tiempo, se deben encontrar los momentos en que existe un quiebre en el comportamiento de este (cambio positivo en la pendiente). Este quiebre en el comportamiento tiene una causa o palanca de mejora, la cual se debe encontrar y clasificar según diseño, procedimiento, gestión contractual y/o planificación. Estas deben ser documentadas.

2.1 RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados esperados son los siguientes:

- Encontrar todas aquellas buenas prácticas que permitieron un aumento en la productividad, calidad y seguridad de las actividades según sea la naturaleza de esta.
- Cuantificar aquellas buenas prácticas que tuvieron un mayor impacto sobre la producción, calidad y seguridad.
- Generar un reporte con el detalle técnico de cada una de las buenas prácticas.

Capítulo 3 ANTECEDENTES

3.1 VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS, CODELCO CHILE

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) es una empresa estatal chilena, líder en producción de cobre. La producción de cobre para el año 2019 fue de 1,806 millones de TM [1], correspondiente al 31% a nivel país, y un 9% de la producción mundial.

En la actualidad, la compañía ejecuta sus operaciones a través de siete divisiones a lo largo de nuestro país, siendo estas las divisiones El Teniente, Salvador, Radomiro Tomic, Ministro Hales, Gabriela Mistral, Chuquicamata y Andina. A estas operaciones se suma la División Ventanas, dotada de instalaciones de Fundición y Refinería, la Casa Matriz en Santiago y la Vicepresidencia de Proyectos.

La Vicepresidencia de Proyectos (VP), se crea en el año 2005, con el objetivo de definir responsabilidades respecto a las maneras con que la corporación genera valor; así, la generación de activos (mineral) queda a cargo de las distintas divisiones, en tanto el desarrollo de proyectos que permitan generar estos activos, quedó bajo la responsabilidad de la VP, la que se ocupa entonces de gestionar y ejecutar la cartera de proyectos de inversión, diseñando y poniendo en marcha todos aquellos de base geo minero-metalúrgica con una inversión superior a los US \$ 10 millones.

“El principio rector del quehacer de la VP lo constituye la excelencia en la gestión de proyectos, lo que supone velar por la integralidad de los desarrollos en sus aspectos técnicos y organizacionales, aplicando las mejores prácticas en la construcción, como también para la operación y mantención de los nuevos activos” [2].

Entre la cartera de proyectos que está en manos de la Vicepresidencia de Proyectos, el más importante es el Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS).

3.2 PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

El PMCHS es un proyecto estructural y estratégico que representa una importante parte de Codelco y que corresponde a la transformación del rajo abierto más grande del mundo en una gran operación subterránea que permitirá explotar los recursos que quedaran bajo el yacimiento, el que, tras haber sido explotado por casi 100 años, dejara de ser rentable dentro de las próximas décadas.

Entre los años 2001 y 2005, se realizaron múltiples análisis con el fin de desarrollar un estudio a nivel de ingeniería de perfil, para determinar el potencial económico de una eventual explotación subterránea y todos los aspectos referentes a un cambio en el modelo de operación. A partir de los estudios generados por la ingeniería de perfil y análisis específicos llevados a cabo de manera complementaria, se confirmó la viabilidad técnica y económica de realizar el cambio a una explotación subterránea. El siguiente paso fue desarrollar una ingeniería de prefactibilidad para este nuevo método de explotación, etapa de ingeniería que fue finalizada durante el primer semestre del año 2009.

Los estudios de prefactibilidad desarrollados en dicha fase permitieron mejorar la base de datos disponible para el proyecto, elaborar diseños, valorizar oportunidades de gestión y mejorar la identificación de riesgos y de elementos estratégicos presentados en el proyecto

De estos estudios se destacan los siguientes resultados:

- La definición del método de explotación como Block Caving en una configuración especial denominada Macrobloques (MB's) como unidad básica de explotación, con variante de Hundimiento Convencional
- La explotación de recursos en 3 niveles (1.841, 1409 y 1.193 m.s.n.m). (Figura 2)
- El ritmo de producción en régimen en torno a los 140 ktpd, alcanzable luego de un Ramp Up de al menos 7 años.

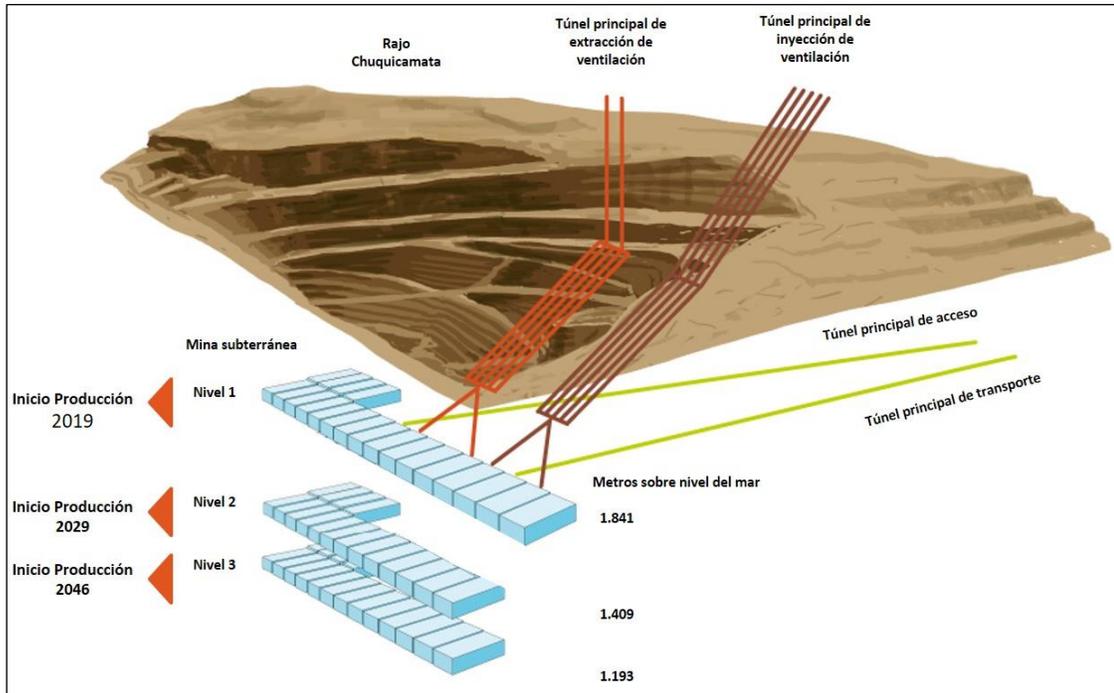


Figura 2: Niveles de explotación PMCHS, CODELCO.

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

El Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea permitirá extender la vida útil de la División Chuquicamata en 39 años, considerando la explotación de 1.738 Mt de recursos mineros con ley de cobre de 0,694% y ley de molibdeno de 519 ppm.

3.2.1 UBICACIÓN

El yacimiento Chuquicamata es el principal depósito del Distrito Zona Norte de CODELCO. Se emplaza en la precordillera de la Región de Antofagasta, Provincia del Loa, a 13 km al Norte de la ciudad de Calama (capital provincial), 232 km al Noroeste de Antofagasta (capital Regional) y a 1.650 km al Norte de Santiago (capital de la República). Sus coordenadas geográficas son 22,27° de latitud Sur y 68,54° de longitud Oeste y su altitud media corresponde a 2.870 m.s.n.m. La altura geográfica del área donde se desarrollan las obras de construcción del Proyecto varía entre los 1.600 y 3.000 m.s.n.m.

En la Figura 3 se muestra la localización del PMCHS, en conjunto con sus principales instalaciones.

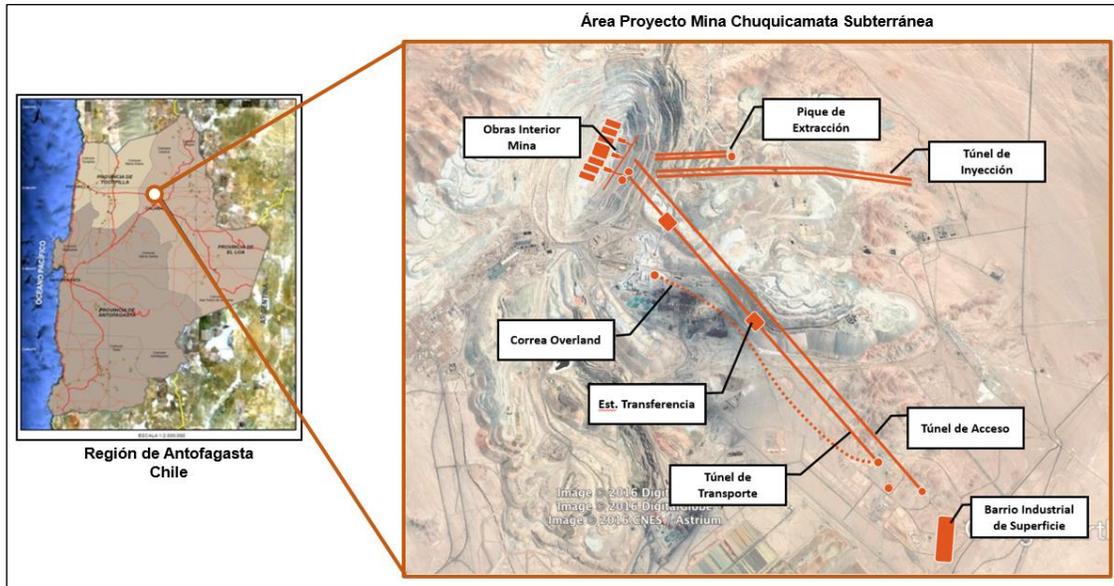


Figura 3: Emplazamiento Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, CODELCO.

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

Esta zona se caracteriza por ser una de las más áridas del mundo y por tener alta radiación solar, baja humedad en el ambiente, escasa nubosidad, régimen térmico bien marcado y una tasa de precipitación baja y concentrada en pocos días del año. El clima de la zona corresponde a desierto normal o desértico marginal de altura, caracterizado por aridez extrema, con precipitaciones escasas sin un régimen marcado, periodos cálidos de mayor temperatura entre diciembre a marzo, y períodos fríos entre junio y julio.

3.2.2 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

El método de explotación seleccionado para el PMCHS corresponde a Block Caving en una Variante de Macrobloques (MB's), lo que fue definido en el Estudio de Prefactibilidad del Proyecto; y durante los Estudios de Ingeniería de Valor de Estudio de Factibilidad del PMCHS, se complementó la definición con un trade off de riesgo entre el método de explotación Block Caving variante MB's y Panel Caving. Los resultados ratificaron la variante MB's mostrando ventajas económicas y de riesgos tanto en diseño base, como en aquellos con planes de mitigación de riesgos. En la Figura 4 se muestra el funcionamiento conceptual de los MB's.

La secuencia operativa de la explotación está estructurada de la siguiente forma:

- Desarrollo y construcción de galerías en Niveles de Hundimiento y Producción.
- Apertura de bateas desde el Nivel de Producción, delante del frente de socavación.
- Tronadura de hundimiento.
- Proceso de Extracción, una vez incorporadas las bateas a la producción.

Al aplicar esta variante de explotación, se concentran las actividades en el Macrobloque, donde primero se ejecutarán todos los procesos de desarrollo y construcción antes de iniciar el corte basal o socavación del bloque. Se realizará hundimiento convencional en el primer nivel (1841).

El nivel de hundimiento está localizado a 18 metros sobre el nivel de producción (distancia piso a piso) y las calles, 4 por cada MB, corren por el mismo eje que las respectivas del nivel de producción, es decir, cada 32 metros. A partir del nivel de producción, desde las galerías zanja, se construye la parte inferior de la batea, una vez desarrollado el nivel de hundimiento de cada Macrobloque, se perfora el diagrama de perforación radial y los tiros negativos hacia la batea, parcialmente construida desde el nivel de producción. Finalmente, se realiza la tronadura para producir la socavación del bloque [2].

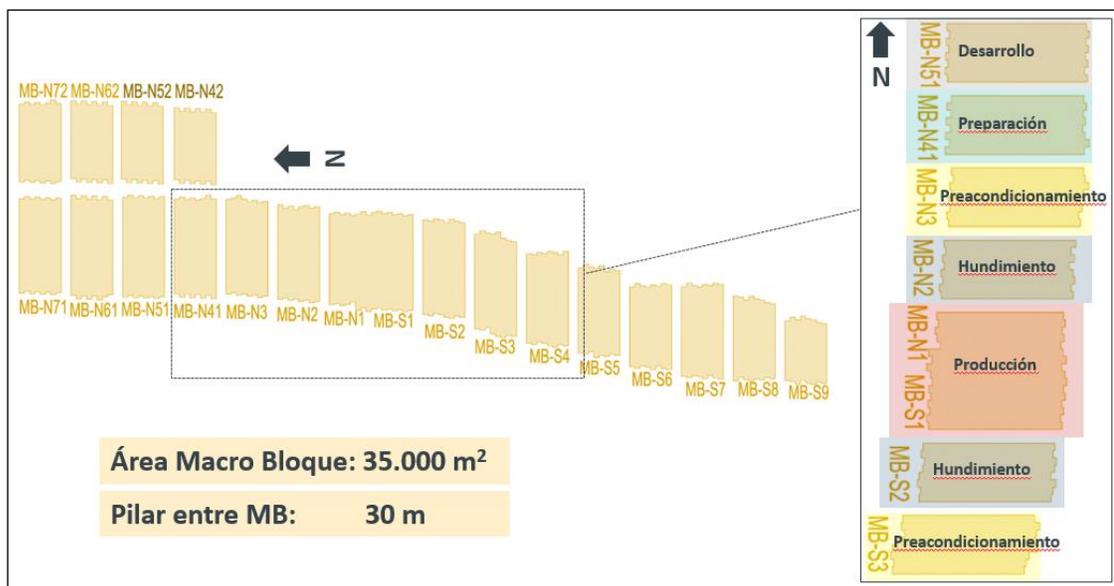


Figura 4: Concepto de Macrobloque, Unidad de explotación independiente.

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

3.2.3 DISEÑO MINERO

La unidad básica de extracción está definida como un macrobloque (MB), y su diseño minero está compuesto por los niveles detallados a continuación y su distribución se puede observar en la Figura 5.

- Nivel de Hundimiento (NH): Este nivel se ubica en la cota 1.841 m.s.n.m, su objetivo principal es realizar la propagación del caving. Las calles se encuentran cada 32 m orientadas en sentido Este - Oeste, con secciones de 4,0 m x 4,6 m.
- Nivel de Producción (NP): Se ubica en la cota 1.823 m.s.n.m., y se establece un área productiva correspondiente a un MB en promedio de 35.000 m². Las calles de producción se encuentran cada 32 m orientadas en sentido Este – Oeste, con sección 5,2 m x 4,85 m. Las galerías zanjadas se separan a 16 m y 20 m (dependiendo del MB). Éstas poseen igual sección que las galerías de producción y están orientadas en dirección N30°E, es decir, 60° respecto a la calle de producción, en una configuración Malla Tipo Teniente.
- Nivel de Chancado: Ubicado en la cota 1.809 m.s.n.m. justo debajo del nivel de producción, está constituido por los accesos a las cavernas de chancado y salas de chancado, que para el caso del proyecto correspondía a las tres primeras salas.
- Subnivel de Ventilación (SNV): Está compuesto por un pique de inyección y extracción, además de los subniveles de inyección (cota 1.802 m.s.n.m) y extracción (cota 1.776 m.s.n.m). Presenta cabeceras tanto de inyección como de extracción dispuestas en sentido N-S y cruzados de ventilación en sentido E-W, las secciones de las galerías de este nivel van desde los 7,2 m x 7,1 m a 4,7 m x 4,6 m.
- Nivel de Transporte Intermedio: Ubicado en la cota 1.716 m.s.n.m. Este nivel consiste en movilizar el mineral chancado desde todos los MB's activos hasta los silos de acopio subterráneo de nivel.

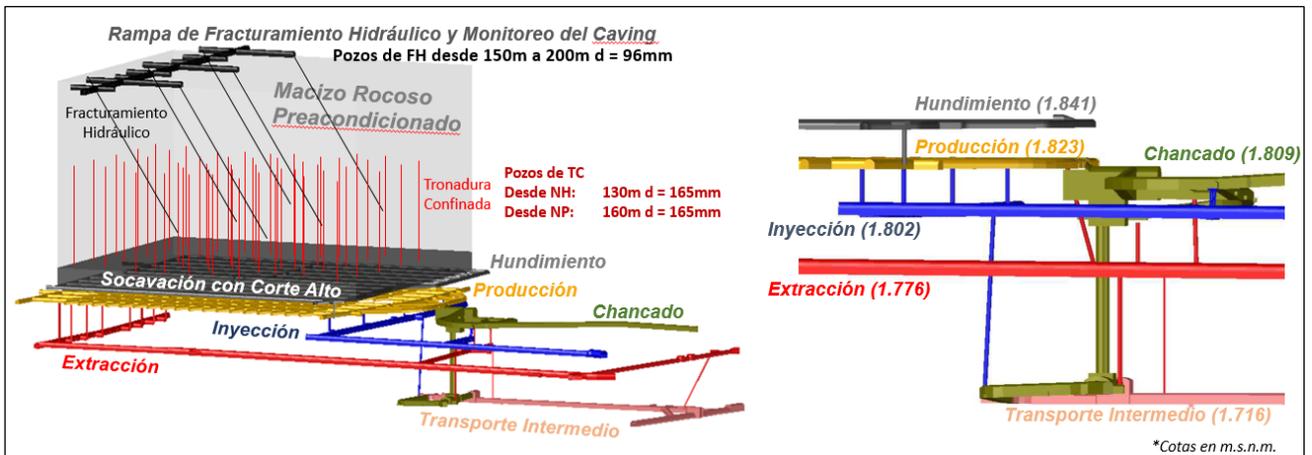


Figura 5: Diseño minero para la unidad básica de explotación PMCHS.

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

3.2.4 SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES (SMM)

El SMM está compuesto de tres etapas:

- Chancado y Apron Feeder. Contempla desde la sala de chancado hasta la Estación de Transferencia Apron Feeder.
- Etapa 2: Transporte Intermedio y Correa Colectora. Inicia en la Correa Intermedia y finaliza en la Estación de Descarga Túnel Correa Colectora con la descarga de material a los Silos Norte y Sur.
- Etapa 3: Transporte Principal. Corresponde al transporte en correa de nivel 1 hasta la descarga en la correa de transporte principal por medio de una correa de transferencia.

3.2.4.1 CHANCADO

En la Figura 6 se presenta una vista isométrica de la sala de chancado en cada par de MB's.

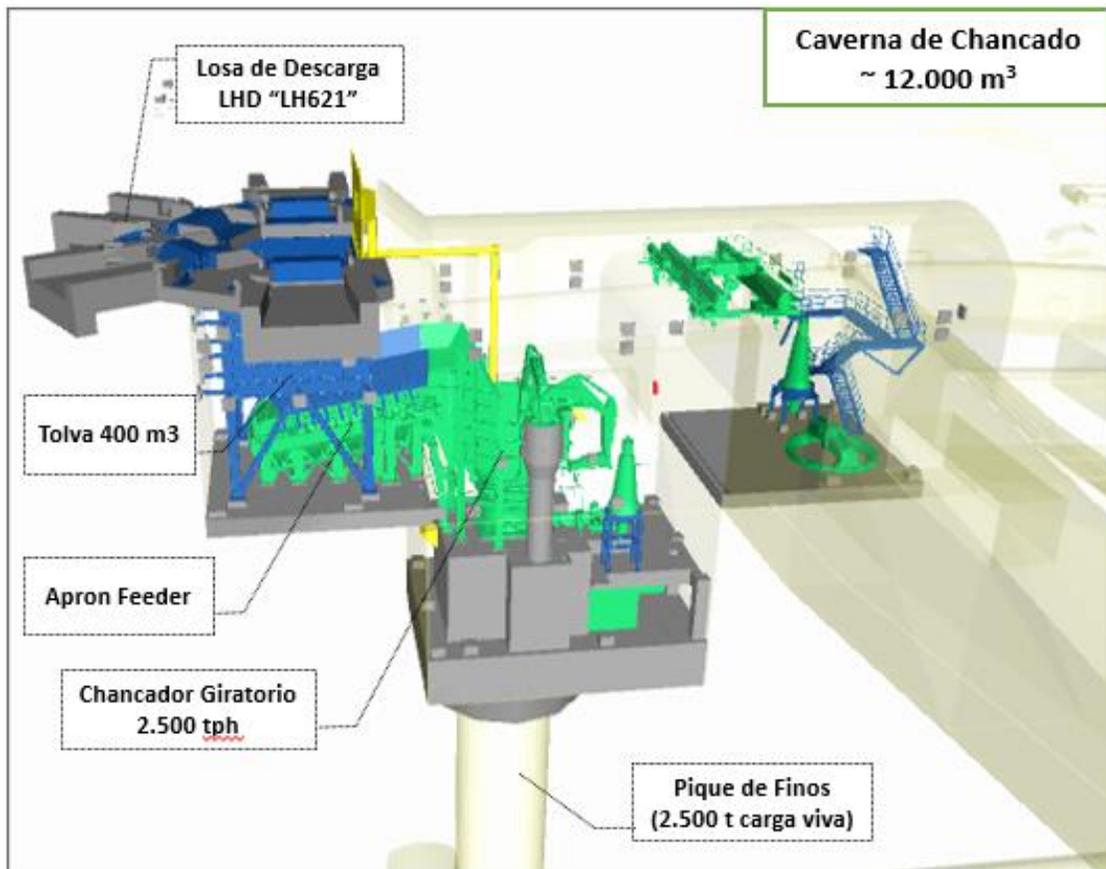


Figura 6: Disposición espacial de las salas de chancado.

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

La configuración de esta etapa del Sistema de Manejo de Materiales (SMM) se desarrolla cada dos MB's. Desde el nivel de producción, utilizando equipos LHD, se extrae y transporta el mineral hasta la tolva, punto inicial del SMM y entrada a la Sala de Chancado de dimensiones 43 m x 15,5 m x 12,3 m. La tolva con capacidad de 400 m³ de carga viva, puede recibir la descarga simultánea e independiente de hasta 4 LHD de 21 t (modelo LH621). Desde la tolva el mineral es alimentado, a través de un apron feeder de 3 m de ancho y 10 m de largo, a un chancador giratorio (SS = 54x75) capaz de procesar sobre 2.500 tph. La Sala de chancado contempla además un puente grúa, un martillo pica roca, sistema de captación de polvo, sistema hidráulico del chancador y un carro de mantenimiento de la excéntrica.

Luego, el mineral chancado pasa a través de un pique de finos de 6 m de diámetro y 63 m de largo (2.500 t de carga viva) hasta un apron feeder (de 1,8 m de ancho y 8 m de largo) que alimentará la correa de sacrificio de 72” de ancho, hasta la “Estación de Transferencia Apron Feeder”.

3.2.4.2 SISTEMA DE TRANSPORTE INTERMEDIO Y CORREA COLECTORA

En la “Estación de Transferencia Apron Feeder”, la correa de sacrificio alimenta a la correa intermedia de 48” de ancho, la que luego descarga a la correa colectora de 84” de ancho en la “Estación de Transferencia Colectora”.

Las correas colectoras descargan en la “Estación de Descarga Túnel Correa Colectora” a través de correas reversibles en dos silos subterráneos de dimensiones de 6 m de diámetro y 60 m de alto, con capacidades de 6.500 t (2.500 t carga viva), Norte y Sur.

En la Tabla 1 se detallan las características de las correas involucradas entre el pique de finos y los silos.

Tabla 1: Parámetros para equipos involucrados en chancado, transporte intermedio y colectora.

Equipo	Capacidad (tph)	Largo (m)	Velocidad (m/s)	Ancho (m)	Potencia (kW)
Apron Feeder Superior – Inferior	2.500	8	0,25	1,80	75
Correa de Sacrificio	2.500	44 – 106 -42	1,70	1,82	75
Correa Intermedia	2.500	108 – 212 – 277	4,30	1,22	150
Correa Colectora	11.000	1.345	4,85	2,13	1.400
Correa Reversible	11.000	50	4,40	2,13	250

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

3.2.4.3 TRANSPORTE PRINCIPAL

Los silos Norte y Sur, llevan el mineral a dos alimentadores de correa (norte y sur respectivamente) de 3 m de ancho y de 36 m de largo, cuya capacidad es de 11.000 tph.

Los alimentadores descargan el mineral a la correa de nivel, de 72” de ancho y 830 m de largo, la cual lleva el mineral hacia la correa de transferencia de 94” de ancho y 53 m de largo, que es la encargada de alimentar las correas principales de capacidad 11.000 tph cada una. La correa principal C-01 tiene un ancho de 72” y un largo de 3.303 m con pendiente positiva de 15%, descarga su mineral en la “Estación de Transferencia Principal Subterránea” (ubicada cerca del punto medio del túnel), a la correa principal C-02 que tiene un ancho de 72” y un largo de 3.039

m, mediante la cual se trasladará el mineral hasta el portal de superficie y posteriormente a la correa overland. La correa overland recibe el mineral de la correa principal C-02 y lo transporta sobre el silo de 15 m de diámetro y de altura 11 m y provee de mineral a las correas alimentadoras bajo silo.

En la Tabla 2 se detallan las características de las correas involucradas en el transporte de nivel y principal:

Tabla 2 : Parámetros para equipos involucrados en transporte principal.

Equipo	Capacidad (tph)	Largo (m)	Alto (m)	Velocidad (m/s)	Ancho (m)	Potencia (kW)
Alimentadores	11.000	36	0	1,4	3,2	400
Correa de Nivel	11.000	835	-36	7,0	1,8	800
Correa de Transferencia	11.000	53	0	3,8	2,4	200
Correa C-01	11.000	3303	495	7,0	1,8	20.000
Correa C-02	11.000	3039	456	7,0	1,8	20.000
Correa Overland	11.000	5330	287	7,0	1,8	15.000

Fuente: CODELCO (Chile), 2017.

Por último, en la Figura 7 se presenta el diagrama de diseño del flujo general del proceso del sistema de manejo de mineral del PMCHS.

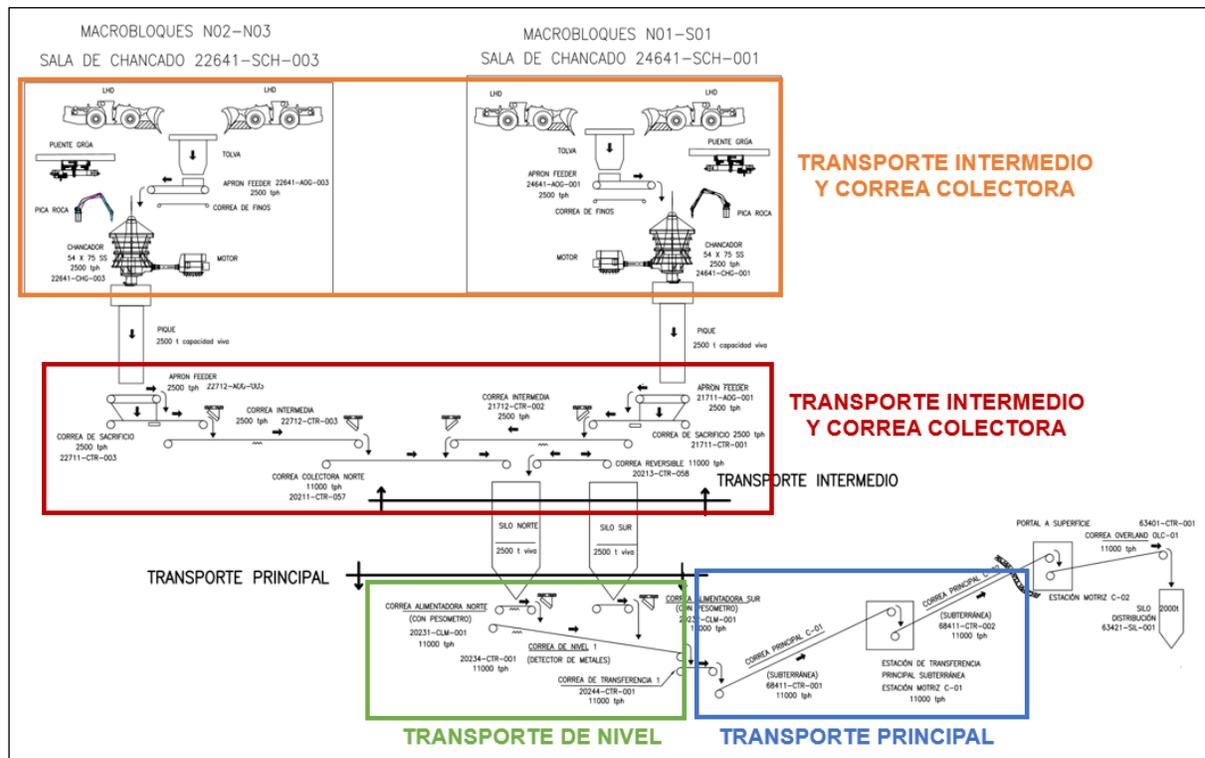


Figura 7: Sistema de manejo de mineral PMCHS. Fuente: CODELCO, Chile 2017.

Capítulo 4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 MEJORAS CONSTRUCTIVAS Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO.

Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea en relación con la construcción y avances, tiene unas de las mejores tasas de avance mensual en lo que respecta a proyectos mineros de Block Caving en el mundo, como se puede evidenciar a continuación.

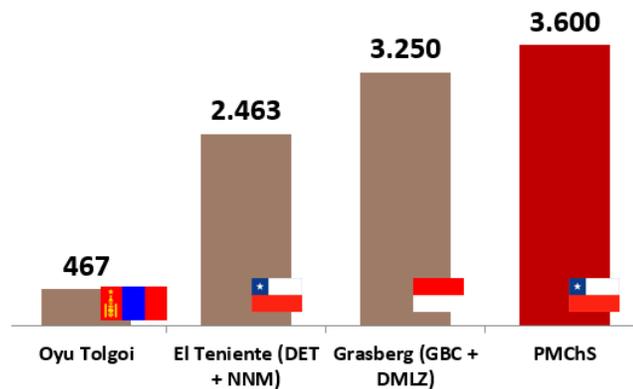


Figura 8: Metros de avance por mes en diferentes faenas (Fuente: Codelco [3]).

Lo anterior se debe al mejoramiento en los procesos constructivos, los que no se han documentado de manera exhaustiva generando un problema, debido a que transmitir y administrar el conocimiento, se ha vuelto en las últimas décadas un imperativo estratégico en todas las empresas [4].

Peter Drucker [5] sostiene que el conocimiento es "el recurso", en vez de ser solo un recurso más y que hoy en día, vivimos en una sociedad del conocimiento debido a la importancia de este último. Otros como Toffler [5] plantean que el conocimiento es la fuente de poder de más alta calidad y que el poder económico de una compañía se basa más en su capital intelectual que en cualquiera de sus otros activos.

Por lo que, la captura de las buenas prácticas (práctica que se ha demostrado que funciona bien y produce buenos resultados, y, por lo tanto, se recomienda) y la transmisión de estas es de vital importancia [6].

Para la identificación de las buenas prácticas, la oficina internacional del trabajo [7] indica que estas deben contener al menos dos de las siguientes características: innovación, pertinencia, alineación, efectividad, eficiencia, replicabilidad, inclusividad y sostenibilidad.

Por otra parte, la organización de naciones unidas [6], menciona que estas deben tener las siguientes características: efectiva y exitosa, sostenible, técnicamente posible, replicable, adaptable y reduce el riesgo de desastre o crisis.

Más específicamente en lo que respecta a construcción minera, el consejo minero [8] indica que, para identificar una buena práctica, en primer lugar, se debe definir, establecer y monitorear indicadores de desempeño que permitan una definición de métricas y factores de mejoramiento, así como la medición de impacto de las medidas correctivas implementadas, para determinar las causas basales de pérdida o aumento de productividad.

4.2 PREPARACIÓN MINERA Y DESARROLLO.

Preparación Minera puede ser definida como el conjunto de actividades que permiten desarrollar túneles y construir infraestructura minera, obras civiles, mecánica, eléctrica e instrumentación de los diferentes niveles o sectores que serán usados para incorporar área productiva [10].

Según Camhi, 2012 [11], la “Preparación Minera” es un área que tiene la responsabilidad de gestionar las actividades relacionadas con el desarrollo y construcción de infraestructura de mina subterránea, a través del cumplimiento del Programa de Preparación que debe sustentar las áreas necesarias a incorporar para cumplir con el Plan Minero de Producción, con una visión sistémica que considere tanto las diferentes fases de ejecución de un proyecto (Ingeniería de Detalle, Adquisiciones, Construcción y Puesta en Marcha), como el alcance, plazo, costo y satisfacción del cliente, permitiendo asegurar los resultados proyectados, optimizando los recursos puestos a disposición del proyecto y así alcanzar los objetivos establecidos, contribuyendo a maximizar en el largo plazo el valor económico de la División y de la Corporación.

Las actividades de preparación minera se pueden clasificar en tres tipos principales de tareas [12]:

- **Excavaciones Mineras:** corresponden a los desarrollos horizontales y verticales que se deben realizar en todos los niveles productivos. Esta categoría incluye la fortificación (perno, malla y shotcrete), saneamientos de galerías y la estabilización de sectores. Sin embargo, esta fortificación no es definitiva en el nivel de producción.

- **Obras Civiles:** son las obras basadas principalmente en hormigón armado y la armadura. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento (esto último es una fortificación definitiva de una zona en producción).
- **Montaje de Infraestructura:** estas tareas corresponden a las obras de terminación necesarias para finalizar un proyecto determinado. Normalmente se ejecutan posterior a las obras civiles y culminan con la habilitación ya sea local o remota de un elemento determinado. Ejemplos de estas actividades son el montaje y habilitación de buzones de carguío y Plate Feeders, elementos de infraestructura necesarios para el traspaso y manejo de materiales desde un nivel a otro.

De manera secuencial, se comienza con el desarrollo y fortificación de las excavaciones mineras, luego se realiza instalaciones de obras civiles y finalmente el montaje de equipos que permiten la operación de la mina. Esta secuencia de actividades tiene como producto una cantidad de área preparada para iniciar o continuar con la explotación minera.



Figura 9: Procesos de preparación mina. Fuente: Camhi, 2012.

Dentro del proceso de excavaciones mineras e instalación de obras civiles, se definen dos tipos de fortificación [13].

- **Fortificación de Desarrollo:** Es el conjunto de elementos de soporte que se instalan inmediatamente después del disparo (a la frente y en la frente) con el propósito de dar una adecuada seguridad, tanto al personal como a los equipos y evitar el deterioro del macizo rocoso, debido a lo cual una colocación oportuna, juega un rol muy importante en alcanzar los objetivos antes mencionados.

- **Fortificación Definitiva:** Es el conjunto de sistemas de soporte que se requieren para asegurar la estabilidad del diseño minero y sus singularidades, permitiendo así alcanzar la extracción programada de mineral del sector. Estos sistemas de soporte se instalan fuera de la zona de transición.

Actualmente los proyectos de preparación minera se ejecutan completamente con recursos externos, esto es mediante empresas contratistas mayores que se encargan de un proyecto determinado y otras de menor rango que participan en la ejecución de obras de infraestructura eléctrica y de control. Según lo anterior, la gestión eficiente de estos contratos se transforma en una de las claves de éxito de la ejecución de un proyecto determinado [11].

4.3 EXCAVACIONES MINERAS

4.3.1 DESARROLLO HORIZONTAL

Técnicamente, los desarrollos horizontales corresponden a excavaciones en roca y en PMCHS, la tecnología usada es perforación y tronadura [14]. La perforación y tronadura para el desarrollo de excavaciones horizontales es aceptada en la industria debido a las condiciones del entorno y las ventajas que presenta respecto de otras técnicas. El ciclo comienza con la perforación mediante equipos mecanizados (jumbos). Tras la tronadura y ventilación de la frente, un equipo LHD se encarga de transportar la marina hacia los vaciaderos. Luego, la acuñadura de las frentes se realiza manualmente desde un elevador hidráulico o con equipos acuñadoras para evitar la exposición de caída de rocas a trabajadores. Terminado esto, la fortificación de la galería se ejecuta con perno, malla y shotcrete, según el grado de estabilidad requerido, finalizando de esta manera el ciclo.

Las distintas etapas del ciclo se detallan a continuación [15]:

- 1) **Perforación de tiros de avance:** Usando una perforadora frontal “Jumbo” de dos brazos con sistema de perforación computarizado, se efectúan los tiros que alojarán los explosivos a detonar posteriormente. Los puntos en que se efectúan las perforaciones son los previamente marcados usando pintura, de acuerdo a la disposición indicada en el diagrama de disparo.
- 2) **Carguío de explosivos:** Personal competente y debidamente certificado se encarga de instalar las cargas explosivas al interior de las perforaciones realizadas por el Jumbo. Idealmente los explosivos deben ser instalados de acuerdo a como lo indica el diagrama de

disparo, sin embargo, no es raro que la instalación se base simplemente en la experiencia del minero encargado.

- 3) **Tronadura:** Se despeja el área en un radio mínimo de 200 metros. Se bloquean todos los accesos que lleven hacia la zona donde se efectuará la tronadura, así como las zonas en que se tiene planificado ocurra el flujo de gases de tronadura para la ventilación.
- 4) **Ventilación de la frente tronada:** Una vez tronada la frente, se debe esperar hasta que la concentración de gases tóxicos alcance valores normales: 40 ppm para el CO, 1,6 ppm para el SO₂ y 25 ppm para el NO₂ según la Ley de Chile (2012). Una vez que el sector es seguro, se procede a quitar las cenefas en los accesos.
- 5) **Regado de marina:** Como medida adicional se rocía con agua la roca recién tronada, así se evita la emanación de gases atrapados entre los fragmentos al iniciar la remoción de la marina y a la posterior contaminación de los piques con gases de tronadura. Es fundamental contar con un indicador de la concentración de gases de tronadura durante este proceso.
- 6) **Extracción de marina:** El mineral fragmentado se carga utilizando un LHD y se transporta hasta un pique de vaciado de marina, donde el personal de Codelco se encarga posteriormente del acarreo. Dado el esponjamiento del mineral es imposible acceder al frente con otros equipos hasta que se efectúe esta etapa por completo. Se remueve marina partiendo por las zonas más alejadas donde ha alcanzado la proyección de roca y se continúa hasta despejar la zona tronada para las siguientes etapas.
- 7) **Acuñadura:** Utilizando un acuñador de aluminio, se golpean las paredes del frente y roca caja con el fin de detectar posibles fragmentos de roca sueltos que puedan desprenderse y provocar algún tipo de accidente. Es importante destacar que ante cualquier avistamiento de un “planchón” suelto es necesario acuñar, sea cual sea la etapa que se esté llevando a cabo, pues no es tolerable priorizar alguna tarea antes que un trabajo seguro. Si la calidad de la tronadura es mala es muy probable que se desprendan grandes cantidades de roca, impidiendo una continuidad en el trabajo sin antes efectuar una segunda remoción de marina o limpieza.
- 8) **Perforación de pernos:** Una vez acuñado y retirado el material producto de la acuñadura, se procede a la perforación de los tiros para la fortificación de pernos de la caja y la corona, esta perforación se realiza con un “jumbo fortificador”.
- 9) **Fortificación primaria con pernos:** Una vez terminadas las perforaciones en la roca de caja y techo se procede a instalar pernos helicoidales usando una mezcla de cemento

especial para su fijación, conocida como lechada, y la fijación de sus respectivas “planchuelas”, que cumplen una función análoga a una tuerca de gran diámetro.

- 10) **Fortificación secundaria con malla:** Una vez fijados los pernos helicoidales, mediante el fragüe de la lechada, se hace una instalación de malla tipo gallinero por encima de estos. Las planchuelas son removidas, luego se extiende la malla por sobre la superficie a fortificar, y finalmente se vuelven a colocar las planchuelas en su posición original, pero esta vez presionando la malla contra la roca.
- 11) **Sujeción de malla con tacos:** Una última etapa se realiza antes de la proyección de shotcrete. Es necesario que la malla esté aceptablemente adosada al cerro. Para ello se lleva a cabo una etapa de perforación, usando un taladro percutor, e instalación de tacos con ojete. Este proceso se conoce comúnmente como “hilteo de malla”.
- 12) **Proyección de Shotcrete:** La última etapa de fortificación, y la etapa final del ciclo de avance, requiere de un mixer que transportará la mezcla desde la planta hacia la frente, con el bolo en movimiento. La idea es proyectar la mezcla en capas de 3 a 4 cm cada vez, sobre las paredes y techo, utilizando un equipo conocido como Robotshot, donde el mixer descargará el mortero. La mezcla proyectada es conocida como shotcrete, debido a su idoneidad a ser proyectada, para luego fraguar rápidamente gracias a los aditivos que contiene. La proyección se debe hacer en forma ascendente y en avance, rotando el brazo del equipo en pequeños círculos de trabajo y perpendicular a la superficie que se está proyectando, para evitar ondulación y rechazo del material. Luego se debe aplicar una segunda capa una vez que se inicie el fraguado de la capa anterior.

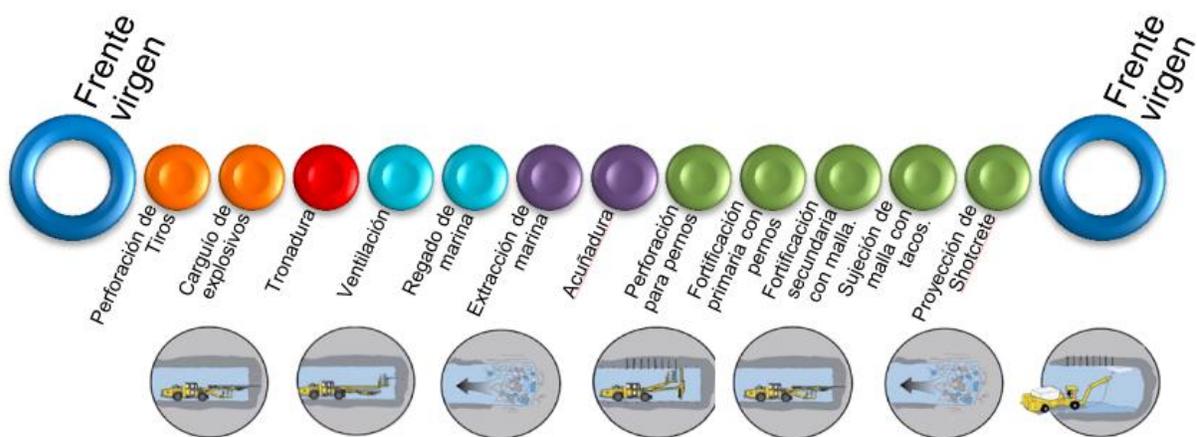


Figura 10: Ciclo minero para desarrollo horizontal de túneles clásico. Fuente: Lavado (2014).

4.3.2 DESARROLLO VERTICAL

Según las ubicaciones de los desarrollos verticales y los diámetros de perforación, en PMCHS se utilizan 2 sistemas, uno es la perforación Raise Borer y el otro corresponde al Sistema Blind Hole.

4.3.2.1 RAISE BORER

El método constructivo Raise Borer, consiste principalmente en la utilización de una máquina electrohidráulica en la cual la rotación se logra a través de un motor eléctrico y el empuje del equipo se realiza a través de bombas hidráulicas que accionan cilindros hidráulicos [16].

Básicamente la operación consiste en perforar, descendiendo, un tiro piloto desde una superficie superior, donde se instala el equipo, hasta un nivel inferior. Posteriormente se conecta en el nivel inferior el escariador el cual actúa en ascenso, excavando por corte y cizalle, la chimenea, al diámetro deseado.

Dependiendo de las características del equipo el motor eléctrico puede ser de 150 HP a 500 HP, este rango de potencias irá directamente en relación con el diámetro final de escariado y la longitud del pique o chimenea.

En este método de excavación de chimeneas se necesitará contar con dos superficies de trabajo: al inicio de la excavación, en la parte superior y al final de la excavación en la parte inferior. Es decir, el método será aplicable para excavaciones en interior de la mina entre dos galerías o desde superficie a una galería ubicada al interior de la mina.

Para el barrido de los detritus con agua, es necesario contar con un sistema de piscinas de unos 15 m³ que permitirá la decantación de los detritus evacuados y la recirculación del agua a las labores de perforación. Se estima una pérdida de agua de alrededor de 1.000 litros por día de perforación. Para el caso donde el macizo rocoso no es competente o la roca es de mala calidad, es necesario cementar (solución de hormigón masa) el tiro piloto y perforar nuevamente el tramo con problemas estructurales, con el fin de dar estabilidad al tiro piloto.

Los rendimientos están directamente relacionados con la calidad del macizo por lo que los antecedentes de rendimientos son referenciales y suponen una situación ideal sin interferencias.

- Piloto de 13 3/4": 10 a 12 metros por día.
- Escariado a 3,0 metros: 4 a 6 metros por día.

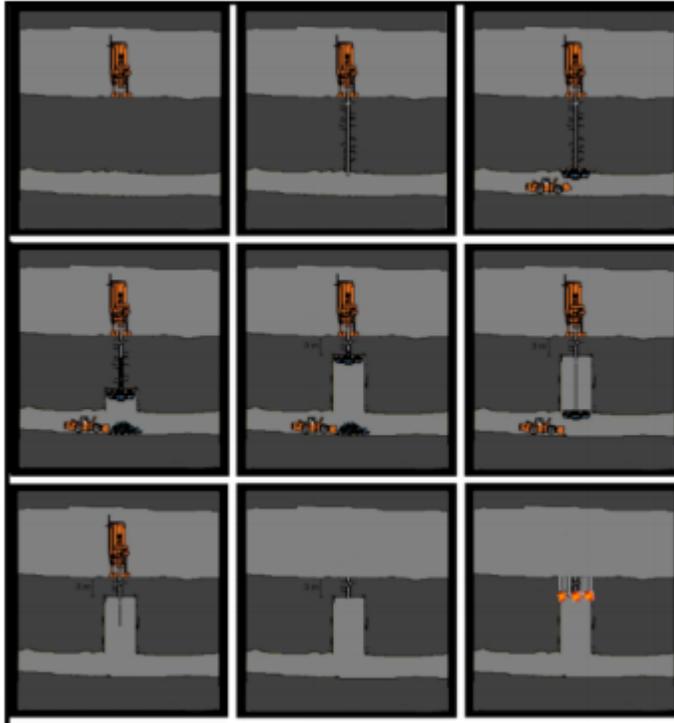


Figura 11: Proceso de Perforación Raise Borer. Fuente: Camhi, 2012.

4.3.2.2 BLIND HOLE

El método de construcción de chimeneas Blind Hole, consiste en la utilización de una máquina electrohidráulica para las excavaciones de chimeneas en forma ascendente [16].

En esta metodología el equipo se instala en el nivel inferior y la operación consiste en perforar el tiro guía 60 centímetros adelantado al escariador, que va excavando a sección completa, posteriormente, en forma solidaria. El material excavado cae por gravedad al nivel de la máquina y será guiado por un colector para prevenir riesgos.

El empuje se obtiene de los sistemas hidráulicos de bombas de alta presión y la rotación de un motor eléctrico de 150 HP, para el caso del equipo MD-150, el equipo más común para PMCHS, que va con la transmisión inmediatamente bajo el escariador. Para alcanzar la altura de excavación se adicionan en el cuerpo de la máquina, a nivel de piso barras especiales, estabilizadas, que permiten ir avanzando en altura con el desarrollo de la chimenea.

La autonomía del método, en este tipo de equipos, es de hasta 100 m de altura. Los equipos disponibles en Chile son para diámetros de 0,7 y 2,0 m.



Figura 12: Perforación máquina Blind Hole. Fuente: Master Drilling 2018.

4.4 PRE-ACONDICIONAMIENTO

Dependiendo de las características del macizo rocoso, este impondrá distintos niveles de dificultad para su explotación. Para hacer frente a esto, se utiliza la técnica del pre-acondicionamiento, por medio de la cual se interviene el macizo rocoso en sus condiciones naturales de confinamiento, para debilitarlo y modificar sus características geotécnicas [17].

Dentro de las técnicas de pre-acondicionamiento, destacan el Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE), el Fracturamiento Hidráulico (FH) y el pre-acondicionamiento mixto, que involucra el uso de FH y DDE a la vez.

4.5 DEBILITAMIENTO DINÁMICO CON EXPLOSIVOS (DDE)

El debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) es una técnica de pre-acondicionamiento que consiste en la detonación de un pozo de explosivo en un ambiente sin caras libres, generando nuevas fracturas y la apertura de las estructuras presentes naturalmente en el macizo. Esto provoca una disminución en su resistencia al fracturamiento natural, haciéndolo más apto para su explotación por métodos de caving [18].

4.5.1 DISEÑO DDE PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

Particularmente en PMCHS, el DDE se aplicó intensivamente en los macro bloques centrales (MB-N01/S01) de forma ascendente tanto del nivel de producción (PD) como en el nivel de hundimiento (HD) teniendo el siguiente diagrama de perforación de pozos (figura 13).

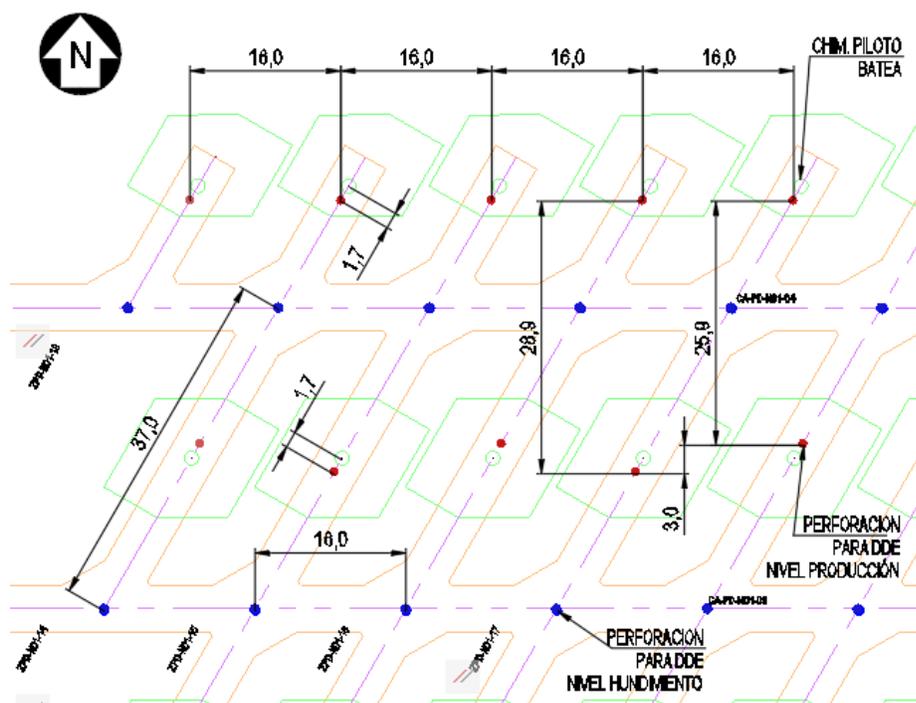


Figura 13: Diagrama perforación pozos de DDE MB-S01/N01 PD y HD (medidas en metro). Fuente: CODELCO, 2019.

En cuanto a las características de los pozos de DDE, estas varían según en el nivel a construirse (PD o HD) debido al cambio de longitud de perforación (tabla 3).

Tabla 3. Característica pozos DDE.

Característica	Unidad	Nivel Producción	Nivel Hundimiento
Longitud Perforación	m	150	130
Longitud de Taco	m	30	20
Longitud de Carga	m	120	110
Longitud Puntos Inicio	m	6 - 8	6 - 8
N° de Iniciadores	un	15 - 19	14 - 18
Carga por Pozo	t	3,3	2,8
Diámetro Perforación	mm	165	
Densidad de Explosivo	g/cm ³	1,15	
Explosivo	kg/m	24,6	

Espacialmente, el pozo está constituido (de forma ascendente) de un taco que varía de 20 a 30 m seguido de 14 a 19 iniciadores electrónicos separados de 6 a 8 m y finalmente del sistema de anclaje que se encuentra en la parte superior del pozo. Los iniciadores son sostenidos por la guirnalda que forma parte del sistema de anclaje. El pozo es relleno con emulsión.

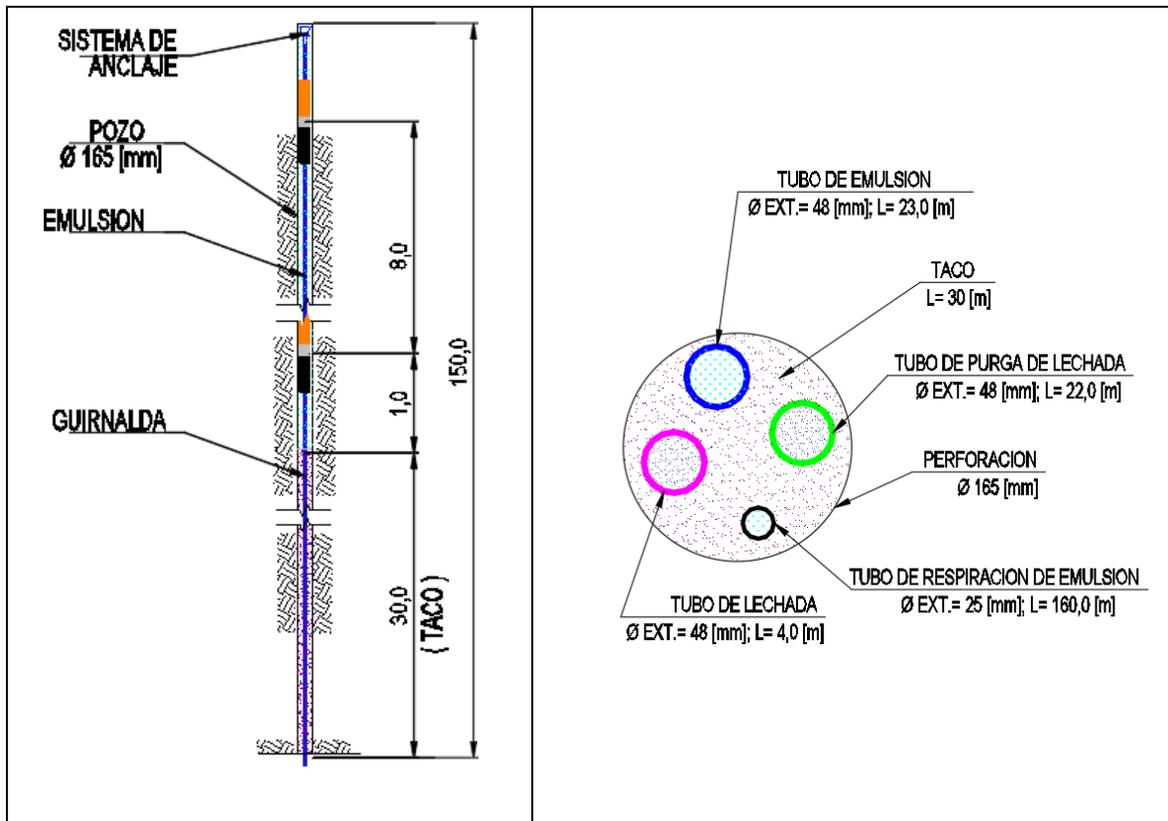


Figura 14: Configuración espacial pozo DDE y sus respectivos componentes (medidas en metros). Fuente:

CODELCO,2019.

El sistema de anclaje es un dispositivo mecánico diseñado para ser colocado en el extremo superior de los pozos. Para ello se utiliza un sistema de mordazas estriadas que se deslizan por la parte externa de un cuerpo cónico, el que permite a su vez el desplazamiento del eje que las une. Cuenta, además, con un resorte para mantenerlas en contacto con las paredes de la perforación. Desde la parte inferior de este cuerpo cuelga un eje que soporta una roldana por donde pasa el cable de acero que constituye el elemento central de la guirnalda.

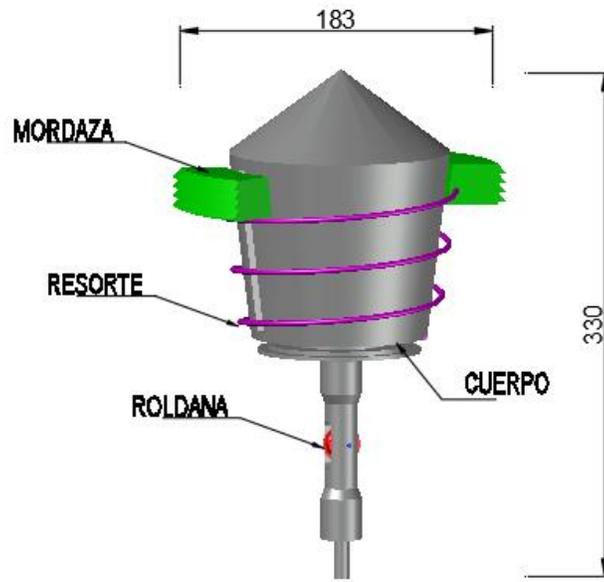


Figura 15: Diseño de sistema de anclaje DDE (medidas en milímetros). Fuente: CODELCO, 2019.

4.5.2 METODOLOGÍA DE PERFORACIÓN Y ANCLAJE DDE

Para la perforación de pozos de DDE e instalación de sistema de anclaje se realizan mediante el uso de una máquina de perforación ascendente de la siguiente manera.

Perforación	Anclaje
<ol style="list-style-type: none">1) Preparación área de trabajo máquina perforadora.2) Instalación de bit en martillo.3) Instalación de martillo en unidad de rotación.4) Posicionamiento de viga para perforación.5) Puesta en marcha de compresor.6) Empate de tiro.7) Perforación regular de tiro.8) Instalación de barras.9) Termino de perforación y detención de compresor.10) Retiro de barras.11) Soltado de bit.12) Retiro de martillo.	<ol style="list-style-type: none">1) Instalación de porta anclaje.2) Instalación de anclaje.3) Instalación de piolas para izaje.4) Instalación de barras.5) Elevación de tren de barras junto con anclaje fondo de tiro.6) Anclaje de dispositivo fondo de tiro.7) Bajar tren de barras.8) Aseguramiento de sistema de anclaje.

4.6 OBRAS CIVILES MINERIA

Los Obras Civiles están dadas básicamente por la ejecución de trabajos de Hormigón, sea este armado o simple, las principales obras civiles corresponden a los Puntos de Extracción, Muros de Confinamiento, Carpetas de Rodado y obras anexas [11].

Las principales obras civiles construidas en los MB N01/S01 de PMCHS son los siguientes [20]:

- 1) Puntos de extracción (Marcos y Vigas).
- 2) Muros de confinamiento de pilares.
- 3) Pavimentos.

4.6.1 PUNTOS DE EXTRACCIÓN

Punto de extracción es el lugar físico por donde se realiza la extracción de mineral en el nivel de producción. Este según las características geológicas y geomecánicas de la roca y la recomendación caso a caso que entregue el área de geomecánica del Proyecto, podrán ser de dos tipos; viga reguladora de mineral o “viga corta saca” y marcos de acero.

4.6.1.1 VIGA REGULADORA DE MINERAL

La viga reguladora de flujo de mineral o “viga corta saca” es un elemento estructural metálico diseñado para contener y regular el flujo de material mineralizado producto del hundimiento inducido al macizo rocoso que escurre del sector batea [21], evitando de esta forma la pérdida de espacio disponible para realizar las maniobras de extracción efectuada por los cargadores subterráneos en las zonas de producción, y controlar el desgaste de la visera del punto, por el escurrimiento de colpas de mayor tamaño [22].

4.6.1.1.1 DISEÑO VIGA REGULADORA

Las vigas reguladoras utilizadas en PMCHS tienen un perfil IE 70x227 y una longitud variable entre 4,7 a 5,6 m dependiendo de la sobre excavación de la zanja en la cual se montará esta.

El conjunto de la “viga corta saca” está compuesta por el cuerpo de la viga, cinco tipos de atiesadores, canaleta superior, placa anti desgaste, placa inferior, ganchos de maniobra y canaleta superior (figura 16).

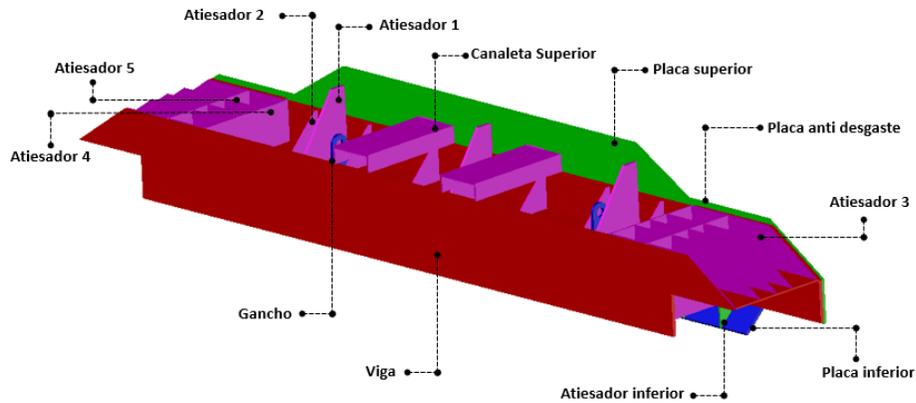


Figura 16: Diseño viga reguladora de flujo de mineral PMCHS.

4.6.1.1.2 MEDODOLOGIA DE INSTALACIÓN VIGA REGULADORA.

Para la instalación de la viga reguladora se requiere seguir los siguientes pasos.

1) Instalación de puntos de izajes (pernos ojos en el techo y caja).

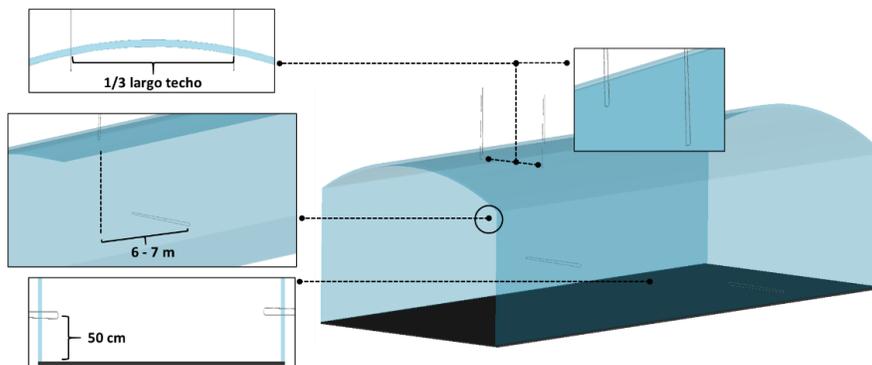


Figura 17; Instalación de puntos de izaje (viga).

2) Perforación, lechado e instalación de pernos de anclaje de consola.

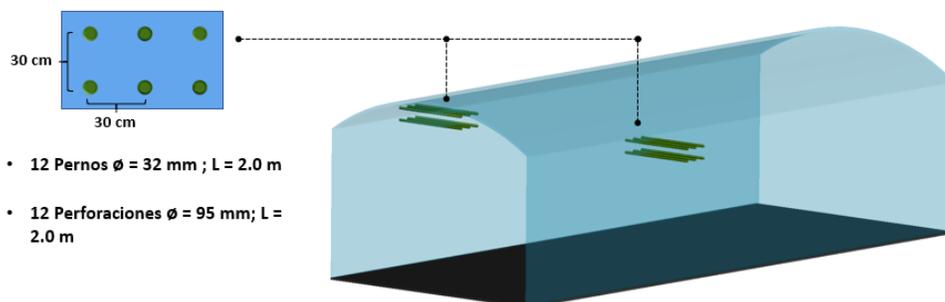


Figura 18: Perforación, lechado e instalación de pernos de anclaje consola (vigas).

3) Instalación de moldaje y grouting (mortero).

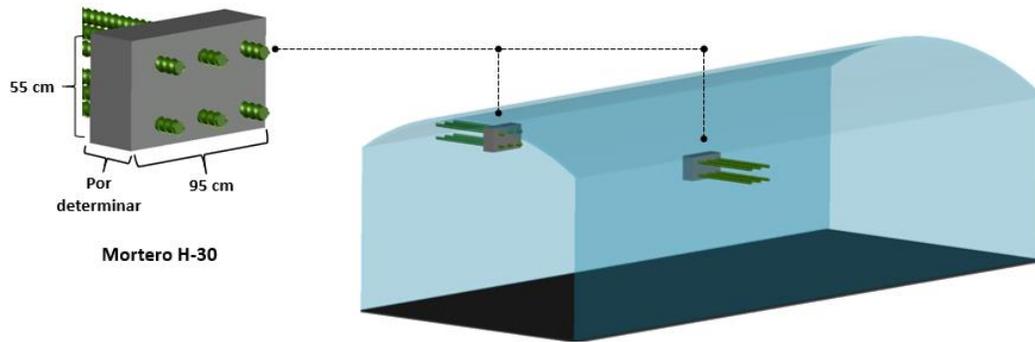


Figura 19: Instalación de moldaje y grouting (mortero).

4) Instalación y montaje de consola.

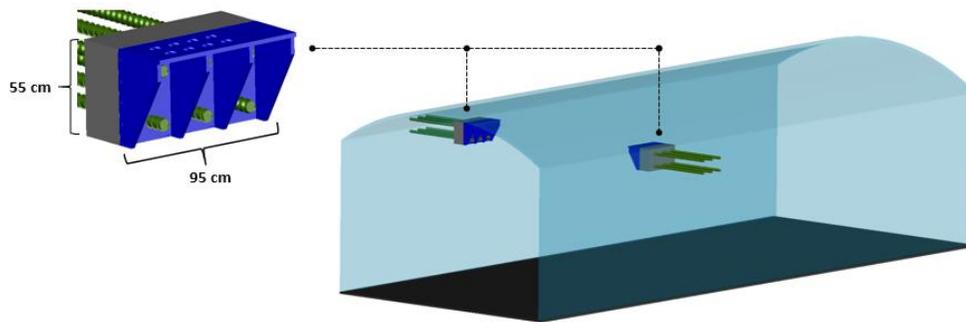


Figura 20: Instalación y montaje de consola.

Para la instalación de la consola es necesario el uso de un dispositivo especial de montaje o “machina” diseñada especialmente para usar el canastillo del equipo de levante.

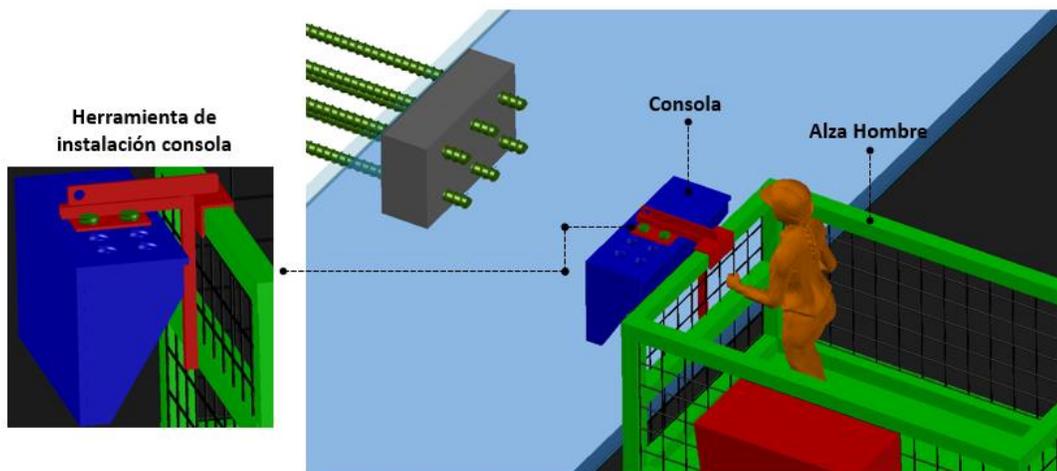


Figura 21: Instalación de consola con machina.

5) Alineación e instalación de planchuela y tuerca pernos de anclaje consola.

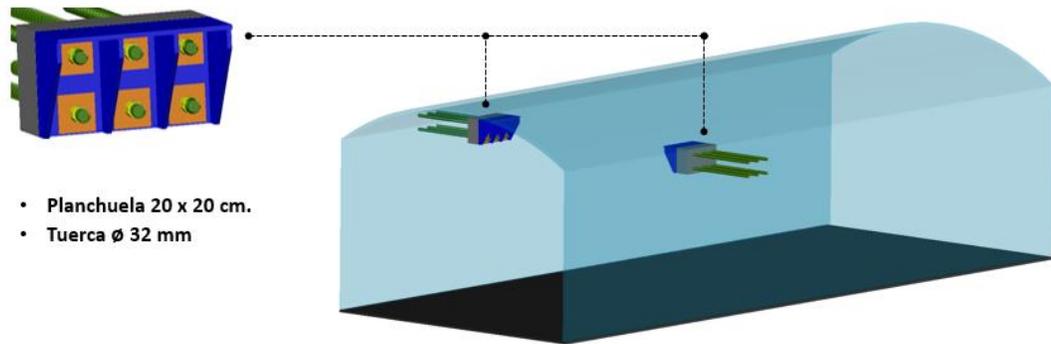


Figura 22: Alineación e instalación de planchuela y tuerca pernos de anclaje consola.

6) Instalación de “cuerpo de la viga”.

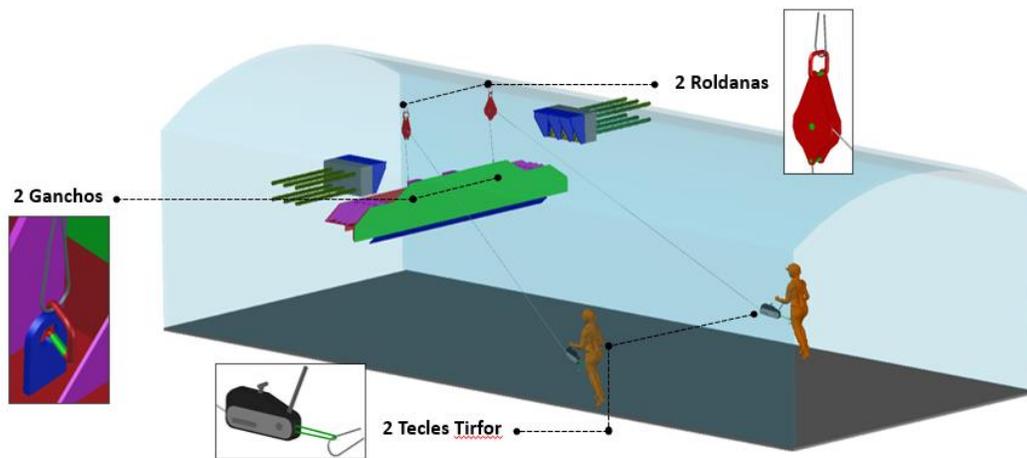


Figura 23: Instalación de cuerpo de viga.

7) Adosamiento y ajuste de viga con consola.

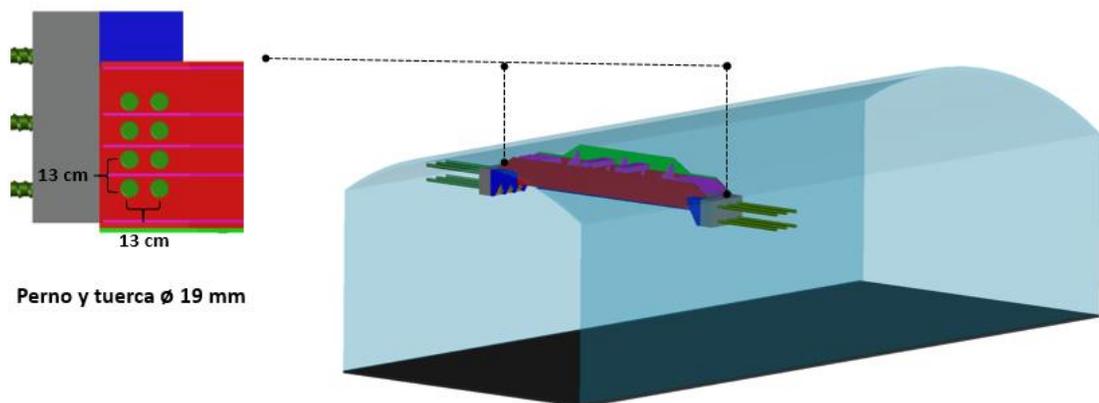


Figura 24: Adosamiento y ajuste de viga de consola.

8) Instalación de mallas sobre viga.

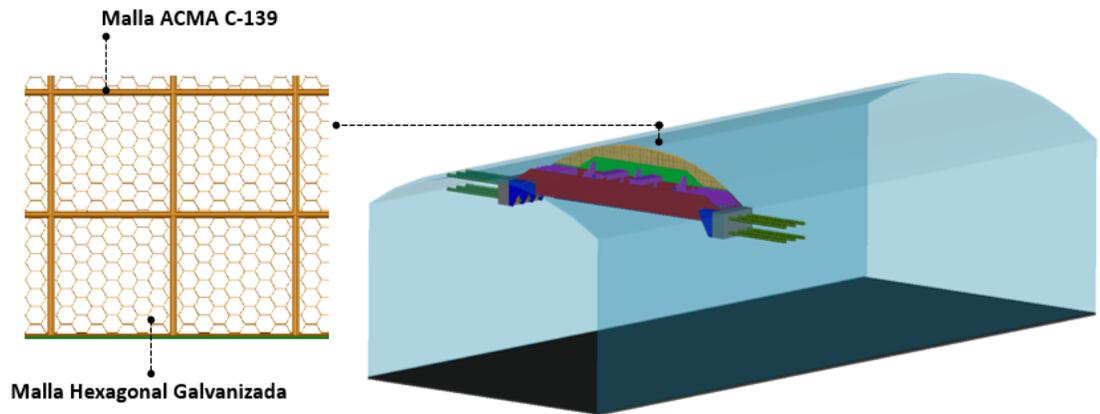


Figura 25: Instalación de mallas sobre viga.

9) Proyección de shotcrete de sello sobre la viga.

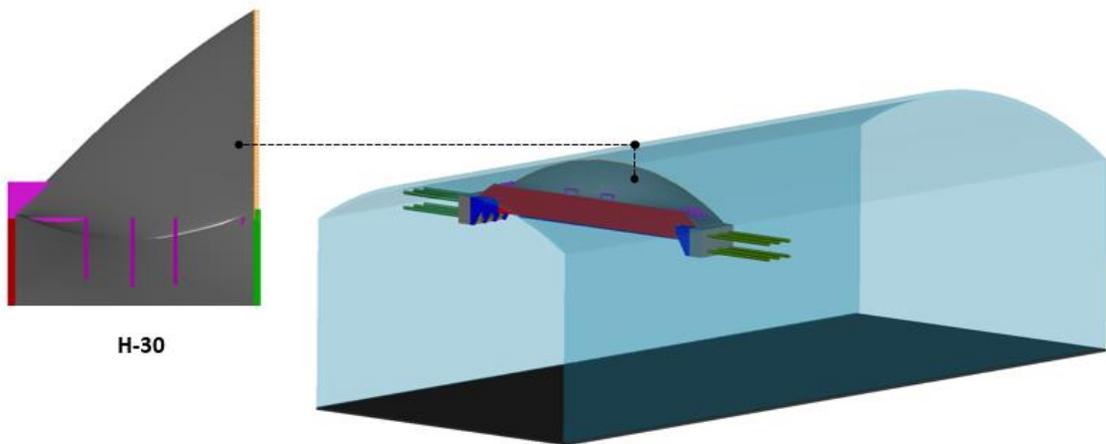


Figura 26: Proyección de shotcrete de sello sobre viga.

4.6.1.1.3 RENDIMIENTOS Y RECURSOS ASOCIADOS A INSTALACIÓN DE VIGA

Para la instalación de las vigas reguladoras de mineral, se necesitan los siguientes recursos y se obtienen los siguientes rendimientos por etapa.

Tabla 4: Recursos y rendimientos asociados a la instalación de vigas.

N°	Actividad	Rendimiento [hr]	Recursos [un]				
			Jumbo	Equipo Levante	Roboshot	M1 OO.CC	M1 Minero
1	Perforación de puntos de izajes y pernos anclaje	2	1	0	0	0	0
2	Instalación lechado e instalación de pernos anclaje y puntos izajes	1.5	0	1	0	1	2
3	Instalación de moldaje y grouting	4	0	1	0	3	0
4	Instalación de consola	1	0	1	0	3	0
5	Alineación e instalación de planchuela y tuerca pernos de anclaje consola	1	0	1	0	3	0
6	Instalación viga	2	0	1	0	4	0
7	Adosamiento y ajuste de viga con consola	1	0	1	0	3	0
8	Instalación de mallas sobre la viga	1.5	0	1	0	3	0
9	Colocación de Shotcrete de sello	2	0	0	1	0	0
Total		13	1	7	1	20	2

4.6.1.2 MARCOS DE ACERO

Los marcos de acero para la construcción de PEX son estructura de acero tipo viga H compuestos de 3 partes; dos columnas o “pie derecho” y un arco que une las dos columnas formando un marco de fortificación.

4.6.1.2.1 DISEÑO MARCOS DE ACERO

Los marcos de acero utilizadas en PMCHS para la construcción de PEX tienen un perfil HN 200 x 69, espaciados a 0,90 m y embebidos en hormigón armado H-30. El set de 4, 3 o 2 marcos se

afianzará entre si con tirantes de acero de 22 mm de diámetro, y se afianzan a la excavación minera mediante “pernos L” los cuales tienen un largo de 2,5 m y un diámetro de 22 mm y mediante pernos de anclaje, los cuales van a piso y tienen un largo de 1,3 m y un diámetro de 22 mm (figura 27).

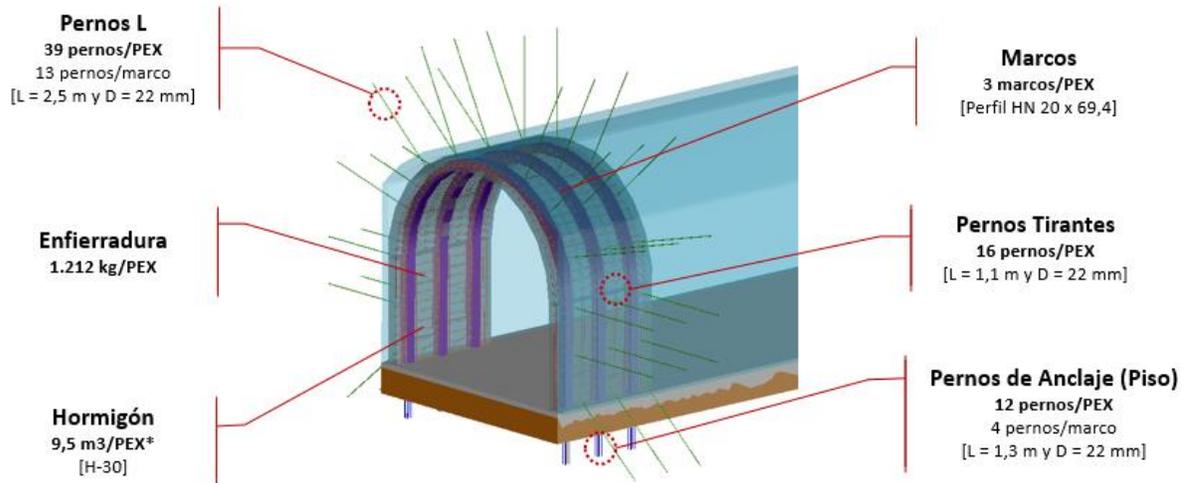


Figura 27: Componentes PEX tipo marco de acero.

4.6.1.2.2 METODOLOGIA INSTALACIÓN MARCOS DE ACERO

Para la instalación de marcos de acero se requiere seguir los siguientes pasos.

1) Nivelación de piso para instalación de marcos (escarpe y nivelación).

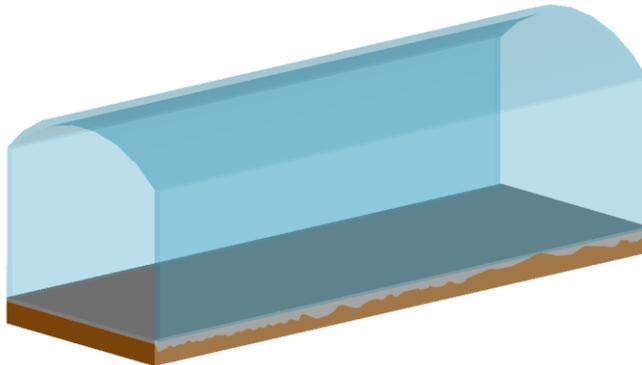


Figura 28: Nivelación de piso para instalación de marcos (escarpe y nivelación).

2) Perforación de 39 pernos L y 12 pernos de anclaje a piso.

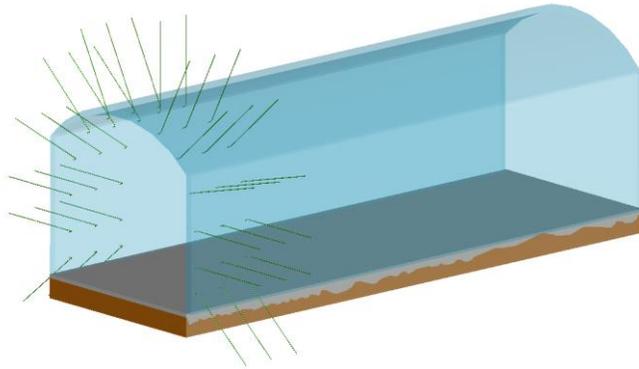


Figura 29: Perforación de pernos L y pernos de anclaje.

3) Montaje e instalación de pie derecho marcos.

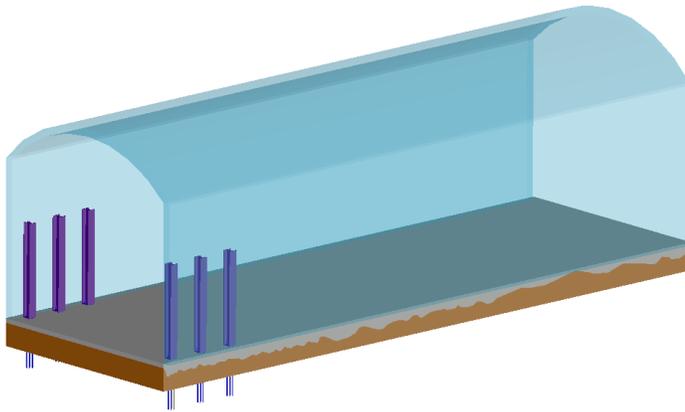


Figura 30: Montaje e instalación de pie derechos marcos.

4) Alineación pie derechos e instalación de pernos tirantes.

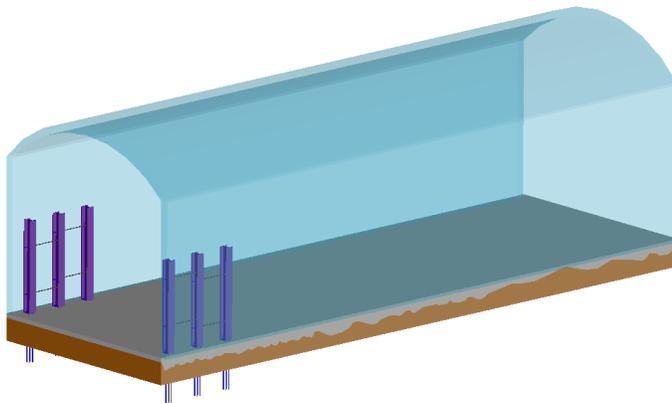


Figura 31: Alineación pie derechos e instalación de pernos tirantes.

5) Montaje y alineación de coronas con pernos tirantes.

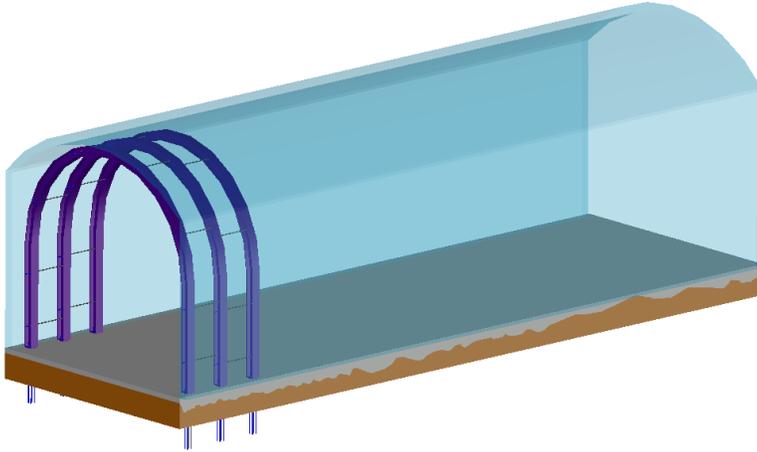


Figura 32: Montaje y alineación de coronas con pernos tirantes.

6) Instalación y lechado de pernos L.

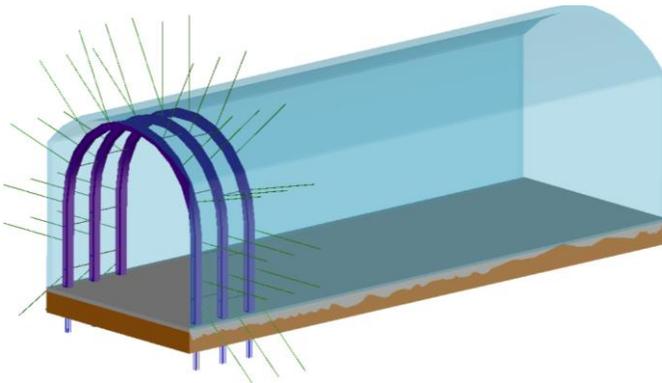


Figura 33: Instalación y lechado de pernos L.

7) Instalación de enfierradura cajas.

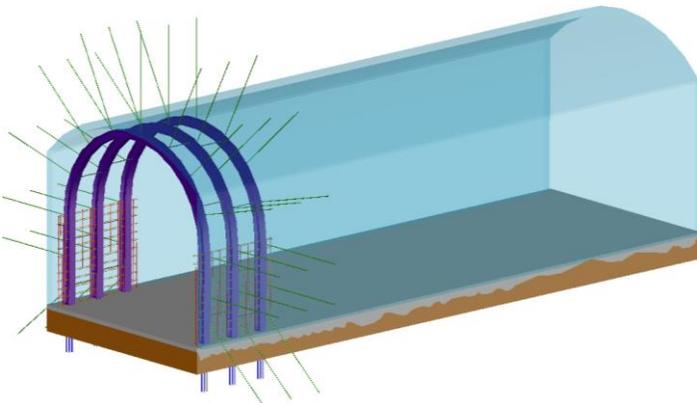


Figura 34: Instalación de enfierradura cajas.

8) Moldaje y hormigonado de cajas.

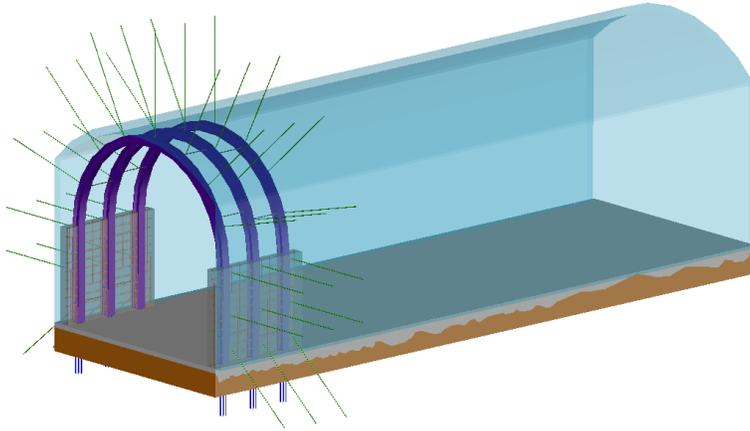


Figura 35: Moldaje y hormigonado de cajas.

9) Instalación enfierradura corona.

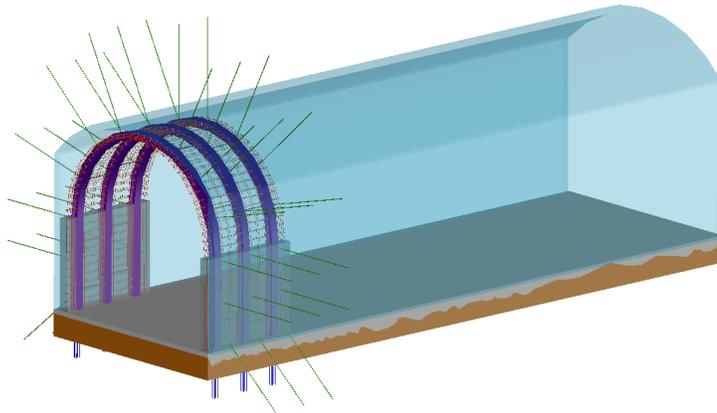


Figura 36: Instalación de enfierradura corona.

10) Moldaje y hormigonado corona.

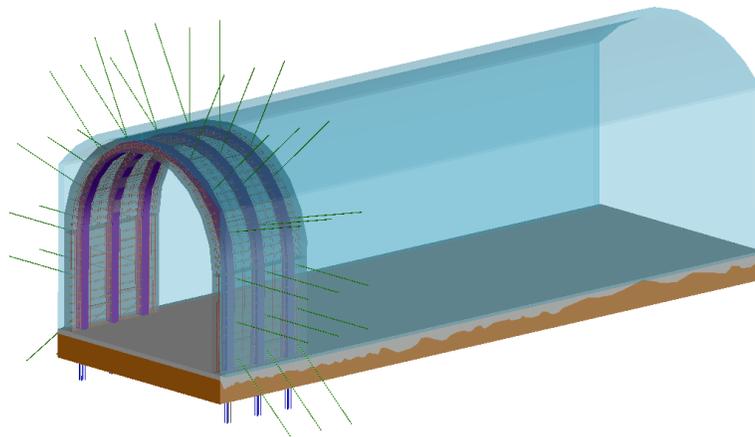


Figura 37: Moldaje y hormigonado corona.

4.6.1.2.3 RENDIMIENTOS Y RECURSOS ASOCIADOS A LA INSTALACIÓN DE MARCOS DE ACERO

Para la instalación de marcos de acero para PEX, se necesitan los siguientes recursos y se obtienen los siguientes rendimientos por etapa.

Tabla 5: Recursos y rendimientos asociados a la instalación de PEX tipo marcos de acero.

N°	Actividad	Rendimiento [hr]	Recursos [un]							
			Jumbo	Perforadora Manual	Martillo Picador	Equipo Levante	Bomba Hormigon	M1 OO.CC	Soldador	M1 Minero
1	Nivelación piso para instalación (escarpe y nivelación)	6,5	0	0	1	0	1	3	0	0
2	Perforación de 39 pernos tipo L	3	1	0	0	0	0	0	0	0
3	Perforación e instalación de pernos anclajes	1	0	0	0	0	0	0	0	2
4	Montaje de pie de marcos	2	0	0	0	1	0	3	0	
5	Alineación pie de marcos e instalación de pernos tirantes	1	0	0	0	0	0	3	0	0
6	Montaje de marcos corona	3	0	0	0	1	0	3	0	0
7	Alineación de marcos corona e instalación de pernos tirantes	1	0	0	0	1	0	3	0	0
8	Lechado de pernos L	2	0	0	0	1	0	0	0	2
9	Instalación de enfierradura cajas	4	0	0	0	0	0	3	0	0
10	Moldaje y hormigonado cajas	3	0	0	0	0	1	3	1	0
11	Instalación enfierradura corona	6	0	0	0	1	0	3	0	0
12	Moldaje y hormigonado corona	6	0	0	0	1	1	3	1	0
Total		38,5	1	0	1	6	3	27	2	4

4.6.2 MUROS DE CONFINAMIENTO DE PILARES

Los muros de confinamiento corresponden a los elementos de la fortificación definitiva en galerías de niveles de producción. Son extremadamente importantes, pues al excavar el cerro, se producen fuerzas de presión hacia el interior que pueden provocar colapsos de la caja. Estos elementos estructurales, además cumplen una función de ordenamiento de las cajas lo que facilita la operación por parte del conductor de una pala o scoop [11].

4.6.2.1 DISEÑOS MUROS DE CONFINAMIENTO

Los muros de confinamiento consisten en bloques de hormigón armado que se instalan de forma modular, donde cada uno de estos módulos tiene dimensiones de 1,8 m de alto, 2,0 m de ancho y 0,2 m de ancho. Cada módulo se fija al pilar con cuatro pernos cables doble y se fijan al piso y entre módulo a través de pernos L de 22 mm de diámetro. Cada sector de pilar consta de aproximadamente de 21 m lineales de muro, lo que equivale a 10 módulos [20]. Además, estos módulos se encuentran afianzados entre sí por cables corchetes.

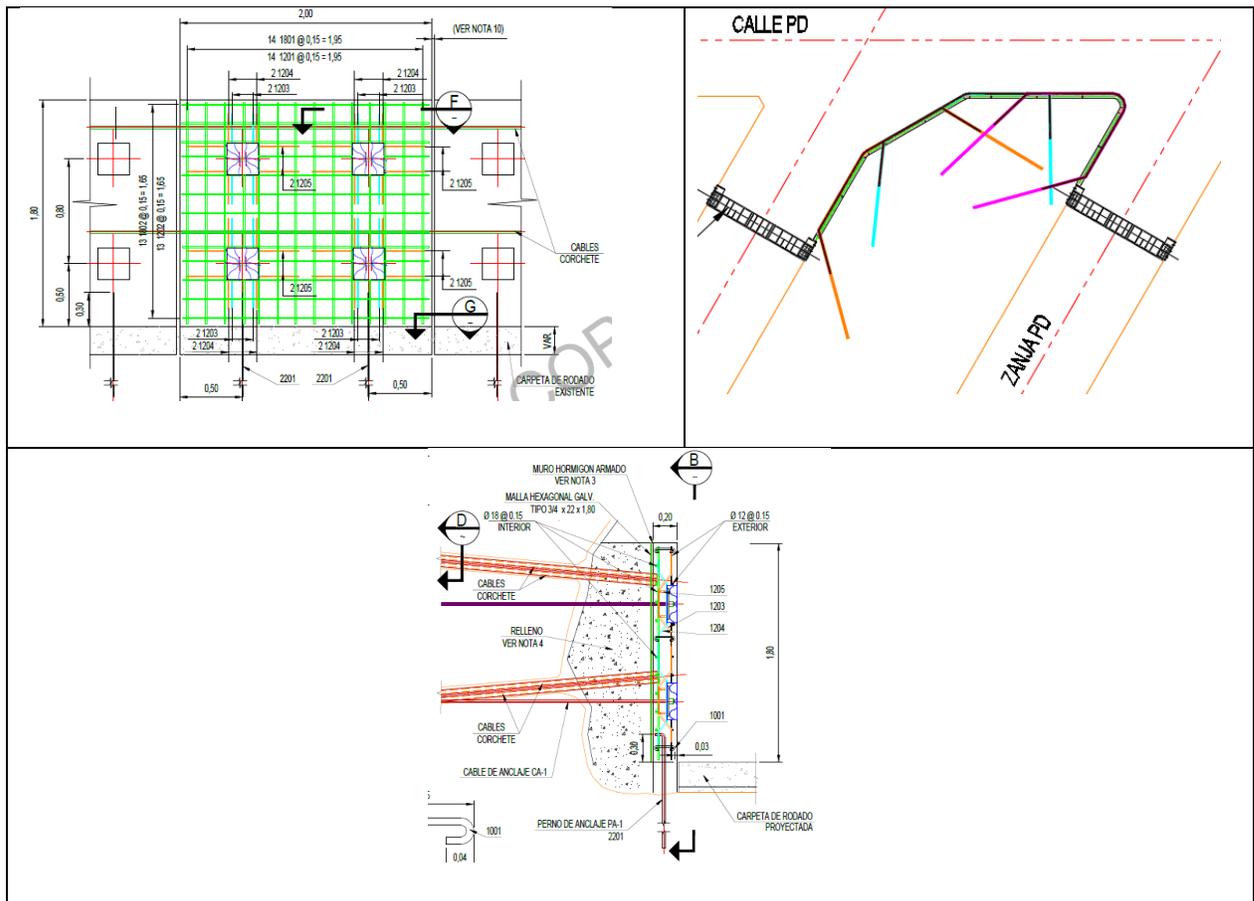
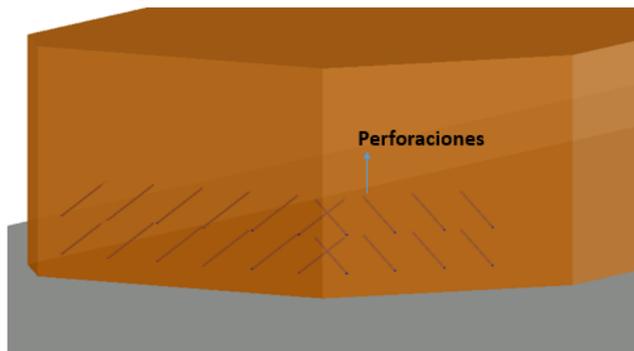


Figura 38: Diseño de muros de confinamiento. Fuente: CODELCO, 2018.

4.6.2.2 METODOLOGIA DE INSTALACIÓN MUROS DE CONFINAMIENTO

Para la instalación de muros de confinamiento se deben seguir los siguientes pasos.

1) Perforación de tiros que se usaran para instalar pernos cables y pernos corchetes.



- Diámetro de perforación para cables pernos y cables corchetes = 64 mm
- Estas perforaciones tienen un largo de 6 m en promedio.

Figura 39: Perforación para pernos cables y pernos corchetes.

2) Desquinche y limpieza de la zona en donde se instalarán los muros.

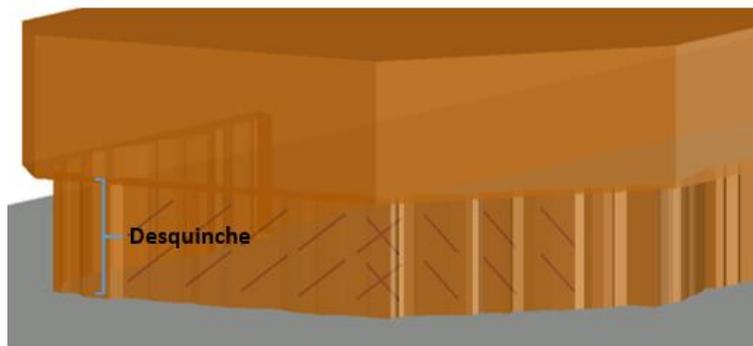


Figura 40: Desquinche y limpieza muros de confinamiento.

3) Se realiza la instalación de la enfierradura interior de Fe, la cual es de 18 mm diámetro y una distancia entre barras de 15 cm.

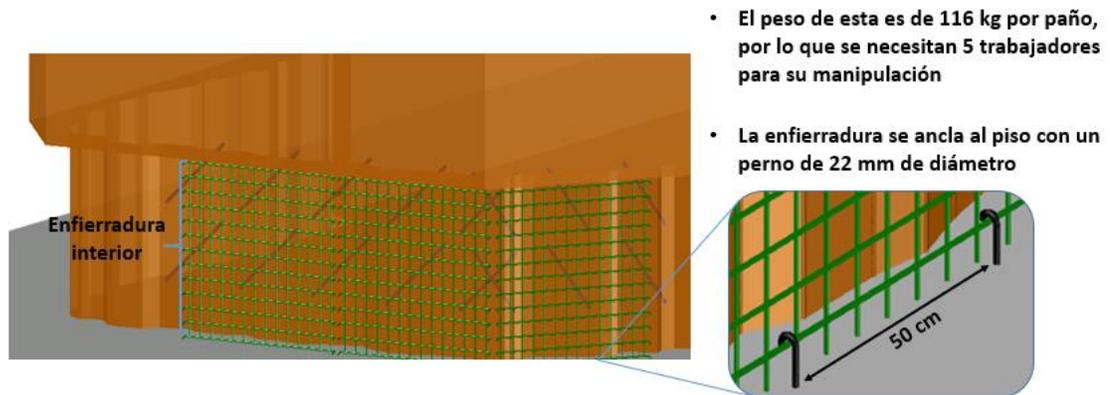


Figura 41: Instalación de enfierradura interior de FE.

4) Instalación y lechado de cables pernos dobles y cables corchete.

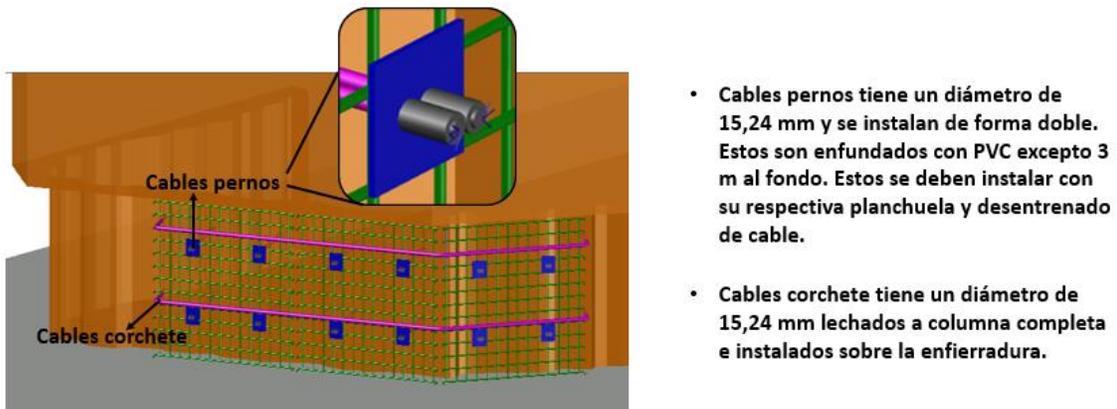


Figura 42: Instalación y lechado de cables pernos dobles y cables corchetes.

5) Instalación de la enfierradura exterior de Fe, la cual es de 12 mm diámetro y una distancia entre barras de 15 cm. También se instalan los separadores de paños.

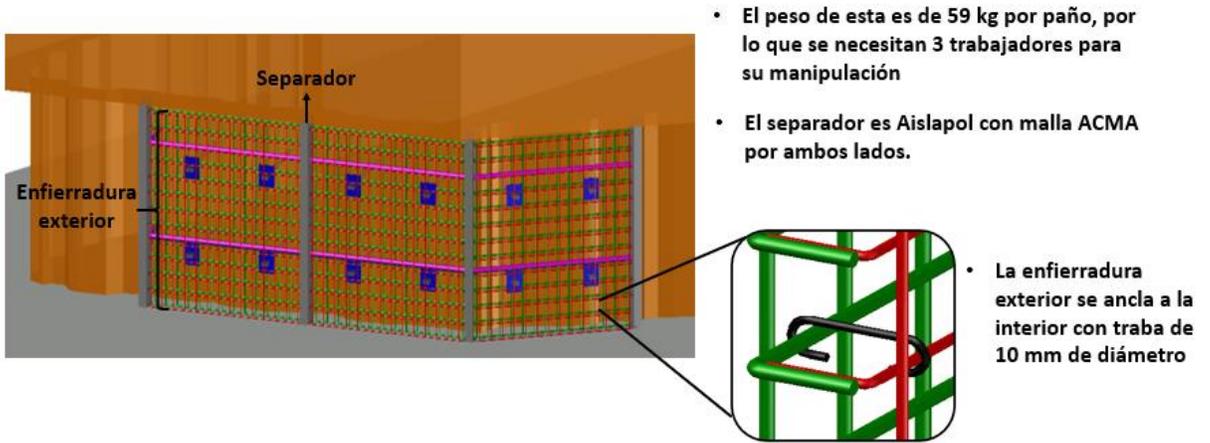


Figura 43: Instalación de enfierradura exterior.

6) Instalación de los moldajes metálicos alrededor de la estructura de fierro instalada.

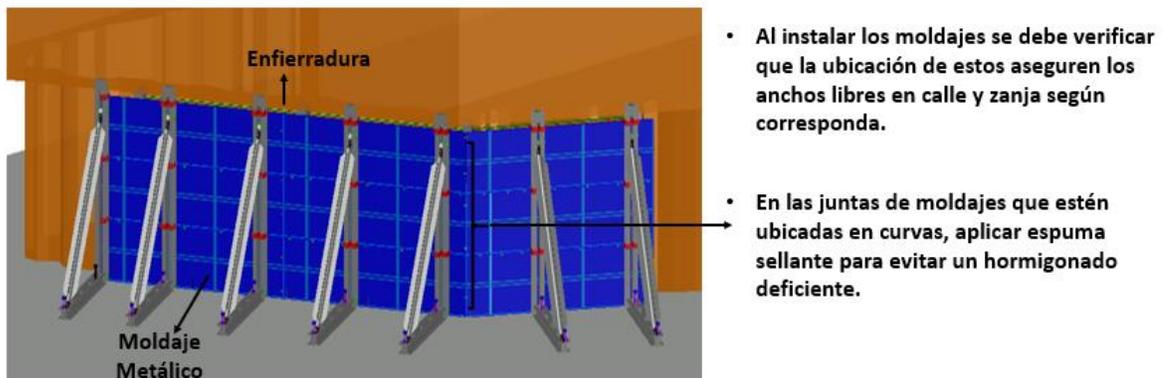


Figura 44: Instalación de moldajes para hormigonado.

7) Hormigonado con HB-30 el cual se deposita mediante una bomba impulsora, no superando la altura del muro.

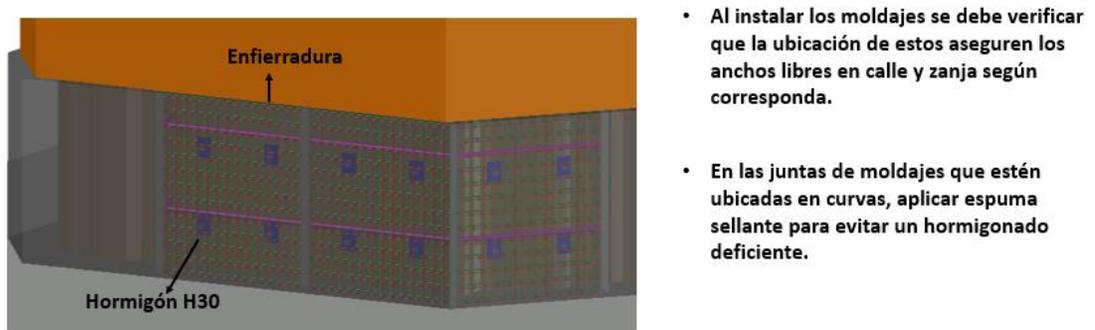


Figura 45: Hormigonado de muros de confinamiento.

4.6.2.3 RENDIMIENTOS Y RECURSOS ASOCIADOS A LA INSTALACIÓN DE MUROS DE CONFINAMIENTO

Para la instalación de muros de confinamiento, se necesitan los siguientes recursos y se obtienen los siguientes rendimientos por etapa.

Tabla 6: Recursos y rendimientos asociados a la instalación de muros de confinamiento.

N°	Actividad	Rendimiento [hr]	Recursos [un]				
			Jumbo	Martillo Picador	Bomba hormigón	M1 OO.CC	M1 Minero
1	Perforación de pernos cables y cables corchete	6,5	1	0	0	0	0
2	Desquinche zona instalación muros	8,5	0	1	0	0	0
3	Instalación enfierradura interior	5	0	0	0	5	0
4	Instalación y lechado de pernos y cables	4	0	0	0	1	2
5	Instalación de enfierradura exterior y separadores de paños	5	0	0	0	5	0
6	Instalación de moldajes	4	0	0	0	5	0
7	Hormigonado	2	0	0	1	3	0
Total		35	1	1	1	19	2

4.6.3.2 METODOLOGIA PARA LA INSTALACIÓN DE CARPETA DE RODADO

Para la instalación de carpetas de rodado se deben seguir los siguientes pasos.

- 1) **Retiro de material suelto hasta cota de piso de labor definida por proyecto, esta limpieza debe ser a roca firme libre material suelto y lavado (escarpe).**

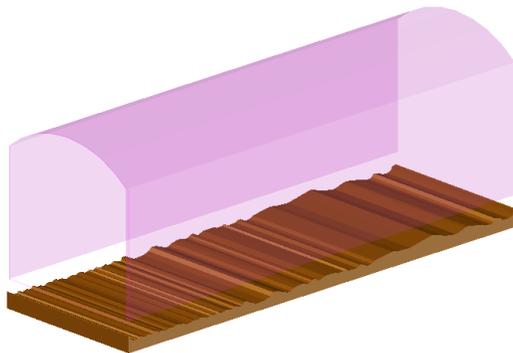


Figura 48: Escarpe.

- 2) **Relleno sobre excavación con hormigón de nivelación.**

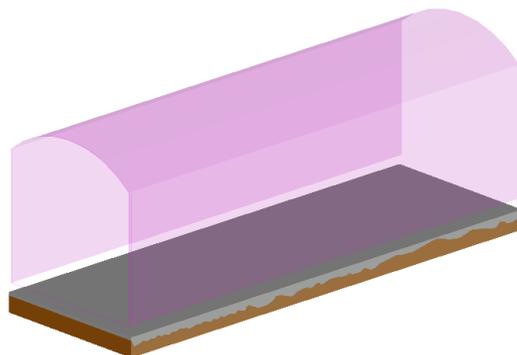


Figura 49: Nivelación.

- 3) **Pavimentación de carpeta definitiva.**

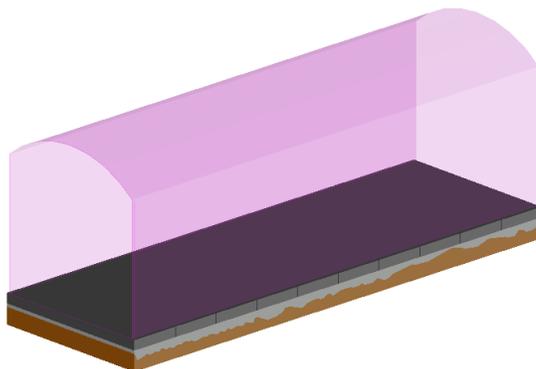


Figura 50: Pavimentación carpeta definitiva.

4) Corte cada 3 m (profundidad 60 cm) y sellado con resina epóxica de carpeta definitiva.

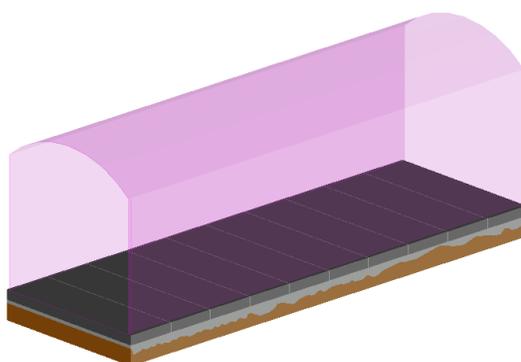


Figura 51: Corte y sellado pavimento.

4.6.3.3 RENDIMIENTOS Y RECURSOS ASOCIADOS A LA PAVIMENTACIÓN

Para la instalación de pavimentos, se necesitan los siguientes recursos y se obtienen los siguientes rendimientos por etapa.

Tabla 7: Recursos y rendimientos asociados a la pavimentación.

N°	Actividad	Rendimiento [ml/turno]	Recursos [un]				
			M1 OO.CC	Martillo Picador	Cortadora	Mixer Carretero	Mixer Bajo Perfil
1	Escarpe	12	0	1	0	0	0
2	Nivelación	12	3	0	0	1	1
3	Pavimentación	12	3	0	0	1	1
4	Corte y Sellado	12	2	0	1	0	0

Capítulo 5 DESARROLLO

5.1 PALANCAS DE MEJORAS DDE.

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño tanto en el proceso de perforación como en la instalación del sistema de anclaje del DDE anteriormente descrito se hace uso de los siguientes KPI.

- Avance mensual de perforación (mb/mes).
- Demoras no programadas según avance mensual (min*mes/mb).
- Nº tiros anclados mensual (un/mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene los siguientes cambios de pendientes (palancas de mejora).

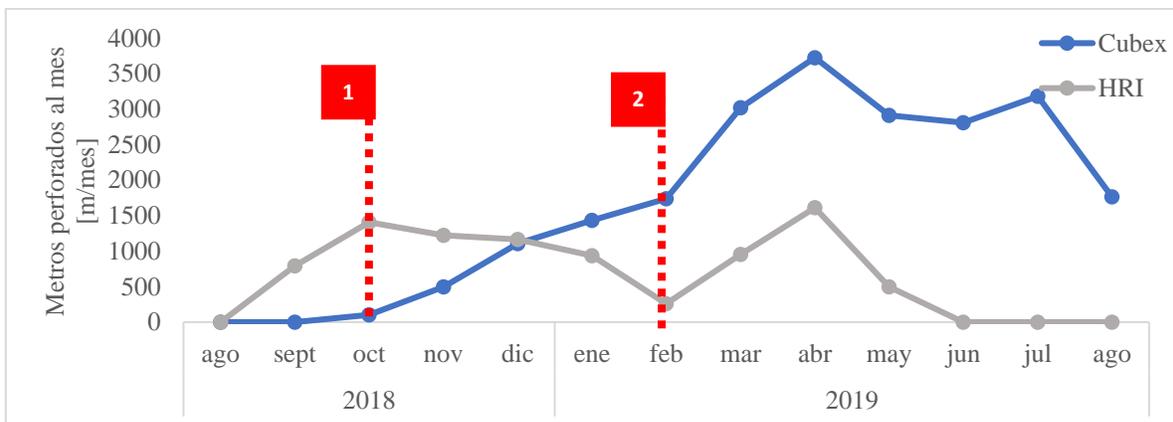


Gráfico 1: Avance mensual de perforación (mb/mes).

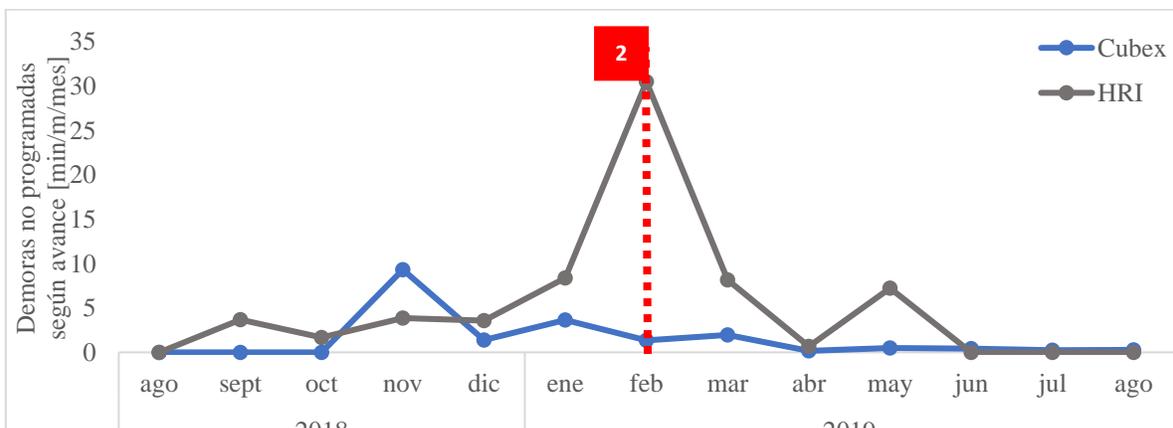


Gráfico 2: Demoras no programadas según avance mensual (min/m/mes).

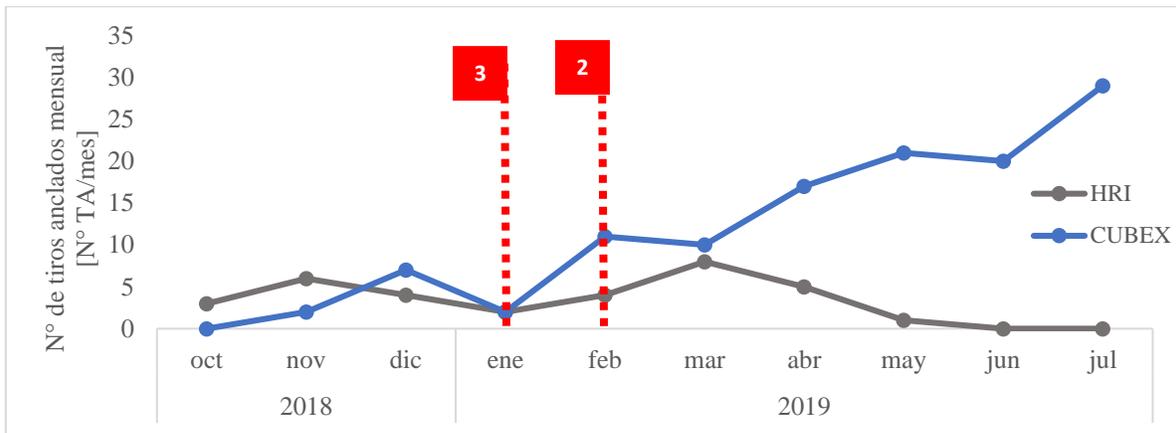
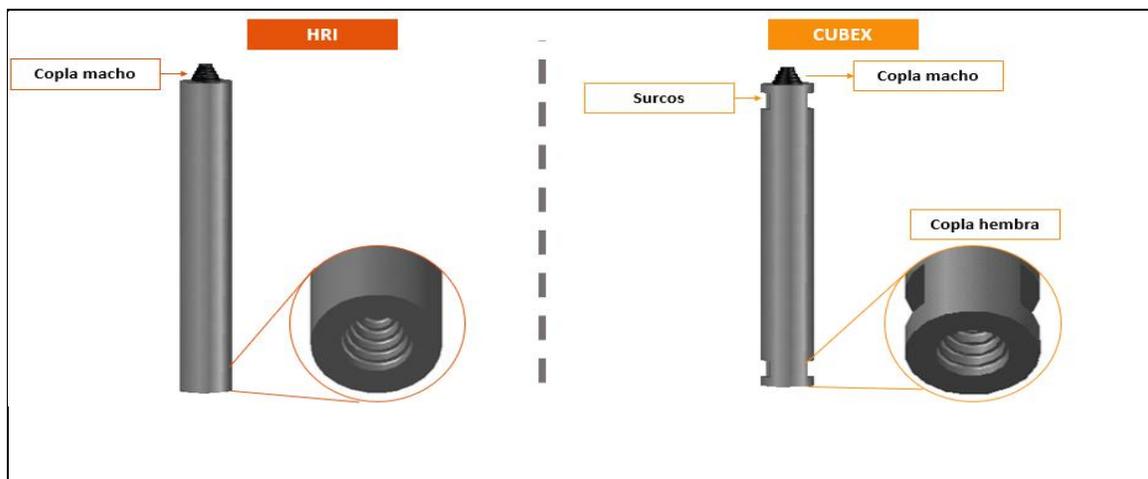


Gráfico 3: N° tiros anclados mensual (un/mes).

5.1.1 PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN OCTUBRE 2018.

a) Cambio en máquina de perforación ascendente. Incorporación de CUBEX (perforación ascendente ITH). Hasta octubre del 2018, para la perforación de tiros ascendentes de 150 m de longitud con diámetro 6”1/2 se usa un JUMBO con un sistema DTH.

- **Problema:** disminución en el rendimiento de perforación por demora en bajar el tren de barras.
- **Causa:** sistema de desacople de barras y sistema hidráulico de HRI no estaban diseñados para perforaciones de gran longitud.
- **Solución:** incorporación de máquinas CUBEX, las cuales están diseñadas para perforaciones ascendentes de gran longitud, la cual incorpora;
 - o Un sistema de desacople de barras dotadas de mordazas y barras con acople.



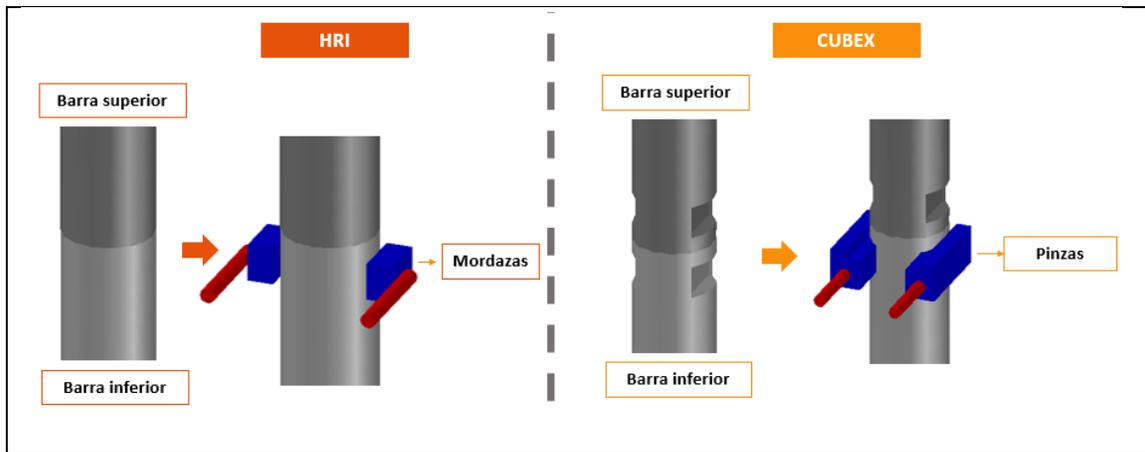


Figura 52: Comparación sistema de barras y anclajes de HRI y CUBEX.

- Compresor de alta presión.

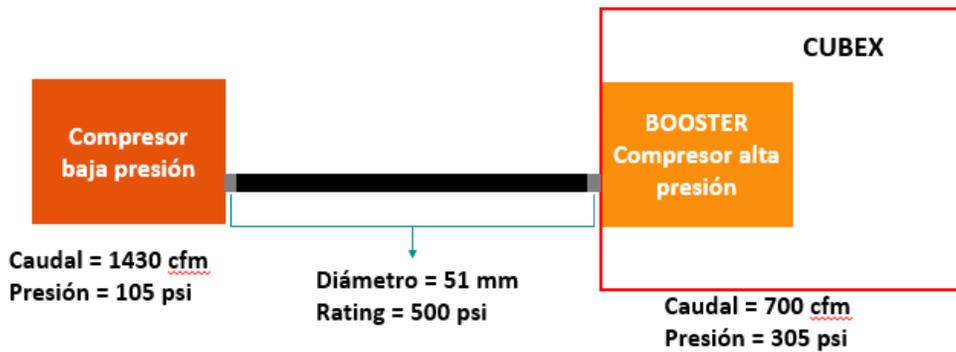


Figura 53: Sistema hidráulico de CUBEX.

5.1.2 PALANCA DE MEJORA N#2: IMPLEMENTACIÓN FEBRERO 2019.

- Perfeccionamiento en el ajuste de variables internas de perforación: presión de avance, velocidad de rotación, tipo de martillo y tipo de bit.

Hasta la fecha, si bien la CUBEX tenía mejor rendimiento que la HRI, esta no llegaba a los rendimientos esperados por el proyecto (2.500 mb/mes).

- **Problema:** no cumplimiento con el rendimiento en perforación requerido por el proyecto.
- **Causa:** la poca experiencia de los operadores y del staff de especialista.
- **Solución:** perfeccionamiento en el ajuste de las variables interna de perforación.

- Ajuste de velocidad de rotación y presión de avance.

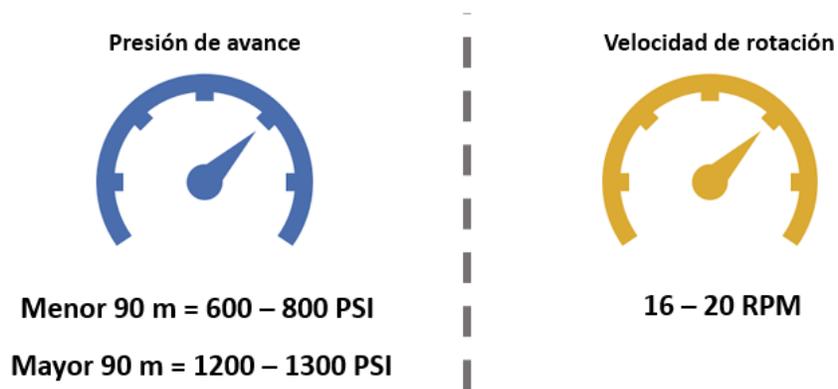


Figura 54: Variables internas de perforación CUBEX.

- Cambio en el tipo de barras, bits y martillo a utilizar.

- 1 **Martillo:** DTH RH560
Rendimiento: 1100 m/martillo
- 2 **Bit:** 6 1/2" QL 60 cara cóncava DP 65.
Rendimiento: 128 m/bits
- 3 **Barras:** CUBEX #28, D 127 mm, L 1.8 m

b) Implementación de cambio de diámetro de perforación en CUBEX y HRI.

- **Problema:** disminución del diámetro del tiro de DDE.
- **Causa:** sobre desgaste del bit por la alta abrasividad de cuarzo sericita.
- **Solución:** perforar los primeros 75 m con bit de diámetro 6 ¾" y después perforar los últimos 75 m con bit de 6 ½".



Figura 55: Implementación de cambio de diámetro de perforación en CUBEX y HRI.

5.1.3 PALANCA DE MEJORA N#3: IMPLEMENTACIÓN ENERO 2019.

a) Mejoramiento en el diseño y metodología de anclaje CUBEX.

- **Problema:** deficiente efectividad de anclaje.
- **Causa:** sistema de anclaje no logra un buen adosamiento a las paredes del tiro por falla en resorte.
- **Solución:** modificar el sistema de anclaje, quitando el resorte y subiendo las mordazas mediante sistema de aire comprimido.

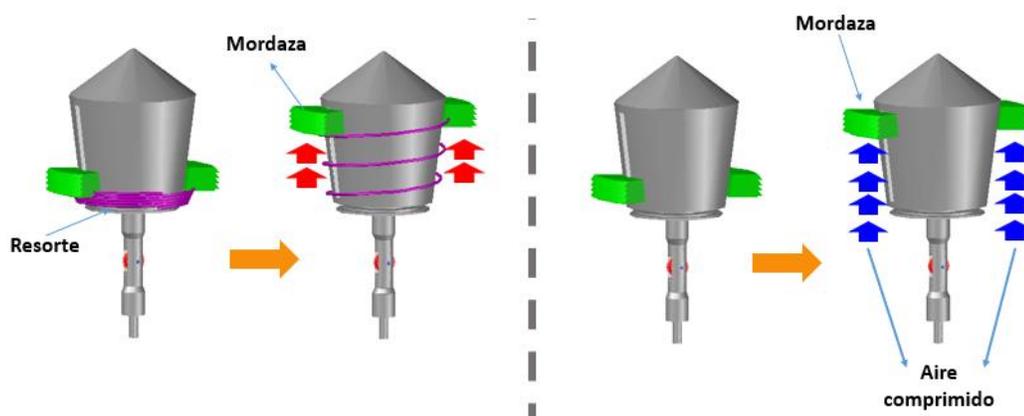


Figura 56: Mejoramiento en el sistema de anclaje.

5.1.4 CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.

A continuación, se categoriza cada palanca de mejora según a qué KPI (productividad) afectó esta palanca de mejora y en qué porcentaje afecta.

- **Productividad:**

Tabla 8: Palancas de mejora que ayudaron a la productividad del DDE.

DDE - PRODUCTIVIDAD		
Palancas de mejora	Porcentaje Mejora [%]	Precio Unitario [KUSD/mb]
Sistema Desacople	21%	0,10
Cambio de diámetro		
Cambio Compresor	41%	0
Ajuste Variables Internas		

La palanca que tuvo un mayor aporte y que además no lleva consigo algún costo adicional es el ajuste en las variables internas de perforación que a su vez está encadenado con el cambio de

perforadora usada (HRI a CUBEX) que tiene un costo adicional de 0,10 KUSD/mb adicional relacionado al cambio de compresor, sistema de desacople y nuevo diámetro de bits.

5.2 PALANCAS DE MEJORA VIGAS REGULADORAS

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño en la instalación de vigas reguladora de flujo se hace uso del siguiente KPI.

- a) Número de vigas instaladas mensualmente (un/mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene los siguientes cambios de pendientes (palancas de mejora).

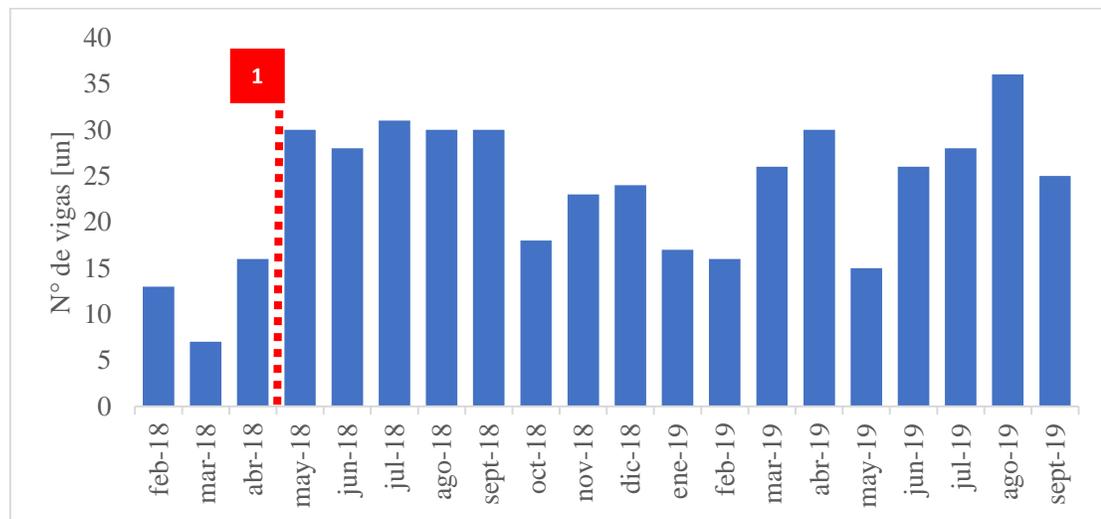


Gráfico 4: Número de vigas instaladas mensualmente (un/mes).

Cabe destacar que la instalación de vigas reguladoras de flujo es una innovación de PMCHS puesto que en Chile no se ha instalado este tipo de OO.CC para PEX hasta la fecha.

5.2.1 PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN ABRIL 2018.

- a) Especialización de cuadrillas para preparación y montaje de vigas.
- **Problema:** baja cantidad de vigas instaladas mensualmente, lo que coloca el riesgo el hito de entrega del MB central para producción.
 - **Causa:** baja experiencia de M1 OO.CC en la instalación de vigas.
 - **Solución:** dividir a los M1 OO.CC en diferentes grupos, en donde cada grupo se especializaba en una tarea específica del ciclo constructivo. Por lo tanto, desde el

punto de vista de la planificación, se adoptó el concepto de “tren constructivo” a especializar cuadrillas de trabajo, subdividir el sector según las áreas de trabajo de especialización y al trabajo en serie de estas (ver figura 57).

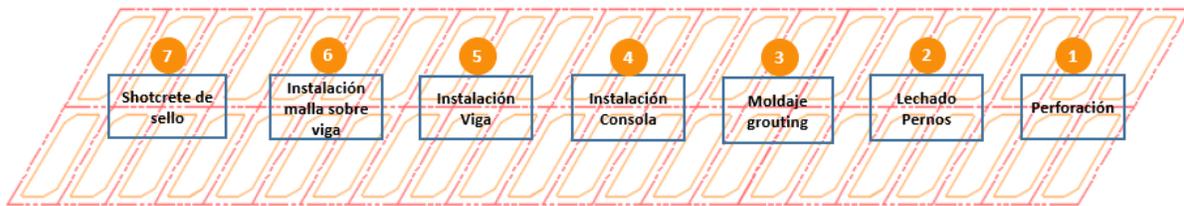


Figura 57: Especialización de cuadrillas y tren constructivo para instalación de vigas.

b) Implementación de herramienta de colocación de consola “machina”.

- **Problema:** proceso de instalación de consola tiene bajo rendimiento.
- **Causa:** anterior a la implementación de la “machina” para la consola esta operación se realizaba con maniobras preinstaladas. La instalación de consola con maniobras era tediosa debido a que se necesitaba control de izaje, mayor cantidad de M1 OO.CC y mayor desgaste de estos.
- **Solución:** implementación de herramienta que permitía instalación de consola con el canastillo del equipo de levante, lo que permitió que esta tarea requiriera una menor cantidad de HH y menor desgaste de M1 OO.CC.

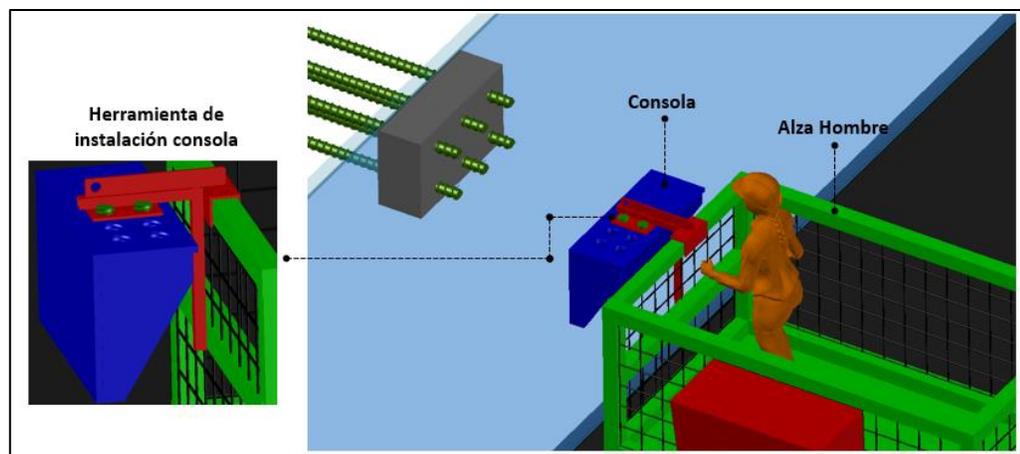


Figura 58: Utilización de machina para colocación de consola viga.

c) Implementación de maniobras para instalación de cuerpo de viga.

- **Problema:** bajo rendimiento en instalación cuerpo de viga.

- **Causa:** anterior a la implementación de maniobras para la instalación de viga, esta operación se realizaba con el canastillo del equipo de levante, por lo que el proceso de hacer coincidir viga-consola dependía de la experiencia del operador del equipo de levante y, por lo tanto, no era una operación mecanizada.
- **Solución:** mecanizar el proceso de instalación de la viga, integrando maniobras y tirfor para el levante y el encaje de viga-consola.

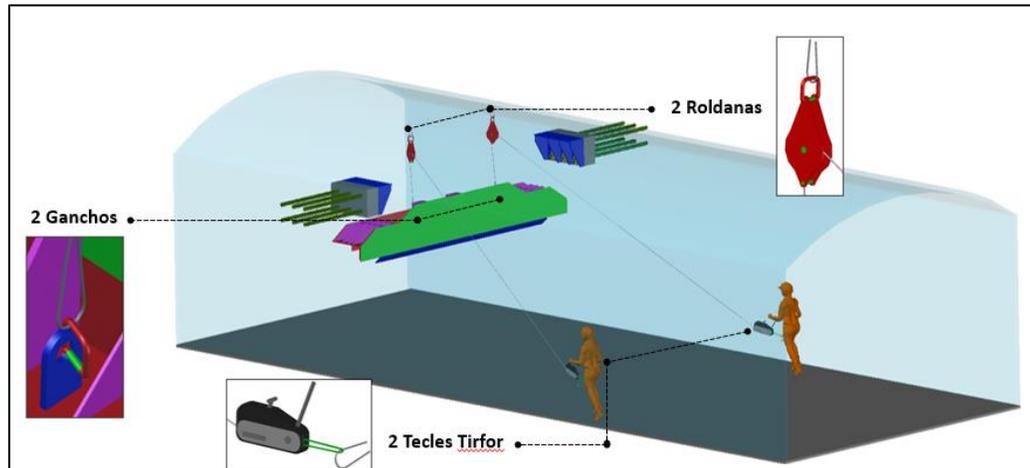


Figura 59: Utilización de maniobras para la instalación de cuerpo de viga.

5.2.2 CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.

A continuación, se categoriza cada palanca de mejora según a qué KPI (productividad) afectó esta palanca de mejora y en qué porcentaje afecta.

- Productividad:

Tabla 9: Palancas de mejora que ayudaron a la productividad de instalación de vigas reguladoras.

VIGAS REGULADORAS DE FLUJO - PRODUCTIVIDAD		
Palancas de Mejora	Porcentaje Mejora [%]	Precio Unitario [KUSD/Viga]
Especialización de Cuadrillas	50%	0
Implementación Machina		
Implementación Maniobras		

El conjunto de las palancas relacionadas a la especialización de cuadrillas, implementación de machina para montaje de consola e implementación de maniobras para la instalación del cuerpo de la viga aportan en un 50% de mejora en la productividad con 0 kUSD/viga adicional.

5.3 PALANCAS DE MEJORA MARCOS DE ACERO

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño en la instalación de marcos de acero se hace uso del siguiente KPI.

- a) Número de marcos de acero instalados mensualmente (un/mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene los siguiente:

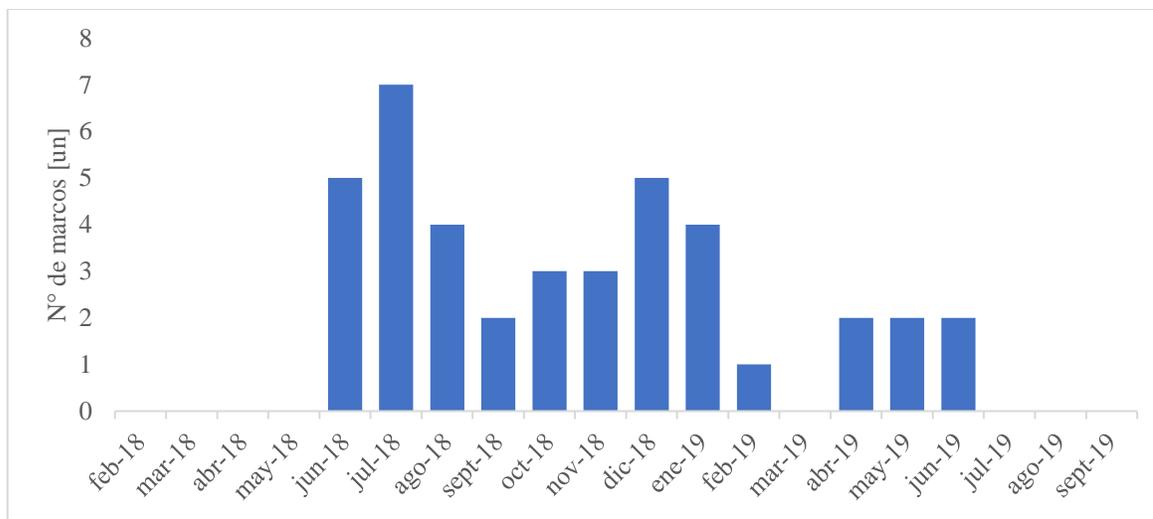


Gráfico 5: Número de marcos de acero instalados mensualmente (un/mes).

La instalación de marcos de acero en PMCHS no fue de forma masiva como es el caso de las vigas reguladoras debido a que estos estaban contemplados solo en una zona acotada de manera original dentro del proceso constructivo del proyecto, por lo que se instalaron solo en sectores puntuales dependiendo de la recomendación de geomecánica. Debido a esta no masividad en la instalación de marcos de acero, no se alcanzó un nivel de experiencia alto en la construcción de PEX con marcos de acero, por lo que no se encontró mejoras en los procesos de instalación de marcos de acero.

5.4 PALANCAS DE MEJORA PAVIMENTACIÓN

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño en la pavimentación se hace uso del siguiente KPI.

- Metros lineales pavimentados mensualmente (m/mes).
- N° de detalles de terminación mensualmente por metro lineal (dts/m*mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene los siguientes cambios de pendientes (palancas de mejora).

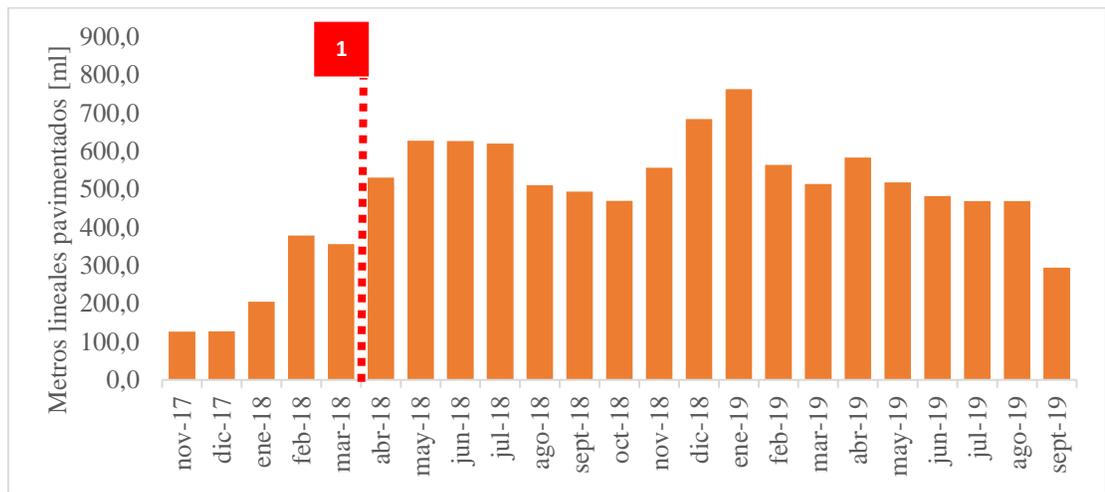


Gráfico 6: Metros lineales pavimentados mensualmente (m/mes).

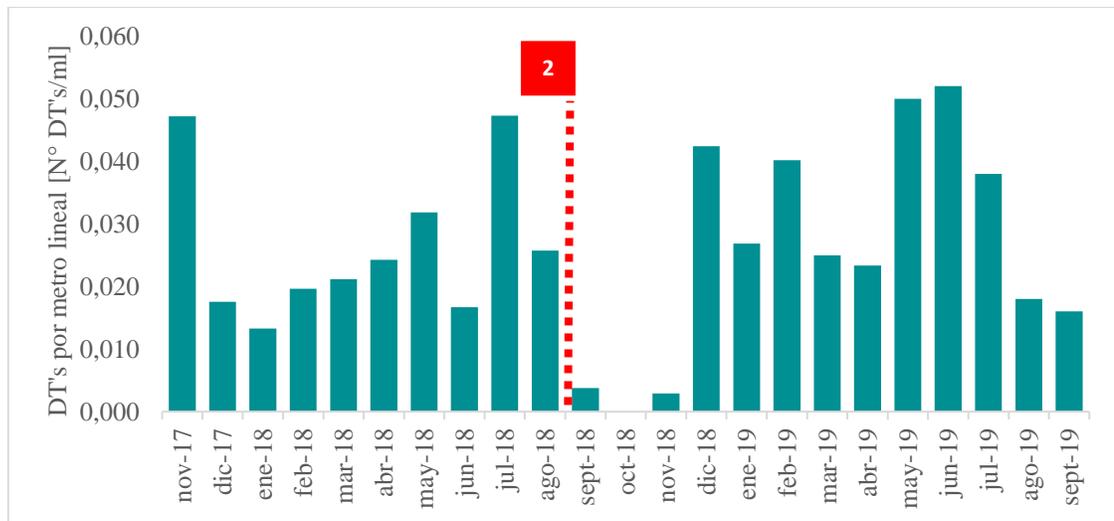


Gráfico 7: N° de detalles de terminación mensualmente por metro lineal (dts/m*mes).

5.4.1 PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN MARZO 2018.

a) Aumento en el área disponible para pavimentación.

- **Problema:** bajo rendimiento en pavimentación.
- **Causa:** baja área preparada para pavimentación.
- **Solución:** para solucionar la baja de área preparada para pavimentación,
 - i. Aumentó la cantidad de retroexcavadoras disponibles para el escarpe y posterior pavimentación, se pasó de tener 3 retroexcavadoras a 5 retroexcavadoras.

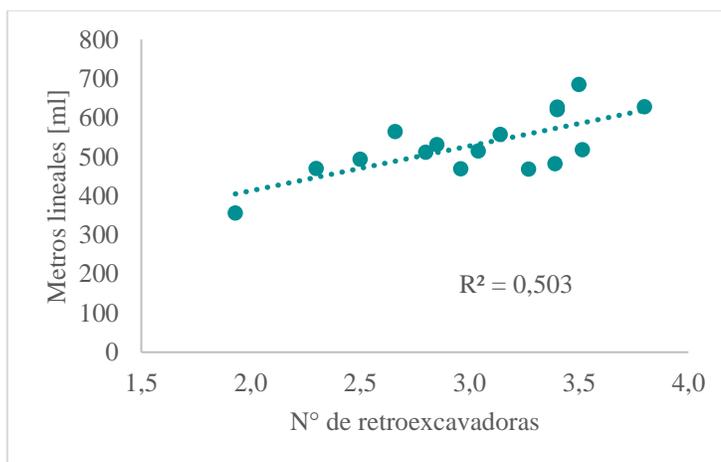


Gráfico 8: Relación entre metros lineales pavimentados y n° de retroexcavadoras disponibles.

- ii. Dado el crecimiento en los desarrollos horizontales del nivel de producción, aumentó la cantidad de zanjas disponibles para ir a pavimentar.

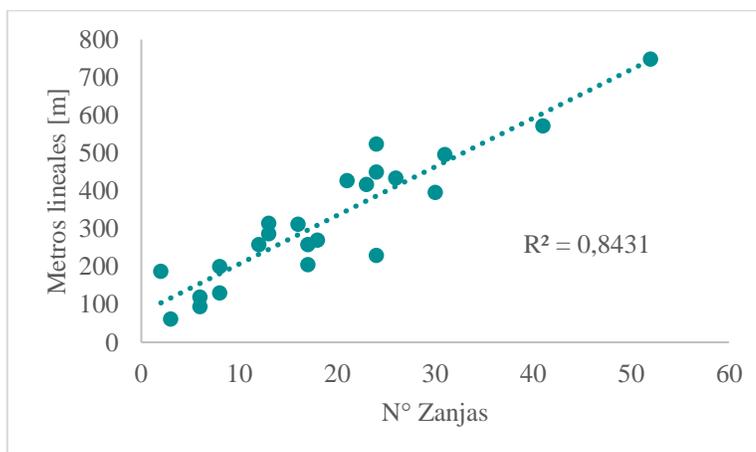


Gráfico 9: Relación entre metros lineales pavimentados y n° de zanjas disponibles.

- iii. Zonas de trasvasije de hormigón (mixer carretero a mixer de bajo perfil) cercanos al nivel de producción.

5.4.2 PALANCA DE MEJORA N#2: IMPLEMENTACIÓN AGOSTO 2018.

a) Implementación de protocolo sistemático de corte y sellado para pavimentación.

- **Problema:** aumento en detalles de terminación relacionados a corte y sellado en la pavimentación, que directamente aumenta detalles de terminación relacionados a reparación de hormigón y reparación de grietas y fisuras.

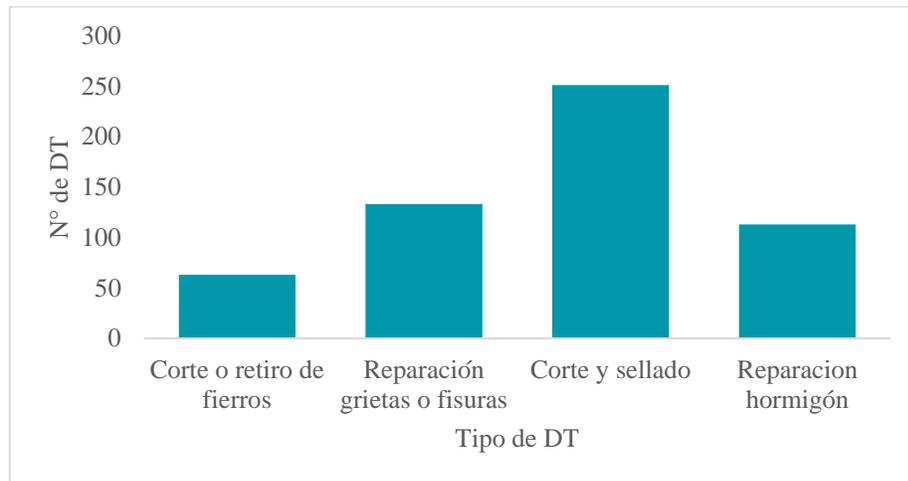


Gráfico 10: Número de DT's según tipo (pavimentación).

- **Causa:** falta de control en corte y sellado del pavimento.
- **Solución:** implementación dentro del ciclo constructivo de la pavimentación, la etapa de corte y sellado, la cual debe ir protocolizada y reportada por parte del contratista, se deben hacer corte y sellado cada 3 m.

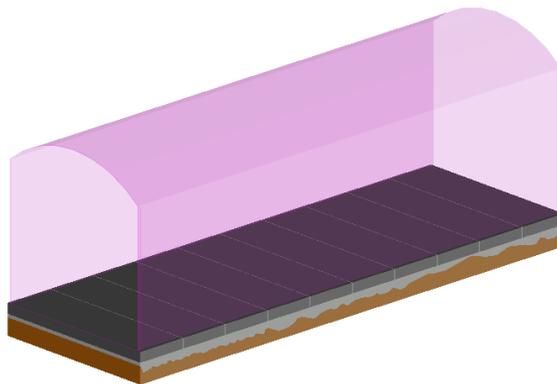


Figura 60: Proceso de corte y sellado.

5.4.3 CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.

A continuación, se categoriza cada palanca de mejora según a qué KPI (productividad) afectó esta palanca de mejora y en qué porcentaje afecta.

- **Productividad:**

Tabla 10: Palancas de mejora que ayudaron a la productividad de la pavimentación.

PAVIMENTACIÓN - PRODUCTIVIDAD		
Palancas de Mejora	Porcentaje Mejora [%]	Precio Unitario [KUSD/m]
Aumento cantidad de Retroexcavadoras	41%	0,003
Aumento cantidad de Zanjas Disponibles		
Zonas de trasvasije de hormigón		

El conjunto de: aumento de cantidad de retroexcavadoras, aumento de cantidad de zanjas disponibles y zonas de trasvasije de hormigón aportan en un 41% al aumento de productividad. El único ítem que requiere una inversión extra es la construcción de zonas de trasvasije de hormigón, el cual tiene un costo unitario de 18.391.140 CLP.

- **Calidad:** En cuanto a calidad, se sabe que la implementación de corte y sello de manera sistemática al proceso de pavimentación disminuye los detalles de terminación relacionados a fisuras y reparación de hormigón. En este caso no se puede contabilizar el porcentaje de mejora debido a que el KPI en el tiempo no muestra una tendencia clara.

5.5 PALANCAS DE MEJORA MUROS DE CONFINAMIENTO

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño en la instalación de muros de confinamiento se hace uso del siguiente KPI.

- Número de muros de confinamiento instalados mensualmente (un/mes).
- Número de detalles de terminación mensual por unidad instalada relacionados a corte y retiro de fierro y reparación de shotcrete (dts/un*mes).
- Número de detalles de terminación mensual por unidad instalada relacionados a juntas frías, biselado, reparación de nidos y fisuras o grietas (dts/un*mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene los siguientes cambios de pendientes (palancas de mejora).

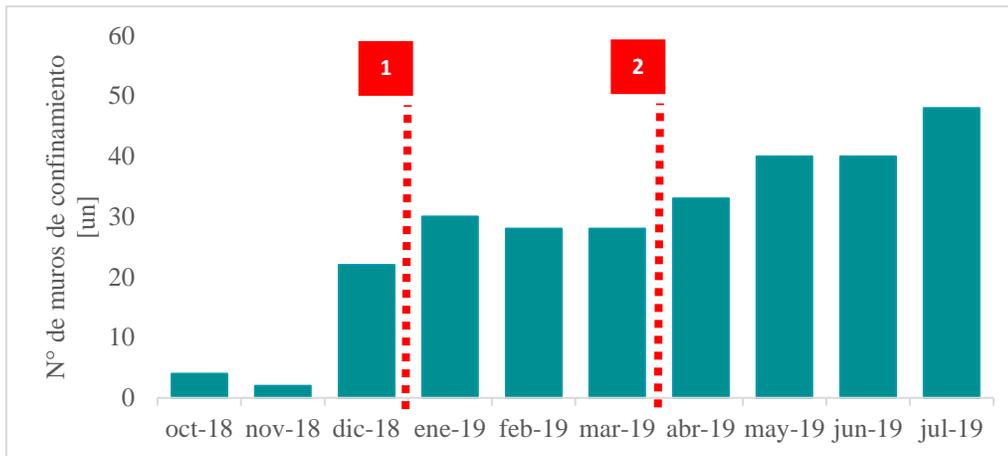


Gráfico 11: Número de muros de confinamiento instalados mensualmente (un/mes).

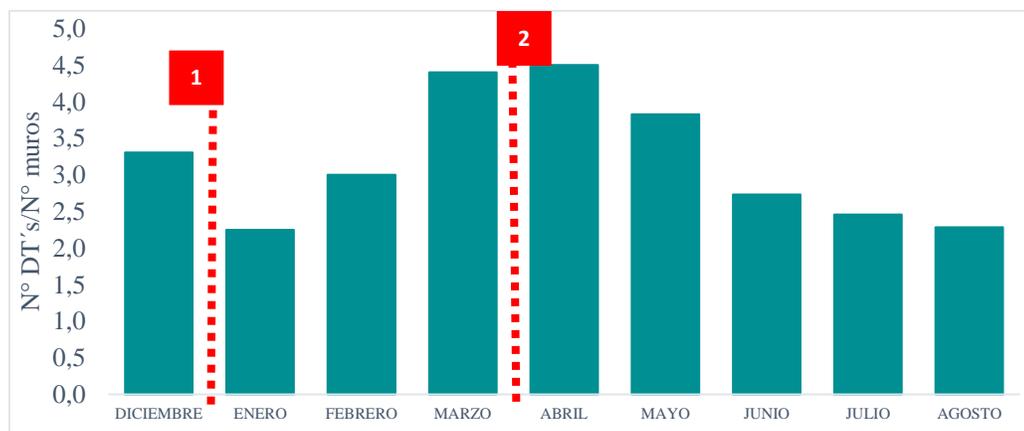


Gráfico 12: Número de detalles de terminación mensual por unidad instalada relacionados a corte y retiro de fierro y reparación de shotcrete (dts/un*mes).

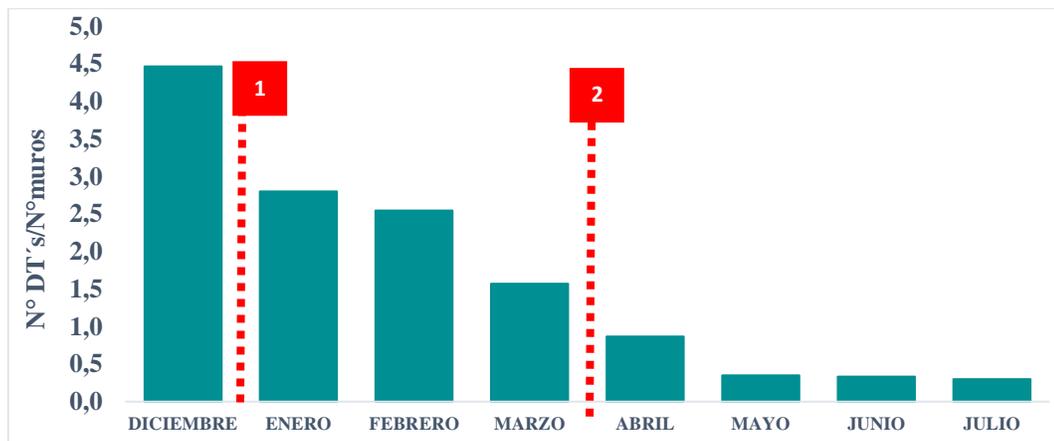


Gráfico 13: Número de detalles de terminación mensual por unidad instalada relacionados a juntas frías, biselado, reparación de nidos y fisuras o grietas (dts/un*mes).

5.5.1 PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN DICIEMBRE 2018.

a) Especialización de cuadrillas para preparación e instalación de muros de confinamiento.

- **Problema:** Rendimiento por debajo de lo esperado, por lo que coloca en peligro la entrega de MB central según fechas acordadas.
- **Causa:** Poca experiencia del personal en la instalación de muros de confinamiento, además de errores de diseño e ingeniería con respecto a la construcción de estos.
- **Solución:** Creación y especialización de cuadrillas para cada sub-tarea relacionada a la instalación de muros de confinamiento, las cuales deben trabajar en serie según sea el orden constructivo.

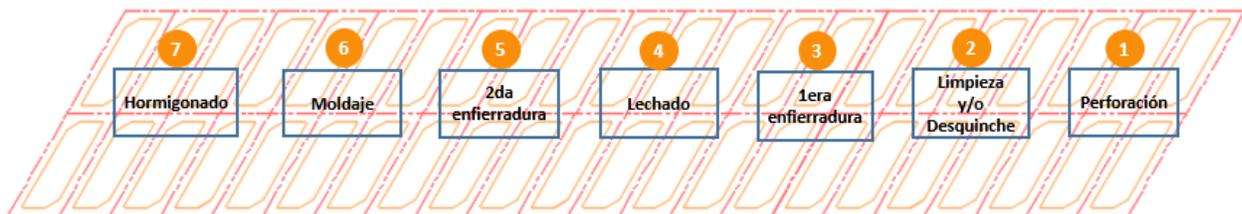


Figura 61: Especialización de cuadrillas para la instalación de muros de confinamiento.

b) Utilización de hormigonado en una sola etapa H30.

- **Problema:** Esguerramiento y problemas de bombeo en etapa de hormigonado.
- **Causa:** Primera etapa de hormigonado contempla hormigón H-10 perlado, el cual causaba problemas con la bomba de hormigón debido al perlado (esferas de plumavit) y esguerramiento de hormigón en la zona inferior del muro.

- **Solución:** Hormigonado de muro en una sola etapa con H-30, sin la utilización del perlado.

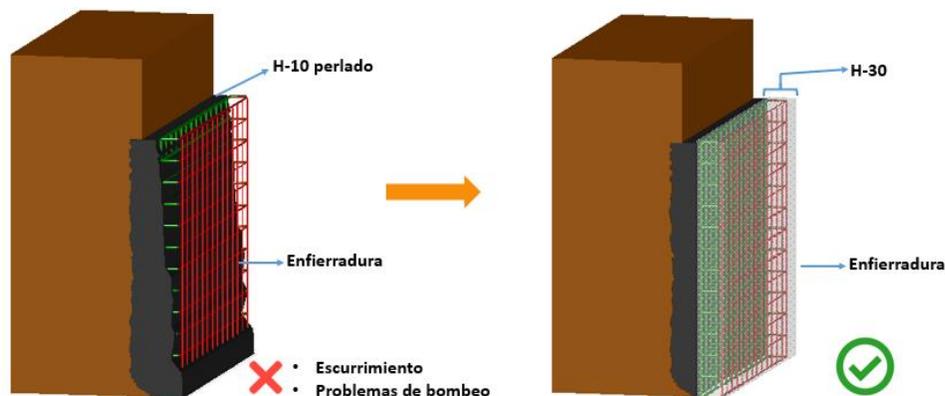


Figura 62: Cambio del tipo de hormigón en el proceso de instalación de muros de confinamiento.

5.5.2 PALANCA DE MEJORA N#2: IMPLEMENTACIÓN MARZO 2019.

a) Operativización de diseño en la instalación de muros.

- **Problema:** El diseño original de la instalación de muros exige que los paños de muros tuviesen siempre un largo de 2 m, por lo que cada ajuste de terreno debido a la necesidad de algún acortamiento de algún paño debía ser revisado por geomecánica y construcción.
- **Causa:** Poca flexibilidad en el proceso de instalación de muros según diseño.
- **Solución:** Dar la facilidad constructiva de que tanto los paños que colindan con el interior de la zanja como los de la punta aguda pudiesen ser menores a 2 m de longitud. Esta facilidad permite una mayor agilización en el proceso constructivo.

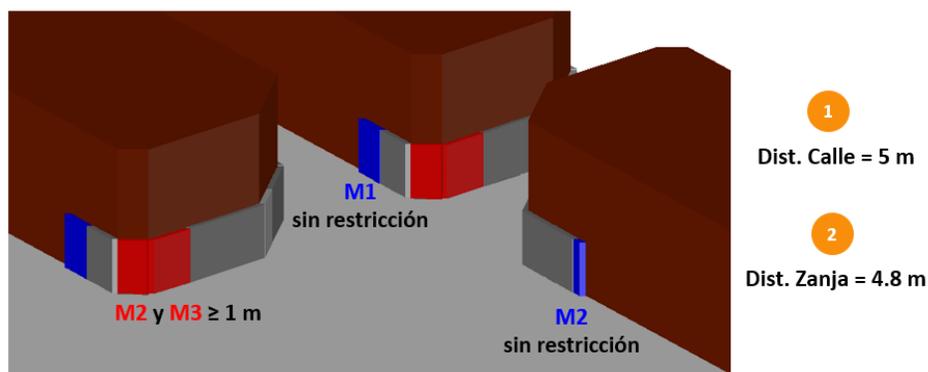


Figura 63: operativización diseño paños de muros de confinamiento.

b) Incorporación de moldajes metálicos.

- **Problema:** Aumento sostenido en detalles de terminación relacionado al corte y retiro de fierro y reparación de shotcrete. Además de un rendimiento bajo lo requerido.
- **Causa:** El uso de moldaje de madera requiere del uso intensivo de pernos y malla adicional que aumenta la probabilidad de dejar detalles de terminación relacionados a corte de fierro y fisuras en shotcrete. Además, el proceso de moldaje de instalación de madera es lento.
- **Solución:** Incorporación al ciclo constructivo del uso intensivo de moldajes de metal para el hormigonado. A continuación, se detalla el proceso.

i. Instalación de corrida inferior de moldajes.

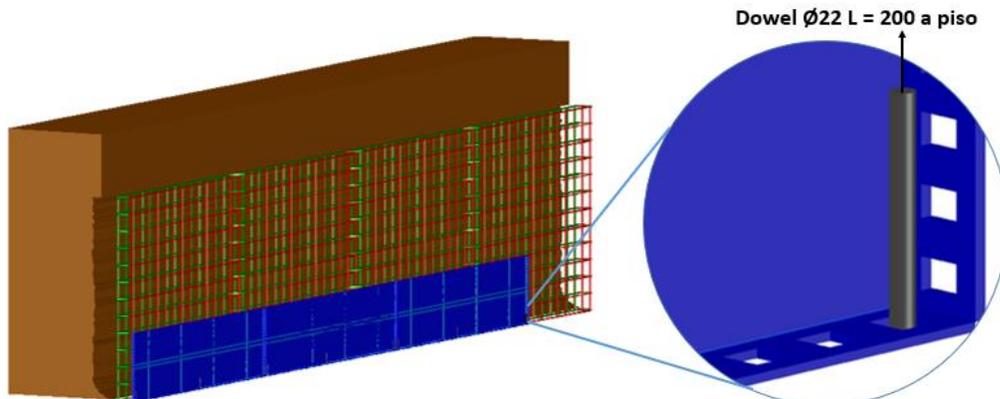


Figura 64: Instalación de corrida inferior de moldajes.

ii. Instalación de corrida superior de moldajes.

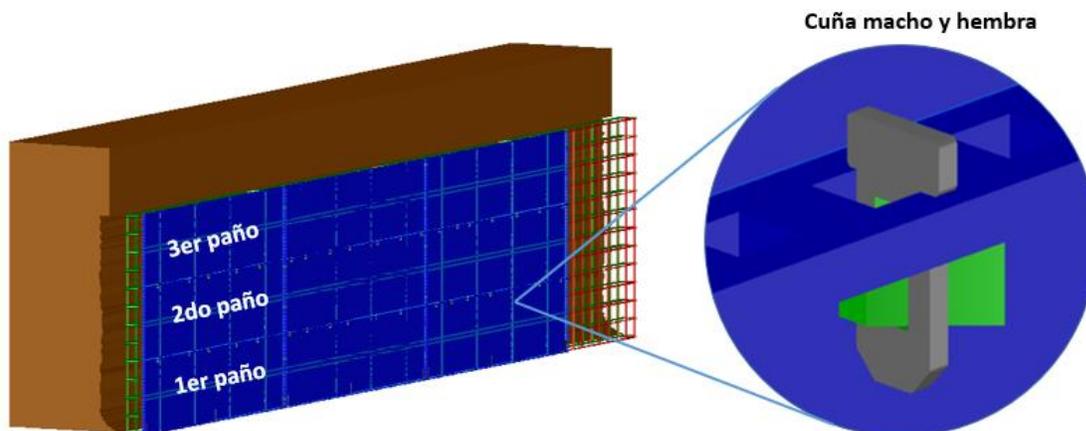


Figura 65: Instalación de corrida superior de moldajes.

- iii. Instalación de canal doble contra terreno 2000, los cuales se adosan a los moldajes a través de la grampa tipo C.

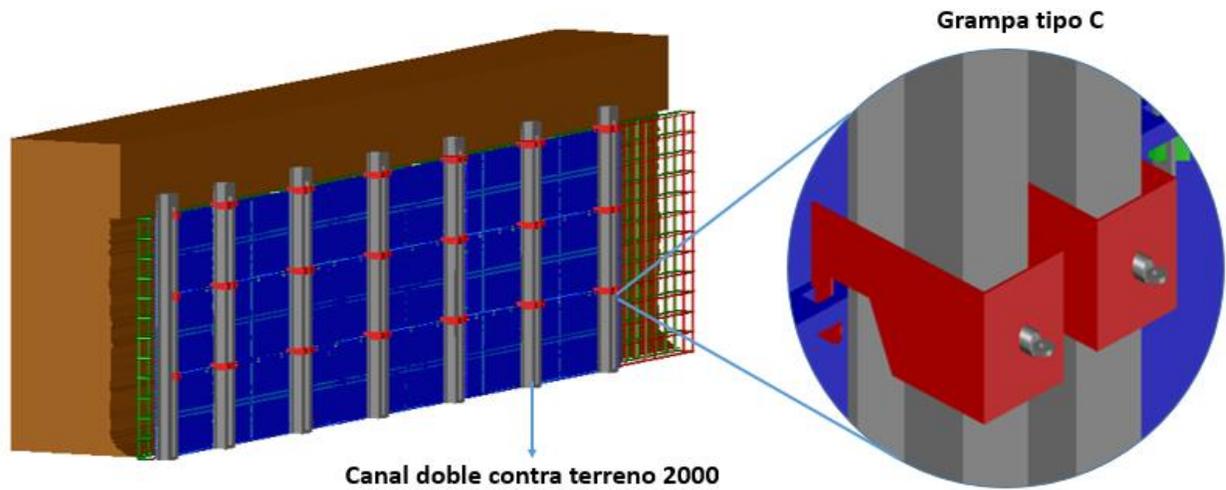


Figura 66: Instalación de canal doble contra terreno 2000.

- iv. Instalación de canal doble contra terreno 1500, los cuales se adosan al canal contra terreno 2000 a través de pasador.

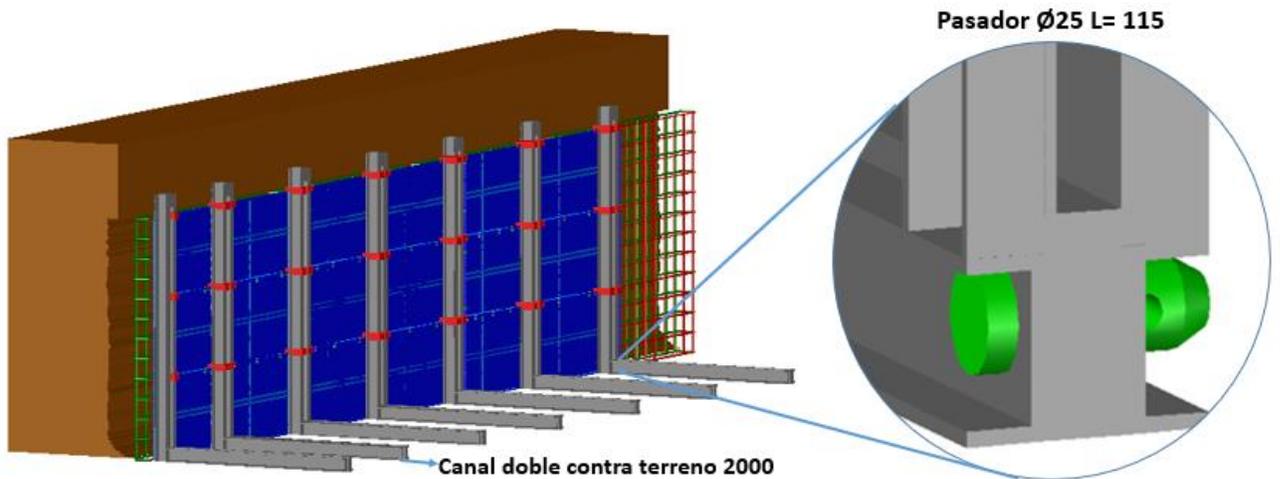


Figura 67: Instalación de canal doble contra terreno 1500.

- v. Instalación de aplomador, los cuales se adosan al canal contra terreno 2000 y 1500 a través de pasador.

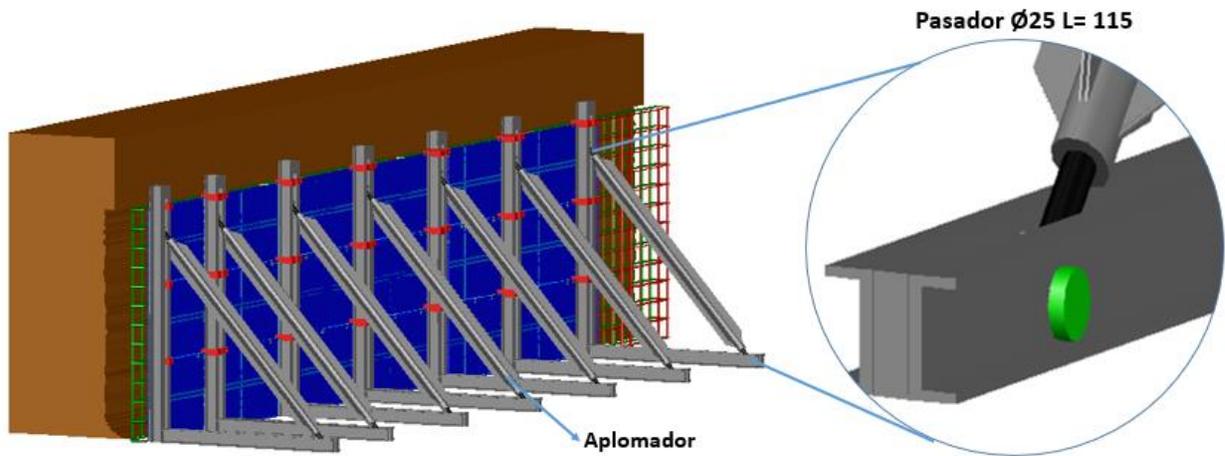


Figura 68: Instalación de aplomador.

- vi. Instalación de Perno Ø22 L= 200 – Planchuela 200x200 – Tuerca para adosar el canal doble contra terreno 1500 al piso y poder dar así resistencia a la estructura en general.

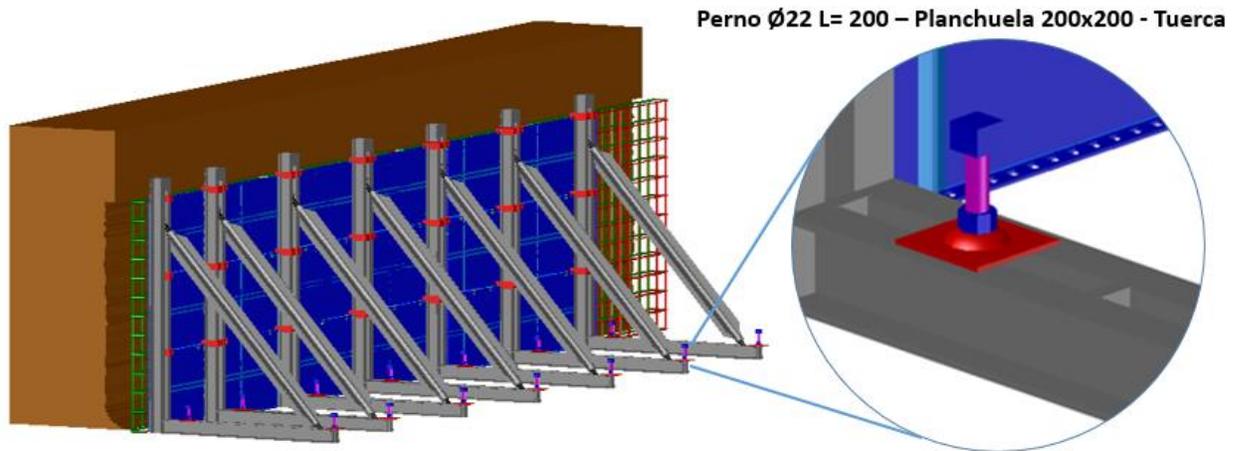


Figura 69: Instalación de pernos y planchuela.

5.5.3 CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.

A continuación, se categoriza cada palanca de mejora según a qué KPI (productividad o calidad) afectó esta palanca de mejora y en qué porcentaje afecta.

- **Productividad:**

Tabla 11: Palancas de mejoras que ayudaron a la productividad de la instalación de muros de confinamiento.

MUROS DE CONFINAMIENTO - PRODUCTIVIDAD		
Palancas de Mejora	Porcentaje Mejora [%]	Precio Unitario [KUSD/muro]
Cambio de hormigón	36%	0,54
Mejoramiento planificación		
Operativización Diseño	10%	0,35
Moldajes		

En productividad, las palancas que más mejoraron la productividad (cantidad de muros instalados mensualmente) fue el cambio de planificación (especialización de cuadrillas) el cual tiene costo cero y el cambio de hormigón (100% H30). El costo está relacionado directamente por el precio más alto del H30 que el H10 (0,54 KUSD/muro es la diferencia de precio por muro instalado usando H30 en vez de H10).

- **Calidad:**

Tabla 12: Palancas de mejora que ayudaron a la calidad de los muros de confinamiento.

MUROS DE CONFINAMIENTO - CALIDAD		
Palancas de Mejora	Porcentaje Mejora [%]	Precio Unitario [KUSD/muro]
Mejoramiento Planificación	15%	0
Moldajes Metálicos	9%	0,35

En calidad, las palancas que disminuyeron la cantidad de detalles de terminación fue la especialización de las cuadrillas en tareas específicas, lo que produce que cada vez los M1 OO.CC cometan menos errores en calidad y la utilización de moldajes metálicos que conlleva un trabajo más limpio y una menor utilización de fierro para la formación de moldajes. Este cambio a moldajes metálicos tiene un costo adicional de 0,35 KUSD/muro (costo del set completo de 21 m de moldaje metálico).

5.6 PALANCA DE MEJORA DESARROLLO VERTICAL BLIND HOLE

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño en los desarrollos verticales usando Blind Hole se hace uso del siguiente KPI.

- Metros verticales desarrollados mensualmente (m/mes).
- Tiempo promedio entre finalización de escariado y comienzo de escariado nueva postura (días/mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene los siguientes cambios de pendientes (palancas de mejora).

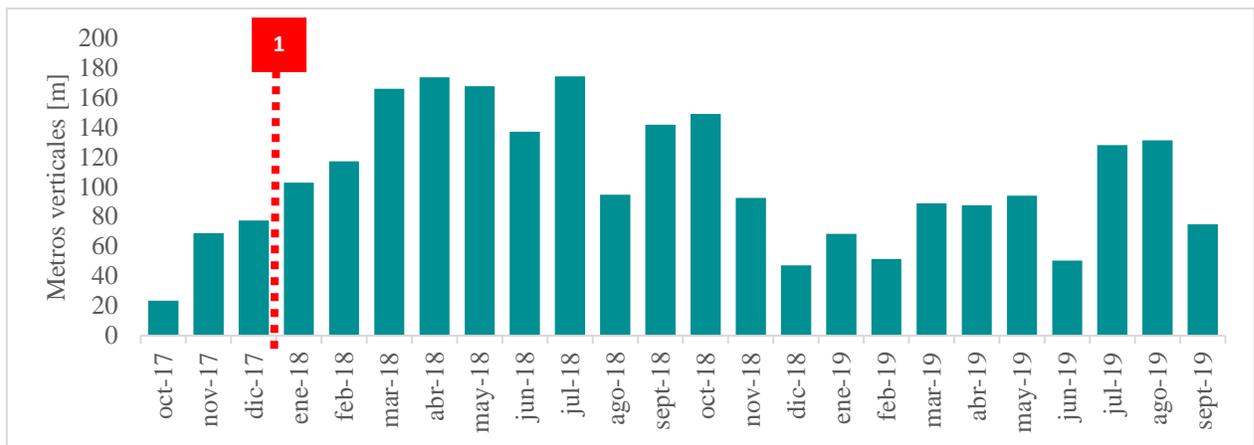


Gráfico 14: Metros verticales desarrollados mensualmente (m/mes).

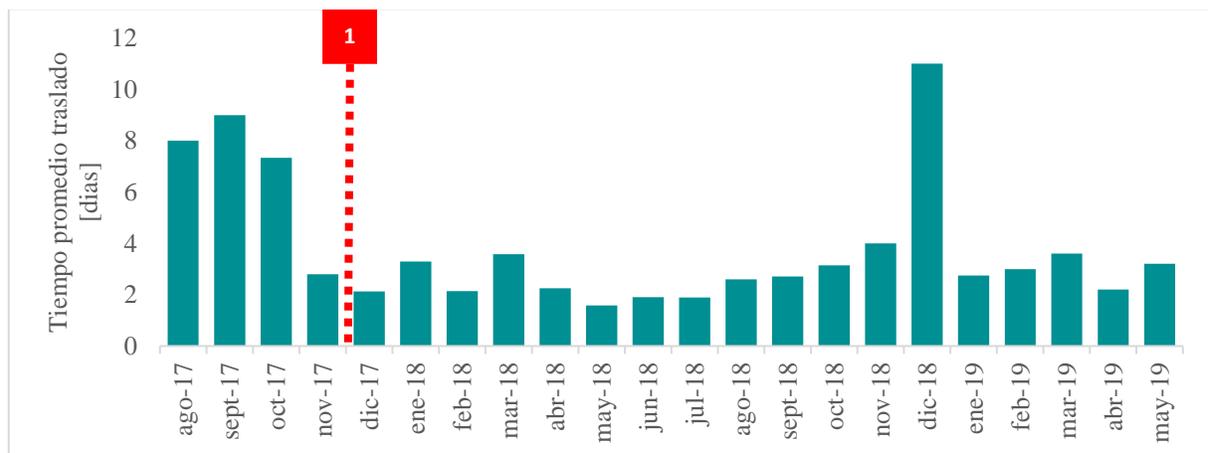


Gráfico 15: Tiempo promedio entre finalización de escariado y comienzo de escariado nueva postura (días/mes).

5.6.1 PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN DICIEMBRE 2017.

a) Mejoramiento en la planificación de preparación de puntos para instalación de Blind Hole.

- **Problema:** Bajo rendimiento en desarrollos verticales escariados por Blind Hole.
- **Causa:** Tiempo de traslado e instalación de máquinas Blind Hole mayor al planificado debido al no funcionamiento de crawler.
- **Solución:** Preparar 4 posturas de Blind Hole de forma adelantada con servicios necesarios esto quiere decir: ventilación, electricidad, losas de hormigón y maniobras (pernos ojos).



Figura 70: Servicios necesarios para puesta en marcha de Blind Hole.

5.6.2 CATEGORIZACIÓN DE PALANCAS DE MEJORAS Y VALORIZACIÓN.

A continuación, se categoriza cada palanca de mejora según a qué KPI (productividad o calidad) afectó esta palanca de mejora y en qué porcentaje afecta.

- **Productividad:** El mejoramiento en la planificación de preparación para instalación de Blind Hole tiene un 34% de aporte en la cantidad de metros escariados mensualmente, teniendo esta palanca 0 kUSD/m adicional asociado.

5.7 PALANCA DE MEJORA DESARROLLO HORIZONTAL

Para identificar las palancas de mejora que permitieron un mejor desempeño en los desarrollos horizontales se hace uso del siguiente KPI.

- a) Metros horizontales desarrollados mensualmente (m/mes).

Graficando temporalmente estos KPI's se obtiene el siguiente cambio de pendientes (palancas de mejora).

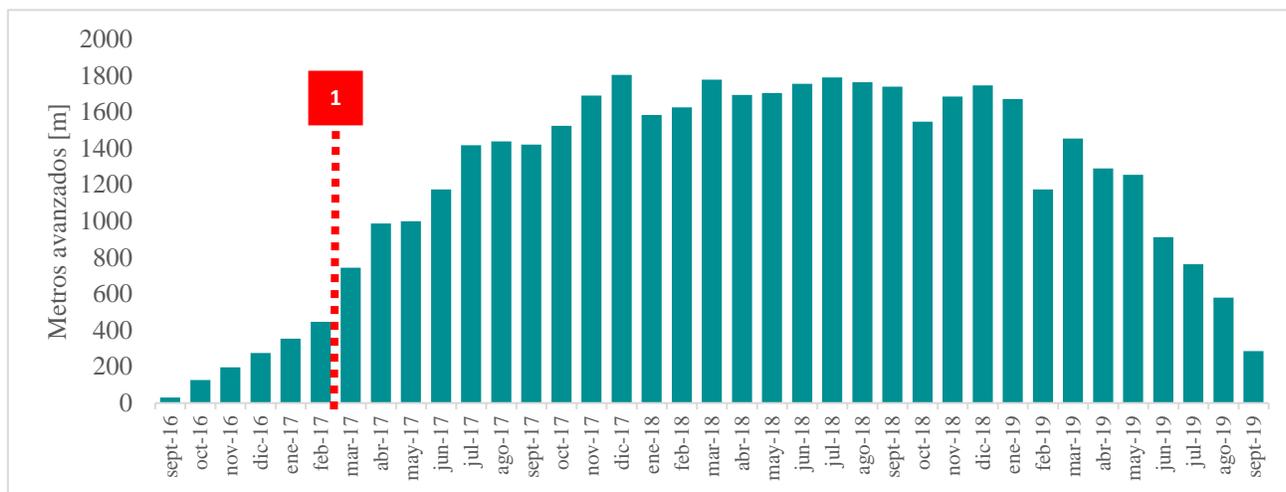


Gráfico 16: Metros horizontales desarrollados mensualmente (m/mes).

5.7.1 PALANCA DE MEJORA N#1: IMPLEMENTACIÓN FEBRERO 2017.

- a) Implementación de Unidad Productiva Básica (UPB).
 - a. **Problema:** Dificultad para alcanzar las tasas de crecimiento comprometidas y la futura compensación del atraso.
 - b. **Causa:** Falta de sectorización para asegurar de manera eficiente los recursos, suministros, servicios y logística.
 - c. **Solución:** Implementar sectores productivos (UPB) en los cuales tantos los servicios, recursos y suministros se encuentran cautivos.

Las UPB [9] se estructuran a través de la filosofía que procura disponer en un sector de cinco frentes principales o prioritarias, con las operaciones unitarias continuas dentro del ciclo de avance; las cuales se complementan con cuatro frentes auxiliares cuya función principal es flexibilizar la asignación de recursos con el objetivo final de maximizar su uso. En las Figuras 71 y 72 se muestran

un esquema que permite comprender como se configuran y distribuyen las UPB en las diferentes zonas de desarrollo.

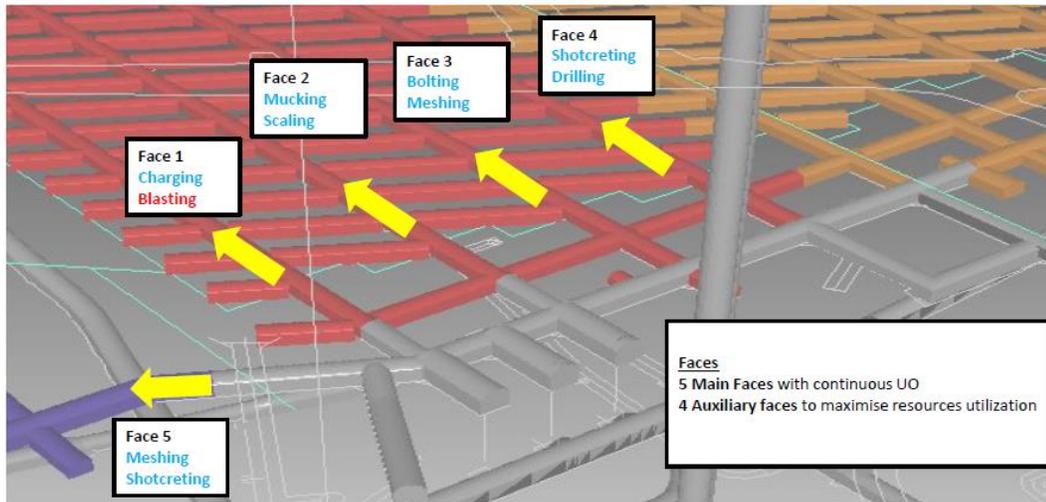


Figura 71: Distribución de operaciones unitarias en frentes de avance. Fuente: Cortes D (2018).

La distribución de las UPB dentro del nivel de producción y en conjunto con el nivel de hundimiento debe tener asegurado los suministros y servicios (ventilación, energía, otros) necesarios que garanticen la máxima utilización de los recursos. Además, considera criterios de tipos de frentes disponibles, en función de las distancias a las que se encuentren entre sí.

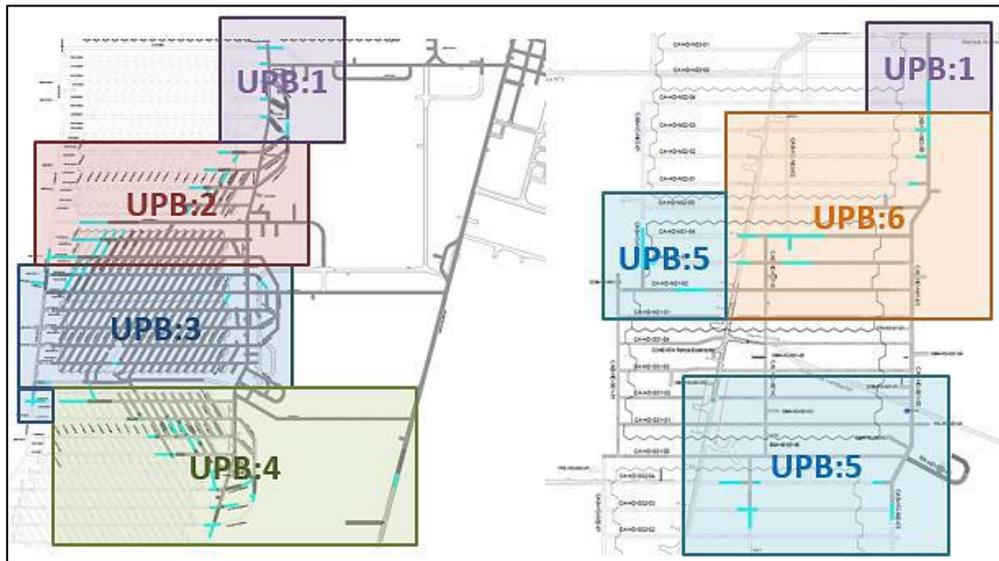


Figura 72: Distribución de UPB en nivel de producción y hundimiento. Fuente: Cortes D (2018).

La configuración de las UPB's requiere que la cantidad de frentes (cinco principales y cuatro auxiliares) sean aseguradas y correctamente planificadas, en virtud del cual se determinan las

cantidades de servicios de ventilación y energía necesaria y se busca disponer de los equipos necesarios para completar el ciclo de avance, esto se representa en la Figura 73.

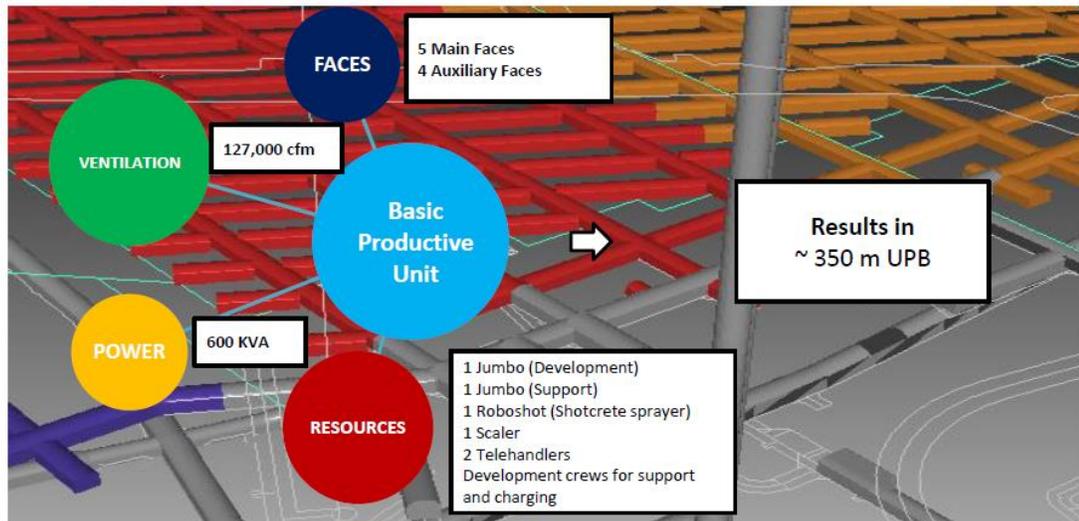


Figura 73: Equipos y servicios necesarios por frente de avance. Fuente: Cortes D (2018).

La implementación de una planificación mediante la estrategia de UPB's en los desarrollos horizontales representa un aporte del 52% al incremento total de rendimiento, teniendo un equivalente de 515 m asociados a esta mejora.

5.7.2 CÉLULA DE TRABAJO AUTONOMA

Si bien la metodología UPB trajo consigo un aumento en la cantidad de metros desarrollados, esta metodología no considera la posible autonomía que puede tener una cuadrilla minera para el desarrollo de sus frentes de trabajo y, por ende, el aumento de rendimiento que lleva consigo esta autonomía.

Es por lo anteriormente mencionado que, durante el segundo semestre del 2020, CODELCO VP implementó una nueva metodología de construcción de túneles mineros que se basa en dos conceptos; cuadrilla minera autónoma que funciona como “operador-mantenedor” y la unidad básica productiva (UBP).

5.7.2.1 CUADRILLA AUTÓNOMA “OPERADOR-MANTENEDOR”

Las cuadrillas autónomas se refieren a un grupo de trabajadores compuestos por maestros mineros y operadores autosustentables, capaz de empezar y terminar una labor unitaria sin intervención de terceros, pudiendo la propia cuadrilla resolver las contingencias que puedan surgir turno a turno.

Debido a la independencia de estas cuadrillas, estas deben ser capacitadas en:

Tabla 13 Capacitaciones y objetivos para cuadrilla autónoma CTA.

Capacitación	Tema	Objetivo
Topografía	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de Referencias Topográficas para Marcación de Frente 	Cuadrilla debe ser responsable de la marcación topográfica de frente de avance
Calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis Módulo de Falla, Producto No Conforme. - Cumplimiento del Sistema de Fortificación Definitiva. 	Cuadrilla debe controlar y mejorar la calidad de los desarrollos mineros.
Ventilación	<ul style="list-style-type: none"> - Instalación de Redes de Servicios. - Instalación de Ventilador Secundario y colocación de mangas de ventilación. 	Cuadrilla debe ser capaz de adelantar servicios a sus frentes de trabajo.
Eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> - Confección de ART, para riesgos eléctricos al enchufar y energizar un TEJ. - Descripción del Paso a Paso a seguir para enchufar y energizar un TEJ. - Límite permitido para trabajar en un TEJ (Operador y Minero). - Uso de EPP específico: Casco Dieléctrico, Botas o Zapato Dieléctrico, Traje ignífugo, Guantes, Protector Auditivo, autorrescatador. - Riesgos Eléctricos: electrocución por contacto directo e indirecto. - Regulación de Protección en TEJ por Electricista. - ¿Qué es un cortocircuito?, fuga a tierra, riesgos eléctricos. 	Cuadrilla puede energizar y desenergizar sus propios equipos.
Mecánico	<ul style="list-style-type: none"> - Reparación e intervención de equipos en terreno. - Procedimiento de aislación y bloqueo. 	Cuadrilla es capaz de reparar fallas menores de sus propios equipos en terreno

5.7.2.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo la Célula de Trabajo Autónoma (CTA), es necesario preparar un área de la mina que tengas las condiciones necesarias para montar una UBP y tener una cuadrilla minera y operadores capacitados para que estos de desempeñen de forma autónoma.

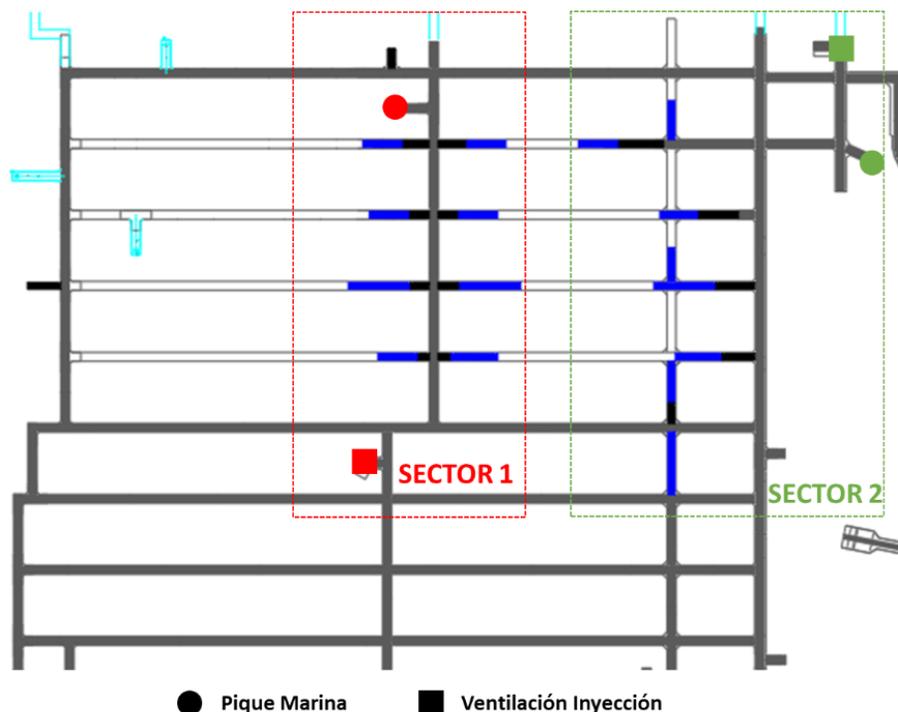


Figura 74: Sectorización de CTA.

El área seleccionada se divide en dos sectores, cada una con las condiciones necesarias para implementar una UBP, esto quiere decir, cada una con servicios independientes o semindependientes y 8 o más frentes operativas.

En cada sector se desarrollan dos grandes grupos de actividades según sea el turno: Pre-tronadura (fortificación, perforación de avance y carguío de explosivos) y Post-tronadura (retiro de marina, acañadura y proyección de shotcrete), como se muestra a continuación.

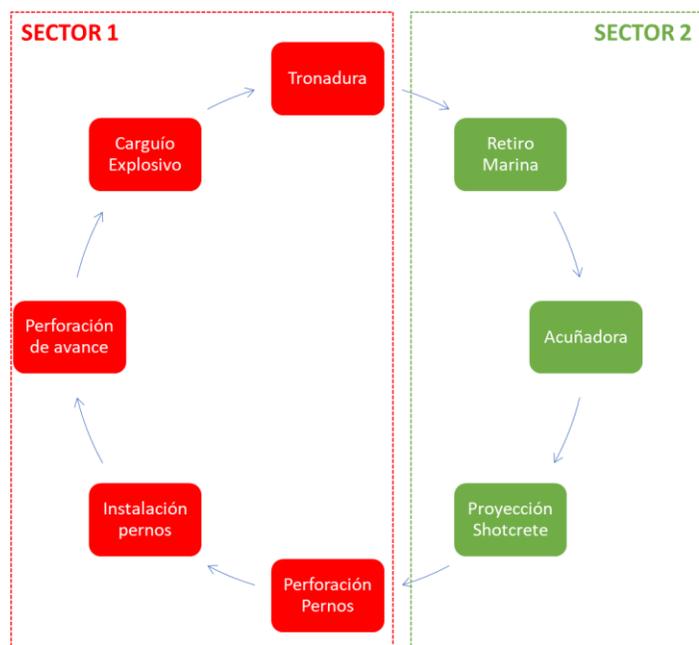


Figura 75: sectorización de operaciones unitarias CTA.

Al turno siguiente, estas operaciones unitarias se intercambian entre sectores y en el sector 1 se comienza con el retiro de marina y en el sector 2 se comienza con la fortificación.

Debido a esta metodología de trabajo, es importante tener dos servicios independizados totalmente; la ventilación y la marina, ya que estos servicios permiten que los dos sectores no provoquen interferencia entre ellos.

El sector donde se realizarán las pruebas es en el nivel de hundimiento del MB-N03, en labores de sección 4,0 x 4,3 (calles de hundimiento) y sección 4,0 x 4,6 (cabeceras auxiliares) con fortificación perno y shotcrete fibra.

5.7.2.3 RESULTADOS CTA

Para evaluar los resultados de la CTA, se toma como muestra del 15-ago al 16-sept debido a que en este periodo se cuenta con los recursos necesarios y con personal capacitado. Además, se deja fuera de esta muestra el día de cambio de turno.

5.7.2.3.1 RENDIMIENTO

En cuanto a rendimiento de la CTA, esta ha logrado cumplir las metas impuestas por el proyecto. Se programaron 525 m para realizar en 30 días con 5 disparos diarios. Los resultados fueron 580 m con un promedio de 5,7 disparos día, por lo que hubo un 110% de cumplimiento.

La adherencia al POD de los 30 días fue de un 89%.

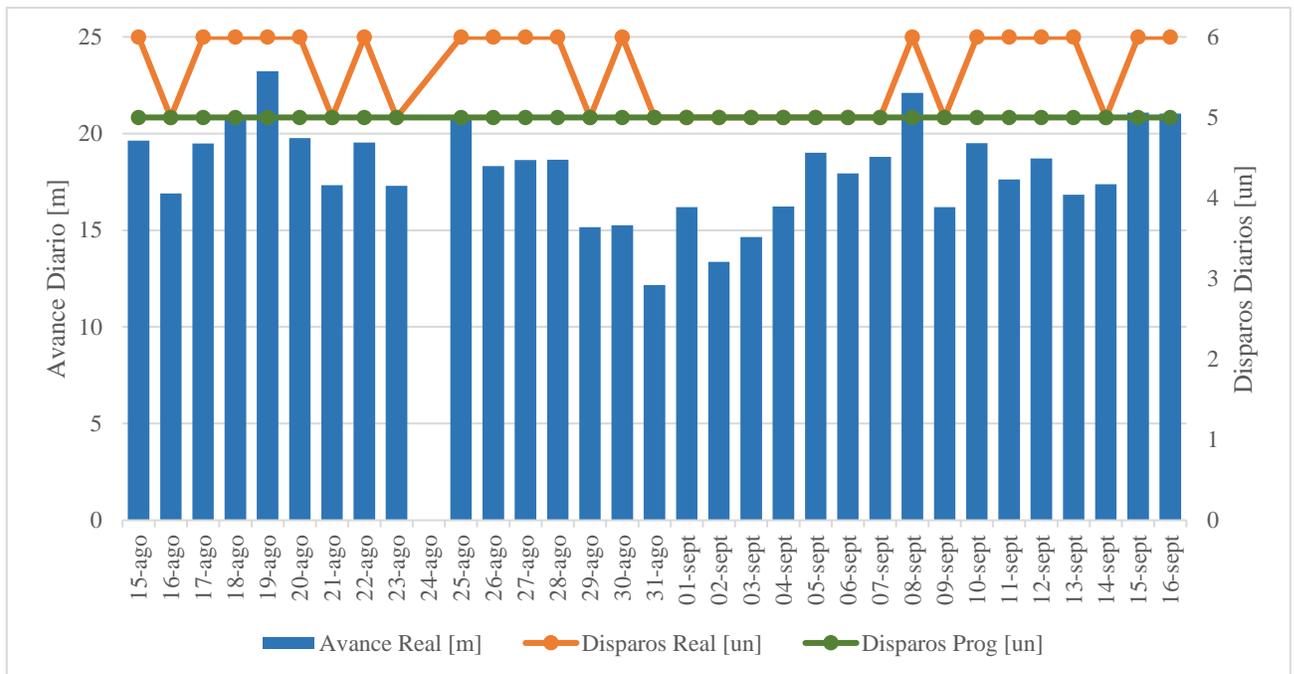


Gráfico 17: Avance diario CTA.

En términos de efectividad de disparo, se programaron disparos de avance de 3,5 m. En el mes de agosto no se cumplió con este avance por disparo al no disponer de emulsión bombeable (uso de explosivo encartuchado). En promedio, durante los 30 días se logró un 97% de efectividad de disparo.

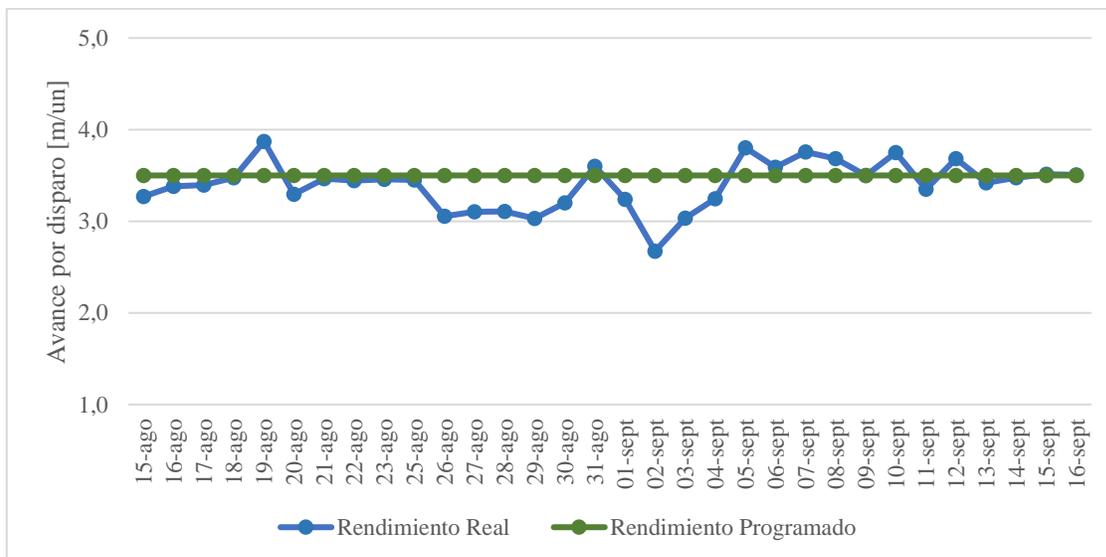


Gráfico 18: Rendimiento disparo CTA.

5.7.2.3.2 RECURSOS

En cuanto a las horas efectivas trabajadas durante las semanas, se tiene una meta de 8,5 h turno efectivamente trabajadas. Durante los 30 días se obtuvo un promedio de 8,0 h. La brecha se debe a retrasos por tronadura por parte de DCH.

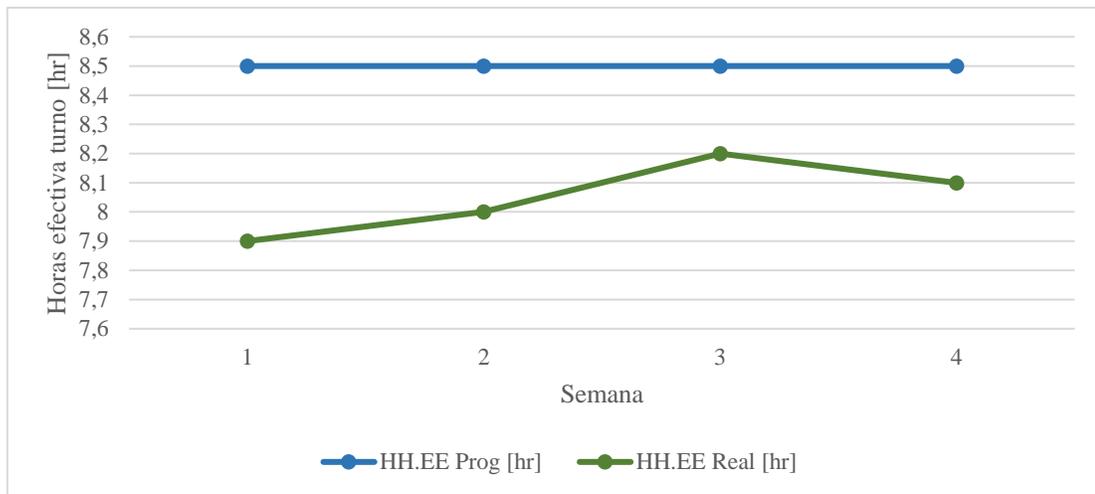


Gráfico 19: Horas efectivas turno semanal CTA.

En relación con las horas hombre ocupadas por metro de avance, se tenía una meta de 14 HH/m. Se logro ocupar 17 HH/m debido al aumento en las fallas de equipos roboshot y acuñador, lo que provoca un aumento en las HH de mantención de equipos CTA.

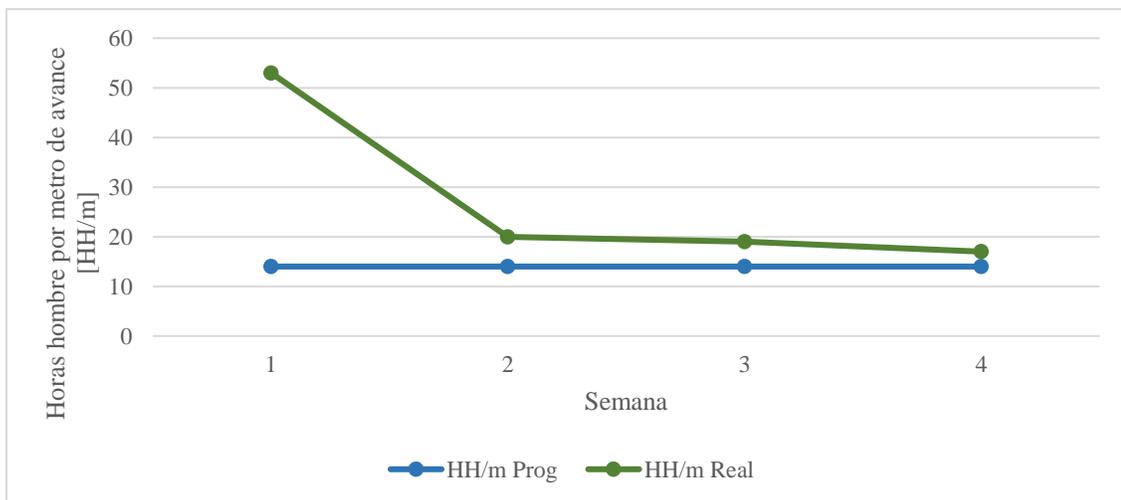


Gráfico 20: Horas hombre por metro de avance CTA.

Con respecto a los equipos críticos (jumbo avance, jumbo fortificación y LHD), estos tuvieron una disponibilidad y utilización acorde a lo planificado.

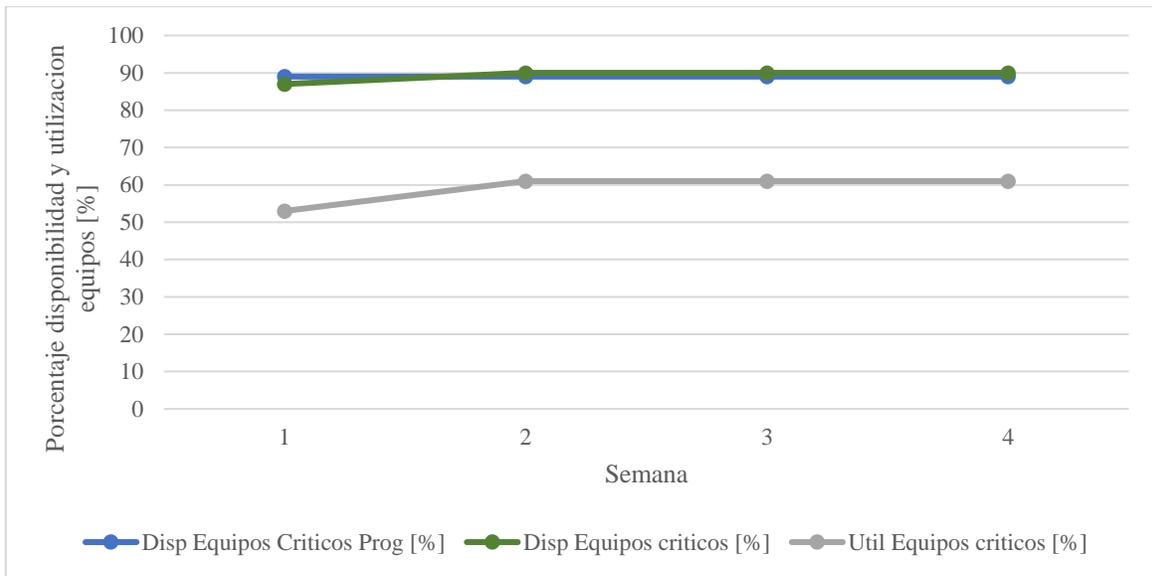


Gráfico 21: Disponibilidad y utilización de equipos críticos CTA

5.7.2.3.3 CALIDAD Y SEGURIDAD

En calidad, se esperaba tener 0,2 DT/m de avance y se obtuvo un promedio semanal de 0,17 DT/m de avance, llegando a obtener un mínimo de 0,03 DT/m y un máximo de 0,35 DT/m debido al no apriete de planchuela.

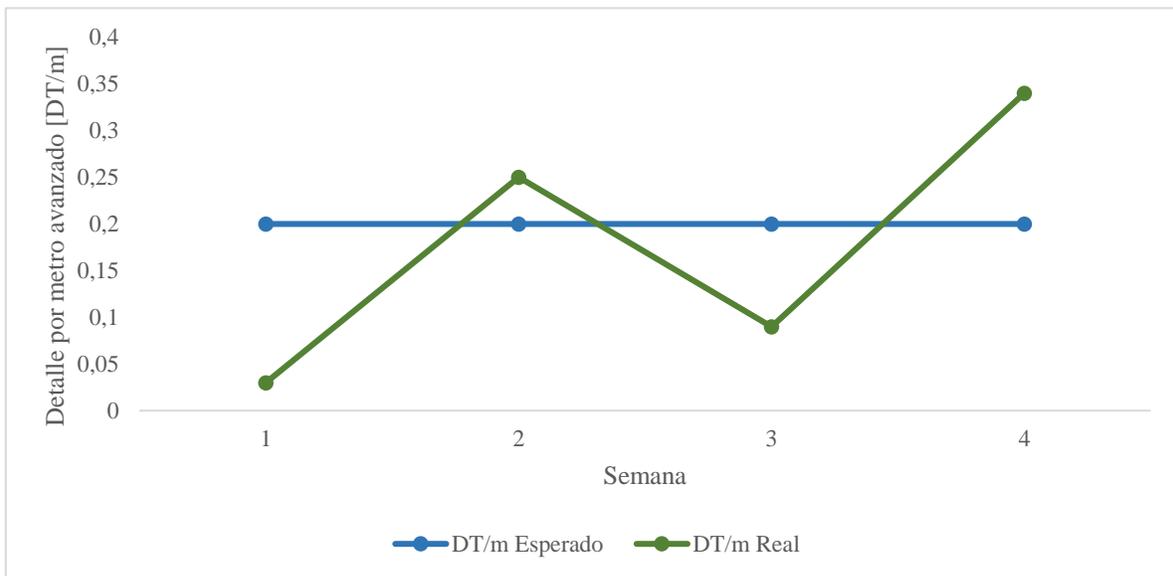


Gráfico 22: Detalles de terminación por metro de avance CTA.

Respecto a la seguridad, desde que comenzó la prueba de CTA, no ha habido CTP ni STP, por lo que los operadores-mantenedores han realizado de buena manera su trabajo, cobrando relevancia una buena capacitación y el compromiso del trabajador por realizar la tarea de forma segura.

5.7.2.3.4 COSTOS

Relacionado a costos, la CTA tiene un costo fijo mensual asociado a la cantidad de recursos usados, los cuales son estándar ya que como se mencionó anteriormente, los recursos de la CTA están cautivos para esta operación, por lo tanto, no se puede agregar ni quitar recursos.

Teniendo lo anterior en cuenta, como el costo de la CTA es fijo, al realizar una mayor cantidad de disparos mensuales, el costo por metro será menor que el costo asociado al cobro por precio unitario (cobro tradicional).

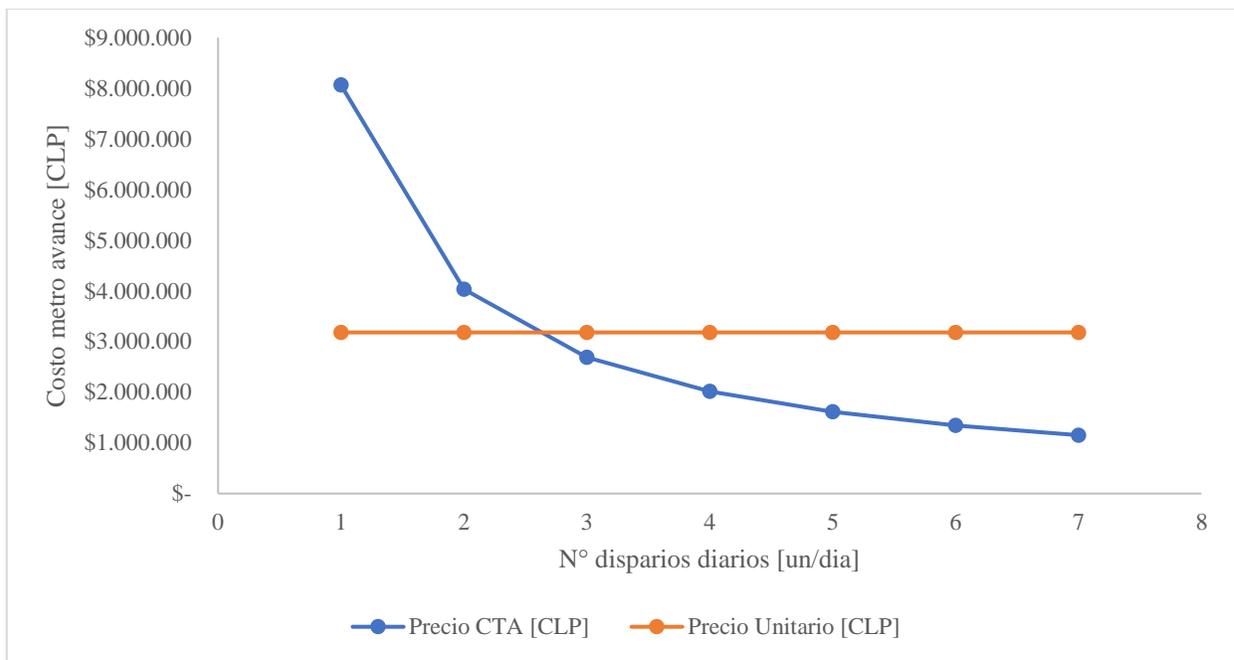


Gráfico 23: Costo por metro CTA vs costo por precio unitario usado históricamente.

Considerando un avance por disparo de 3,5 m, la CTA comienza a ser económicamente rentable al realizar más de 4 disparos por días. Considerando que en promedio la célula realizó 5,5 disparos diarios, la célula implica un ahorro diario de 1.730.958 CLP (54% de ahorro con respecto al precio unitario histórico).

5.7.2.3.5 RESUMEN

En resumen, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 14 Resumen resultados de CTA.

	KPI	UNIDAD	LÍNEA BASE	VALOR ESPERADO FP	VALOR REAL
SEGURIDAD	CTP	#	-	0	0
	STP	#	-	0	0
RENDIMIENTO	Avance	m/mes	280	525	580
	Adherencia	%	75%	95%	89%
	Cumplimiento	%	99%	100%	110%
	Eficiencia disparo	%	85%	94%	97%
RECURSOS	Mano de obra	HH/m	88	14	17
	HH.EE	hr	7,5	8,5	8,0
	Disponibilidad Eq.	%	79%	89%	90%
	Utilización Eq.	%	S/I	S/I	61%
CALIDAD CONSTRUCTIVA	Detalles Terminación	DT/m	0,4	0,2	0,17

5.7.2.4 ESTRATEGIA DE PLANIFICACIÓN PARA REPLICABILIDAD EN EL TIEMPO

Para la aplicación de metodología CTA en los futuros contratos y en construcción de los futuros macrobloques es necesario definir dos estrategias base; la convivencia de dos o más células de trabajo en los diferentes subniveles (Hundimiento y Producción) y cómo cada célula debe ir generando nuevas frentes de trabajo a medida que estas van agotando frentes de trabajo.

5.7.2.4.1 CONVIVENCIA ENTRE CÉLULAS DE TRABAJO EN NIVEL DE PRODUCCIÓN Y HUNDIMIENTO

Para hacer convivir dos o más células trabajando simultáneamente en los subniveles de producción y hundimiento es necesario sincronizar las operaciones unitarias de cada CTA, esto quiere decir, en cada turno sectorizar el nivel de producción y nivel de hundimiento en sector de preparación de tronadura (pre-tronadura) y sector de retiro de marina (post-tronadura).

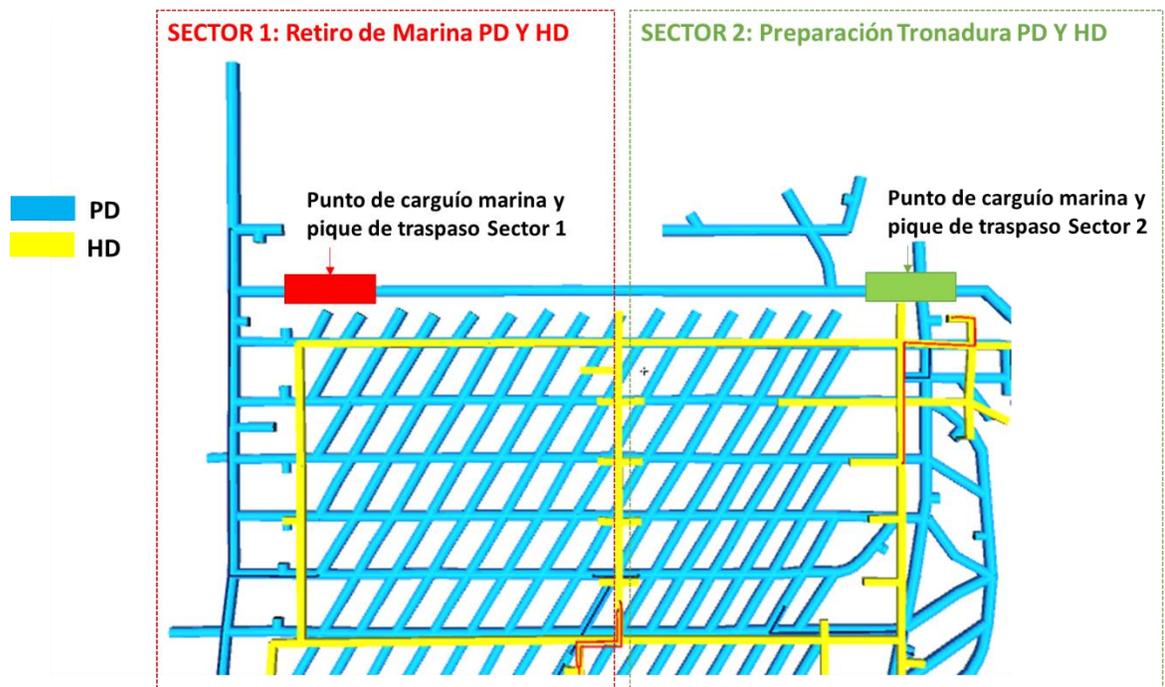


Figura 76: Sectorización de dos o más CTA.

Esta sectorización entre sectores de retiro de marina y preparación de tronadura es necesaria para disminuir la interferencia por acarreo de marina, mejor coordinación de logística entre células de trabajo – OO.CC y el aumento en la utilización de los recursos transversales como los es el LHD y camiones de bajo perfil. Para que esta sectorización sea exitosa, es necesario que tanto los puntos

de carguío en el nivel de producción como los piques de traspaso de marina desde el nivel de hundimiento, estén cercanos (distancia menor a 250 m).

5.7.2.4.2 GENERACIÓN DE NUEVAS FRENTES DE TRABAJO CTA

Para que la CTA tenga validez en el tiempo y sea sustentable, además de cumplir con los KPI de rendimiento, seguridad y calidad debe ser capaz de auto generar nuevas frentes de trabajo a medida que esta vaya agotando frentes, por lo que es necesario definir en los planes mensuales rutas de apertura de frentes. Para el caso del nivel de hundimiento, estas rutas son las cabeceras y para el nivel de producción, cabeceras y zanja.

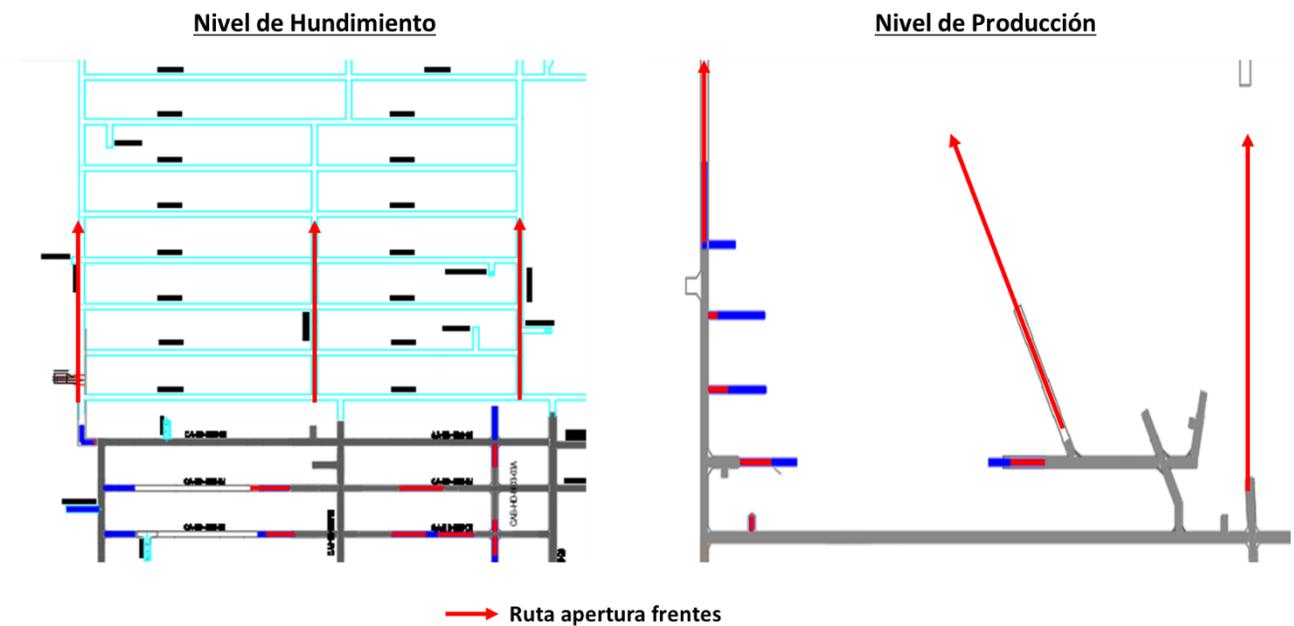


Figura 77: Rutas de apertura de frentes CTA.

Capítulo 6 CONCLUSIONES

Durante la etapa de construcción de PMCHS, este se considera un éxito debido a que ha tenido una de las mejores tasas de avance mensual. Más de 1,8 km desarrollados por mes considerando solo los niveles de producción y hundimiento, y más de 3,6 km desarrollados por mes considerando la mina completa (niveles de hundimiento, producción, ventilación, trasporte intermedio, trasporte final). Este éxito constructivo de PMCHS se debió principalmente a la identificación temprana de los procesos claves que necesitaban un mejoramiento para alcanzar los KPI's exigidos por el proyecto y alertas tempranas que permitieron la asignación efectiva de recursos.

Las palancas de mejoras que permitieron un mejor desempeño en las distintas actividades de preparación mina fueron:

- **DDE:** el cambio de HRI a CUBEX fue la mejora clave para el mejoramiento de los metros barrenados mensuales exigidos. Esto debido a que la CUBEX fue creada para la perforación de grandes longitudes en un diámetro 6 ½" de forma ascendente.
- **Vigas Reguladoras:** la especialización de cuadrillas para el montaje de vigas, además del cambio en la forma de montaje (incorporación de pernos maniobras y machina) fueron la clave para alcanzar el buen ritmo constructivo requerido.
- **Pavimentos:** el aumento del área disponible para pavimentar y la incorporación de puntos de trasvasije cercanos a las áreas de pavimentación permitieron alcanzar avances mensuales mayores a los 600 m.
- **Muros de confinamiento:** Al igual que en las vigas reguladoras, la especialización de cuadrillas para el montaje de muros de confinamiento y el cambio de grado del hormigón de dos etapas a solo una etapa fueron las palancas de mejoras que tuvieron un mayor impacto en esta actividad constructiva.
- **Desarrollos Verticales (Blind Hole):** Mejoramiento en la planificación de preparación de puntos para la instalación de Blind Hole (servicios y maniobras).
- **Desarrollos Horizontales:** La incorporación de metodología en base a las Unidades de Producción Básica (UPB) fue el gran acierto de PMCHS, el cual incorporando a esta metodología el concepto de "operador-mantenedor" permite que se cree la "Célula de Trabajo Autónomo" que tiene como objetivo, realizar la misma cantidad de metros mensuales obtenidos en el proyecto, pero con una cantidad reducida de recursos y, por ende, con un menor costo.

Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- [01] Comisión Chilena del Cobre. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1998-2017. Santiago: COCHILCO, 2018. Informe económico.
- [02] CODELCO (Chile). Vicepresidencia de Proyectos. Explotación Chuquicamata Subterránea - Proyecto: Capítulo 8 Explotación Minera y Reservas Minerales. Calama: CODELCO, 2017. Informe técnico: N14MS03-I2-N14MS03-70100-INFMD02-2000-008.
- [03] Paredes P, “Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea”, Presentación Workshop Delphos, Codelco, Santiago, Chile (2017).
- [04] Nonaka y Takeuchi, “La organización creadora de conocimiento”, EE. UU.: Oxford University, 1995.
- [05] Aravena N, “Diseño de un sistema de gestión del conocimiento para una consultora del sector minero”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile, Santiago, Chile (2013).
- [06] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, “Plantilla de buenas prácticas”. Informe, Roma, Italia (2015).
- [07] Consejo Minero CChC, “Buenas Prácticas en la Construcción Minera”. Mesa de Trabajo Productividad, Santiago, Chile (2015).
- [08] Oficina Internacional del Trabajo, “Guía para el Intercambio de Buenas Prácticas y Lecciones Aprendidas”. Construcción de Políticas Efectivas, Ginebra, Suiza (2015).
- [09] Cortes D, Martínez Y, Silva M, “Maximizing resource utilization in scheduling of underground mining Works with multiple faces”. Caving 2018: Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Vancouver, Canadá (2018).
- [10] Díaz, G. y E. Morales (2008). Tunneling and construction for 140.000 tonnes per day – El Teniente mine - Codelco Chile. En: Fifth International Conference & Exhibition on Mass Mining. Ed. por Díaz, G. y Morales, E.

- [11] Camhi, J.F. (2012). Optimización de los Procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de Block Caving. Caso Estudio Mina El Teniente Codelco Chile. Tesis. Universidad de Chile.
- [12] Vásquez J (2018). OPTIMIZACIÓN DE PLANES MINEROS EN MINAS EXPLOTADAS POR PANEL CAVING INCLUYENDO ACTIVIDADES DE PREPARACIÓN MINERA. Tesis. Universidad de Chile. Santiago.
- [13] NOTA INTERNA DET: Energia, deformacion y corrosión en elementos de fortificacion y lineamientos generales de fortificación. Rancagua: CODELCO, 2015. Informe técnico: GRMD-SGM-NI-10-2015.
- [14] Arce J., 2002, “Dimensionamiento de Distancias entre Puntos de Extracción y Niveles de Producción - Socavación para Método Panel Caving en Roca Primaria Mina El Teniente”, Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil en Minas, Universidad de Santiago de Chile.
- [15] Lavado D (2014). METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN DESARROLLOS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA. Memoria. Universidad de Chile. Santiago.
- [16] Autio, J., Kirkkomäki, T., 1996, “Boring of Full scale deposition holes using a novel dry blind boring method”, Saanio y Riekkola Consulting Engineers.
- [17] Codelco (2010). Libro del pre-acondicionamiento del macizo rocoso.
- [18] Cerrutti, C. (2008). Guía preliminar de criterios de diseño y parámetros de planificación con pre-acondicionamiento. Informe IM2 P 45-07-IP-004-V0. Codelco Chile.
- [19] DISEÑO PROGRAMA PREACONDICIONAMIENTO CON EXPLOSIVOS. Calama: CODELCO, 2019. Plano N14MS03-I1-N14MS03-21200-200MI02-2210-001.
- [20] Muhlenbrock K, Navarrete R, Silva D, Mardones L. Construction of the first macro block at the Chuquicamata Underground project., Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining, MassMin 2020, Santiago de Chile.
- [21] PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DE VIGA CORTA SACA EN PUNTO DE EXTRACCION. Calama. CODELCO, 2018. Informe N14MS03-I1-ZUBLIN-000000-PROCI05-0000-031_2

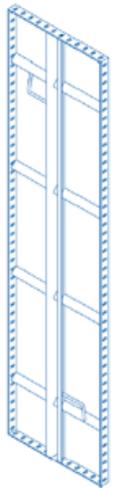
[22] Henríquez E (2018). EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE OPORTUNIDADES DE MEJORA AL PLAN DE PREPARACIÓN MINERA, PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA. Memoria. Universidad de Santiago. Santiago.

[23] DISEÑO REFORZAMIENTO PILAR CON MURO ESTRUCTURAL Y CABLES. Calama. CODELCO, 2018. Plano N14MS03-I1-N14MS03-24200-205MI02-2200-008-0.

[24] Pavimentación - Macro Bloques N01 y S01. Calama: CODELCO, 2018. Plano: N14MS03-I1-N14MS03-20000-200CI02-2200-002.

ANEXOS

Anexo 1: PIEZAS MOLDAJE METÁLICO



Dimensiones	Peso	Personas para manipular
2400 x 600 x 2 mm	64 kg	3 un
1200 x 600 x 2 mm	32 kg	2 un
900 x 600 x 2 mm	26 kg	2 un
800 x 600 x 2 mm	23 kg	1 un

Acero A36

Figura 78: Paño moldaje de acero típico.

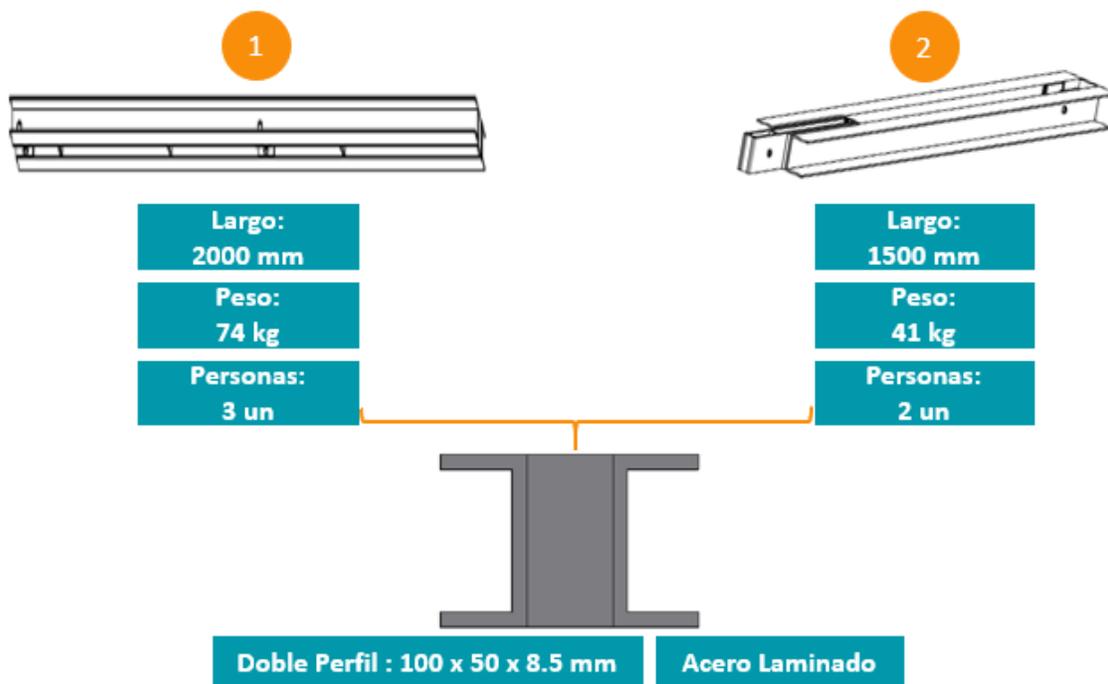


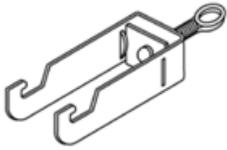
Figura 79: Canaletas moldaje de acero típico.



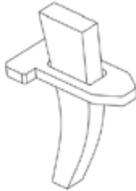
- Diámetro:**
60 mm
- Largo:**
1950 – 2800 mm
- Peso:**
30 kg
- Personas:**
2 un
- Acero:**
A-53 SCH40

Figura 80: Aplomador típico moldaje acero.

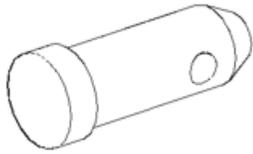
Grampa tipo C



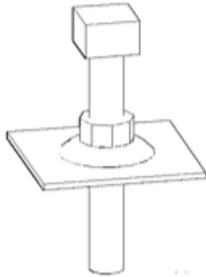
Cuñas macho y hembra



Pasador Ø25 L= 115



Perno Ø22 L= 200 – Planchuela 200x200 - Tuerca



Dowel Ø22 L = 200



Figura 81: Accesorios moldaje de acero.