

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA SOBREEEXCAVACIÓN EN
DESARROLLOS HORIZONTALES CON ANFO VERSUS DESARROLLOS
REALIZADOS CON EMULSIÓN EN LA MINA ESMERALDA, DIVISIÓN
EL TENIENTE, CODELCO CHILE**

Trabajo de titulación para optar al
título de Técnico Universitario en
MINERÍA Y METALURGIA

Alumna:

Estefany Paulina Hernández Correa

Profesor Guía:

Ing. Marcelo Rojas Vidal

RESUMEN EJECUTIVO

KEYWORDS: SOBREEEXCAVACIÓN –EXPLOSIVO – ANFO –EMULSIÓN

La División El Teniente, actualmente pasa por un proceso de reformulación de acuerdo a la preparación minera, siendo responsable de esta actividad la Gerencia de Obras Mina y cuyo objetivo principal, es aumentar la productividad y eficiencia en la ejecución de desarrollos horizontales. Con el fin de aumentar la eficiencia, es que la GOBM ha fomentado la innovación, incentivando a las empresas especializadas en construcción a la utilización de nuevas tecnologías.

En este estudio se aborda la implementación del uso de la Emulsión en la tronadura de avance de desarrollos y su análisis comparativo respecto al método convencional de tronadura con ANFO.

Dentro de los problemas identificados, se encuentra la sobre excavación y el desafío de la minimización de ésta.

Minimizar la Sobreexcavación reduce los costos de la operación, ya que existe una directa relación entre ésta y el consumo de recursos, tanto como materiales y horas hombre. Poder controlar la sobre excavación, permite generar un beneficio positivo al momento de programar los ingresos a obtener en la construcción respecto a los costos.

Entre las ventajas de realizar un control de ésta, se encuentran:

- Mejor uso de activos
- Mejorar los tiempos de las operaciones unitarias del ciclo de construcción
- Ahorro en los costos de la fortificación
- Ahorro en el costo de acarreo de la marina

Para este trabajo de título se considerarán 3 capítulos, los cuales se detallan brevemente a continuación:

- Capítulo I: Se presentan antecedentes generales del estudio y las definiciones de los explosivos más utilizados y sus características principales
- Capítulo II: Se presentan las operaciones unitarias involucradas en el ciclo minero
- Capítulo III: Se entregará un análisis de la sobreexcavación utilizando ANFO como explosivo y el cambio de éste a emulsión, presentando optimizaciones en el diagrama, con el fin de obtener mejores resultados.

Es así como en el presente trabajo, se ofrece una herramienta que contribuya a las futuras operaciones mineras, ligadas a la productividad y eficiencia del proceso.

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

ALCANCE

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

- 1.1. INTRODUCCIÓN
- 1.2. LA GERENCIA DE OBRAS MINA (GOBM)
- 1.3. MINA ESMERALDA
- 1.4. EXPLOSIVOS
- 1.5. CARGA DE COLUMNA
 - 1.5.1. Anfo
 - 1.5.2. Emulsiones
 - 1.5.3. Softron
- 1.6. CARGA DE FONDO
 - 1.6.1. Tronex
 - 1.6.2. APD
- 1.7. ACCESORIOS DE TRONADURA
 - 1.7.1. Detonador No Eléctrico
 - 1.7.2. Cordón Detonante
- 1.8. CONCLUSIÓN

CAPÍTULO 2: CICLO MINERO DE EXCAVACIÓN HORIZONTAL

- 2.1. INTRODUCCIÓN
- 2.2. VENTILACIÓN
- 2.3. REGADO DE MARINA
- 2.4. ACUÑADURA
- 2.5. EXTRACCIÓN DE MARINAS
- 2.6. MARCACIÓN DE PERNOS DE FORTIFICACIÓN
- 2.7. PERFORACIÓN DE FORTIFICACIÓN

- 2.7.1. Pernos Helicoidales
- 2.7.2. Pernos Split Set
- 2.8. LECHADO DE PERNOS
- 2.9. INSTALACIÓN DE MALLA
- 2.10. ACONDICIONAMIENTO DE MALLA
- 2.11. PROYECCIÓN DE SHOTCRETE
- 2.12. PERFORACIÓN DE DISPARO O AVANCE
- 2.13. CARGUÍO DE FRENTE
- 2.14. SOBREECAVACIÓN CONTRACTUAL
- 2.15. CONCLUSIÓN

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE SOBREECAVACIÓN

- 3.1. INTRODUCCIÓN
- 3.2. CONSIDERACIONES PREVIAS
- 3.3. UTILIZACIÓN DE ANFO
 - 3.3.1. Línea Base
 - 3.3.2. Pruebas en Terreno
 - 3.3.3. Sobre Excavación
- 3.4. CAMBIO DE EXPLOSIVO
 - 3.4.1. Pruebas en Terreno
 - 3.4.2. Litología
 - 3.4.3. Modificación del Diagrama de Disparo para Emulsión
 - 3.4.4. Optimización de la Malla de Perforación
 - 3.4.5. Diseño Final
 - 3.4.6. Longitud de Perforación
 - 3.4.7. Número de tiros cargados por postura
 - 3.4.8. Carguío de Explosivo
 - 3.4.9. Conclusión

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

- ANEXO A: GALERÍA CARGADA CON EMULSIÓN BOMBEABLE
- ANEXO B: RESULTADO DE TRONADURAS
- ANEXO C: ILUSTACIÓN DEL PUNTO DE AMARRE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1.	Ubicación Mina Esmeralda
Ilustración 1-2.	Emulsión
Ilustración 1-3.	Softron
Ilustración 1-4.	Tronex
Ilustración 1-5.	APD
Ilustración 1-6.	Nonel
Ilustración 1-7.	Cordón detonante
Ilustración 2-1.	Mapa Conceptual Ciclo Minero en Excavaciones Horizontales
Ilustración 2-2.	Representación de Acuñaadura
Ilustración 2-3.	Representación Extracción de Marina
Ilustración 2-4.	Perno Helicoidal
Ilustración 2-5.	Perno Split Set y Planchuela
Ilustración 2-6.	Representación Colocación de Malla
Ilustración 2-7.	Representación Proyección de Shotcrete
Ilustración 2-8.	Representación Perforación de Disparo en la frente
Ilustración 2-9.	Representación Carguío de frente
Ilustración 2-10.	Flujograma Carguío de Explosivos
Ilustración 2-11.	Sobreexcavación
Ilustración 2-12.	Ciclo de Construcción de túneles para desarrollos Mina
Ilustración 3-1.	DTM
Ilustración 3-2.	Perfiles Topográficos
Ilustración 3-3.	Diseño del Diagrama de Perforación para ANFO
Ilustración 3-4.	Nivel de Hundimiento Mina Esmeralda
Ilustración 3-5.	Mapa de sector a estudiar
Ilustración 3-6.	Litología del Sector
Ilustración 3-7.	Malla de Perforación P&T con Emulsión
Ilustración 3-8.	Forma de Carguío con Emulsión Subteck Charge
Ilustración 3-9.	Diagrama Modificado. Lado izquierdo teórico recibido y lado derecho diseño optimizado
Ilustración 3-10.	Diseño Final
Ilustración 3-11.	Resultado largo perforaciones
Ilustración 3-12.	Número de tiros cargados según postura
Ilustración 3-13.	Sobreexcavación Emulsión

Ilustración 3-14.	Comparación Sobreexcavación generada ANFO V/S Emulsión
Ilustración A-1.	Galería cargada con Emulsión bombeable, conectada a cordón detonante listo para quemar
Ilustración B-1.	Resultado post-tronadura con avances a medias cañas
Ilustración B-2.	Resultado post-tronadura con avances a medias cañas
Ilustración B-3.	Resultado post-tronadura con avances a medias cañas
Ilustración C-1.	Puntos de Amarre
Ilustración C-2.	Puntos de Amarre

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Características del Softron
Tabla 1-2.	Características Tronex
Tabla 1-3.	Características APD
Tabla 2-1.	Límites máximos permisibles
Tabla 2-2.	Cantidad de Split Set dependiendo de sección
Tabla 2-3.	Distribución de explosivos según diagrama de disparo
Tabla 2-4.	Límite de tolerancias por sección teórica
Tabla 3-1.	Sectores a Analizar
Tabla 3-2.	Sobreexcavación ANFO
Tabla 3-3.	Características Disparo
Tabla 3-4.	Detalles de Carguío

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

SIGLAS:

GOBM	: Gerencia de Obras Mina
ANFO	: Nitrato de Amonio y Combustible derivado del patróleo
DET	: División El Teniente
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar
tdp	: Toneladas por dia
MUS\$	: Miles de dolares Estadounidenses
T-sub 6	: Nivel teniente Sub 6
3D	: Tercera Dimensión
DTM	: Modelos Digitales en Terreno
[mt]	: Metros
MS	: Milisegundos
RISES	: Residuos Industriales Segregados Sólidos

SIMBOLOGÍAS:

%	: Porcentaje
m ²	: Metros cuadrados
±	: Más menos
"	: Pulgadas
[ml]	: Metros lineales
#	: Indica número, cuantificable
°	: Grados sexagesimal
yd ³	: Yardas Cúbicas

INTRODUCCIÓN

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO), es una empresa autónoma, propiedad del Estado Chileno, cuyo negocio principal es la explotación de recursos mineros de cobre, es el mayor productor de este mineral en el mundo, exportándolo a los países asiáticos y americanos. (Patricio Arce, 2015).

En relación a la economía, los temas relacionados con el uso eficiente de los recursos ha sido foco de investigaciones por parte de especialistas, donde la búsqueda de datos que corroboren la teoría replantea distintos modelos que permitan mejorar la producción y productividad en los procesos.

Tal situación crea nuevos desafíos en CODELCO, lo que obliga a la compañía a optimizar sus procesos de tal modo que se aumente la productividad y se administren de mejor manera los recursos.

La División el Teniente en búsqueda de alcanzar estos objetivos, pasa por un proceso de reformulación de la forma en cómo se realiza el proceso de preparación minera. La GOBM, encargada de esta actividad, pretende alcanzar mayor productividad con menores costos, siendo esto un desafío, debido a que la productividad baja a medida que se avanza en el ciclo de actividades mineras.

El estudio de esta de investigación se enmarca en la Mina Esmeralda, donde se contextualiza el trabajo y se enfoca en las bases contractuales de la GOBM analizando los procesos de perforación y tronadura, la utilización de explosivo ANFO o Emulsión y las diferencias en los resultados de sobre excavación obtenidas con ambos explosivos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Comparar la sobreexcavación generada en los desarrollos horizontales de la preparación Mina, respecto a la utilización de ANFO o Emulsión para las tronaduras de avance, en la Mina Esmeralda, División El Teniente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer los tipos de explosivos utilizados actualmente en Mina Esmeralda, mediante la aplicación en las tronaduras de avance.
- Describir los procesos unitarios y el concepto de sobreexcavación en el ciclo minero a través de los desarrollos horizontales.
- Comparar la sobreexcavación generada, mediante los resultados obtenidos aplicando Emulsión y ANFO respectivamente.

ALCANCE

El estudio se realizó en Mina Esmeralda de División El Teniente, considerando la toma de datos desde Febrero hasta Marzo, en turnos de 10 por 5 y 9 horas y media por turno.

El estudio se enfoca solamente en el resultado de la sobre excavación obtenida, que se produce directamente por el tipo de explosivo utilizado, por lo tanto, para todo análisis se considera el mismo tipo de roca, el mismo diagrama de disparo y la misma calidad en la perforación.

Se considera para el análisis sólo los niveles de producción y hundimiento de Mina Esmeralda, ya que es donde se encuentra actualmente una mayor actividad minera constructiva, teniendo así una mayor cantidad de datos a evaluar.

Se utilizan diferentes secciones de galería, las cuales corresponden a las presentes en Mina Esmeralda, Mina Reservas Norte y Mina Diablo Regimiento, las cuales son las secciones presentes en los niveles de producción y hundimiento.

El ciclo de avance se considerará desde la tronadura de una frente, hasta que se vuelve a tronar la misma frente, considerando los tiempos en que efectivamente el resto de las actividades fueron realizadas.

El presente estudio contempla una revisión de los procedimientos propuestos actualmente, de las empresas especializadas que realizan desarrollos o excavaciones horizontales.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

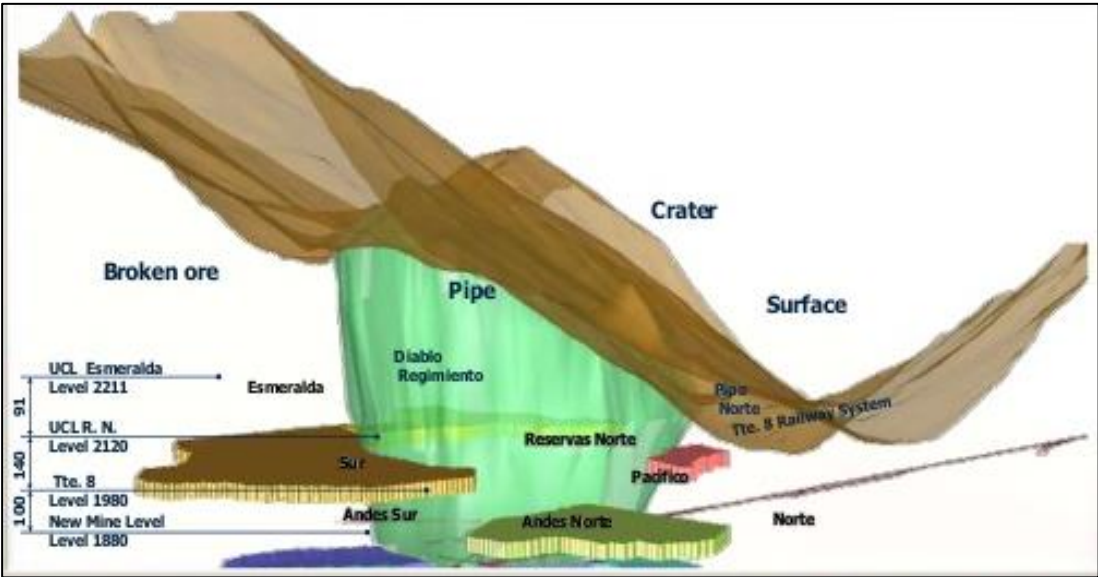
El presente capítulo contextualiza el estudio y se enfoca en las bases contractuales transversales para las distintas empresas contratistas (constructoras) de la GOBM de la DET. La revisión comprende a las actividades que conforman el ciclo de minero y su forma de ejecución.

1.2. LA GERENCIA DE OBRAS MINA (GOBM)

La GOBM fue creada el 2014 a partir de la Dirección de Preparación de Minas (DPM) con el fin de dar mayor sustento e importancia a la Preparación de Minas en la DET. La GOBM es la encargada de realizar desarrollos y construcciones de obras civiles, planes de preparación ingeniería de construcción, control, programación y planificación de obras. Actualmente presenta una dotación de 14 personas propias, 3000 trabajadores de empresas contratistas y 100 personas que prestan servicios.

1.3. MINA ESMERALDA

La Mina Esmeralda (Ilustración 1-1), se emplaza en el sector sur del mineral el teniente, la cual tiene una superficie de 629.000 m², conteniendo reservas de 348 millones de toneladas con una ley media del 1,014 % cobre total. El Nivel de hundimiento se ubica a una cota de 2210 m.s.n.m., el nivel de Producción a 2913 m.s.n.m. y el Nivel de Acarreo a 2163 m.s.n.m.. Sus operaciones comenzaron en septiembre de 1997 a un ritmo de 1000 tpd.



Fuente: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 1-1. Ubicación Mina Esmeralda

Presenta el mayor gasto en preparación minera dentro de todos los sectores de la DET, con 93 MUS\$ para el año 2015. Por otro lado, las obras de desarrollo horizontal para el nivel de hundimiento y nivel de producción han sido en promedio de 1461 ml y 2929 ml respectivamente, para el periodo 2006 – 2015.

El método de explotación utilizado en Esmeralda corresponde al Panel Caving con hundimiento avanzado, desde 2004. La socavación en el nivel de hundimiento se realiza sobre el nivel de producción que se desarrolla en forma parcial, dejando galerías, zanjas y bateas bajo el área hundida.

El sistema de turnos de trabajo para el personal asociado a la operación es de 10 días de trabajo por 5 días de descanso, mientras que para el personal administrativo el turno comprende 5 días de trabajo por cada 2 días de descanso. Cada día de trabajo se divide en 2 turnos diarios de 9,5 hrs cada uno. El personal de supervisión, salvo los jefes de turno, trabajará en un sistema de 5 días de trabajo por 2 días de descanso.

1.4. **EXPLOSIVOS**

Los explosivos son sustancias químicas que en condiciones normales de temperatura y presión son inocuas, pero que por medio de un iniciador pasan violentamente al estado gaseoso, produciendo un gran aumento de volumen, alta temperatura y presión; se pueden clasificar en primario o secundario según la función que

cumplan, los primeros son los responsables de iniciar la detonación de una masa explosiva y los segundos son los encargados de ejercer el efecto rompedor del disparo.

1.5. CARGA DE COLUMNA

Se entiende como carga de columna a los explosivos que son los encargados de quebrar la roca y que necesitan de un explosivo con mayor potencia para poder iniciar en la mayoría de los casos. Existe una gran variedad de cargas que se pueden utilizar para cumplir esta función.

1.5.1. Anfo

El ANFO es una mezcla de Nitrato de amonio y un combustible. El nitrato de Amonio (NH_4NO_3) es una sal inorgánica blanca. Ésta por sí sola no es un explosivo, sólo adquiere esta capacidad al ser mezclado con pequeñas cantidades de un combustible. En la fabricación de explosivos se emplea aquel que tiene forma de partículas esféricas, ya que es el que tiene mejores características para retener a los combustibles líquidos.

Cualquier sustancia combustible puede utilizarse con el nitrato de amonio para generar y fabricar un agente explosivo. Antes se empleaba polvos de carbón hasta llegar a ser sustituido por los combustibles líquidos principalmente porque lograban mezclas más homogéneas con el Nitrato de Amonio. El producto más utilizado es el gas-oil ya que, frente a otros líquidos, presenta la ventaja de no tener un punto de volatilidad tan bajo, en comparación con las gasolinas y el keroseno, teniendo un menor riesgo de explosiones de vapor.

1.5.2. Emulsiones

Dentro de los explosivos, la emulsión es el más reciente en el mercado, teniendo como principales características el mejoramiento de la potencia y la resistencia al agua. Tiene un sistema bifásico compuesto por la mezcla de un fluido inmiscible en otro. Las emulsiones explosivas son denominadas agua aceite en donde la fase acuosa está compuesta por sales orgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible hidrocarbonado inmiscible en agua. Ver ilustración 1-2.



Fuente: ORICA 2018

Ilustración 1-2. Emulsión

En lo que a los tipos de emulsiones se refiere, existen productos de diferentes propiedades relacionadas con las características físicas que posee cada una de ellas. Dependiendo del tipo de combustible, gas-oil, parafinas, gomas, etc., sus características reológicas son distintas en cada tipo de emulsión, así como sus aplicaciones y usos.

La incorporación de emulsión promete ciertos beneficios claves:

- La densidad final del producto puede ser modificada para ajustarse a los requerimientos deseados
- La emulsión bombeable reduce derrame y junto a la resistencia al agua, minimiza el percolamiento de nitrato y el resultante impacto medio ambiental
- Proporciona una carga explosiva totalmente acoplada para maximizar los resultados de la tronadura
- La gran velocidad de carga y los reducidos gases post tronadura, mejoran dramáticamente el tiempo de retorno
- Reduce potenciales explosiones de polvo sulfatado
- Se elimina la preocupación relacionada con la salud ocupacional por manipulación y almacenamiento de explosivos

1.5.3. Softtron

Explosivo con bajo poder rompedor (Tabla 1.1) que tiene como base la Nitroglicerina, el cual está diseñado para trabajos de tronadura controlada en tunelería y para tronadura de contorno en frentes de avance, donde en ambos casos es necesario

conseguir un perímetro parejo con un mínimo de sobreexcavación, ya que permite minimizar el fracturamiento de la roca más allá de la línea de contorno.

Tabla 1-1. Características del Softron

Característica	Unidad	Valor
Densidad	[g/cc]	1,19 ± 3%
Velocidad de detonación	[m/s]	3324 ± 3%
Presión de detonación	[kbar]	33
Energía	[kJ/kg]	4480
Resistencia al agua	[horas]	12 - Regular
Volumen de gases	[L/kg]	968
Potencia relativa al ANFO	en peso	1,13
	en volumen	1,72

Fuente: ENAEX, 2016

Los cartuchos de este explosivo por sus características se pueden acoplar perfectamente entre sí, ya que su forma es de un tubo rígido acoplable de polietileno (Ilustración 1-3).



Fuente: ENAEX, 2016

Ilustración 1-3. Softron

1.6. CARGA DE FONDO

La carga de fondo es la responsable de iniciar la tronadura, ya que al poseer una alta velocidad de detonación es capaz de accionar a las demás cargas y generar así la detonación de éstas, por lo general se varía el tipo de iniciador o carga de fondo dependiendo de la configuración y características de la roca, sobre todo si hay o no presencia de agua.

1.6.1. Tronex

Es un tipo de dinamita semigelatina (Ilustración 1-4), la cual fue diseñada para ser utilizada en trabajos tanto de superficie como subterránea. Esta semigelatina posee una alta velocidad de detonación, incluso en condiciones de confinamiento deficiente, por lo que se vuelve una buena opción como carga principal para tunelería y desarrollo de galerías (Tabla 1-2).



Fuente: ENAEX, 2016

Ilustración 1-4. Tronex

Tabla 1-2. Características Tronex

Característica	Unidad	Valor
Densidad	[g/cc]	1,18 ± 3%
Velocidad de detonación	[m/s]	4250 ± 3%
Presión de detonación	[kbar]	77
Energía	[kJ/kg]	4908
Resistencia al agua	[horas]	12 - Regular
Volúmen de gases	[L/kg]	942
Potencia relativa al ANFO	en peso	1,22
	en volumen	1,85

Fuente: ENAEX, 2016

1.6.2. APD

Son explosivos compuestos de pentolita. También conocido como explosivo de alto poder detonante, ya que la velocidad de detonación alcanza los 7300 [m/s] y una presión superior a los 200 [kbar], poseen una alta densidad y su característica principal es que son sensibles a fulminantes, (tabla 1.3).

Tabla 1-3. Características APD

Característica	Unidad	Valor
Densidad	[g/cc]	1,62 ± 3%
Velocidad de detonación	[m/s]	7.300 ± 3%
Presión de detonación	[kbar]	216
Energía	[kJ/kg]	1338
Resistencia al agua	[horas]	Excelente
Volumen de gases	[L/kg]	692
Potencia relativa al ANFO	en peso	1,5
	en volumen	3,12

Fuente: ENAEX, 2016

La gran ventaja que presenta este tipo de explosivo es que son insensibles a los golpes o roces, lo que le otorga una gran seguridad en su manipulación para su uso en minería y a su vez el envase plástico que los contiene hace que el compuesto sea mucho más resistente al agua presente en las perforaciones. Actualmente para minería subterránea y específicamente en Mina DET, este iniciador cilíndrico es uno de los más utilizados en la mayoría de las perforaciones. Otro aspecto importante es que puede ser utilizado para diámetros medianos como grandes, debido a sus diferentes tamaños en el mercado, (Ilustración 1-5).



Fuente: ENAEX, 2016

Ilustración 1-5. APD

1.7. ACCESORIOS DE TRONADURA

Existe diferentes tipos de accesorios en la tronadura que varían dependiendo de la utilidad que se le quiera dar, esto se debe a que existe una serie de configuraciones posibles para poder conectar los explosivos, donde la decisión final dependerá del conocimiento que se tenga por parte de los explosivistas, según los resultados que se quieran obtener.

1.7.1. Detonador No Eléctrico

El NONEL es un detonador del tipo no eléctrico que viene con retardo incluido (Ilustración 1-6), conformado por un tubo de choque de color (naranja en el caso del tipo MS) que en uno de sus extremos posee un detonador de alta potencia y el otro extremo se encuentra sellado. Cerca de este último se tiene un conector blanco tipo J-Hook y una etiqueta con el periodo, esta etiqueta posee un color definido por el tipo de periodo y el tiempo nominal del retardo.



Fuente: Dyno Nobel, 2007

Ilustración 1-6. Nonel

1.7.2. Cordón Detonante

Se puede describir como una cuerda flexible, formada por varias capas protectoras y un núcleo de explosivo conocido como pentrita, que es difícil de encender, pero tiene la sensibilidad suficiente para iniciar la explosión con detonadores. En Chile se comercian diferentes tipos de cordones detonantes, los cuales van desde 1,5 a 42 [gr/m] según la concentración lineal de Pentaeritritoltetranitrato (PETN). Su velocidad de detonación es de 6700 [mt/s]. La fuerza de estallido es suficiente para hacer detonar explosivos continuos dentro del barreno, actuando, así como iniciador de la carga explosivo.



Fuente: ENAEX, 2016

Ilustración 1-7. Cordón detonante

CAPÍTULO 2: CICLO MINERO DE EXCAVACIÓN HORIZONTAL

2. CICLO MINERO DE EXCAVACIÓN HORIZONTAL

2.1. INTRODUCCIÓN

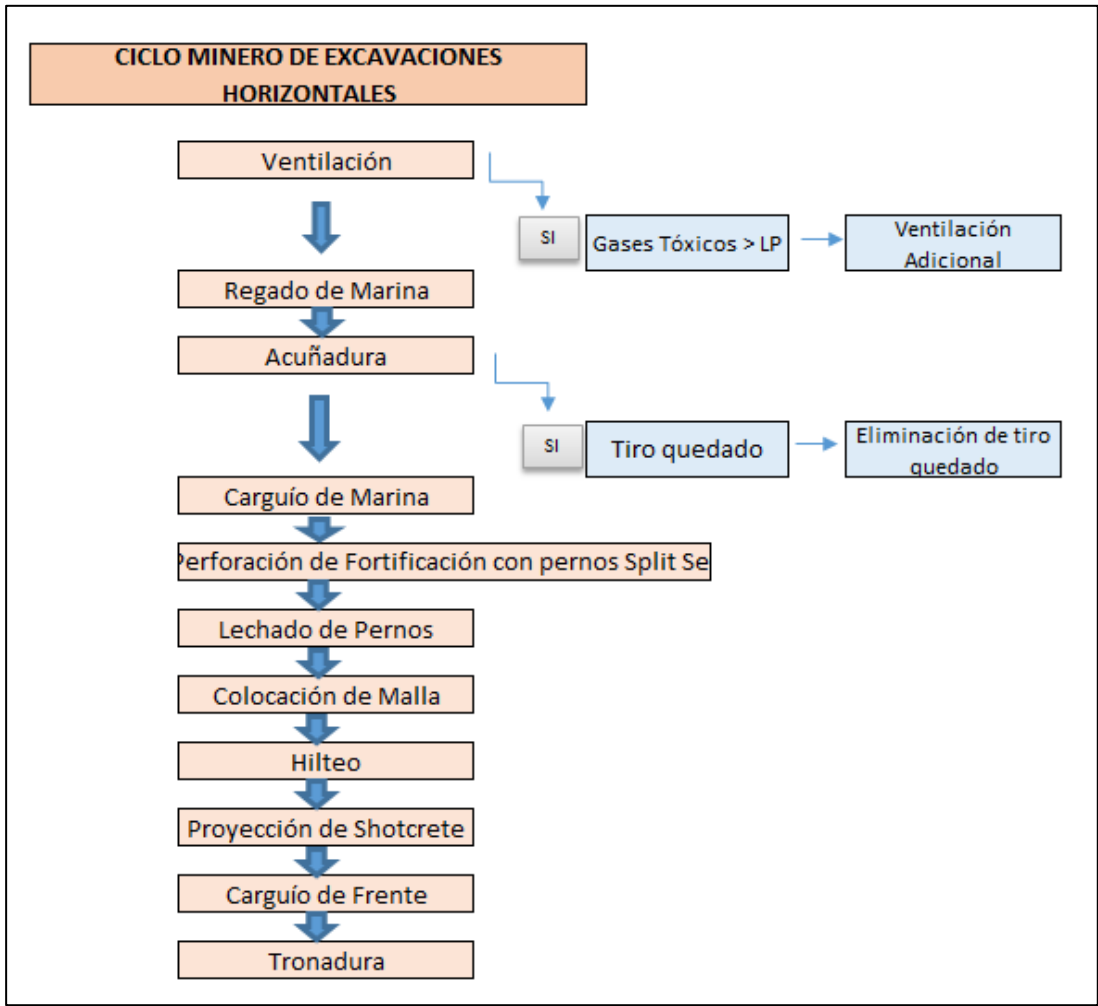
La excavación horizontal se realiza mediante la creación de una segunda cara libre, producida por las perforaciones que conforman la rainura. Esta última se caracteriza por presentar tiros cargados y tiros sin carga, configurados de manera tal que el resultado correcto de la tronadura dependerá principalmente de ésta. Los demás tiros se denominan de contorno, los cuales van cargados, se clasifican en zapateras, coronas, cajas y auxiliares, y son los encargados de realizar la tronadura y generar la sección deseada.

Para construir la sección de la galería de avance se evalúa el tipo de roca sobre el cual se realizarán las actividades de perforación y tronadura, esto se ejecuta en los niveles de hundimiento y producción.

Las galerías se construyen realizando distintas actividades que conforman el denominado ciclo minero, en su orden son: ventilación, retiro de marina, acuñadura, perforación de fortificación, lechado de pernos, instalación de malla, hilteo, proyección de shotcrete, perforación de frente y carguío de explosivo.

Los equipos considerados para la construcción son de bajo perfil y algunos telecomandados. Las instalaciones consideradas para el correcto funcionamiento de la obra incluyen las necesarias para ubicar las conexiones de agua, electricidad y aire comprimido, siendo esta última responsabilidad de una empresa especializada.

En la Ilustración 2-1, se muestra el flujograma del ciclo minero para el desarrollo de excavaciones horizontales.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración 2-1. Mapa Conceptual Ciclo Minero en Excavaciones Horizontales

A continuación, se explicarán en detalle las actividades del ciclo de minero en desarrollos horizontales, datos contractuales de las tres Empresas especializadas: Geovita, Mas Errázuriz y Gardilcic que realizan labores de construcción de túneles de preparación minera en la Mina Esmeralda.

En el ciclo de excavación horizontal, se presentan las principales operaciones unitarias que lo conforman a continuación.

2.2. VENTILACIÓN

Todos los desarrollos horizontales realizados en Mina Esmeralda son de avance ciego. Sus longitudes de avance son mayores a 50 metros utilizando equipos diésel.

Se tiene programada la implementación de un sistema de ventilación auxiliar, en búsqueda de dar cumplimiento a los requerimientos de ventilación, descritos en la normativa divisional. Las mangas de ventilación se ubicarán a una distancia no superior a 30 metros de la frente de avance. (Geovita, 2014).

Después de cada disparo o tronadura se recomienda ventilar por un período de al menos 30 minutos (para que se disipen los gases post-tronadura) antes de ingresar de nuevo a la postura o área de trabajo, ya que se debe realizar una verificación de la concentración de gases tóxicos en cada frente, éstos deben cumplir con los estándares de seguridad establecidos. Esta labor está a cargo de los jefes de turno o supervisores del turno, utilizando detectores de gases calibrados, la concentración permisible de gases contaminantes se encuentra señalada en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Límites máximos permisibles

Gas Contaminante	Concentración
Monóxido de Carbono (CO)	40,0 ppm
Dióxido Nitroso (NO ₂)	2,4 ppm

Fuente: SERNAGEOMIN, 2015

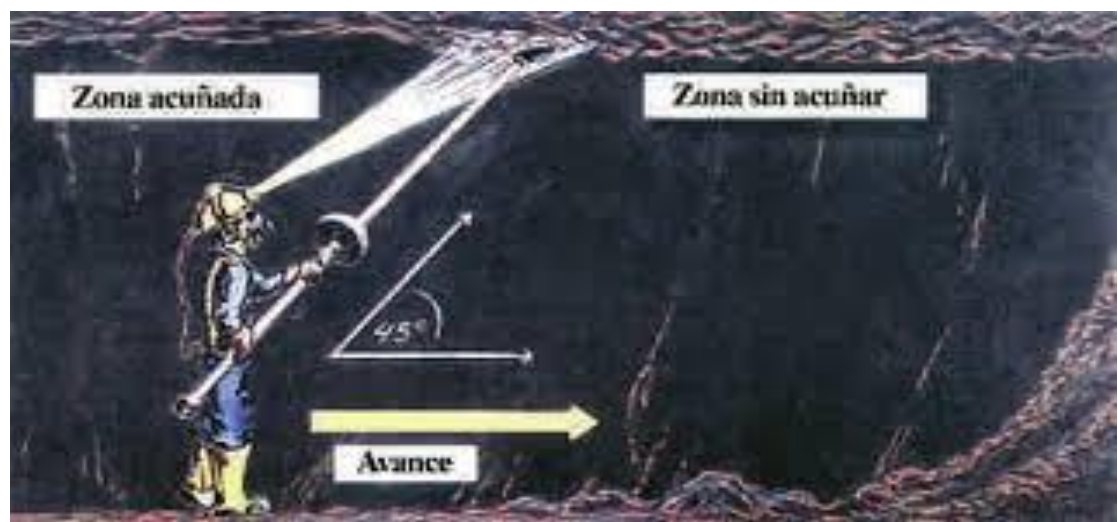
2.3. REGADO DE MARINA

El regado de marina, tiene por objetivo disipar las concentraciones o bolsones de gases que puedan quedar tras la tronadura. Posteriormente se debe realizar una nueva verificación del nivel de agentes químicos.

2.4. ACUÑADURA

Tras normalizarse la ventilación del sector, se debe continuar con la acuñadura que tiene como principal objetivo, detectar tiros quedados, tanto como eliminar posibles caídas de rocas. Por lo mismo es de vital importancia, ya que, al no realizarla, se pone en riesgo la vida del trabajador. Para realizar esta acción se ilumina el sector con la ayuda de focos y se utiliza una grúa con jaula dotada de techo protector y acuñadores metálicos

manuales, el proceso de acuñaatura siempre se realizará en dirección de avanzada y con ángulo de 45°, como se muestra en la Ilustración 2-2.



Fuente: ACHS, 2015

Ilustración 2-2. Representación de Acuñaatura

2.5. EXTRACCIÓN DE MARINAS

El siguiente paso después de inspeccionar las rutas de marina y piques de vaciado, es la extracción de marina. Para ello es primordial realizar una revisión del área de trabajo, confinando el área de ruta de marina, la que es retirada con la utilización de un Scoop de 7 yd³ en cada uno de los puntos indicados por la programación del turno y siguiendo la ruta de extracción de marinas.

Esta etapa del ciclo consta de tres fases: carguío del balde de la pala, transporte del material hacia el pique o acopio destinado y descarga de este.



Fuente: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 2-3. Representación Extracción de Marina

2.6. **MARCACIÓN DE PERNOS DE FORTIFICACIÓN**

Luego de volver a acuñar, se lleva a cabo la demarcación de la ubicación de las perforaciones donde se instalarán los pernos de fortificación de tipo helicoidal y Split Set.

La Tabla 2-2., indica la cantidad mínima de Split Set a colocar dependiendo del tamaño de la sección de la galería. Además, la ubicación de los pernos inicia a 1 metro de altura medida desde el piso.

Tabla 2-2. Cantidad de Split Set dependiendo de sección

Sección [mt]	3,6x3,6	4,0x4,0	4,0x4,5	5,0x5,0	5,0x6,0	6,0x6,0	6,0x6,7	7,0x7,0	7,0x7,8
Nº	8	10	12	16	19	23	26	31	35

Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

2.7. PERFORACIÓN DE FORTIFICACIÓN

El objetivo de esta operación unitaria es reforzar el avance, controlando la caída de roca en la frente de trabajo. Al confinar el sector de trabajo, se procede con la instalación del jumbo en la frente, contando con la presencia del electricista de turno y/o operador de jumbo (quien deberá ser instruido por supervisor eléctrico, con respaldo escrito), quien es responsable de controlar la habilitación de energía eléctrica para el jumbo, tanto en el tendido del cable como en el procedimiento conexión y puesta en servicio. Al momento de realizar el tendido del cable se deben utilizar ganchos con chaqueta plástica aislante.

Una vez en la ubicación, el jumbo se posicionará utilizando “gatos estabilizadores”, antes de iniciar la perforación, se instalará una bomba de drenaje si es necesario debido a la presencia de agua.

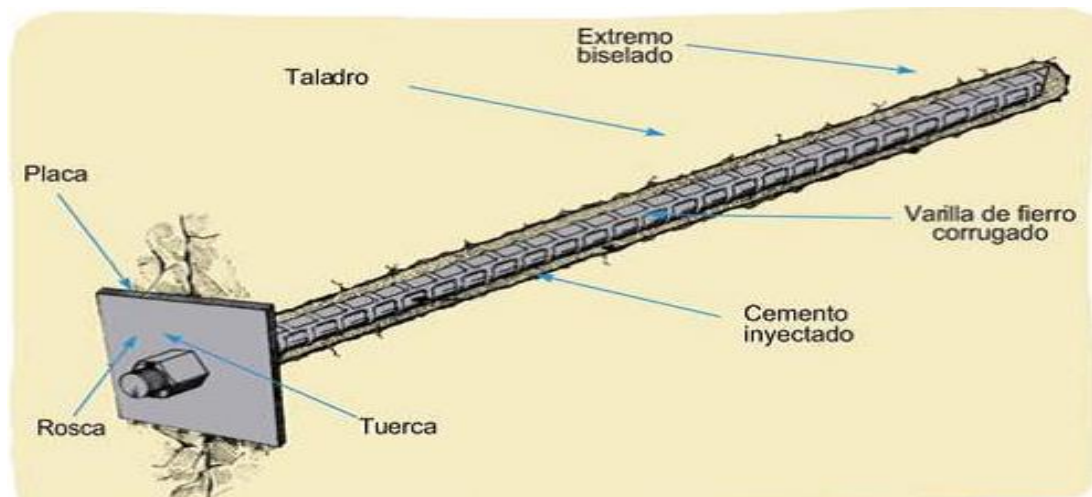
Se iniciará la perforación de los pernos helicoidales contando un metro desde la última parada de pernos existentes hacia la frente y estos se perforarán desde techo a piso, la cantidad depende del tipo de sección como se aprecia en la tabla 2.2 presentada anteriormente.

Terminado el proceso anterior, el jumbo procede a perforar los pernos Split Set que van a la frente y tienen como función principal realizar una fortificación provisoria de esta, con el fin de evitar desprendimiento de roca debido a la ocurrencia de un evento sísmico y facilitar los trabajos posteriores que se realizan en la frente.

Una vez finalizada la perforación, se debe recoger en forma mecanizada el cable de alimentación eléctrica del jumbo, evitando así el sobreesfuerzo por parte del puntero y operador.

2.7.1. Pernos Helicoidales

El perno helicoidal, es una barra de acero cuya sección transversal es ovalada con resaltes en forma de un hilo helicoidal izquierdo (Ilustración 2-4), que actúa en colaboración con un sistema de fijación formado por una placa de acero perforada y una tuerca de fundición nodular, las cuales actúan de forma complementaria para reforzar y preservar la resistencia natural del macizo rocoso.



Fuente: Revista de Seguridad Minera, 2005

Ilustración 2-4. Perno Helicoidal

2.7.2. Pernos Split Set

El sistema de fortificación Split Set, es un sistema estabilizador de rocas que actúa por fricción y consiste en un tubo ranurado o longitudinalmente con un extremo cónico (Ilustración 2-5), para ser insertado en la perforación anteriormente realizada por el jumbo. En el otro extremo lleva un anillo soldado que sirve para sostener la planchuela de acero que actúa como tope del perno.



Fuente: LOCH MINING, 2018

Ilustración 2-5. Perno Split Set y Planchuela

2.8. LECHADO DE PERNOS

Esta etapa, consiste en inyectar una lechada que se compone de mezcla de cemento, agua y aditivo acelerante en cantidades establecidas por fichas técnicas y que tiene como fin sostener los pernos helicoidales en la perforación sujetándose por presión. Esta actividad se realiza con la ayuda de una grúa, dotada de jaula con techo protector, esto para no exponer al trabajador al riesgo ya que se encuentra en zona no completamente fortificada. La lechadora, debe contar con mangueras de alta presión, longitud y diámetro adecuado para poder alcanzar el largo de las perforaciones. El tiempo estimado de fragüe es de 2 [hrs]. Fraguada la lechada, se continúa con la siguiente actividad.

2.9. INSTALACIÓN DE MALLA

Siempre antes de comenzar una actividad del ciclo minero, se debe acuar, hasta que se haya terminado por completo la fortificación. Posterior al acuar luego del lechado de pernos, se realiza la instalación de malla, confinando el área antes de comenzar.

También se utiliza una grúa con jaula protectora. Se utiliza una malla ACMA 10006, que se extiende sobre el techo de la jaula, montándose sobre el eje de la galería para comenzar a fijar los pernos con planchuela y tuerca. Se inicia desde el techo hacia las cajas. Habiendo ya extendido la malla por completo, se comienza con la tensión de los pernos de forma definitiva. Entre malla y malla se debe cumplir con un trasape de 30 [cm], esto quiere decir, una malla encima de la otra con una longitud de 30 [cm]. En la Ilustración 2-7, se muestra su representación:



Figura: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 2-6. Representación Colocación de Malla

2.10. ACONDICIONAMIENTO DE MALLA

También llamado “hilteo”, corresponde a la actividad de aseguramiento de la malla con el fin de obtener el correcto agarre de esta con el cerro debido a la forma uniforme de este, para ello el minero inspecciona el taladro eléctrico portátil, barrena y embute totalmente en cada orificio el taco hilti de cabezal interior de expansión, inmediatamente acerca la malla galvanizada pasando por el bizcocho y la argolla del taco hilti una hebra de alambre del N° 8 que amarra dándole sólo una vuelta con las manos, corta la hebra y tortolea con las tenazas del napoleón. Repite el procedimiento completo hasta que la malla esté totalmente sujeta a las irregularidades del cerro.

2.11. PROYECCIÓN DE SHOTCRETE

El Shotcrete es un tipo de hormigón proyectado de forma neumática a alta velocidad por una manguera conocida como “culebrón” (Ilustración 2-8). Se compone por una mezcla de cemento y agua complementándose con materiales finos como aditivos químicos, acelerantes y/o fibras de refuerzo. Para poder realizar esta actividad, se debe haber lavado la labor (frente, techo y cajas), se realiza una nueva acuñadura y se continúa con el trasvasije desde el equipo mixer al Roboshot, equipo que se utiliza para la proyección de shotcrete. Se recomienda que el trasvasije sea por gravedad. El acelerante debe encontrarse previamente agitado con aire al momento de la utilización. Una vez

proyectado el shotcrete se elimina cualquier obstrucción en el culebrón o pitón (manguera que proyecta el hormigón)



Figura: CODELCO CHILE, 2017

Ilustración 2-7. Representación Proyección de Shotcrete

2.12. PERFORACIÓN DE DISPARO O AVANCE

Esta etapa del ciclo minero consiste en realizar los tiros o perforaciones que luego se cargarán con el explosivo (Ilustración 2-8). Se realiza de acuerdo a un diagrama de disparo dependiendo de la sección de la labor y a una previa marcación de disparo, realizado por topografía. Antes de comenzar con la actividad, el operador debe posicionar el equipo en la postura de trabajo, utilizando los gatos estabilizadores, confinando el área. Se deben tender los cables eléctricos por las cajas de la labor, siempre colgados de un gancho. Se conecta el cable eléctrico a la caja y se instala una bomba de drenaje, el operador realiza el cambio de barras y finalmente se barrenan los tiros, los cuales tienen como longitud de perforación 3,80 ml.



Fuente: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 2-8. Representación Perforación de Disparo en la frente

2.13. **CARGUÍO DE FRENTE**

En esta actividad se realiza el carguío de los tiros de acuerdo al diagrama de perforación correspondiente a la sección de la labor, aquí el supervisor solicita la cantidad de explosivo requerida al polvorín de T-sub 6 a través de vales de explosivos. El retiro se efectúa en una camioneta debidamente acondicionada para el transporte de explosivos y autorizada por SERNAGEOMIN.

Para la manipulación, carguío y transporte de explosivos, el personal a cargo debe contar con la respectiva licencia de manipulador de explosivos, con instrucción específica en el uso y manejo de los mismos.

Antes de cargar los tiros barrenados, se inyectará aire a presión en todas las perforaciones para eliminar el agua y los residuos sólidos (detritus) que puedan impedir una carga de explosivo adecuada en las perforaciones.

Para el carguío de la frente, también se utilizará una grúa con jaula con techo protector (con malla de seguridad). Ver Ilustración 2-11.



Figura: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 2-9. Representación Carguío de frente

La secuencia de carguío será la siguiente:

- Distribuir los cebos, según secuencia de salida, en la boca de los tiros, exceptuando las zapateras que se cargan al final
- Se insertan los cebos en los tiros, empleando coligüe de largo adecuado
- Se continúa con la carga de los tiros ya sea con ANFO o Emulsión, cuando corresponda
- Los tiros que se encuentran en la periferia (cajas y coronas) se cargan con Tronex como cebo, seguido de Softron y finalmente el taco de greda
- Los tiros de zapatera se rellenan con Tronex

La Tabla 2-3, muestra la distribución de explosivos según diseño de los diagramas de disparo:

Tabla 2-3. Distribución de explosivos según diagrama de disparo

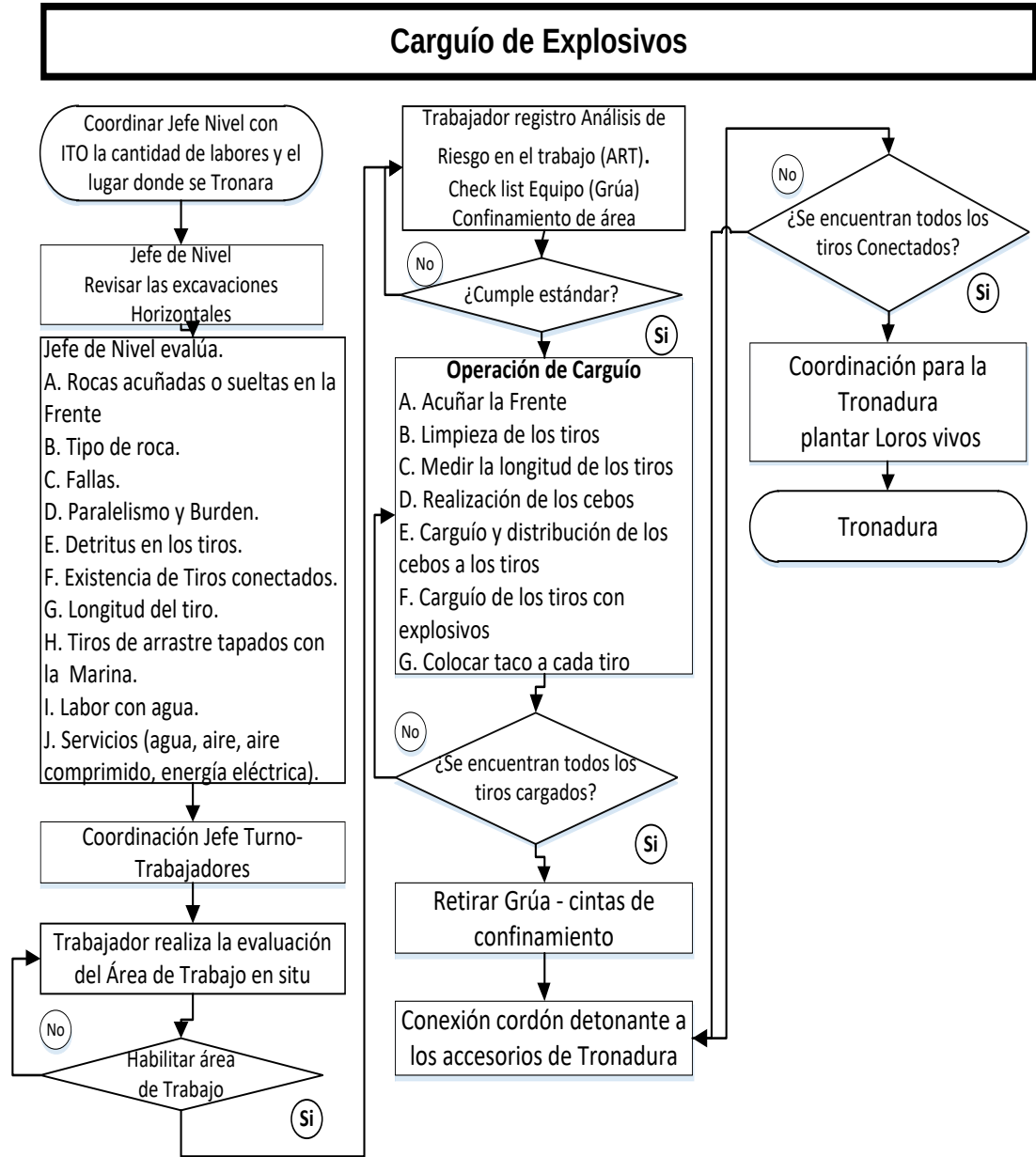
Cebo	Tronex N° 2 de 11/8"x 8"
Zapateras	Tronex N° 2 de 1 1/8"x 8"
Contorno	Softtron 11/16" x 20"
Resto de disparos	ANFO
Iniciación	No eléctrica
Rainura	Retardos de la serie MS
Resto disparos	Retardos de la serie LP

Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Para no generar una sobreexcavación mayor al 12 %, se realizará un uso racional y controlado de los explosivos, debido a que este factor determina el costo de los precios unitarios en los desarrollos horizontales.

Finalmente, se conectan los noneles al cordón detonante. A la vez, se retirarán equipos, insumos, herramientas, envolturas, cajas de explosivos o explosivos sobrantes, quedará nota de ello en el libro de control de explosivos. Se retirarán instalaciones o elementos susceptibles a ser dañados con la tronadura, o se harán las protecciones necesarias para resguardarlos. En las frentes cargadas, se ubicará a una persona encargada de proteger el disparo de iniciación.

Una vez cumplido lo señalado, se informará al jefe de turno, quien solicitará autorización para iniciar la tronadura a personal de inspección para que autorice el carguío. Una vez autorizada la acción de inicio se conectan los dos extremos y fulminante de guías dirigido en dirección al disparo. La actividad se muestra en la Ilustración 2-12.



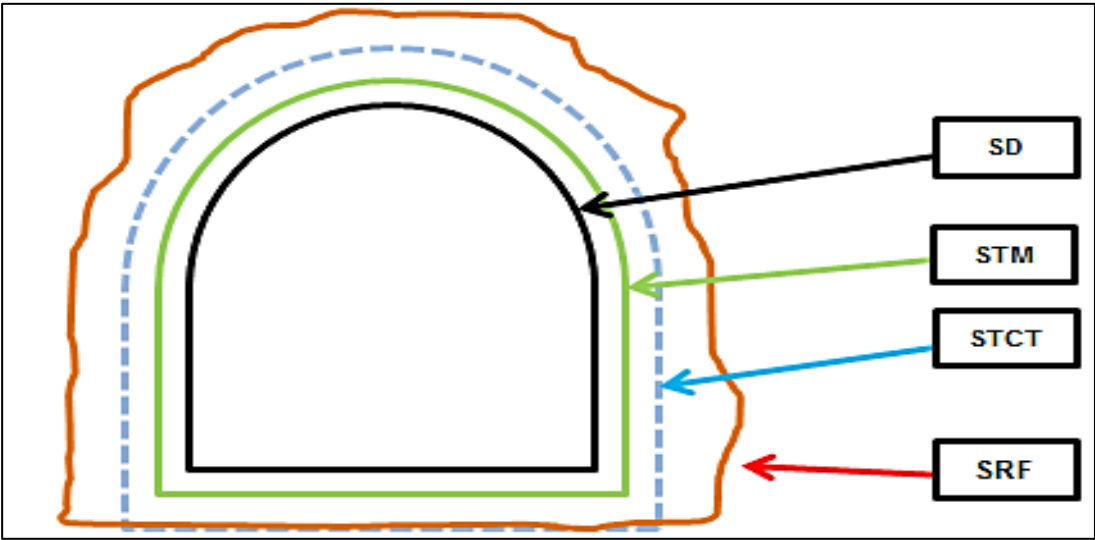
Fuente: GARDILCIC, 2015

Ilustración 2-10. Flujograma Carguío de Explosivos

2.14. **SOBREEXCAVACIÓN CONTRACTUAL**

Dentro del contrato que se suscribe entre la empresa mandante y contratista (constructora) se define cuál es la sobre excavación esperada a la hora de realizar los avances horizontales.

Se indican a continuación los elementos que conforman el diseño de cada sección de galería, en la Ilustración 2-11.



Fuente: GOBM, 2015

Ilustración 2-11. Sobreexcavación

En la Tabla 2-4, se entrega el detalle del límite de las tolerancias para cada sección teórica:

Tabla 2-4. Límite de tolerancias por sección teórica

Sección[mt]	3,6x3,6	4,0x4,0	4,0x4,5	5,0x5,0	5,0x6,0	6,0x6,0	6,0x6,7	7,0x7,0	7,0x7,8
SD [m²]	11,57	14,42	18,28	22,57	27,32	32,39	38,14	46,42	53,35
STCT [m²]	13,4	16,39	20,63	25,16	30,17	35,48	41,49	50,1	57,29
%	14%	12%	11%	10%	9%	9%	8%	7%	7%

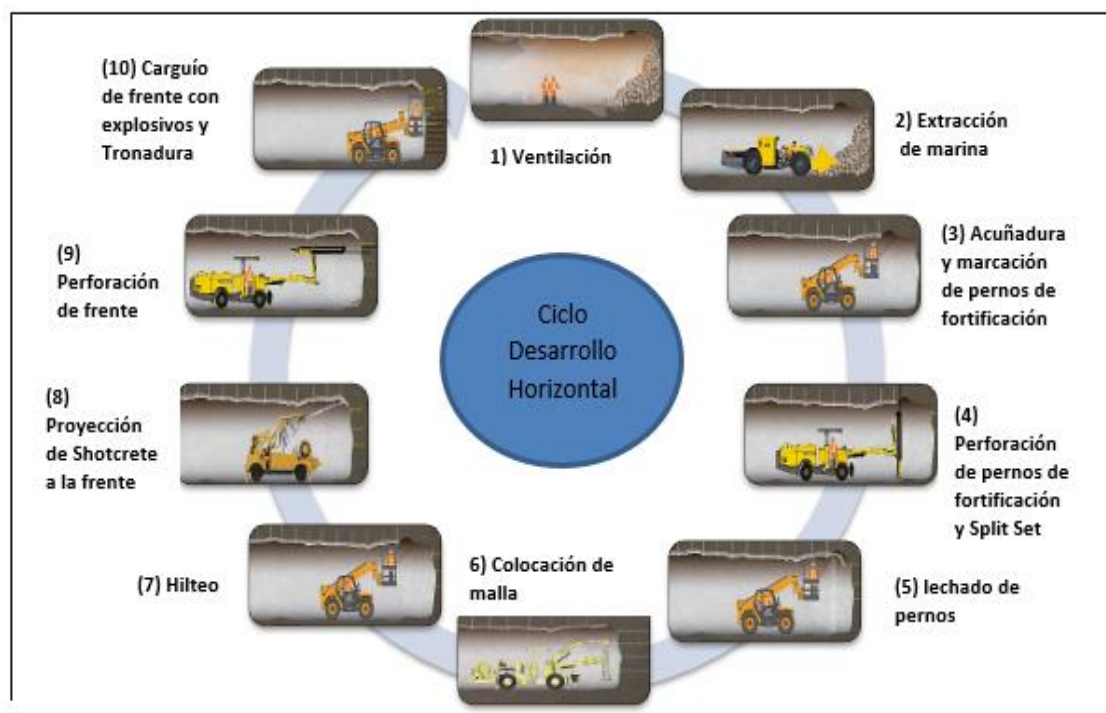
Fuente: GOBM, 2015

Se define:

- **SD:** Sección de Diseño: Sección indicada en los planos de diseño de excavación minera
- **STM:** Sección Teórica Media: Sección esperada producto de desviación de perforación (3º)
- **STCT:** Sección Teórica con Tolerancia: Corresponde a la Sección Teórica Media, más la tolerancia permitida, para cada sección

- **SRF:** Sección Real Final: Es el área promedio final obtenida a partir de secciones topográficas tomadas a 1,75 ml de cada disparo de avance. Se considera una longitud de perforación de 3,5 ml. Esta sección promedio final corresponde a la medida en un período de trabajo (mes) o una longitud definida (metros)
- **SE:** Sobre excavación: Existe **SE** cuando la **SRF** es mayor a la **STCT**, para cada las diferentes secciones. (Sobreexcavación, 2015)

En relación con lo mencionado anteriormente, el ciclo minero se presente en la siguiente forma, donde muestra la secuencia en que se desarrollan estos procesos.



Fuente: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 2-12. Ciclo de Construcción de túneles para desarrollos Mina

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE SOBREEXCAVACIÓN

3. ANÁLISIS DE SOBREEEXCAVACIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

El estudio nace bajo la creciente necesidad de reducción de tiempos en minería y la consecuente disminución de costos, para ello se identificó una variable crítica presente en los desarrollos horizontales, la cual corresponde a la sobreexcavación. La posible mejora de ésta, más allá de las ventajas económicas, también implica una menor exposición de horas hombre al realizar esta actividad y por ende, una reducción a la exposición de los trabajadores a los riesgos inherentes de la acción.

Por lo anterior, el desafío entonces es optimizar la sobreexcavación y a su vez optimizar la productividad de las labores mineras.

3.2. CONSIDERACIONES PREVIAS

La recopilación de la información recolectada en la Mina Esmeralda se realizó en terreno considerando el avance en metros lineales (ml) en un periodo mensual, para ello, la información utilizada se obtiene de:

- Datos topográficos de sobreexcavación
- Fotografía ADAM (sistema de fotografías en 3D)

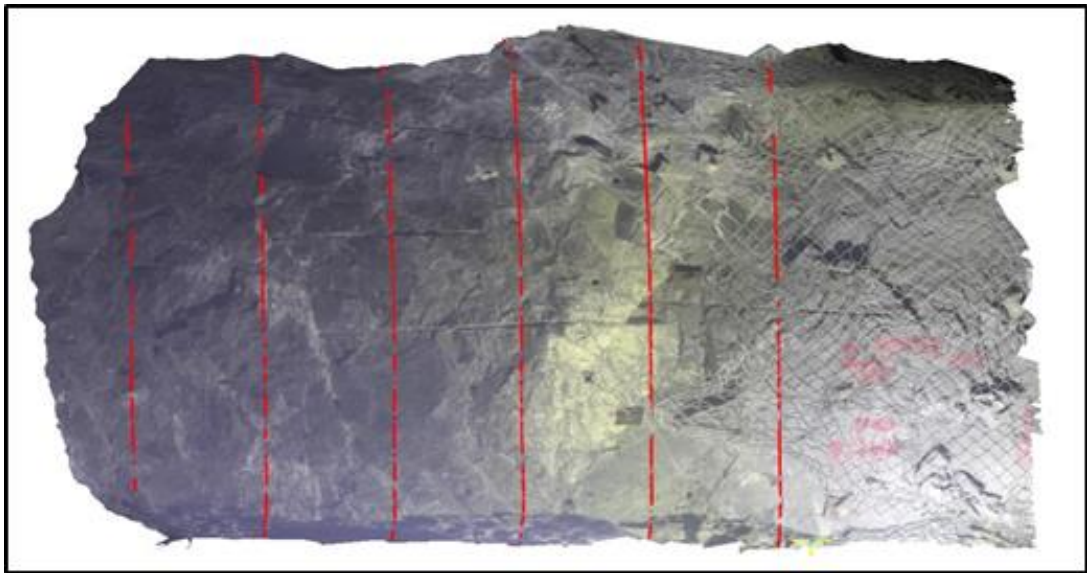
Se definen las siguientes consideraciones en la evaluación:

- Información recolectada correspondiente a sub o sobreexcavación
- Las mediciones se realizarán en los niveles de producción y hundimiento

Para obtener el modelo 3D de la galería, es necesario analizar las 16 fotografías, más los 4 puntos coordinados necesarios. Con el procesamiento de los datos, tanto de las fotografías, más las coordenadas, se obtiene un modelo de la excavación.

Se debe realizar una triangulación de la zona de roca descubierta con el fin de obtener todos los datos necesarios para realizar el presente estudio. Por ese motivo se procesa el DTM con el fin de eliminar la superficie o triangulación de la zona fortificada,

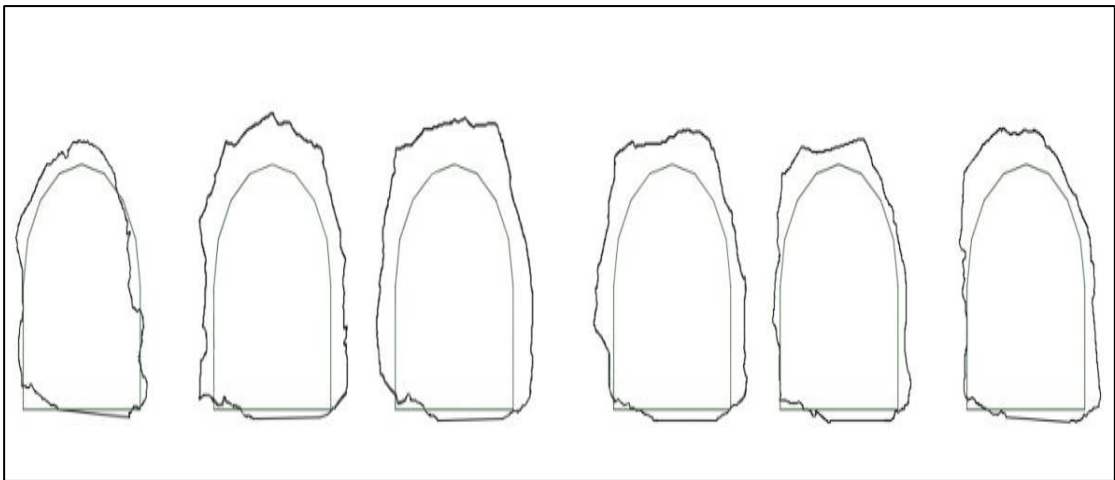
y manteniendo la superficie de roca. Esto se debe realizar sobre la totalidad de modelos en 3D que contengan el área estudiada, ver Ilustración 3-1.



Fuente: CODELCO CHILE, 2018

Ilustración 3-1. DTM

Los perfiles topográficos utilizados para el estudio se obtienen de la triangulación que da como resultado la superficie solo con roca. Paso seguido se debe comparar cada modelo de perfil de galería obtenido a partir de los DTM con las secciones de galería de diseño o teórica (Ver ilustración 3-2), con el fin de obtener la sobre excavación asociada.



Fuente: CODELCO CHILE, 2018

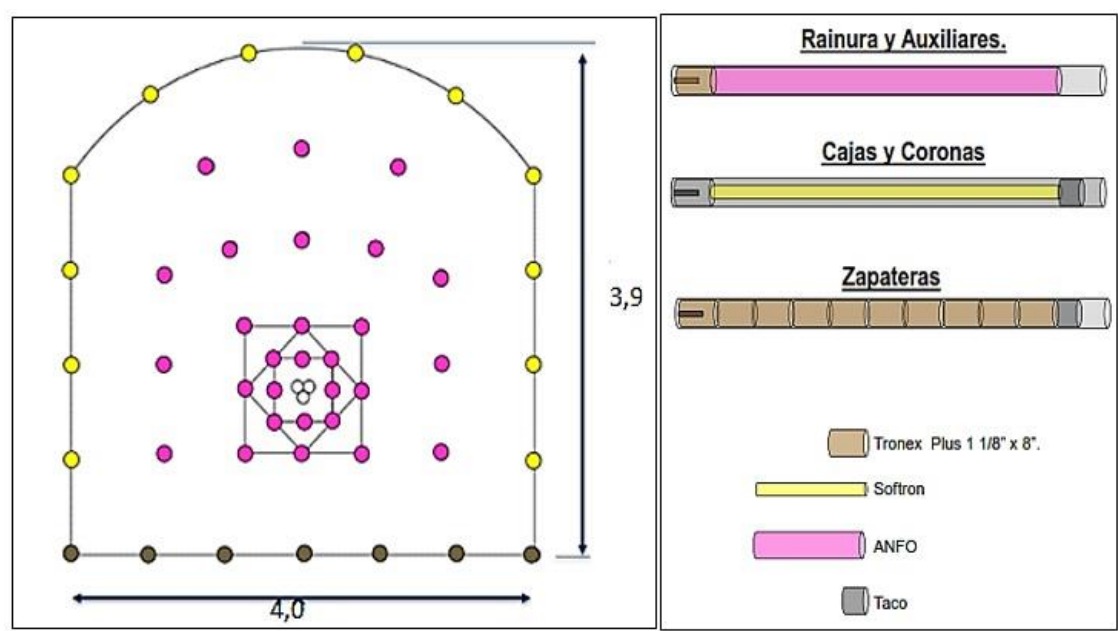
Ilustración 3-2. Perfiles Topográficos

3.3. UTILIZACIÓN DE ANFO

A continuación, se realizará el análisis de la sobreexcavación, considerando la utilización de ANFO en el desarrollo de avance minero.

3.3.1. Línea Base

Se realiza la línea base de tronadura con el explosivo tipo ANFO, que es el utilizado tradicionalmente en la Mina Esmeralda, para lo cual se presenta el diagrama que se muestra en Ilustración 3-3.



Fuente: GEOVITA, 2016

Ilustración 3-3. Diseño del Diagrama de Perforación para ANFO

La distancia entre estos tiros de rainura es de 0.20 [mt] y el criterio de carguío es iniciar la serie de MS (milisegundos) del 1° al 4°, el tiro de rainura que esté más cerca al tiro de alivio, siempre es el primero en la distribución de MS (Un milisegundo es el período que corresponde a la milésima fracción de un segundo).

Los cuadrantes restantes se cargan con la serie LP (detonador No-Eléctrico de retardo tipo Largo Período), del 7° al 14°, siendo en total 16 tiros de producción se carga al fondo del tiro un sebo Tronex plus 1 1/8” x 8” (2 unidades/tiro), seguido por una columna de ANFO de 3,40 [mt] más un taco de greda de 0.20 [mt].

Los tiros de ayuda de rainura, de hastiales y de corona se cargan con un sebo Tronex plus 1 1/8” x 8” (1 unidad/tiro) más la columna de ANFO de 3 [mt] más un taco de greda de 20 [mt].

Los tiros de hastiales y corona se cargan con un sebo Tronex plus 1 1/8” x 8” (1 unidad/tiro más Softtron 11/16” x 20”, 6 unidades/ tiro) más un taco de greda de 20 [cm].

Los tiros de zapatera se cargan con cebo Tronex plus 1 1/8” x 8” (2 unidades/tiro) y la columna de 3,40 [cm] cargado con ANFO Premium más dos tacos de greda de 20 [[cm]/tiro].

Los tiros de rainura son los más importantes de la malla, pues si fallan, la tronadura no cumplirá con los rendimientos esperados.

El tiempo del ciclo total de perforación es de 3,47 [hrs], mientras que, los equipos utilizados son: Jumbo Frontal y Bomba de Drenaje, mientras que el personal requerido corresponde a un operador y un ayudante.

3.3.2. Pruebas en Terreno

Para poder realizar el análisis, se consideró la toma de información en terreno de 9 frentes a analizar en Mina Esmeralda, las cuales actualmente se cargaban con ANFO, con el fin de obtener un detalle más acabado de las variables a considerar.

Definido lo anterior, las mediciones obtenidas por fecha, ubicación y tipo de sección se entregan en la Tabla 3-1.

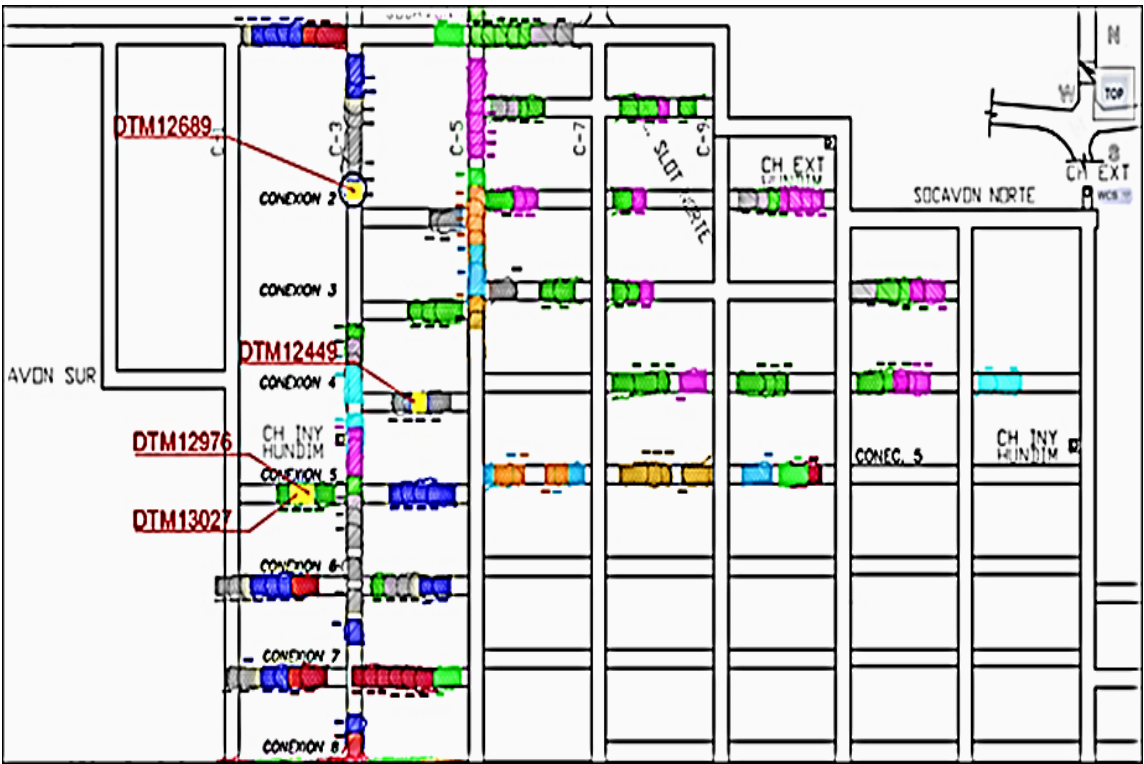
Tabla 3-1. Sectores a Analizar

Postura	C45 N Acceso 5	C43 S Acceso 5	C29 S XC5	Rampa N°2 FW	C43 S Z40	C47 S Z49	C51 S Z44	Z41 HW C45	XC Acc 6 HW C31
Nivel	UCL	UCL	UCL	UCL	NP	NP	NP	NP	UCL
Sección	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9	4 X 3,9
Fecha Tronadura	12.02.18	12.02.18	15.02.18	20.02.18	27.02.18	01.03.18	01.03.18	06.03.18	08.03.18
DTM	12689	Marina	12449	Rotura	12976	12978	Error topo.	13027	Marina

Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Según lo presentado en la Tabla 3-1, se logró obtener mediante la fotografía ADAM, un total de 5 DTM (Modelos Digitales de Terreno), que representan fielmente la geometría existente en los sectores indicados.

A su vez, se presenta la Ilustración 3-5, la cual entrega la ubicación de los DTM a utilizar para el estudio.



Fuente: Planos Topográficos - Mensuras GEOVITA, 2016

Ilustración 3-4. Nivel de Hundimiento Mina Esmeralda

3.3.3. Sobre Excavación

Es necesario conocer el área teórica y, el área teórica con tolerancias de cada sección, con el fin de comparar estos valores a los obtenidos en terreno, mediante el modelamiento 3D, este análisis permitirá obtener el resultado de la sobreexcavación. Esta información se obtiene del plano oficial del sector Esmeralda. Según lo anterior, se obtiene la Tabla 3-2, la cual entrega la información mencionada.

Tabla 3-2. Sobreexcavación ANFO

DTM	Nivel	Perfil	Metro	Área real Excava da [m²]	Área sección proyectada Teórico [m²]	Sección Proyecta da [%]	Dif. Real Excava da [m²]	Sobre Excavació n [%]
12689	UCL	P1	0,5	19,6	15,6	100	4,0	25,64
		P2	1,0	20,8	15,6	100	5,2	33,33
		P3	1,5	22,4	15,6	100	6,8	43,59
		P4	2,0	19,3	15,6	100	3,7	23,72
		P5	2,5	19,5	15,6	100	3,9	25,00
		P6	3,0	17,4	15,6	100	1,8	11,54
12449	UCL	P1	0,5	20,4	15,6	100	4,8	30,77
		P2	1,0	19,6	15,6	100	4,0	25,64
		P3	1,5	20,4	15,6	100	4,8	30,77
		P4	2,0	19,7	15,6	100	4,1	26,28
		P5	2,5	23,5	15,6	100	7,9	50,64
		P6	3,0	19,5	15,6	100	3,9	25,00
12976	NP	P1	0,5	22,1	15,6	100	6,5	41,67
		P2	1,0	21,5	15,6	100	5,9	37,82
		P3	1,5	19,7	15,6	100	4,1	26,28
		P4	2,0	19,3	15,6	100	3,7	23,72
		P5	2,5	21,1	15,6	100	5,5	35,26
		P6	3,0	20,4	15,6	100	4,8	30,77
12978	NP	P1	0,5	21,7	15,6	100	6,1	39,10
		P2	1,0	20,4	15,6	100	4,8	30,77
		P3	1,5	20,6	15,6	100	5,0	32,05
		P4	2,0	17,9	15,6	100	2,3	14,74
		P5	2,5	22,5	15,6	100	6,9	44,23
		P6	3,0	18,8	15,6	100	3,2	20,51

Tabla 3-2. Sobreexcavación ANFO (continuación)

DTM	Nivel	Perfil	Metro	Área real Excava da [m²]	Área sección proyectada Teórico [m²]	Sección Proyecta da [%]	Dif. Real Excava da [m²]	Sobre Excavació n [%]
13027	NP	P1	0,5	22,9	15,6	100	7,3	46,79
		P2	1,0	18,2	15,6	100	2,6	16,67
		P3	1,5	18,6	15,6	100	3,0	19,23
		P4	2,0	20,5	15,6	100	4,9	31,41
		P5	2,5	20,7	15,6	100	5,1	32,69
		P6	3,0	20,3	15,6	100	4,7	30,13

Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Lo anterior se puede resumir por DTM y postura asociada según la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Características Disparo

Características Disparo	
Ancho [mt]	4,20
Alto [mt]	3,90
Línea de gradiente [mt]	1,00
Densidad [gr/cc]	2,60
Área de Sección [m²]	16,30
Longitud perforación [m]	3,80
Volumen a remover [m³]	62,20
Tonelaje a remover [ton]	168,00
Diámetro de perforación [mm]	45,00
No. Tiros Totales [#]	51,00
Tiro de alivio - 6" [#]-> numero	3,00
Longitud taco [m]	0,70
Carga lineal ANFO [kg/m]	1,40

Tabla 3-3. Características Disparo (continuación)

Características Disparo	
Factor de carga [kg/m³]	3,20

Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

3.4. **CAMBIO DE EXPLOSIVO**

Actualmente y como se ha mencionado con anterioridad, el problema latente crítico, se encuentra en la sobreexcavación, ya que, al presentar valores considerables, implica tener mayor costos en todas las actividades del ciclo minero, su vez, a las empresas contratistas que son las encargadas de realizar la tarea del avance minero, solo se les paga por la sobreexcavación generada hasta la sección con tolerancia, toda fortificación excedente o actividades relacionadas extras, donde haya que realizar, son consideradas a costo de las empresas, he implican que, en ciertas oportunidades, este no se vuelva un negocio rentable. Este costo extra alcanza inclusive hasta un 30% del valor normal.

Cabe destacar que, el ANFO crea fracturas extensas pero discretas (Crack zone), mientras que la emulsión ocupa su energía en triturar un halo circundante a la perforación, de manera intensiva y sin generar fracturas discretas extensas que contribuyan a dañar la geometría circundante al disparo.

Por lo anterior y con el fin de minimizar estos costos y entregar un valor agregado al proceso, se consideró la utilización de emulsión como explosivo para las tronaduras, generando en terreno una cantidad de 40 pruebas.

3.4.1. **Pruebas en Terreno**

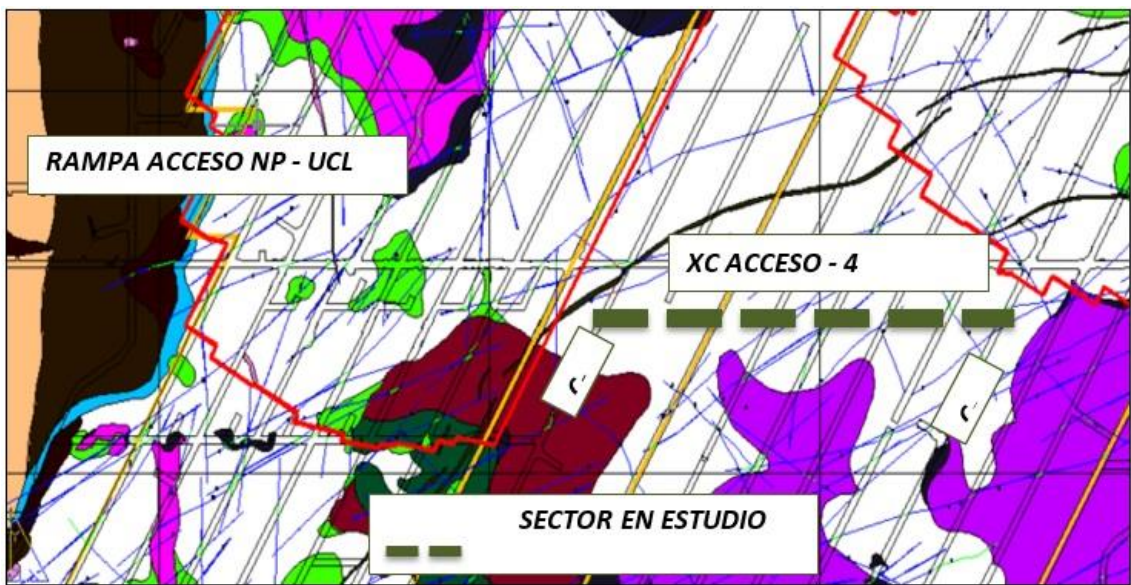
Las pruebas en terreno se realizan en tres minas diferentes que corresponden a: Mina Esmeralda, Mina Diablo Regimiento y Mina Reservas Norte, con la colaboración de las empresas contratistas presentes en estos sectores, se consideraron las tronaduras solo en los niveles de producción y hundimiento.

Para ello, es necesario no solo considerar la medición en terreno de los datos obtenidos en la tronadura, sino que, registrar in situ las diferentes actividades e interferencias asociadas al proceso, considerando los equipos y el recurso empleado.

3.4.2. Litología

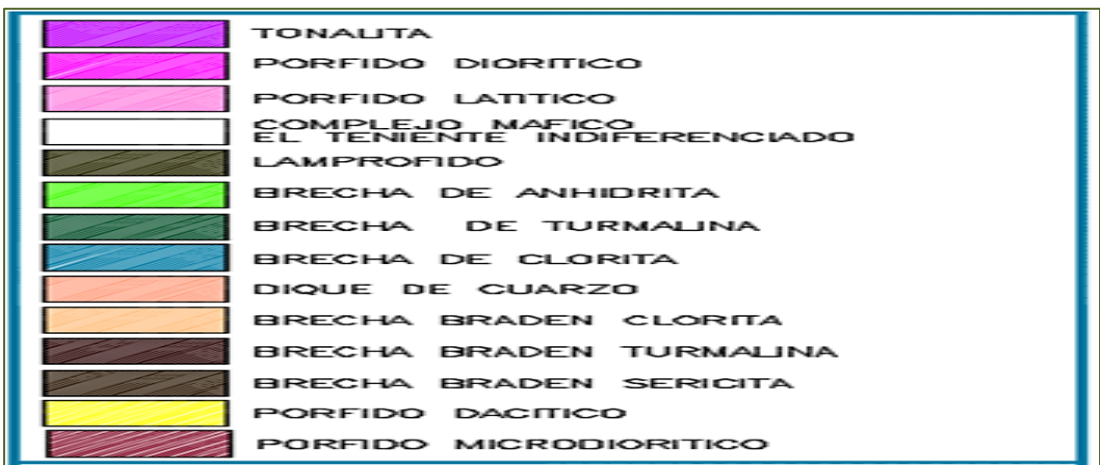
Antes de lograr definir el posible diagrama de disparo para la utilización de emulsiones, es necesario considerar la litología como variable, para poder optimizar el resultado final de la tronadura.

Se inician las pruebas en la Mina Esmeralda en nivel de hundimiento ubicado en el sector sur, pues ésta es considerada como una zona estable y se programó la construcción de 500 [mt] de galería. Ver Ilustración 3-5 e Ilustración 3-6.



Fuente: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 3-5. Mapa de sector a estudiar



Fuente: CODELCO, Chile, 2016

Ilustración 3-6. Litología del Sector

3.4.3. Modificación del Diagrama de Disparo para Emulsión

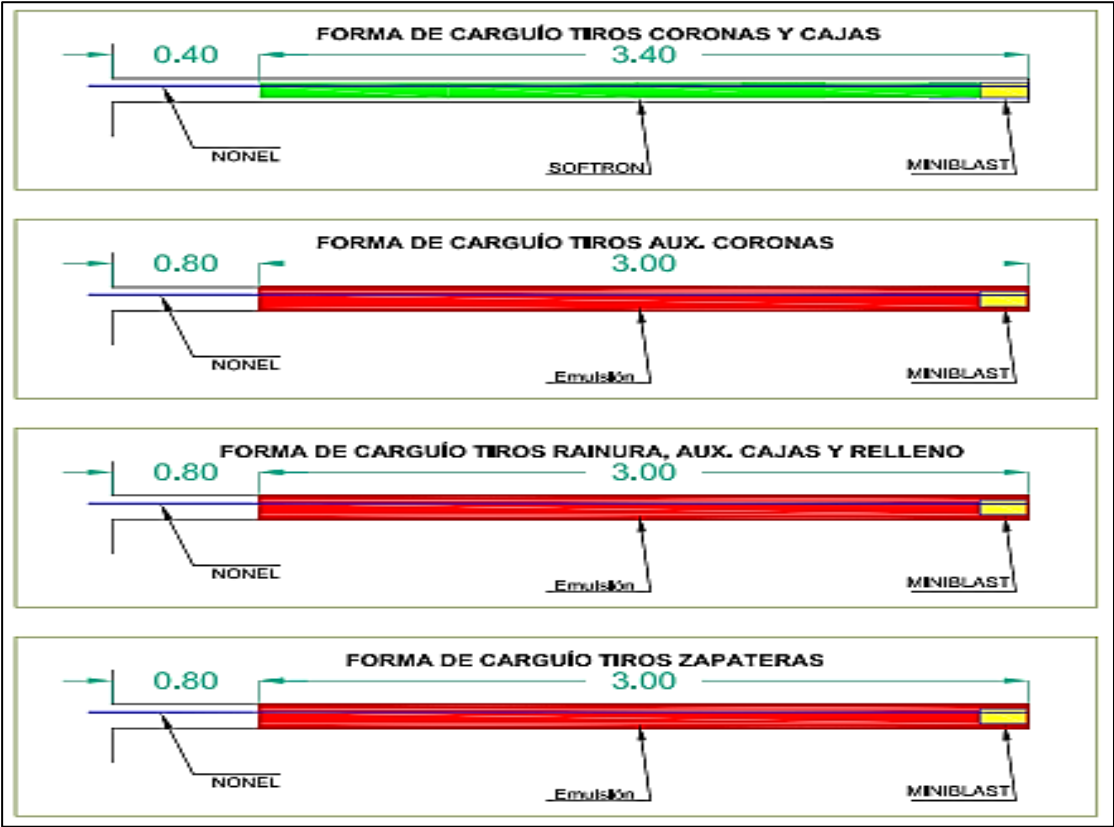
The diagram illustrates a dome structure with a central square plan and a semi-circular apse. The plan view shows a central square with an inscribed diamond and two small circles. The dome's profile is a semi-circle with a radius of 1.00. The base of the dome is a rectangle with a width of 4.00 and a height of 3.9. The dome's surface is divided into segments by lines connecting numbered points (1-38). The dome's profile is a semi-circle with a radius of 1.00. The base of the dome is a rectangle with a width of 4.00 and a height of 3.9. The dome's surface is divided into segments by lines connecting numbered points (1-38). The dome's profile is a semi-circle with a radius of 1.00. The base of the dome is a rectangle with a width of 4.00 and a height of 3.9. The dome's surface is divided into segments by lines connecting numbered points (1-38).

Ilustración 3-7. Malla de Perforación P&T con Emulsión

Los tiros de corona se perforan con un espaciamiento de 0.76 [mt] y un burden de 0.7 [mt]. Son cargados con Softron, explosivo para tronadura amortiguada, en cartuchos de 11/16” x 20” (5 unidades/tiro) e iniciados con APD de 40 [gr], los tiros auxiliares de corona se perforan con un espaciamiento de 0.76 [mt] y son cargados con emulsión e iniciados con APD de 40 [gr] (1unidades/tiro).

Los tiros interiores, ya sean auxiliares de caja, tiros de descarga o tiros de rainura, se cargan con Emulsión Subteck Charge, cuya densidad final es de 1,1 [g/cc], iniciados con APD de 40 [gr] (1 unidad/tiro) sin taco.

En los tiros de zapateras se emplea emulsión con un espaciamiento de 0.7 [mt]. Ver Ilustración 3-8.



Fuente: GRMD, 2016

Ilustración 3-8. Forma de Carguío con Emulsión Subteck Charge

Lo anterior se resume en la Tabla 3-4, a continuación:

Tabla 3-4. Detalles de Carguío

DETALLES DE CARGUIO		EXPLOSIVO	CANTIDAD
Tiro Coronas		-	6
Primado - MINIBLAST		40 [gr]	1
Carga Columna - SOFTRON		11/16" x 20"	6
Tiro Aux. Coronas		-	3
Primado - MINIBLAST		40 [gr]	1
Carga Columna -EMULSIÓN		Emulsión	21.95 [kg]
Tiros de Caja		-	6
Primado - MINIBLAST		40 [gr]	1
Carga Columna - SOFTRON		11/16" x 20"	6
Tiros Aux. Cajas		-	6

DETALLES DE CARGUIO		EXPLOSIVO	CANTIDAD
Primado - MINIBLAST		40 [gr]	1
Carga Columna - SOFTRON		11/16" x 20"	6
Tiros Aux. Cajas		-	6
Primado - MINIBLAST		40 [gr]	1
Carga Columna -EMULSIÓN		Emulsión	32.92 [kg]
Tiros de Rainura		-	14
Primado - MINIBLAST		40 [gr]	1
Carga Columna -EMULSIÓN		Emulsión	76.82 kg

Fuente: GRMD, 2016

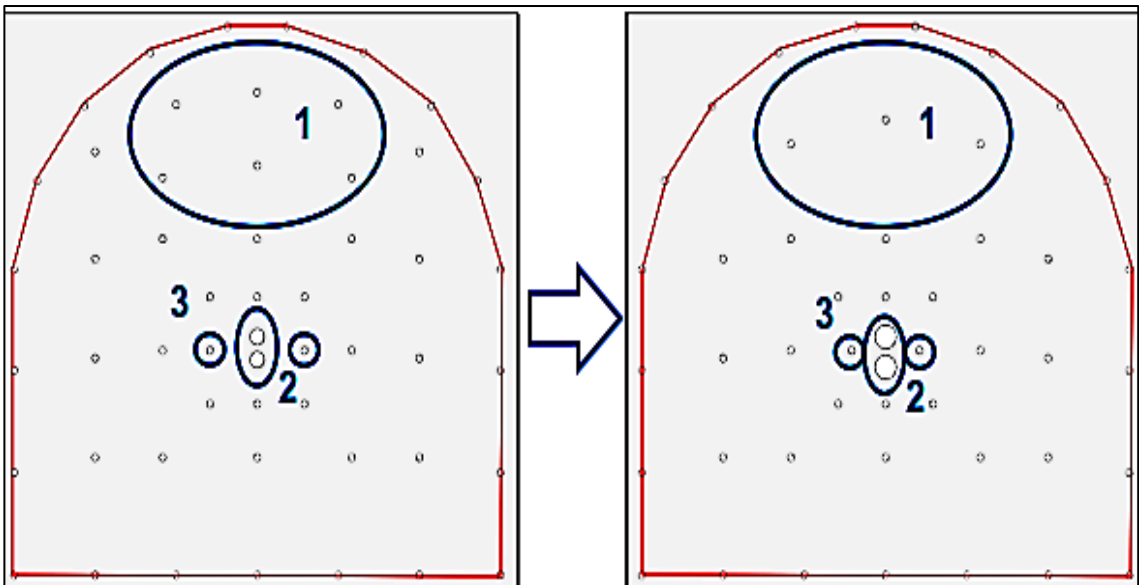
3.4.4. Optimización de la Malla de Perforación

Por último, se realiza una última mejora en la malla de perforación, considerando un estudio realizado por la empresa ORICA, la cual prestó el servicio técnico y de carguío de explosivo realizando el análisis del VOD, que permite controlar la calidad de explosivo.

Al analizar los resultados obtenidos en términos de fracturas, se entiende que se está generando mucho daño en el techo, debido a la densidad de tiros en la parte superior de la frente (tiros auxiliares de corona más relleno), lo mismo se ve en términos de energía.

Adicionalmente, se determina que la distancia primer disparo/tiros de alivio no es óptima.

A continuación, se presentan las modificaciones realizadas al efectuar el cambio de explosivo ANFO por emulsión SUBTEK, ver Ilustración 3-9.



Fuente: ORICA, 2018

Ilustración 3-9. Diagrama Modificado. Lado izquierdo teórico recibido y lado derecho diseño optimizado

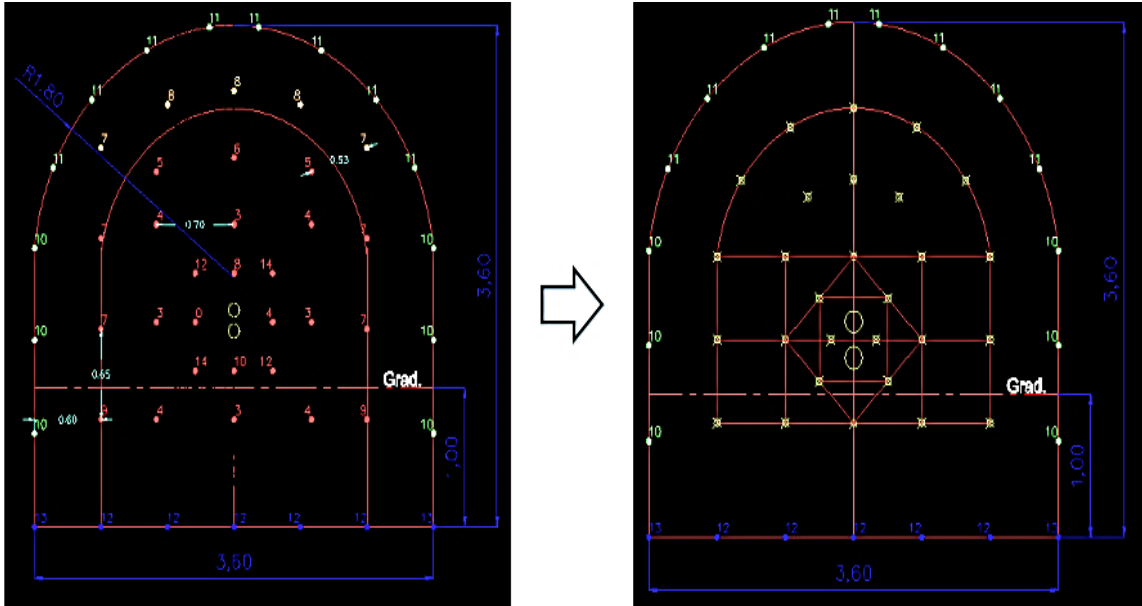
Como se logra apreciar, las modificaciones fueron:

- a. Se eliminan tiros auxiliares de corona y corrieron hacia arriba tiros de relleno
- b. Se modificó el diámetro de tiros de alivio de 4” a 6”
- c. Se movieron los tiros de alivio 10 [cm], a los tiros centrales de la rainura

En las imágenes de resultados de tronadura usando ANFO, se observa que el efecto de los tiros auxiliares de corona, generan por si solos, sobre excavación, se ve claramente que el mecanismo de fractura del ANFO/Emulsión es totalmente distinto.

3.4.5. Diseño Final

En este punto se entregan los detalles de la propuesta final de un diseño de tronadura alternativo, implementado como resultado de las evaluaciones realizadas al diseño de calibración, obteniendo así, el diagrama presentado en la Ilustración 3-10.

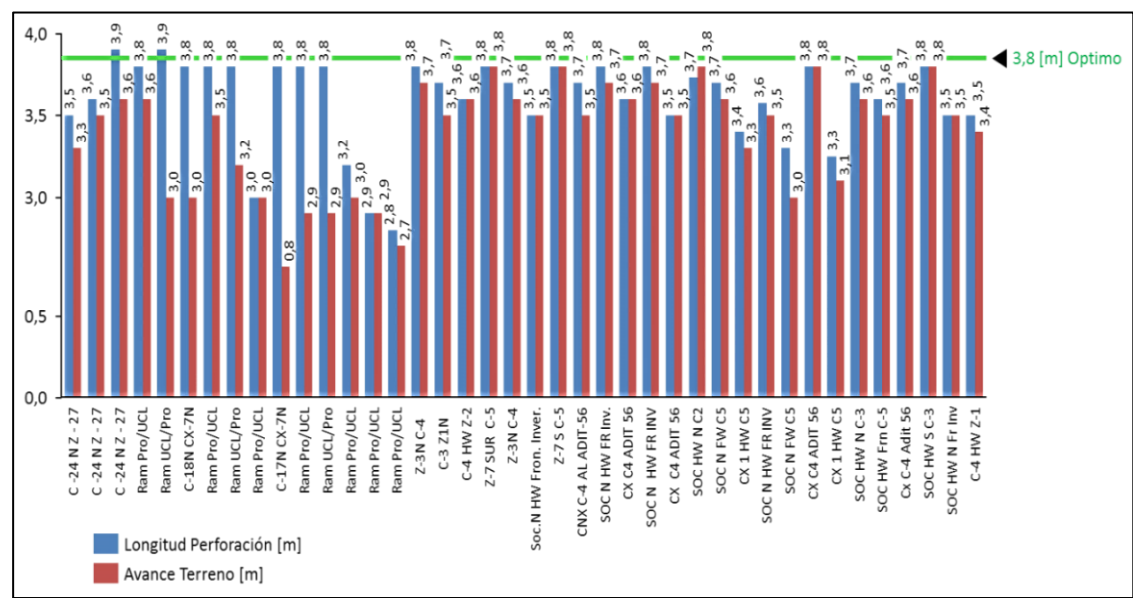


Fuente: CODELCO CHILE, 2016

Ilustración 3-10. Diseño Final

3.4.6. Longitud de Perforación

Otro aspecto importante por considerar y que afecta el resultado de la tronadura es la longitud de la perforación, para ello se analizó el largo de cada perforación realizada, obteniendo los resultados que se muestran en la Ilustración 3-11.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración 3-11. Resultado largo perforaciones

Los resultados en los avances fueron en un 95% de eficiencia, la longitud de perforación promedio es de 3,7 [ml]. La Ilustración 3-11, muestra la longitud de tiro promedio para cada frente de avance, las barras de color azul indican la longitud de perforación y las barras de color rojo son los resultados de avance en [ml].

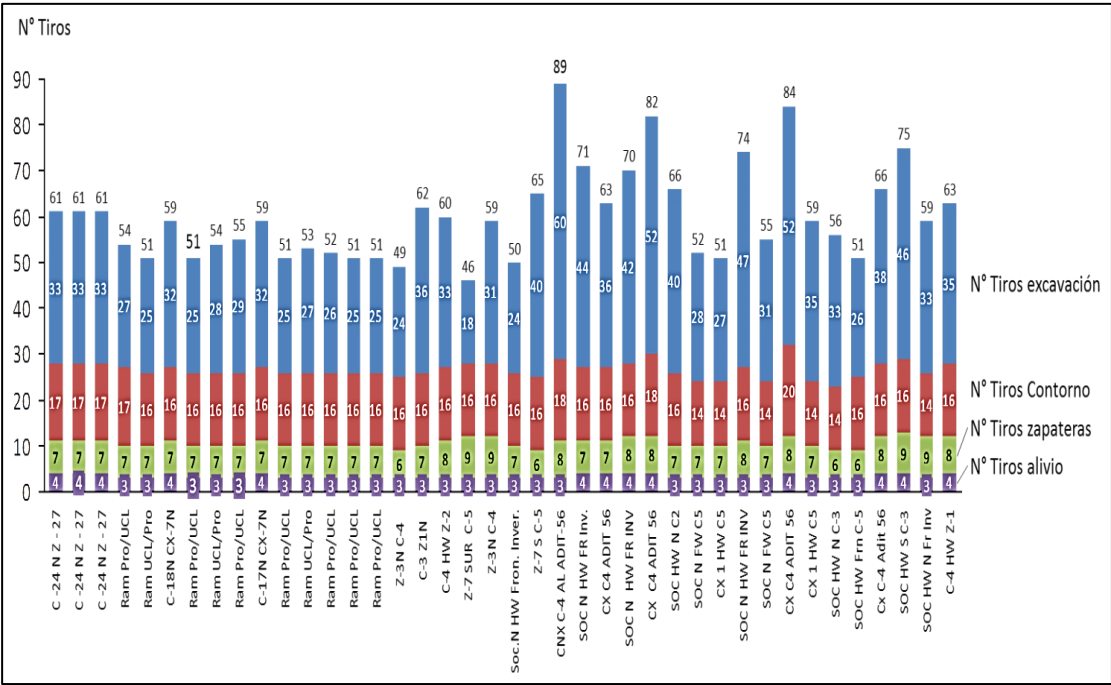
La longitud de perforación esperada es de 3,8 [mt]. Las mediciones realizadas en todas las Minas, dan como resultado una longitud de avance promedio utilizando ANFO de 3,2 [ml]. Con Emulsión se tiene un avance promedio de 3,5 [ml].

Las razones por las que no se puede alcanzar la longitud esperada de 3,8 [mt] es:

- Postura con el frente no vertical en el anterior disparo, para solucionar este problema, el operador del Jumbo ubica la sección asignándole a la perforación una longitud mayor a la parte sobresaliente de la postura, esto delimita la longitud y su perforación es menor a lo esperado
- La longitud final de perforación normalmente es menor, porque no se lleva el buen paralelismo de la perforación en la rainura o existe diferente longitud de perforación en cada postura
- Se respetó el diagrama optimizado de ORICA, en la perforación del carguío de explosivo

3.4.7. Número de tiros cargados por postura

Otro aspecto importante a considerar, corresponde a la cantidad de tiros cargados por perforación, lo anterior se presenta en la Ilustración 3-12.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración 3-12. Número de tiros cargados según postura

La cantidad de tiros perforados, depende del tamaño de sección en cada frente, existe un diseño entregado por DET, además, al momento de realizar la oferta técnica, las empresas especializadas indican los procedimientos para ejecutar todo tipo de actividades constructivas, pero las mallas de perforación entregadas no consideran la litología de la roca.

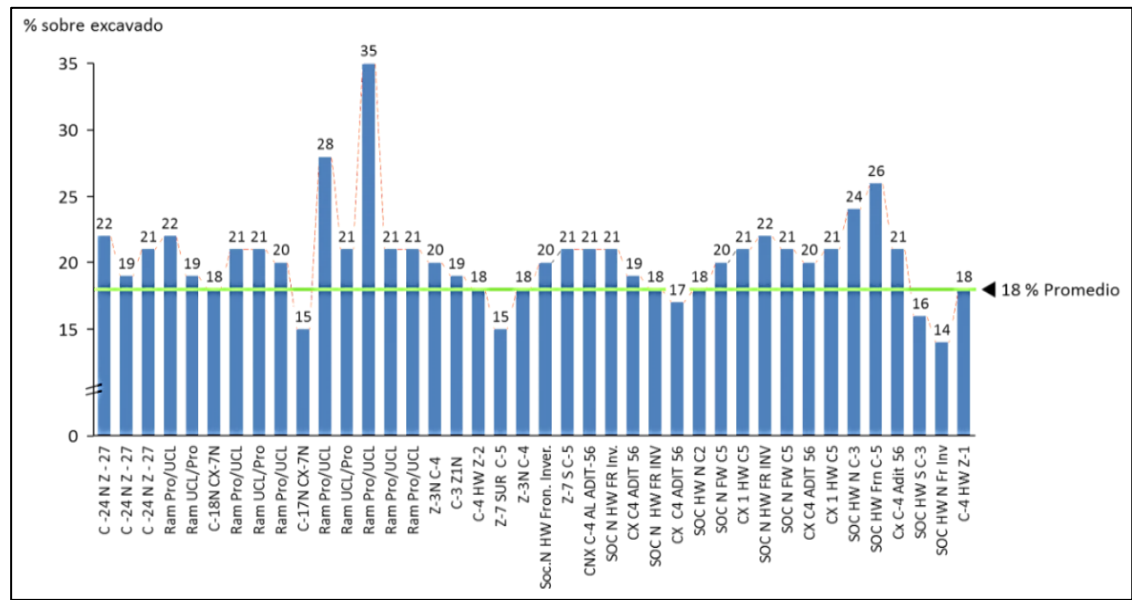
3.4.8. Carguío de Explosivo

Las primeras 15 pruebas se realizaron en la Mina Reno y Esmeralda, donde se realizó el carguío con emulsión encartuchada (Emultex 1 ¼” x 16”), En la Ilustración 3-12, cada barra indica cómo se cargó y la cantidad de explosivos utilizados en la frente.

En cada tiro se instaló un APD de 150 [gr], seguido por emulsión encartuchada (1 ¼ x 16), más un taco de greda. Toda la periferia se carga con un APD de 150 [gr], más Softron (11/16” x 20”) y un taco de greda de 0,20 [mt].

En las 25 pruebas restantes se cargó con APD de 150 [gr], más la Emulsión a granel Subteck Charge, la periferia que son los hastiales y las coronas se carga con Softron (11/16” x 20”), sin taco. La Empresa ORICA, vende el producto Emulsión a granel Subteck Charge y el servicio del carguío de explosivo.

En los protocolos se estipuló que las empresas de obras mineras como Gardilcic, Mas Errazuriz y Geovita, entregarían la frente perforada con los tiros limpios y realizaban la coordinación para la tronadura y tronaban. ORICA cargaría el explosivo.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración 3-13. Sobreexcavación Emulsión

CONCLUSIONES

Como se aprecia existen varios tipos de explosivos que pueden ser utilizados, donde la decisión final radica netamente en las circunstancias y características necesarias para el desarrollo. Si bien se entrega una pauta de los explosivos a utilizar, en la práctica esto puede variar debido a las condiciones que se puedan presentar al momento de cargar los tiros, es fundamental que los trabajadores que desarrollen esta función tengan un conocimiento acabado sobre los explosivos y cuenten con las correctas certificaciones de manipulación de explosivos.

Debido a la realidad presente en Mina El Teniente, el explosivo más utilizado para realizar tronaduras es el ANFO, el cual en la actualidad está generando grandes desviaciones en los resultados de la sobreexcavación, es por lo mismo que se genera la posibilidad de implementar la emulsión como explosivo principal a utilizar.

Los desarrollos horizontales estudiados, se encuentran en el nivel de producción y hundimiento de la Mina Esmeralda. Se han definido 10 procesos que conforman el ciclo minero de avance:

- Ventilación
- Retiro de marina
- Acuñadura y marcación de pernos de fortificación
- Perforación de pernos de fortificación y Split Set
- Lechado de pernos
- Colocación de malla
- Hilteo
- Proyección de Shotcrete a la frente
- Marcado y Perforación de frente
- Carguío de frente con explosivos y Tronadura

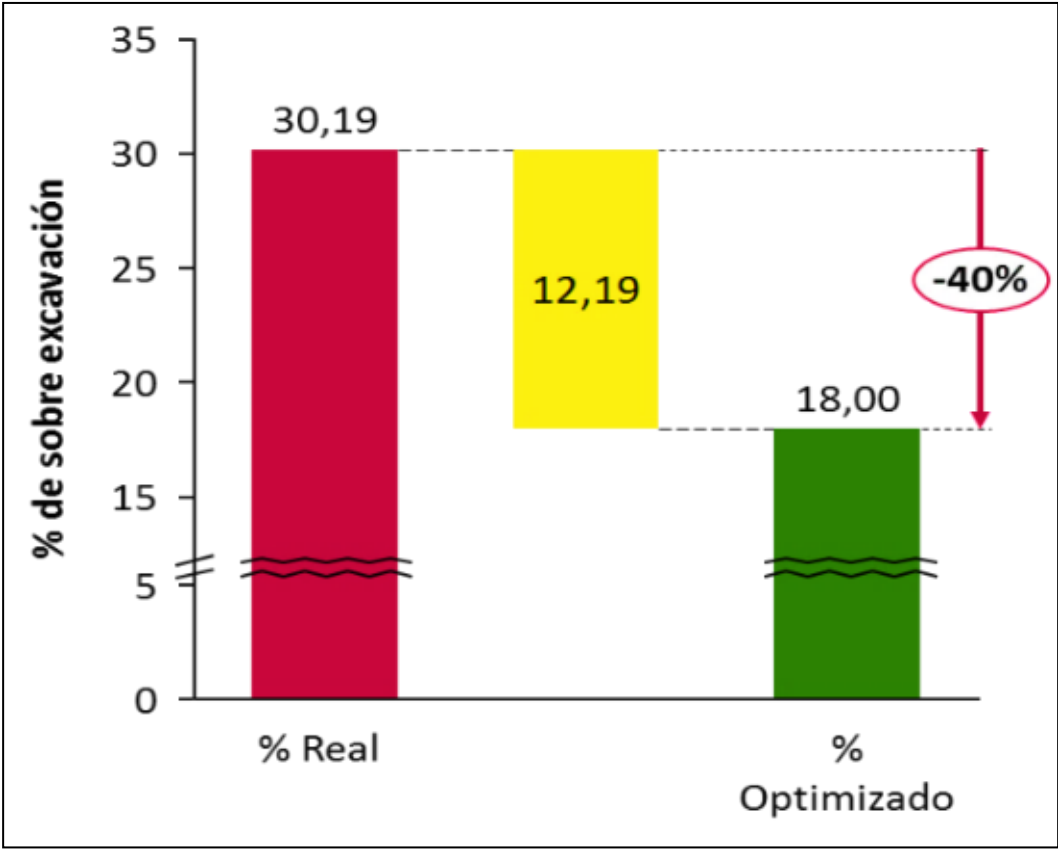
El factor relevante del estudio corresponde a la sobreexcavación generada al realizar el cambio de explosivo, por lo mismo, esta se presenta en la Ilustración 3-13, detalla por prueba.

La sobreexcavación disminuyó hasta alcanzar el 18% promedio, los resultados obtenidos se deben a la aplicación de las siguientes mejoras:

- Verticalidad al fondo de la postura
- Medias cañas en la periferia (Cajas y corona)
- No hay daño en el macizo rocoso
- Zapatera horizontal
- Avance de 3,5 [mt] para un largo de perforación de 3,8 [mt]

En Anexo A se presentan imágenes del resultado de la tronadura.

Con relación al objetivo general de este trabajo, se obtiene que se presentan diferencias en la sobreexcavación generada al utilizar diferentes explosivos en el avance horizontal. Para el caso estudio, se tiene que la emulsión optimizada genera un menor impacto en la sobreexcavación, en comparación al ANFO. Lo anterior se aprecia en la Ilustración 3-14.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración 3-14. Comparación Sobreexcavación generada ANFO V/S Emulsión

Se tienen una sobre excavación generada con ANFO de 30,19% promedio y una sobreexcavación generada con emulsión de un 18%, lo que implica una disminución de un 12,19%.

La sobreexcavación y la subexcavación es la base de este estudio, ya que, al optimizar a 18%, se está reduciendo en un 40% el material sobreexcavado, teniendo efecto en todas las actividades que van conectadas en el ciclo minero, el efecto se refleja en el menor tiempo que toma realizar cada actividad; menor interferencia por el tránsito de equipos, menor volumen de marina, menor necesidad de piques disponibles, menos RISES, menor cantidad de materiales y menor necesidad de recursos humanos.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la incorporación de la emulsión representa una tecnología que además de generar impacto en lo operacional, también aporta al momento de la planificación y evaluación de un proyecto, siendo una alternativa a considerar a la hora de lograr objetivos en plazos determinados y también económicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARRIAGADA José. 1991. Manual de explosivos. Ireco Chile Ltda. 1991.
2. CODELCO (Chile). División El Teniente. Estándares y Metodologías de Trabajo para Geología de Minas. Rancagua: CODELCO, 2003. Informe interno SGL-I-123/03.
3. CONSTRUCTORA GARDILCIC. Procedimiento de carguío y tronadura. Rancagua: Constructora Gardilcic, 2016. Informe Interno SGIG-I-184-MIN-017.
4. EXSA. Manual práctico de voladura. Lima : EXSA, 2010.
5. GUZMÁN Henríquez, Matías Nicolás. Diagnóstico y mejoramiento de diagramas de disparo en desarrollo horizontal, Mina Tambo de oro. Santiago: Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería en Minas, 2014. Tesis para optar a título de Ingeniero de Ejecución en Minas.
6. LAVADO, David. Metodología de asignación de recursos en desarrollos minería subterránea. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, 2014. Memoria de Ingeniería Civil de Minas.
7. LÓPEZ Jimeno, Carlos, LÓPEZ Jimeno, Emilio y GARCÍA Bermúdez, Pilar. Manual de perforación y voladura de rocas. Madrid: U. D. Proyectos, 2003.
8. MUSIC Garrido, Andrés. Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal, Mina El Teniente. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería en Minas, 2007. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Minas.
9. OSSANDÓN, G. Petrología y alteración del Pórfido Dacítico, Yacimiento El Teniente. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Santiago, Chile. 112p., 1974. Tesis para optar al título de Geólogo.

10. SALGADO Véliz, Jonathan. Secuenciamiento genérico de obras para la preparación minera Mina El Teniente. Santiago: Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Minas, 2009. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil en Minas.
11. SÁNCHEZ Becerra, Camilo Andrés. Construcción de chimeneas mediante el uso del método Drop Raising, Sector Mina Diablo Regimiento, El Teniente. Santiago: Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería en Minas, 2016. Tesis para optar a título de Ingeniero Civil en Minas.

ANEXOS

ANEXO A: GALERÍA CARGADA CON EMULSIÓN BOMBEABLE

A continuación, se presentan imágenes de la tronadura resultante al usar emulsión bombeable.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

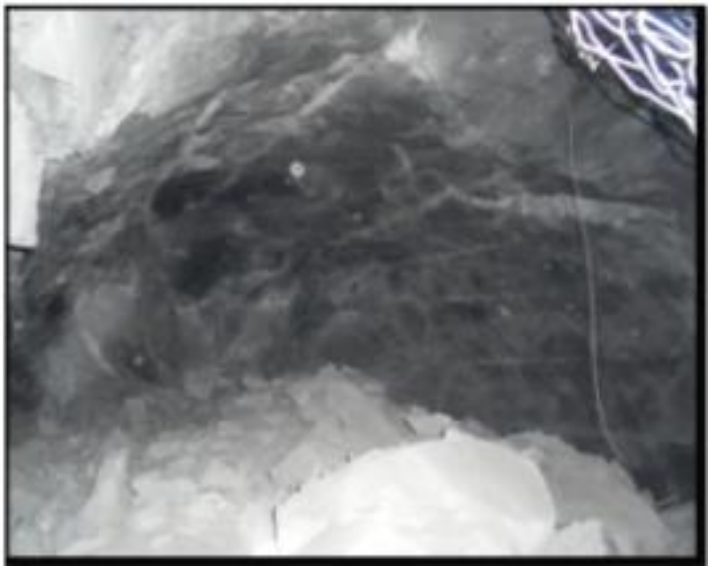
Ilustración A-1. Galería cargada con Emulsión bombeable, conectada a cordón detonante listo para quemar

ANEXO B: RESULTADO DE TRONADURAS



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración B-1. Resultado post-tronadura con avances a medias cañas



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración B-2. Resultado post-tronadura con avances a medias cañas

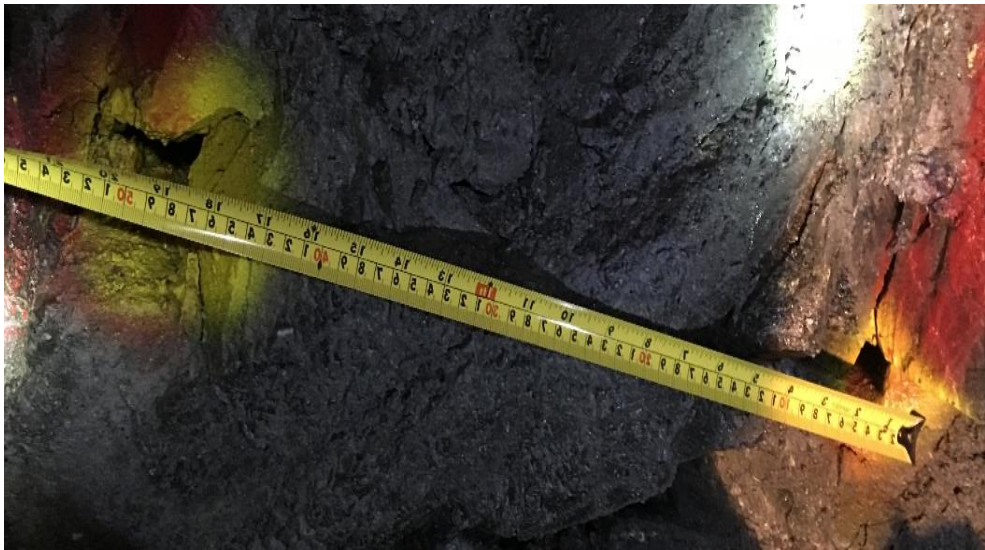


Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración B-3. Resultado post-tronadura con avances a medias cañas

Las Ilustraciones B-1, B-2 y B-3, muestran los resultados pos tronadura, donde se puede observar un avance de 3,7 ml., con medias cañas en cajas y en coronas, sin embargo, no demuestran existencias de sobreexcavación como también de subexcavación.

ANEXO C: ILUSTACIÓN DEL PUNTO DE AMARRE



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración C-1. Puntos de Amarre

La Ilustración C-1, muestra el momento donde están a punto de amarrar los noneles al cordón detonante, la distribución de los tiros y la secuencia de salida de los noneles.



Fuente: Elaboración propia en base a registros en terreno, 2018

Ilustración C-2. Puntos de Amarre

La Ilustración C-2, Muestra el control de parte de la empresa ORICA midiendo las longitudes, espaciamiento horizontalidad y la cantidad de tiros de perforación.