



**UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS  
FACULTAD DE INGENIERIA Y NEGOCIOS  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**Reducción de la sobre excavación mediante explosivo SUBTEK en  
Mina Esmeralda, El Teniente – Codelco Chile**

**Proyecto de Tesis para optar al  
Título Profesional de Ingeniería En Minas**

Profesor Guía:  
**Carlos Espinoza M.**  
Estudiante:  
**Nataly González V.**  
**Cristian Rivera C.**

AGOSTO – 2018

## **RESUMEN**

Se propone el cambio del explosivo ANFO por otro denominado SUBTEK CHARGE (en adelante SUBTEK) para reducir la sobre excavación en los desarrollos horizontales de la mina Esmeralda, de la División El Teniente de Codelco-Chile. La reducción de sobre excavación tendrá un impacto en reducir el costo y tiempo del ciclo de desarrollo, por la menor cantidad de material a extraer y menor costo de fortificación.

Todo proyecto minero tiene como principal enfoque la mayor productividad al menor costo. En el caso de un proyecto subterráneo el costo del desarrollo horizontal es un componente crítico del costo operativo. Se agrega a lo anterior el hecho de que el cumplimiento del programa de desarrollos horizontales es crítico para abrir nuevas reservas y cumplir con el programa de producción y el flujo de caja esperado. El retraso de este programa, por un mayor tiempo de ciclo del desarrollo horizontal, tendrá consecuencias negativas en este cumplimiento. El fenómeno de sobre excavación incrementa este tiempo de ciclo, por lo que la minimización de ésta contribuirá al cumplimiento del programa de desarrollo.

El presente trabajo estudia las características del explosivo que inciden en sobre-excavación y, con este fin, se propone el uso del explosivo SUBTEK en reemplazo del ANFO, utilizado en la actualidad. El estudio evaluará la reducción esperada de sobre excavación y estimará la reducción esperada del costo de desarrollo. Se utilizará el modelo Mechanistic Blasting Model (MBM) de ORICA S.A. para evaluar el impacto del cambio de explosivo.

## **SUMMARY**

It is proposed to change the ANFO explosive to another called SUBTEK to reduce over-excavation in the horizontal developments of the Esmeralda mine, of El Teniente Division of Codelco-Chile. The reduction of over-excavation will have an impact in reducing the cost and time of the development cycle, due to the lower amount of material to be extracted and lower cost of fortification.

All mining projects have as their main focus the highest productivity at the lowest cost. In the case of an underground project, the cost of horizontal development is a critical component of the operating cost. Added to the foregoing is the fact that compliance with the horizontal development program is critical to open new reserves and comply with the production program and expected cash flow. The delay of this program, for a longer cycle time of horizontal development, will have negative consequences in this compliance. The phenomenon of over-excavation increases this cycle time, so minimizing this will contribute to compliance with the development program.

The present work studies the characteristics of the explosive that affect over-excavation and, for this purpose, the use of the explosive SUBTEK is proposed in replacement of the ANFO, currently used. The study will evaluate the expected reduction of over excavation and estimate the expected reduction of the development cost. The model Mechanistic Blasting Model (MBM) of ORICA S.A. to evaluate the impact of the explosive change.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a toda la escuela de mina de nuestra universidad partiendo desde el rector, pasando por cada uno de nuestros profesores, principales formadores en este camino hacia nuestro objetivo. Hasta el último funcionario vinculado en nuestra formación que de algún modo nos guiaban a responder interrogantes de este maravilloso mundo que es la minería.

Gracias, con especial cariño, a nuestro profesor guía Carlos Espinoza gran profesional y más aún mejor persona, el cual clase a clase nos motivaba a seguir. Con su experiencia como profesional nos entregó los consejos necesarios para poder llegar al objetivo final. ¡Gracias profesor Carlos por esta ahí!

Agradecer también a cada compañero y futuros colegas que conocimos durante estos años de formación, nombrarlos a todos sería muy extenso y tal vez podríamos cometer algún olvido indebido. ¡Gracias compañeros todos!

Y por último pero de gran importancia a nuestros seres queridos, padres, hijo, esposo, pareja de vida. A todos ellos mil gracias y disculpas por habernos ausentados en algunas ocasiones o no haber prestado la atención necesaria en momentos. Tengan claro que este sacrificio valdrá la pena. ¡Los amamos con el alma!

*El crecimiento es un proceso de prueba y error: es una experimentación. Los experimentos fallidos forman parte del proceso en igual medida que el experimento que funciona bien. –  
**Benjamín Franklin***

# INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES</b> .....	<b>1</b>
1.1    Introducción .....	1
1.2    Objetivos.....	2
1.2.1.    Objetivo general.....	2
1.2.2.    Objetivos Específicos.....	2
1.3    Hipótesis del trabajo.....	2
1.4    Alcances y Limitaciones.....	3
1.5    Metodología a desarrollar.....	3
<b>CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES DE MINA ESMERALDA</b> .....	<b>4</b>
2.1    Ubicación .....	4
2.2    Geología de División El Teniente .....	5
2.3    Método de Explotación de Mina Esmeralda .....	7
2.4    Descripción de Desarrollos Horizontales en mina Esmeralda.....	8
<b>CAPÍTULO 3: ESTADO DE LA SOBRE EXCAVACIÓN EN MINA ESMERALDA</b> .....	<b>11</b>
3.1    ¿Qué es la sobre excavación? .....	11
3.2    Estado de sobre excavación en desarrollos horizontales de mina Esmeralda.....	13
3.3    Causas probables de sobre excavación en mina Esmeralda .....	16
3.3.1    Desviación de los tiros de contorno, auxiliares de contorno y tiros de caja.....	16
3.3.2    Impacto de vibraciones en el contorno y respuesta de la roca. ....	18
<b>CAPÍTULO 4: EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL EXPLOSIVO EN LA SOBRE EXCAVACIÓN</b> .....	<b>20</b>
4.1    Características del Explosivo y su Distribución.....	20
4.1.1.    Presión de barreno .....	20
4.1.2.    Velocidad de Detonación .....	21
4.1.3.    Factor de carga.....	21
4.2    Estudios de sobre excavación.....	23
4.2.1.    Parámetro de Tronadura.....	23
4.2.2.    Parámetros geológicos.....	24
4.3    Carguío de frente con explosivo ANFO utilizado actualmente en los desarrollos horizontales .....	24
4.4    Características de explosivos ANFO y SUBTEK .....	26

4.4.1	Características explosivo ANFO. (Fuente: ENAEX S.A.).....	27
4.4.2	Características explosivo SUBTEK CHARGE. (Fuente: ORICA S.A.) .....	28
4.4.3	Comparación de Diagrama del explosivo ANFO y SUBTEK.....	30
4.4.4	Método de Pearse Monsanto.....	32
<b>CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL EXPLOSIVO SUBTEK EN LA SOBRE EXCAVACIÓN .....</b>		<b>33</b>
5.1	Descripción del Modelo Mechanistic Blasting Model (MBM-ORICA). .....	33
5.2	Simulación del uso de explosivo SUBTEK mediante la modelación MBM. ....	33
<b>CAPITULO 6: COMPARACIÓN DE COSTOS DE LOS EXPLOSIVOS SUBTEK Y ANFO EN UNA TRONADURA. (Fuente: Elaboración propia).....</b>		<b>38</b>
6.1	Detalle de costos por el uso del explosivo SUBTEK en una tronadura. ....	39
6.2	Detalle de costos por el uso del explosivo ANFO en una tronadura. ....	40
6.3	Detalle de ahorro en costos en una tronadura con explosivo SUBTEK para una sección de 3,6 x 3,6 con 20% de sobre excavación (Elaboración propia) .....	41
<b>CAPÍTULO 7: Análisis de DAFO – CAME de los Explosivo SUBTEK .....</b>		<b>44</b>
7.1	Análisis DAFO del explosivo SUBTEK .....	44
7.2	Análisis CAME del explosivo SUBTEK.....	45
<b>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES .....</b>		<b>47</b>
<b>CAPÍTULO 9: RECOMENDACIONES .....</b>		<b>48</b>
<b>CAPÍTULO 10: BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>49</b>
<b>CAPÍTULO 11: ANEXO .....</b>		<b>51</b>

## FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente .....	4
<b>Figura 2:</b> Distribución de sectores en mina El Teniente .....	6
<b>Figura 3:</b> Sección transversal Panel Caving hundimiento avanzado .....	7
<b>Figura 4:</b> Extracción por Panel Caving - Mina Esmeralda .....	8
<b>Figura 5:</b> Malla del Nivel de producción Mina Esmeralda .....	9
<b>Figura 6:</b> Detalle de tronadura de túneles excavados convencionalmente .....	11
<b>Figura 7:</b> Definición de las secciones en tronadura .....	12
<b>Figura 8:</b> Sobre excavación en relación a la STCT en disparos de mina Esmeralda. ....	14
<b>Figura 9:</b> Ciclo de Minado de las Excavaciones Horizontales .....	15
<b>Figura 10:</b> Desviación de Tiros Coronas y Auxiliares de Corona. ....	17
<b>Figura 11:</b> Ejemplos de diagramas de disparo teórico y real (2017) .....	18
<b>Figura 12:</b> Presión de barrenos vs distancia de fracturamiento. ....	20
<b>Figura 13:</b> Velocidad de detonación (m/s) – sobre excavación (m) .....	21
<b>Figura 14:</b> Factor de carga perimetral vs % de sobre excavación. ....	22
<b>Figura 15:</b> Efecto en tipo de explosivo en generar sobre excavación .....	22
<b>Figura 16:</b> Detalle de diagrama de carguío tipo. ....	26
<b>Figura 17:</b> Ejemplos de resultados de fracturas con esfuerzos según diseño teórico .....	32
<b>Figura 18:</b> Observaciones experimentales y en terreno de influencia de los esfuerzos en la generación de fracturas de la roca (a, b y c (Aydan, 2013) d y e (Jung et al., 2001)) .....	33
<b>Figura 19:</b> Diseño modelamiento de sección 3,6 x 3,6m .....	34
<b>Figura 20:</b> Diseño para modelamiento (MBM). ....	34
<b>Figura 21:</b> Comparación de explosivos en simulación en tronaduras de primer tiro del cuele... ..	35
<b>Figura 22:</b> Velocidad de detonación del ANFO. ....	35
<b>Figura 23:</b> Diseño original (con auxiliar corona): generación de fracturas y granulometría resultante. (ANFO). ....	36
<b>Figura 24:</b> Generación de fracturas y granulometría resultante. (SUBTEK) .....	37
<b>Figura 25:</b> Diagrama de disparo utilizado para comparación de costos .....	38

## TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Producción Codelco El Teniente .....	6
<b>Tabla 2:</b> Resumen año 2017 Preparación Mina Esmeralda Desarrollos Horizontales .....	10
<b>Tabla 3:</b> Valores estándar de sobre excavación para las distintas secciones.....	13
<b>Tabla 4:</b> Resultados de 6 disparos, Mina Esmeralda. Desarrollos Horizontales .....	14
<b>Tabla 5:</b> Propiedades técnicas del ANFO.....	28
<b>Tabla 6:</b> Propiedades técnicas de Emulsión SUBTEK.....	29
<b>Tabla 7:</b> Costos de una tronadura con explosivo Emulsión SUBTEK. ....	39
<b>Tabla 8:</b> Costos de una tronadura con explosivo ANFO.....	40



# CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

## 1.1 Introducción

Los desarrollos horizontales en la mina Esmeralda de la División el Teniente nos indica, que las obras del nivel de hundimiento y nivel de producción de la mina; obras mineras que se desarrollan desde el 2012 hasta 2017.

Obras ejecutadas

- Desarrollo y fortificación horizontales → 24.449 metros lineales

Mencionadas obras comprenden el mayor gasto, esto causado por las interferencias operativas, ya que si la dimensión de la preparación minera crece baja la productividad elevando los gastos operativos. Aquí en donde aparece la denominada sobre excavación.

La sobre excavación es materia muy difícil de dimensionar ya que influyen un sin número de factores que las generan pero si se pueden realizar estudios teniendo bien claro que factores son los que la provocan. Esto ha llevado a que varios profesionales realicen estudios que determinen como controlar o en que poner atención cuando se realizaran los avances en minería subterránea.

También en la actualidad y con los avances tecnológicos, se cuentan con herramientas que nos pueden ayudar a generar modelos para simular las tronaduras con los distintos tipos de explosivos que existen en el mercado y es aquí donde podemos mencionar la empresa ORICA S.A., la cual es una empresa líder en el mercado de los explosivos para la minería en Chile y el Mundo y que no solo cuenta con insumos para tronaduras sino que también con apoyos tecnológicos como software con sus respectivos simuladores o modeladores para tronaduras. Herramientas que hoy en día facilitan enormemente las tareas de profesionales en el rubro minero a poder generar mejores resultados en los avances de minería tanto subterránea como superficial, consiguiendo mejores costos en lo que respecta a la inversión en el ítem de los desarrollos horizontales como es el caso de mina Esmeralda del Teniente.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Reducir la sobre excavación en los desarrollos horizontales en mina Esmeralda, mediante la sustitución del explosivo ANFO por la emulsión explosiva SUBTEK.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Describir el estado actual de la sobre excavación por tronadura en los desarrollos horizontales originada por el uso de ANFO y los costos de desarrollo horizontal actuales en Mina Esmeralda, División el Teniente, CODELCO.
- Analizar las propiedades del explosivo que inciden en el origen de la sobre excavación y relacionar al explosivo usado y propuesto.
- Describir las características del explosivo actual y propuesto que mejoran los índices de sobre excavación.
- Analizar otras variables que inciden en la sobre excavación.
- Analizar los costos adicionales asociados a la sobre excavación de labores horizontales.
- Simular, mediante el modelo MBM-ORICA, el uso del explosivo SUBTEK en trabajos de tronadura en los avances horizontales de mina Esmeralda.
- Evaluar los beneficios de la propuesta del uso del explosivo SUBTEK para reducir la sobre excavación.

## **1.3 Hipótesis del trabajo**

Demostrar que el uso del explosivo SUBTEK permite reducir la actual sobre excavación generada por el uso de explosivo ANFO. Ayudando también a reducir costos en los avances horizontales en mina Esmeralda.

## **1.4 Alcances y Limitaciones**

Este estudio aplica a los desarrollos horizontales de mina Esmeralda y se basa en información recolectada de disparos realizados y busca evaluar una opción alterativa al uso del explosivo tradicional ANFO.

## **1.5 Metodología a desarrollar**

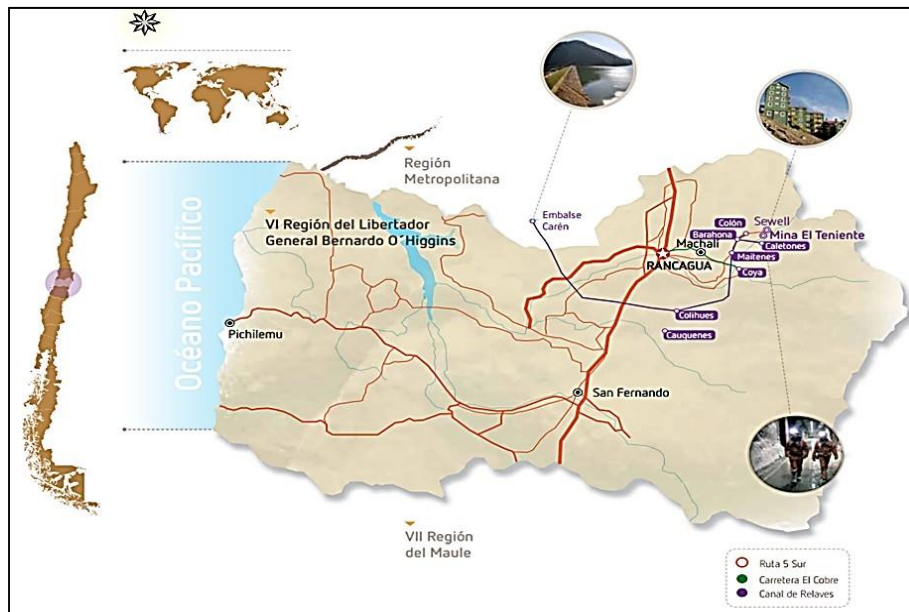
- Establecer una línea base de comparación mediante el análisis de la situación de sobre excavación en mina Esmeralda, División El Teniente.
- Comparar los explosivos ANFO y SUBTEK en relación con aquellas variables del explosivo que inciden en la sobre excavación.
- Para el explosivo SUBTEK simular y estimar la sobre excavación mediante el modelo Mechanistic Blasting Model (MBM-ORICA)
- Analizar los resultados y determinar la reducción en costo y sobre excavación por el uso del explosivo SUBTEK.

## CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES DE MINA ESMERALDA

### 2.1 Ubicación

El yacimiento El Teniente, de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) división el Teniente, corresponde a un depósito de cobre porfídico y molibdeno que se encuentra emplazado en el flanco poniente de la cordillera de los Andes a 34°14' latitud sur y 70°21' longitud oeste y entre los 2.000 a 3.200 m.s.n.m. en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, provincia de Cachapoal, a 40 kilómetros al NE de la ciudad Rancagua y a 72 Km al SE de la ciudad de Santiago.

El acceso al yacimiento se realiza desde Rancagua por la carretera asfaltada Eduardo Freí Montalva la que une la ciudad de Rancagua con la localidad de Colón Alto en el kilómetro 46 (1983 m s.n.m.) y posee un desvío en el Kilómetro 26 hacia la localidad de Coya, **Figura 1**.



**Figura 1:** Ubicación y vías de acceso al yacimiento El Teniente  
Fuente: CODELCO- División El Teniente, 2016.

## 2.2 Geología de División El Teniente

El yacimiento El Teniente forma parte del arco magmático del Mioceno-Plioceno temprano, emplazado a 260 km al este de la fosa oceánica actual y a 90 Km sobre la zona sísmica. Su origen es magmático-hidrotermal, el distrito geológico es dominado por rocas volcánicas, localmente instruida por rocas ígneas de composición intermedia además de brechas hidrotermales (Kay. 1991).

La mayor parte de producción de cobre de Chile proviene de pórfidos cupríferos como es el caso de El Teniente y que son esencialmente depósitos minerales de baja ley y gran tonelaje. Se denominan pórfidos porque frecuentemente, pero no exclusivamente, se asocian con rocas ígneas intrusivas con fenocristales de feldespato en una masa fundamental cristalina de grano fino.

La textura porfídica indica que los magmas instruyeron y cristalizaron cerca de la superficie y debido a su naturaleza relativamente poco profunda se denominan intrusivos epizonales, pero ellos pueden ser equigranulares con grano moderadamente grueso.

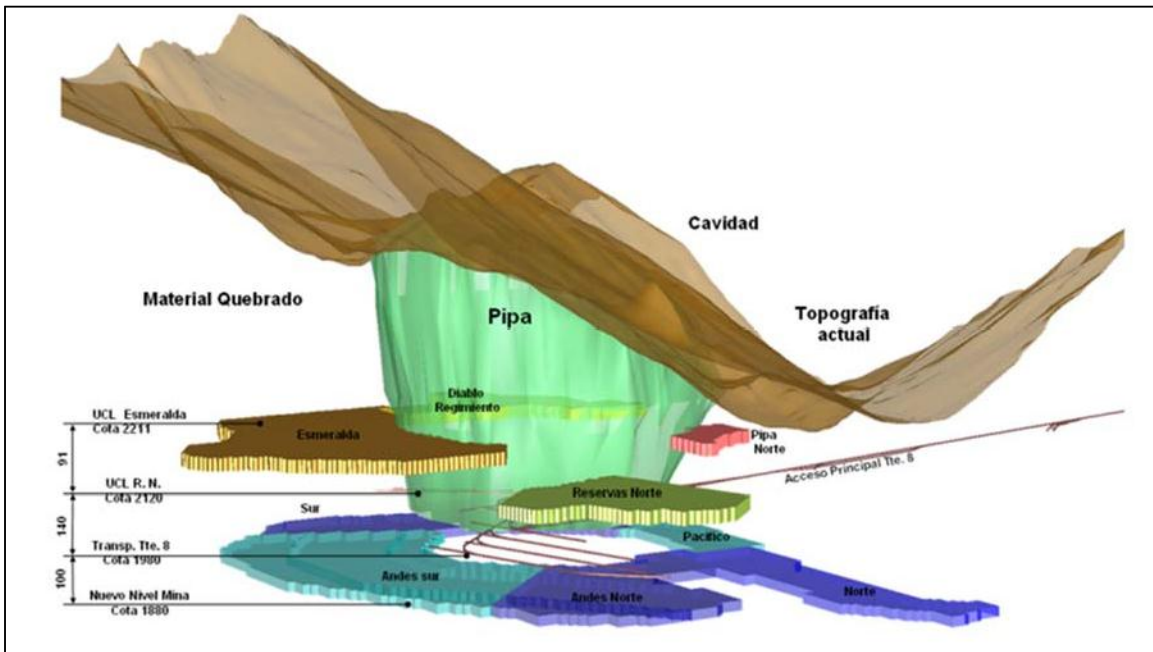
Las principales unidades litológicas reconocidas en mina Esmeralda corresponden a: (Celhay, F., Burgos, L., Pereira J., 2006)

- Complejo Máfico El Teniente (CMET) (Ex andesitas)
- Unidades de Pórfidos Félsicos (Pórfido Diorítico y Pórfido Latítico)
- Unidades de Brechas (Complejo de Brechas Braden, Brechas Hidrotermales y Brechas Ígneas).

División El Teniente produce cobre en la forma ánodos, cátodos y concentrado de cobre. Como subproductos y resultado del procesamiento del mineral también se obtiene molibdeno en forma de concentrado y ácido sulfúrico.

El Teniente actualmente tiene 8 minas en producción más el nuevo Nivel Mina que comenzara a operar el año 2022. La producción total del Teniente es 152.500 toneladas por día [t/d], la producción con el Nuevo Nivel Mina será 307.500 [tn/d], la Ley media promedio de todas las

minas es de 0,98 % siendo los aportes más considerables de las minas Reservas Norte y mina Esmeralda, **Figura 2 y Tabla 1.**



**Figura 2:** Distribución de sectores en mina El Teniente  
Fuente: CODELCO- División El Teniente, 2017.

<b>Producción Codelco División el Teniente</b>		
Minas	Toneladas de producción por día (TPD)	Ley media (%)
Teniente Sur	1.500	0,80
Esmeralda	33.000	0,97
Diablo Regimiento	24.000	0,83
Pacífico Superior	15.000	0,86
Reservas Norte	34.000	1,16
Dacita	17.000	1,37
Recursos Sur	25.000	0,87
Newdet	3.000	0,97
Nuevo nivel Mina (2022)	155.000	1,01

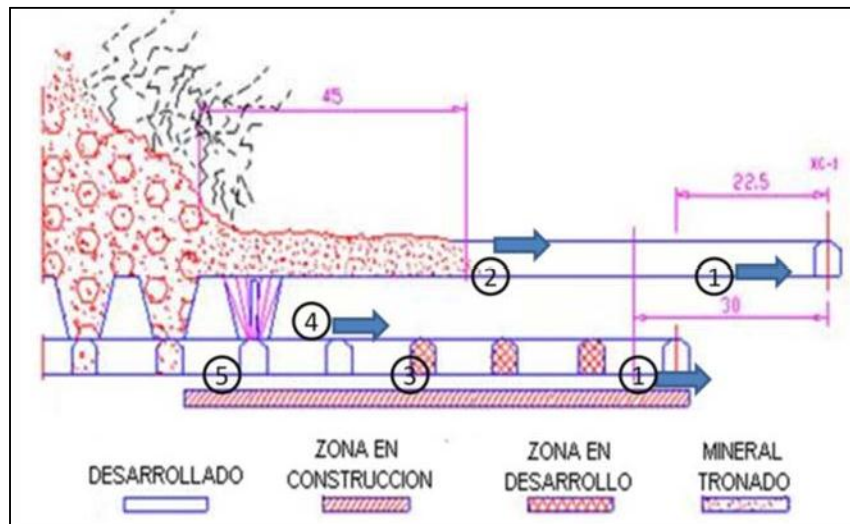
**Tabla 1:** Producción Codelco El Teniente  
Fuente: CODELCO-División El Teniente, 2017

### 2.3 Método de Explotación de Mina Esmeralda

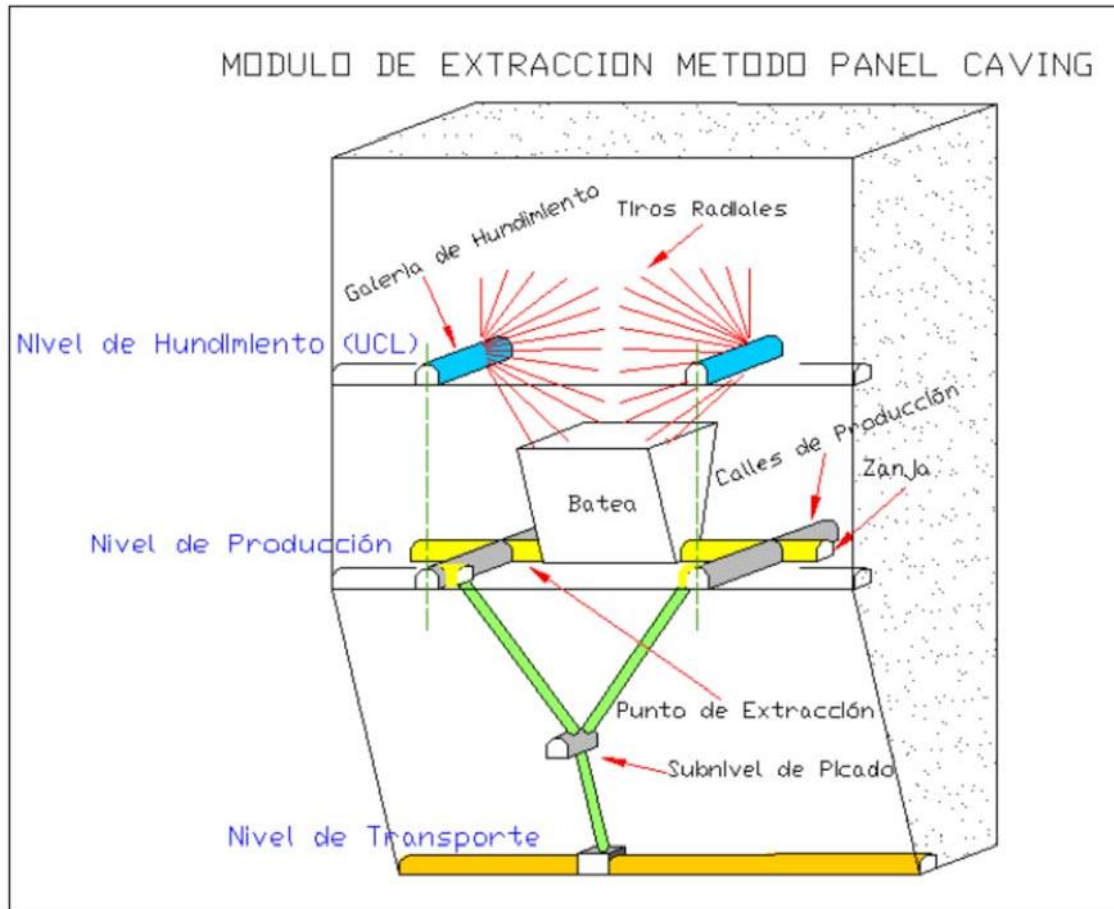
En la actualidad la Mina Esmeralda utiliza el método de explotación por Panel Caving con hundimiento avanzado. En esta variante la socavación en el nivel de hundimiento se realiza sobre un nivel de producción parcialmente desarrollado, dejando las galerías de zanja y bateas recolectoras de mineral para ser desarrolladas bajo área hundida o socavada. La supuesta ventaja de esta variante es que proporciona una mayor estabilidad durante el desarrollo del nivel de producción, dado que las excavaciones son realizadas fuera de la zona de concentración de esfuerzos, **Figura 3 y Figura 4**.

La secuencia de excavación de las labores se detalla a continuación:

1. Desarrollo de las labores del nivel de hundimiento y de algunas del nivel de producción. En general solamente se construyen las calles de producción.
2. Tronadura de socavación en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
3. Se desarrollan las restantes labores del nivel de producción en el sector bajo el área socavada.
4. Se realiza la apertura de las bateas.
5. Se inicia la extracción.



**Figura 3:** Sección transversal Panel Caving hundimiento avanzado  
Fuente: Métodos de explotación mina El Teniente, 2010.



**Figura 4:** Extracción por Panel Caving - Mina Esmeralda  
Fuente: Mina El Teniente.

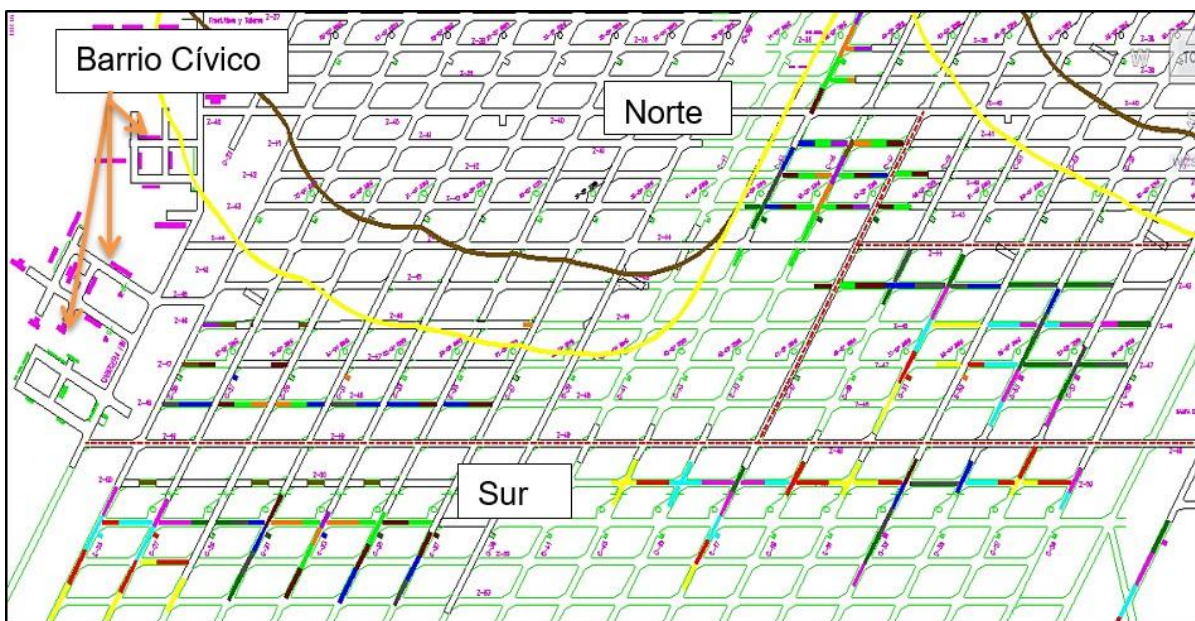
#### 2.4 Descripción de Desarrollos Horizontales en mina Esmeralda.

En mina Esmeralda las excavaciones horizontales son las que permiten delinear el bloque a explotar generando accesos al nivel de hundimiento, de producción o para construir las zanjas receptoras (o bateas). Estas labores están diseñadas de acuerdo a las necesidades de los distintos sectores dentro de la mina. Estas labores horizontales tienen secciones definidas de la siguiente manera:

- Cruzados de cabecera de hundimiento: 4,0 x 4,0 m
- Galerías de hundimiento: 3,6 x 3,6 m
- Cruzados de cabecera de producción: 4,2 x 3,9 m
- Galerías de producción: 4,1 x 3,9 m
- Galerías puntos de extracción: 3,6 x 3,9 m



Las excavaciones horizontales se realizan en forma mecanizada mediante perforación, tronadura, carguío y transporte. El diseño de una sección requiere evaluar el tipo de roca, tipo de nivel (hundimiento, producción, ventilación y transporte) y tamaño de los equipos. La construcción de estas labores sigue un conjunto de actividades llamado el ciclo de minado (tronadura, ventilación, retiro de marina, acuñadura, fortificación, perforación de frente y carguío de explosivo). Los equipos considerados para la construcción son de bajo perfil y en algunos casos, telecomandados. La **Figura 5** presenta una vista en planta de las distintas labores requeridas para la explotación por el método panel Caving.



**Figura 5:** Malla del Nivel de producción Mina Esmeralda  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017)

Los desarrollos horizontales realizados durante 2017 y que sirven de base para el presente estudio se presentan en la **Tabla 2**.

<b>Programa 2017 Preparación mina Esmeralda</b>			
<b>Desarrollo Horizontal</b>			
<b>Actividades</b>	<b>Sección</b>	<b>Mina Esmeralda Horizontal (m)</b>	
		<b>Sur</b>	<b>Norte</b>
<b>Nivel de Hundimiento</b>			
Horizontal	4,0 x 4,0	565	0
	3,6 x 3,6	1518	0
	2,7 x 2,6	12	0
	3,0 x 3,8	0	0
Total		2095	0
<b>Nivel de producción</b>			
Horizontal	4,2 x 3,9	2212	264
	4,1 x 3,9	640	200
	3,6 x 3,9	0	432
	2,7 x 2,6	63	10
	3,8 x 3,8	0	0
Total		2915	907

**Tabla 2:** Resumen año 2017 Preparación Mina Esmeralda Desarrollos Horizontales  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017)

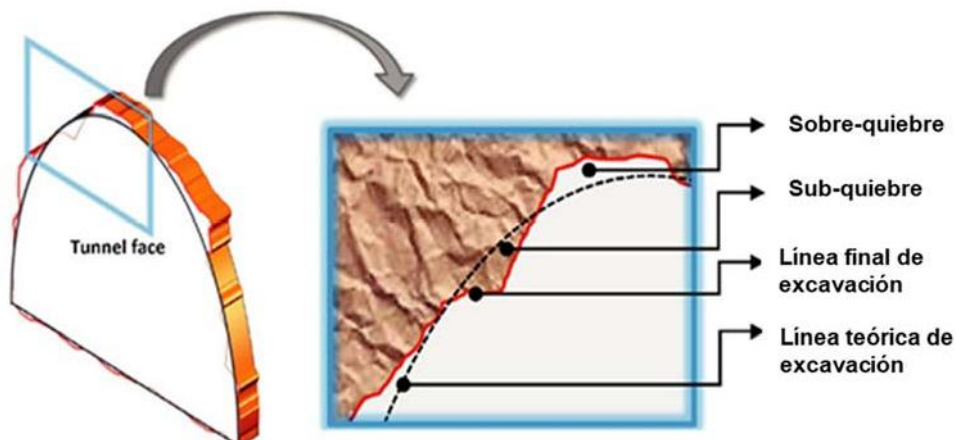
La **Tabla 2** muestra un resumen de las dimensiones de las secciones de los avances del año 2017, separados por sector y nivel, los cuales nos entregó un total de 5.917 m de avances horizontales desarrollados durante el año.

## CAPÍTULO 3: ESTADO DE LA SOBRE EXCAVACIÓN EN MINA ESMERALDA

### 3.1 ¿Qué es la sobre excavación?

La sobre excavación es un área excavada excedente de roca más allá del contorno teórico en una excavación, y puede ocurrir en cualquier tipo de método de excavación subterránea. La sobre excavación es inevitable en el método de perforación y tronadura, y se produce por una combinación de variables geológicas y operacionales cuyo control es parcial. Aunque se sabe que la excavación mediante perforación y tronadura es un método económico, se complica cuando la seguridad de las estructuras está en peligro. El exceso de roca más allá de la sección diseñada de un túnel es un factor importante que pone en riesgo los sectores excavados y afecta significativamente la eficiencia operacional y de gestión. La sobre excavación pone en peligro tanto a los trabajadores como a los equipos en las excavaciones subterráneas y aumenta la dilución del mineral en las operaciones mineras. Además, afecta negativamente la gestión de la mina al generar dilución en el caso del mineral, requisitos de soportes adicionales, etc., lo cual aumenta los costos de producción. (Hyongdoo Jang, Erkan Topal, 2013)

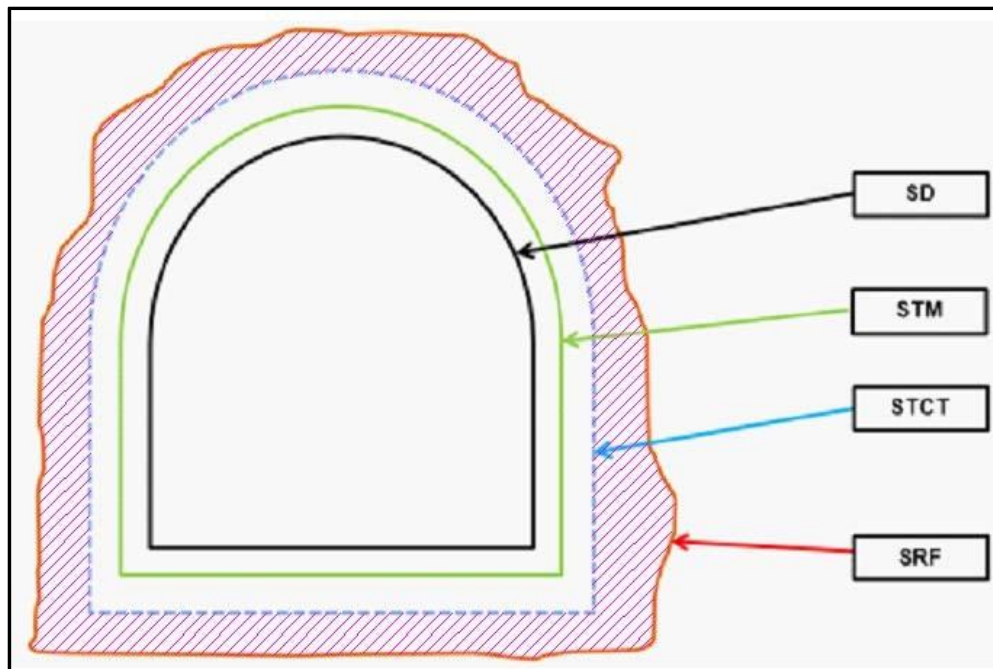
Debemos mencionar que durante una tronadura así como se genera sobre excavación (Over-break), también puede generar lo que denominaremos sub excavación (Under-break) ambas tienen una incidencia negativa en los resultados de los avances. Ver **Figura 6**.



**Figura 6:** Detalle de tronadura de túneles excavados convencionalmente.

Fuente: Hyongdoo Jang, Erkan Topal (2013)

Para el caso mina El Teniente y específicamente en mina Esmeralda se considera una secuencia de secciones para identificar el tipo de sección lograda y medir la eficiencia de la excavación. Este esquema de sección explica bajo que parámetros se puede identificar si existe sobre excavación. El esquema considerado se presenta en la **Figura 7**.



**Figura 7:** Definición de las secciones en tronadura  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017)

De esta forma se define:

**Sección de Diseño (SD):** Sección indicada en los planos de diseño de excavación minera.

**Sección Teórica Media (STM):** Sección esperada producto de desviación de perforación ( $3^\circ$ ).

**Sección Teórica con Tolerancia (STCT):** Corresponde a la Sección Teórica Media, más la tolerancia permitida, para cada sección, según la

	3,6 x 3,6	4,0 x 4,0	4,0 x 4,5	5,0 x 5,0	5,0 x 6,0	6,0 x 6,0	6,0 x 7,0	7,0 x 7,0	7,0 x 8,0
SD (m <sup>2</sup> )	11,57	14,42	18,28	22,57	27,32	32,39	38,14	46,42	53,35
STCT (m <sup>2</sup> )	13,40	16,39	20,63	25,16	30,17	35,48	41,49	50,10	57,29
%	14%	12%	11%	10%	9%	9%	8%	7%	7%

**Tabla 3:** Valores estándar de sobre excavación para las distintas secciones  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017)

La **Tabla 3** muestra el porcentaje de sobre excavación aproximado permitido para cada una de las secciones que se ejecutan en los avances horizontales de mina Esmeralda. Se puede concluir que mientras más grande la sección menor es el porcentaje de sobre excavación permitido.

**Sección Real Final (SRF):** Es el área promedio final obtenida a partir de secciones topográficas tomadas a 1,75 metros de cada avance de disparo, considerando una longitud de perforación de 3,5 metros. Esta sección promedio final corresponde a un período de trabajo (mes) o una longitud definida (metros).

**Sobre excavación (SE):** Existe **SE** cuando la **SRF** es mayor a la **STCT**, para las diferentes secciones. Como lo muestra la zona achurada de la **Figura 7**.

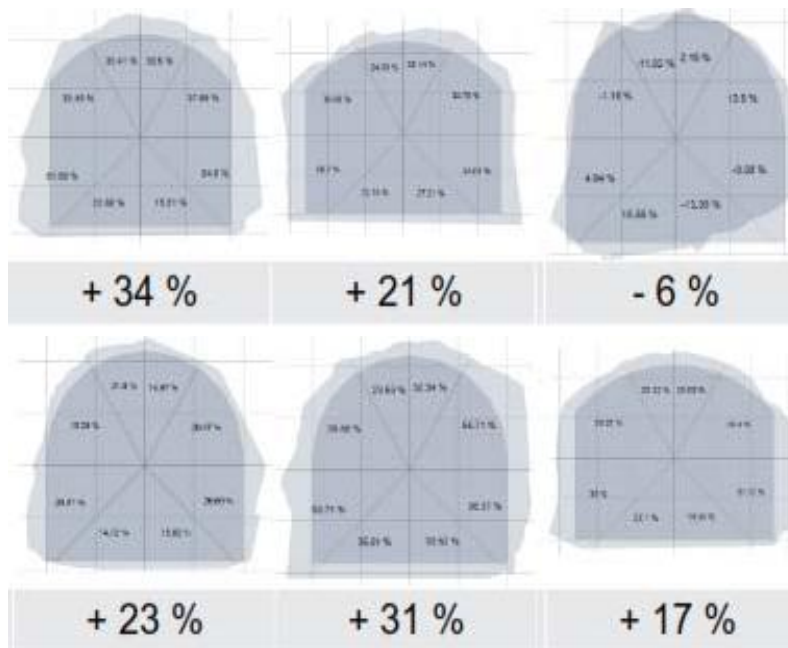
### 3.2 Estado de sobre excavación en desarrollos horizontales de mina Esmeralda

Para revisar y estudiar el estado de la sobre excavación en mina Esmeralda se obtuvo información del levantamiento en terreno de 6 frentes/disparo de la Mina, 4 disparos en Nivel de hundimiento (UCL) y 2 disparos en Nivel de producción (NP).

Antecedentes recopilados:

- Avance metros lineales (mensual)
- Datos topográficos de sobre excavación: 30% aprox. real en promedio.
- Tolerancia permitida de sobre excavación: 12% aprox. promedio.

A modo de antecedentes la **Figura 8** presenta los resultados de mediciones de la sobre excavación en distintos frentes de avance horizontal de distintos frente de trabajo.



**Figura 8:** Sobre excavación en relación a la STCT en disparos de mina Esmeralda.  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017)

Los resultados de la medición se presentan en la

**Tabla 4.**

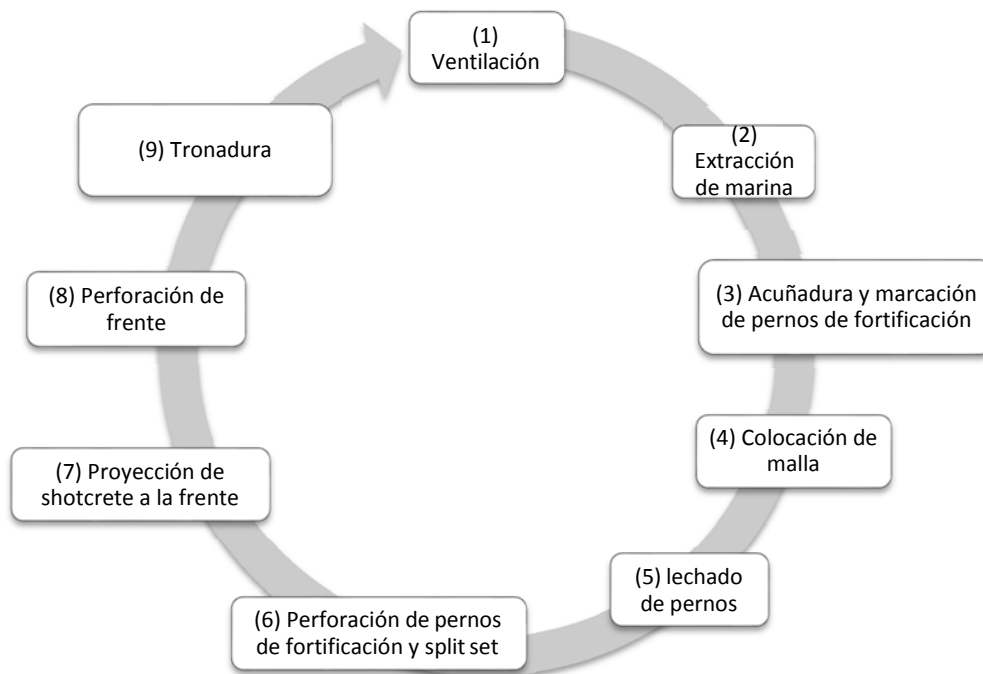
	Disp. N°1	Disp. N°2	Disp. N°3	Disp. N°4	Disp. N°5	Disp. N°6
<b>Fecha</b>	15-05-17	17-05-17	19-05-17	20-07-17	21-07-17	21-07-17
<b>Nivel</b>	<b>UCL</b>	<b>NP</b>	<b>UCL</b>	<b>UCL</b>	<b>UCL</b>	<b>NP</b>
<b>Sección</b>	4,0 x 4,0	3,6 x 3,6	4,2 x 4,2	4,0 x 4,0	4,2 x 4,2	3,6 x 3,6
<b>Número de tiros (unid.)</b>	-	63	-	51	51	63
<b>Longitud de perforación (m)</b>	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
<b>Avance efectivo (m)</b>	3,1	3,6	2,67	3,5	3,7	3,37
<b>Avance efectivo (%)</b>	82	95	70	92	97	89
<b>Sobre excavación (%)</b>	34	21	-6	23	31	17
<b>UCL:</b> Nivel de hundimiento						
<b>NP:</b> Nivel de producción						

**Tabla 4:** Resultados de 6 disparos, Mina Esmeralda. Desarrollos Horizontales  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017)

El efecto negativo de la sobre excavación en la operación minera son, entre otros, los siguientes:

- Algunas labores necesitan restituir su dimensión para cumplir con los requerimientos.
- Mayor consumo de Hormigón para cada labor (Schotcrete).
- Demoras en el ciclo de extracción de marina al tener mayor cantidad de material.
- Carpetas de Rodado, esto debido a que la sobre excavación también afecta la zona de zapateras luego de una tronadura.

Como en todo proyecto minero existe un llamado ciclo de avance de minado, este puede ser en avances horizontales, verticales, etc. La **Figura 9** muestra el ciclo de minado de los avances horizontales, materia expuesta en este informe en el cual es común que exista sobre excavación posterior a una tronadura. A medida que avanzan las tareas del ciclo aparecen los problemas que pueden generar la sobre excavación.



**Figura 9:** Ciclo de Minado de las Excavaciones Horizontales

Fuente: Elaboración propia

Se puede señalar que dentro del ciclo de avance de minado, la sobre excavación que se produce en mina Esmeralda afecta directamente algunas de sus etapas como:

- Acuñaadura
- Extracción de marina
- Proyección de Shotcrete

Lo efectos que puede provocar la sobre excavación sobre estas tareas es la mayor cantidad de tiempo a emplear tanto como horas – hombre requeridas, horas de equipos de carguío y mayor cantidad de materiales de fortificación y que no siempre están contemplados o calculados en los costos.

### **3.3 Causas probables de sobre excavación en mina Esmeralda**

Con la información obtenida y analizada, las causas o factores probables que generan sobre excavación en los desarrollos horizontales y que formaran parte del proceso de estudio de este trabajo, son:

- Desviación de los tiros de contorno, auxiliares de contorno y tiros de caja.
- Impacto de vibraciones en el contorno y respuesta de la roca.
- Distribución de la carga explosiva, en el contorno y centro de la labor.
- Calidad e implementación del diseño de disparo actual.
- Geología de la zona.
- Tipo de explosivo (\*)

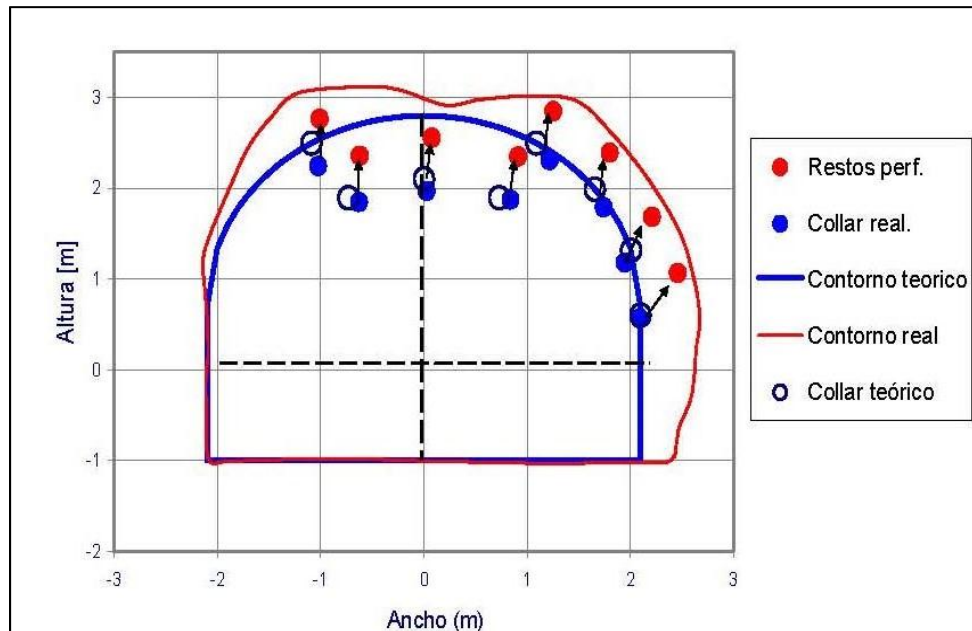
(\*) Tema que abordamos en detalle en el presente informe.

#### **3.3.1 Desviación de los tiros de contorno, auxiliares de contorno y tiros de caja.**

El procedimiento de medición de la desviación, consiste en estimar las coordenadas de la boca o collar de los tiros como las del fondo, tanto de las perforaciones de contorno como auxiliares de contorno. Una vez que se tienen estas coordenadas se puede estimar con exactitud la desviación y por consiguiente los errores de perforación.



A modo de ejemplo, en la **Figura 10** se muestra el comportamiento de la desviación de los tiros de contorno y auxiliares de contorno. En ella se observa claramente que, tanto los tiros de corona como auxiliares de corona (color azul), tienden a desviarse en forma radial hacia el interior del macizo rocoso circundante a la galería, favoreciendo la sobre excavación.



**Figura 10:** Desviación de Tiros Coronas y Auxiliares de Corona.  
Fuente: Memoria Andrés Music (2007).

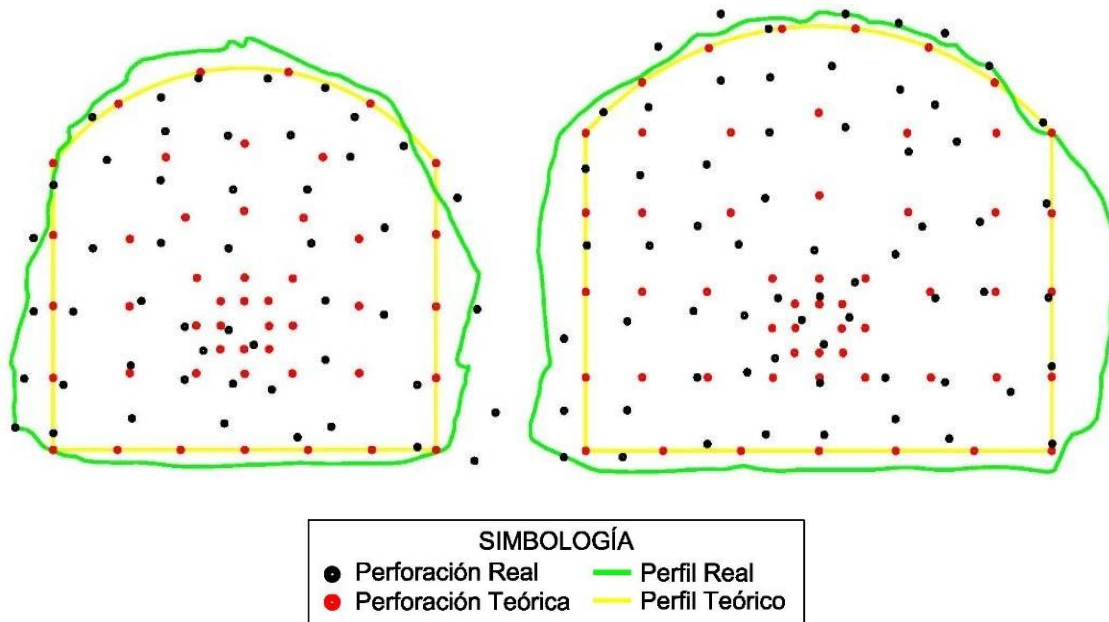
Al comparar las coordenadas del collar de los tiros nominales y reales, estos últimos tienden en su mayoría a ubicarse por debajo de la posición teórica. Esta tendencia podría deberse a dos factores principales o una combinación ambos.

El primero tiene relación con una mala marcación de los tiros. El segundo con la operación, la perforadora no se posiciona completamente horizontal para perforar los tiros de corona, situación por la cual el operador inicia la perforación más abajo del punto marcado, con una cierta inclinación hacia arriba para alcanzar la posición correcta en el fondo.

El problema en este caso se debe principalmente a que el ángulo de inclinación era mayor que el necesario, produciendo graves errores de desviación.

La **Figura 11** muestra una diferencia de sobre excavación con respecto a la perforación real, esta se debió a la desviación de disparos (perforación y no empate). Se evidencia que al realizar perforaciones con demasiado ángulo esta puede generar sobre excavación en todo el

contorno, con mayor relevancia en el sector de las cajas e incluso a nivel de piso como es el caso de los ejemplos que se muestra.



**Figura 11:** Ejemplos de diagramas de disparo teórico y real (2017)  
Fuente: Mina Esmeralda-División el Teniente (2017).

El diagrama de disparo de la **Figura 11** anterior tienen las siguientes características:

- Los diagramas poseen un 12% más de barrenos respecto al diagrama teórico.
- La longitud promedio del barrenado de los cueles y alivios es de 3,8 mt.
- Los barrenos de las cajas tienen una longitud promedio de 3,6 mt, 5% menos respecto al diseño.
- El porcentaje de avance promedio es de 88%.

### 3.3.2 Impacto de vibraciones en el contorno y respuesta de la roca.

Otro factor que incide en la sobre excavación es el daño que producen los altos niveles de vibración generados por la tronadura los que producen, dependiendo de la distancia, nuevas fracturas, extensión y dilación de fracturas preexistentes.

Se debe determinar la relación entre el impacto vibracional de las cargas en el contorno de la labor y la respuesta del macizo rocoso. Para lograr esto es necesario contar con monitoreos de vibraciones, diseñando un modelo de comportamiento vibracional y se determinar niveles de

vibración críticos para la roca, con el fin de obtener parámetros permisibles de vibraciones en el contorno.

El monitoreo de vibraciones tiene por objetivo obtener los niveles de “vibración” absolutos para cada una de las cargas explosivas, para estudiar la eficiencia de un conjunto de cargas y proveer la información necesaria para evaluar el potencial de daño que esas vibraciones pueden producir.

Las variables restantes que inciden en una mayor o menor sobre excavación son estudiadas en detalle en el siguiente capítulo.

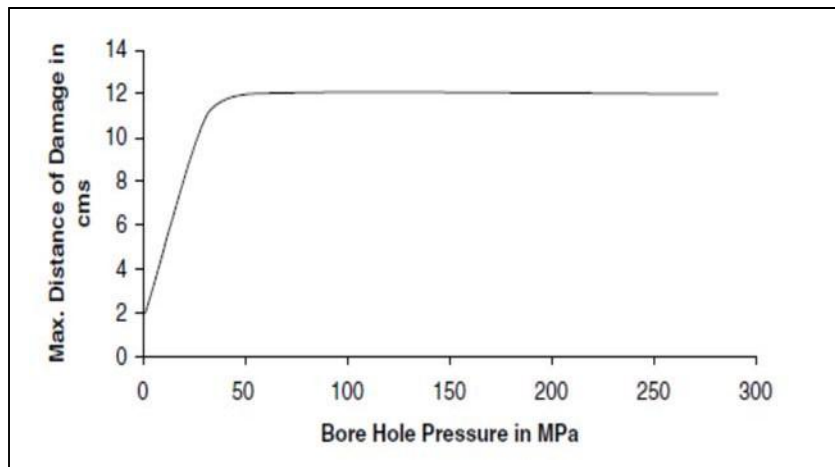
## CAPÍTULO 4: EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL EXPLOSIVO EN LA SOBRE EXCAVACIÓN

### 4.1 Características del Explosivo y su Distribución.

#### 4.1.1. Presión de barreno

Cuando detona una carga explosiva en el barreno, la presión del gas que actúa sobre la pared del barreno es variable debido a la sobre presión dinámica cercana al frente de detonación. Luego de un instante, la presión tenderá a estabilizarse en un valor cuasi-estático conocido como presión del barreno. La presión del barreno es aquella presión que los gases de la detonación ejercen sobre la pared del barreno y depende de la densidad del explosivo y del calor generado por la explosión.

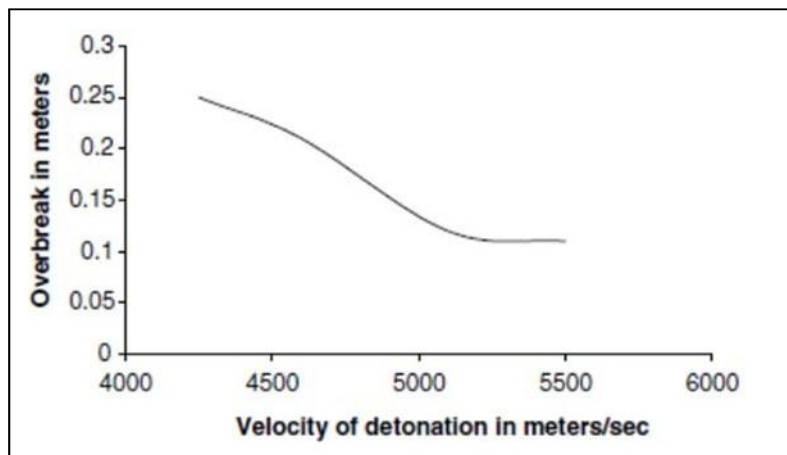
La magnitud de la presión del barreno determina la tensión y el grado de fracturamiento experimentado por la masa rocosa. Estudios que relacionan la presión del barreno y un índice de daño por tronadura muestran que la presión del barreno tiene un impacto limitado a los tiros de corona en la cantidad de sobre excavación generada en esa parte de la galería. Se observa que el daño aumenta hasta una cierta distancia al aumentar la presión del barreno hasta alcanzar un valor límite, más allá del cual la energía se consume en la fragmentación de la roca. Ver **Figura 12**.



**Figura 12:** Presión de barreno vs distancia de fracturamiento.  
Fuente: S. Paul Singh, Peter Xavier (2005).

#### 4.1.2. Velocidad de Detonación

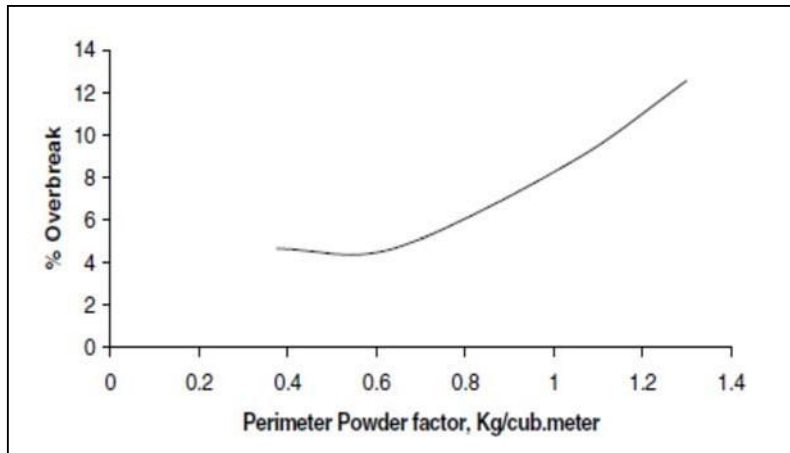
La presión de barreno de un explosivo es directamente proporcional a su velocidad de detonación (VOD). Sin embargo, a mayor presión de un barreno existe más daño en tanto que un explosivo con una VOD alta genera menos daño, lo que es verdadero ya que generalmente los explosivos con una VOD alta están desacoplados y entregan una mayor energía de choque y menos energía convertida en gas. El efecto del desacople del explosivo es disipar la energía de choque siendo la energía del gas más importante desde el punto de vista del daño. Ver **Figura 13**.



**Figura 13:** Velocidad de detonación (m/s) – sobre excavación (m)  
Fuente: S. Paul Singh, Peter Xavier (2005).

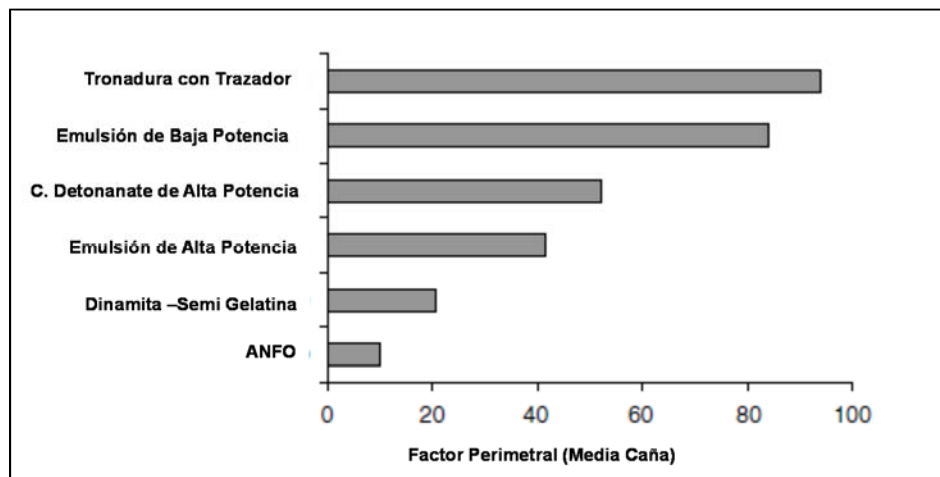
#### 4.1.3. Factor de carga

En general, un factor de carga alto producirá sobre excavación y un factor de carga bajo podría producir una sub excavación. No obstante, más importante que el factor de carga es el factor de carga perimetral, cuyo efecto en la sobre excavación se presenta en la **Figura 14**.



**Figura 14:** Factor de carga perimetral vs % de sobre excavación.  
Fuente: S. Paul Singh, Peter Xavier (2005).

En conclusión, las características del explosivo tienen un rol crítico en la generación de daño por tronadura uno de los cuales es la sobre excavación. El explosivo libera su energía e interactúa con la roca de diversas formas por causa de la diferencia en sus constituyentes y de la reacción química que genera la explosión. La **Figura 15** siguiente presenta el efecto que tiene el tipo de explosivo en la generación de la sobre excavación.



**Figura 15:** Efecto en tipo de explosivo en generar sobre excavación.  
Fuente: S. Paul Singh, Peter Xavier (2005).

## 4.2 Estudios de sobre excavación

En la minería subterránea, durante mucho tiempo se ha reconocido que la sobre excavación es la causa principal de los riesgos de peligros y deterioro en la gestión de una mina y, como tal, se han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación relacionados. Muchos trabajos de investigación se han dedicado a aclarar el fenómeno de la sobre excavación, pero aún no pueden explicar el proceso exacto de este fenómeno. De acuerdo con algunos estudios, los factores que causan la sobre excavación pueden clasificarse en dos grupos. 1) Factores geológicos y 2) factores de tronadura, son los principales grupos que influyen en la sobre excavación (Mahtab et al., 1997; Mandal et al., 2008).

### 4.2.1. Parámetro de Tronadura

Los parámetros de tronadura son modificables y controlables en cierta extensión e incluyen factores tales como: geometría de la tronadura, perforación inadecuada, perforaciones guía, secuencias de disparo, diseño de corte, desviación de tronadura, características del explosivo, concentraciones de carga, relación de acoplamiento, factores de carga, niveles de energía y onda de choque inducidos por explosión, etc. Los parámetros de explosión afectan la sobre excavación en una correlación mutua compleja en tan solo unos pocos milisegundos. En realidad, para obtener un plano de fractura suave sin ningún daño en la pared, el diseño de tronadura debe ser el adecuado y la perforación precisa debe ser una prioridad.

Con estas influencias en la sobre excavación y la flexibilidad para manipular los parámetros de tronadura, se han llevado a cabo muchos proyectos de investigación para comprender las causas de la sobre excavación y para revelar las influencias de los parámetros de tronadura en el fenómeno de la sobre excavación. Por ejemplo, **Rustan (1998)** llevó a cabo pruebas de voladura de modelos y de campo para definir el tiempo de retardo óptimo entre las perforaciones de contorno en la tronadura combinando sistemas de iniciación simultáneos y micro-secuenciales. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas, pero se descubrió que el sistema de iniciación simultánea es superior para minimizar el exceso de radiales. Como resultado, las pruebas de campo mostraron que la longitud máxima de grietas radiales en la masa rocosa restante de los sistemas de iniciación simultáneos creaba 1,3 a 9,0 veces

menos que el sistema de iniciación micro-secuencial que tenía solo 1 m/s de retardo de disparo entre las perforaciones del contorno.

#### **4.2.2. Parámetros geológicos**

Los parámetros geológicos son factores fijos y la mayoría de ellos, como la resistencia de la masa rocosa, las características de las discontinuidades, las condiciones del agua presente, las condiciones de esfuerzos y la topografía del área circundante influyen en el fenómeno de sobre excavación. Existen estudios de investigación para comprender la relación entre los factores geológicos y la sobre excavación. **Hagan (1992)** enfatizó en un estudio, que las fracturas en la roca tienden a dominar la naturaleza del patrón de fracturas inducido por la tronadura y generalmente influye en la sobre excavación más que las propiedades mecánicas y físicas de la roca.

Entre los factores geológicos, la orientación de la discontinuidad es uno de los principales factores que influyen en el fenómeno de sobre excavación. **Hoek y Brown (1980)** señalaron que en un plano de discontinuidades que tiene un impacto paralelo al eje del túnel se considera que tiene un efecto desfavorable sobre la sobre excavación. En general, se observa menos sobre excavación donde el manto de la discontinuidad es casi perpendicular al eje del túnel y mayor cuando son casi paralelos.

### **4.3 Carguío de frente con explosivo ANFO utilizado actualmente en los desarrollos horizontales**

El explosivo que se utiliza para tronadura de desarrollos horizontales en la actualidad es ANFO, lo que ha llevado a considerar otras alternativas de explosivos para la tarea de tronadura con el fin de reducir la sobre excavación por causa del tipo de explosivo.

Para el carguío de la frente, se emplea grúa con jaula con techo protector (cuenta con malla de seguridad), cuya estructura esta forrada, cadenas a tierra y tubo de escape con aislante. La secuencia de carguío es la siguiente:

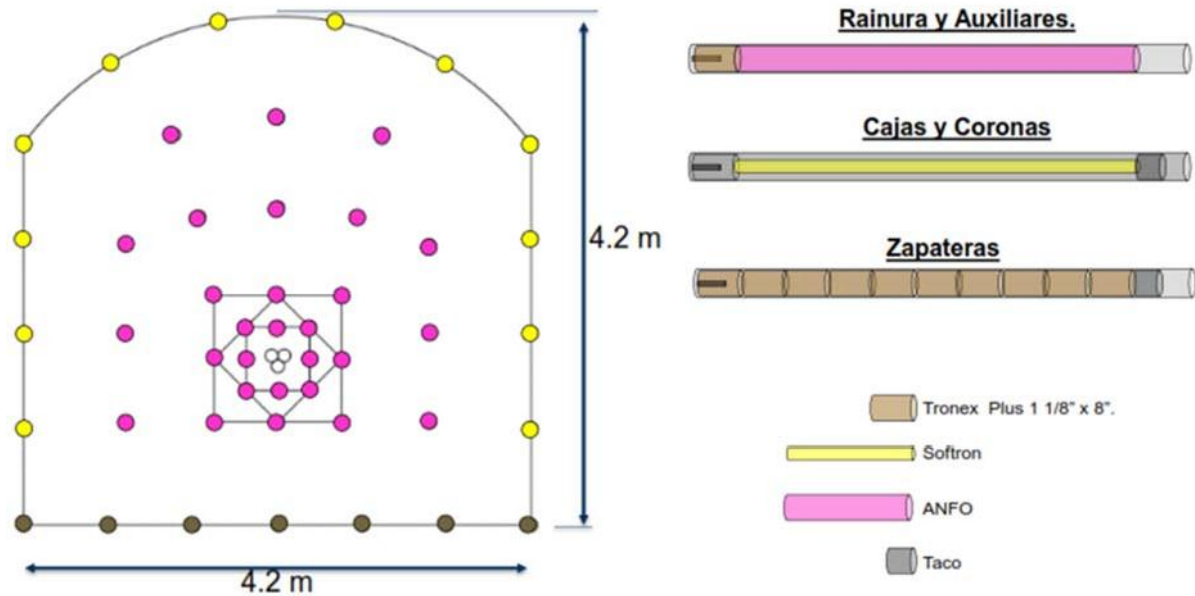


- Distribuir los cebos, según secuencia de salida, en la boca de los tiros de arriba hacia abajo (a excepción de las zapateras que se cebarán y cargarán al final del proceso de carguío).
- Luego, se introducirán los cebos en los tiros empleando coligue de largo adecuado, de arriba hacia abajo.
- Luego se cargarán los tiros con ANFO, de arriba hacia abajo.
- El carguío de periferia cajas y coronas con Tronex como cebo más Softrón más el taco.
- Los tiros de zapatera con Tronex más taco.

El diseño de los diagramas de disparo contempla los explosivos de acuerdo a la disposición siguiente:

- |                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| • Cebo           | Tronex N° 2 de 1 1/8"x8" |
| • Zapateras      | Tronex N° 2 de 1 1/8"x8" |
| • Contorno       | Softrón 11/16x20"        |
| • Resto disparos | ANFO                     |
| • Iniciación     | No eléctrica             |
| • Rainuras       | Retardos de la serie MS  |
| • Resto disparo  | Retardos de la serie LP  |

Se realiza un uso racional y controlado de los explosivos, con el fin de no producir sobre excavaciones que determina el costo de los precios unitarios de los desarrollos horizontales de un 20%, considerado como sobre excavación normal. El diagrama utilizado se presenta en la **Figura 16.**



**Figura 16:** Detalle de diagrama de carguío tipo.  
Fuente: mina Esmeralda, El Teniente (2017).

#### 4.4 Características de explosivos ANFO y SUBTEK

Es importante conocer las características propias de cada explosivo con el fin de determinar su correcta utilización, principalmente en función de las propiedades geoestructurales y geomecánicas de la roca en que se realizará la tronadura y de los componentes que se han utilizado para su elaboración. Con el conocimiento de esta información se podrá evaluar y determinar el explosivo más adecuado requerido para el desarrollo de galerías o túneles.

Las características se pueden dividir en dos grupos:

- Funcionales.
- Prácticas.

##### **Características funcionales:**

Las características referentes al funcionamiento o detonación de un explosivo se pueden dividir en dos subcategorías: rompedoras, asociadas al impacto violento de la onda de choque generada durante la detonación; y energéticas, asociadas al proceso de expansión posterior de los gases generados producto de la reacción química.

A su vez en estas subcategorías se dividen en:

**i.- Características rompedoras:**

- Densidad
- Velocidad de detonación (VOD)
- Presión de detonación (PD)

**ii.-Características energéticas:**

- Trabajo de expansión de los gases
- Volumen de gases
- Presión de explosión

**Características prácticas:**

Se refieren a las características relacionadas con la aplicación, el manejo operacional y las restricciones de seguridad que poseen los explosivos.

Estas se dividen en:

- Fuerza o potencia
- Diámetro crítico
- Balance de oxígeno (BO)
- Sensibilidad
- Resistencia al agua
- Tolerancia a la presión

Existen diferentes tipos de explosivos y dentro del mundo de la minería subterránea se utilizan principalmente dos: Emulsión y ANFO. El primero se caracteriza por tener una alta presión de barreno inicial (que se atenúa rápidamente) que ocasiona la onda de choque, mientras que el ANFO, posee una presión máxima de barreno menor, pero que se atenúa de forma más lenta, entregando más energía en forma de gas durante este proceso.

**4.4.1 Características explosivo ANFO. (Fuente: ENAEX S.A.)**

**Descripción**

Agente de voladura de alta calidad, fabricado con nitrato de amonio grado explosivo de baja densidad y alta absorción de petróleo. Se mezcla y carga in-situ mediante camiones especialmente diseñados. Sus principales propiedades se presentan en la [Tabla 4.4.1](#). No se encuentra el origen de la referencia..

<b>ANFO</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,75 - 0,80
Velocidad de detonación (VOD) medición (m/s)	3.800-4.100
Resistencia al Agua	Nula
Tiempo de Espera	30 días
Diámetro mínimo de barreros (mm)	38
Energía Relativa Efectiva (REE)	
Fuerza Relativa en peso (%)	125
Fuerza Relativa en volumen (%)	130

**Tabla 5:** Propiedades técnicas del ANFO  
Fuente: ENAEX S.A.

### Aplicación

El ANFO a granel es un agente de voladura de bajo costo, recomendable para minería subterránea, en zonas con buena ventilación, y para voladuras de superficie, especialmente cuando se desea una moderada concentración de carga. Se recomienda utilizarlo en perforaciones mayores a 3” de diámetro, sin presencia de agua.

El ANFO se entrega en forma mecanizada, directamente en las perforaciones de mediano o gran diámetro, mediante camiones fábrica vaciadores (“Auger” o “Quadra”), por lo que es recomendable cuando el volumen de consumo lo justifica.

#### 4.4.2 Características explosivo SUBTEK CHARGE. (Fuente: ORICA S.A.)

##### Descripción

La emulsión explosiva a granel SUBTEK Charge es un explosivo bombeable sensible a un iniciador, que tiene la apariencia de un fluido opaco, con viscosidad similar a la grasa liviana o aceite pesado. Tiene excelente resistencia al agua como característica propia de estructura de emulsión.

## Aplicación

Es fabricado en el sitio de voladura desde una unidad de bombeo subterránea diseñada por el fabricante. Ésta combina una emulsión no explosiva con un sensibilizador para entregar un producto explosivo resistente al agua, puede ser usada en todas las aplicaciones subterráneas, especialmente en barrenos descendentes y horizontales.

## Beneficios claves

- Puede ser cargada en barrenos de hasta 80 metros de longitud vertical.
- Fue desarrollado para proporcionar un rendimiento confiable en barrenos excepcionalmente largos.
- Al ser una emulsión bombeable reduce el derrame, y junto con la excelente resistencia al agua minimiza el percolamiento de nitrato y el resultante impacto medio ambiental.
- Proporciona cargas explosivas totalmente acopladas para maximizar los resultados de las tronaduras.
- La gran velocidad de carga y los reducidos gases post voladura, 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.

<b>Explosivo SUBTEK</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,15 – 1,25
Velocidad de detonación (VOD)- Medición (m/s)	3.500 -5.700
Resistencia al Agua	Si
Tiempo de Espera	21 días
Diámetro mínimo de barreros (mm)	40
Energía Relativa Efectiva (REE)	-
Fuerza Relativa en peso (%)	87-91
Fuerza Relativa en volumen (%)	125-142

**Tabla 6:** Propiedades técnicas de Emulsión SUBTEK  
Fuente: ORICA S.A. (2017)

Notas:

(\*) La VOD real depende de las condiciones de uso incluyendo el diámetro del barreno y el grado de confinamiento.

(\*\*) La “Energía Efectiva Relativa” (REE) de un explosivo es la energía calculada a estar disponible para hacer efectivo el trabajo de la voladura, es relativo al ANFO a una densidad de 0,8 g/cm<sup>3</sup>.

### **Primado e Iniciación**

Puede ser iniciado de manera confiable usando un booster Pentex TM o un cartucho de explosivo Senatel TM junto con un detonador Exel TM. El diámetro del cartucho del explosivo Senatel TM debe ser apropiado para el tamaño del barreno.

El tiempo máximo de espera recomendado es de 7 días. El tiempo de espera depende de factores tales como: diámetro del barreno, densidad, condiciones de agua del terreno y sistema de iniciación. Este producto está disponible para uso en terrenos de temperatura entre 0° a un máximo de 40°C.

### **Seguridad**

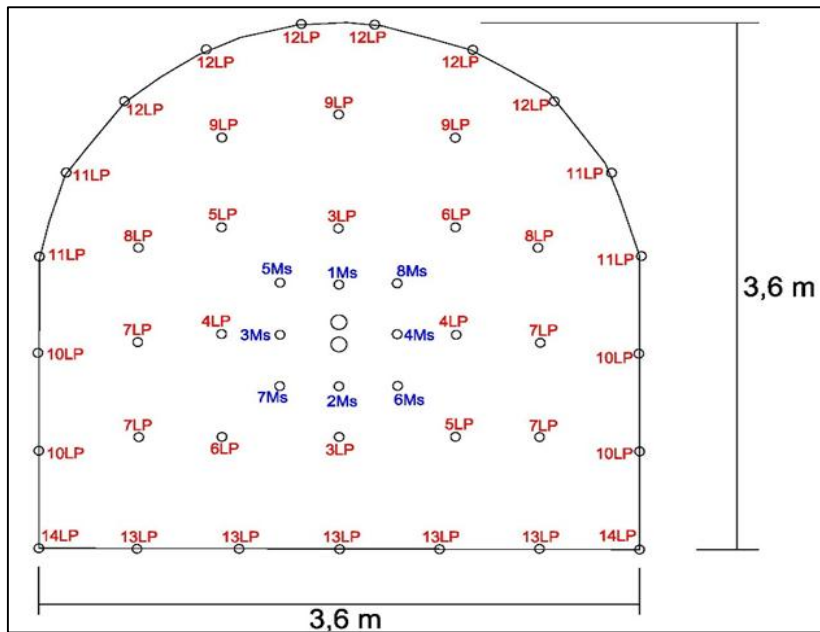
Los gases post-detonación característicos de SUBTEK lo hacen apropiado para aplicaciones de voladura subterránea. Se debe asegurar que haya una ventilación adecuada previa al reingreso dentro del área tronada. Es relativamente insensible a la iniciación por impacto, fricción o impacto mecánico bajo condiciones de uso normal. Puede ocurrir detonación producto de impacto fuerte o calor excesivo, particularmente bajo condiciones de confinamiento. Los explosivos hechos a base de Nitrato de Amonio tales como SUBTEK pueden reaccionar con materiales piríticos en el terreno y pueden crear situaciones potencialmente peligrosas.

#### **4.4.3 Comparación de Diagrama del explosivo ANFO y SUBTEK.**

### **Descripción**

Nuestro estudio comprobamos que el diagrama de disparo de perforación para el explosivo ANFO y el explosivo emulsión SUBTEK, tiene diagramas distintos entre ambos explosivos

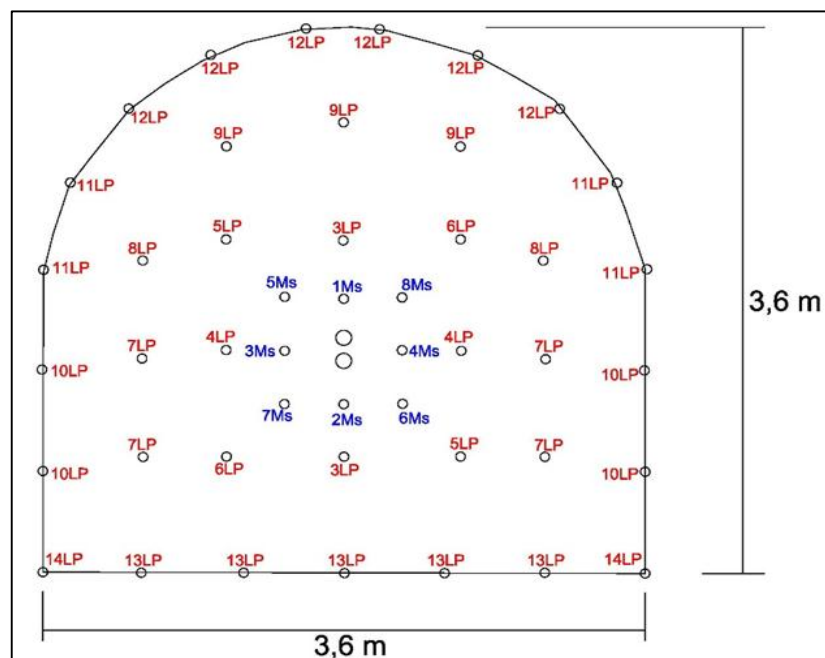
1.- En el caso del explosivo ANFO, es el siguiente diagrama de perforación:



Fuente: Elaboración propia.

Como nos muestra este diagrama de disparo para el explosivo ANFO, es de 51 tiros y 2 tiros de alivios.

2.- En el caso del explosivo SUBTEK, es el siguiente diagrama de perforación:



Fuente: Elaboración propia.

Como nos muestra este diagrama de disparo para el explosivo SUBTEK, es de 45 tiros y 2 tiros de alivios. Al utilizar el explosivo SUBTEK, se disminuye 6 tiros.

#### 4.4.4 Método de Pearse Monsanto

##### Descripción

Este método de Pearse Monsanto, se puede calcular el factor de carga y la energía estimada de la tronadura. Al considerar la detonación de perforación, la velocidad de detonación y el factor de carga del explosivo.

$$E = \frac{K}{50} D \sqrt{\frac{P.D}{RT}}$$

- **E** = Espaciamiento Máxima (m)
- **K** = Factor de tronabilidad de la roca
- **D** = Diámetro del barreno (mm)
- **PD** = Presión de detonación del explosivo (kg/cm<sup>2</sup>)
- **RT** = Resistencia a la tracción de la roca - (kg/cm<sup>2</sup>)

En el caso del explosivo de ANFO, su factor de carga es de 3,04 Kg/m<sup>3</sup> y la energía estimada de la tronadura es de 16,267 KJ.

En el explosivo propuesto que es el SUBTEK, su factor de carga es de 4,29 kg/m<sup>3</sup> y su energía estimada de la tronadura es de 22,956 KJ.



## **CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL EXPLOSIVO SUBTEK EN LA SOBRE EXCAVACIÓN**

### **5.1 Descripción del Modelo Mechanistic Blasting Model (MBM-ORICA).**

El módulo Mechanistic Blasting Model (MBM) propiedad de ORICA S.A, trabaja con el Software ELFEN (RockField Software) a fin de capturar el efecto de la tronadura ante distintos escenarios de esfuerzos, patterns y explosivos. El módulo MBM es capaz de simular la detonación de un explosivo dentro de una perforación, la generación de fracturas que esto ocasiona, el movimiento del macizo rocoso circundante debido a los efectos inducidos de tensión-deformación, y la influencia dinámica de los gases desde la perforación y a través de toda la red de fracturas **(Minchinton & Lynch, 1996)**.

El Software ELFEN Considera una envolvente de Mohr-Coulomb con modificaciones propias del método de Rankine y una evolución anisotrópica del daño por degradación del módulo de elasticidad del material. Mientras que el módulo MBM: un modelo de fractura que utiliza los esfuerzos principales locales para definir la dirección de propagación de estas y el proceso completo de detonación, incluido el efecto de las altas presiones de los gases.

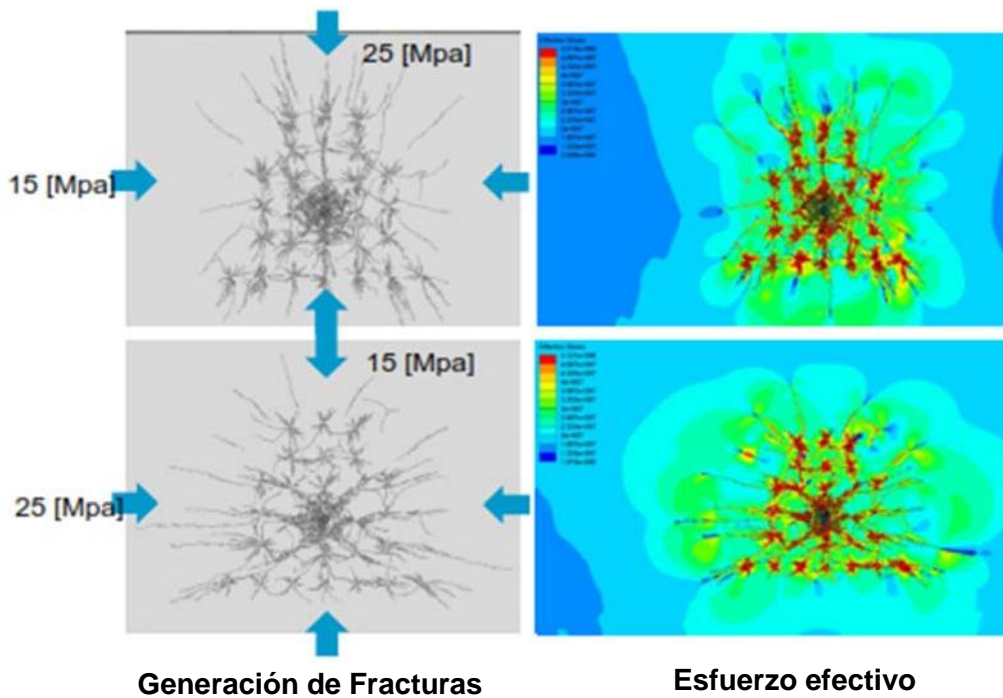
### **5.2 Simulación del uso de explosivo SUBTEK mediante la modelación MBM.**

Las pruebas que se modelarán mediante el MBM tienen un resultado gráfico, y no entrega un valor de sobre excavación. Para obtener un correcto resultado final luego de una tronadura y cuanto es la disminución de sobre excavación, para esto se necesita ejecutar en terreno un nuevo levantamiento topográfico para calcular el porcentaje real de sobre excavación.

En cuanto a las capacidades del modelamiento podemos mencionar:

- Secuencia en milisegundos.
- Esfuerzos in situ (anisotropía y dirección).
- Geometría.
- Consideración de caras libres.
- Distintos tipos de explosivos.
- Desplazamiento/proyección de material.

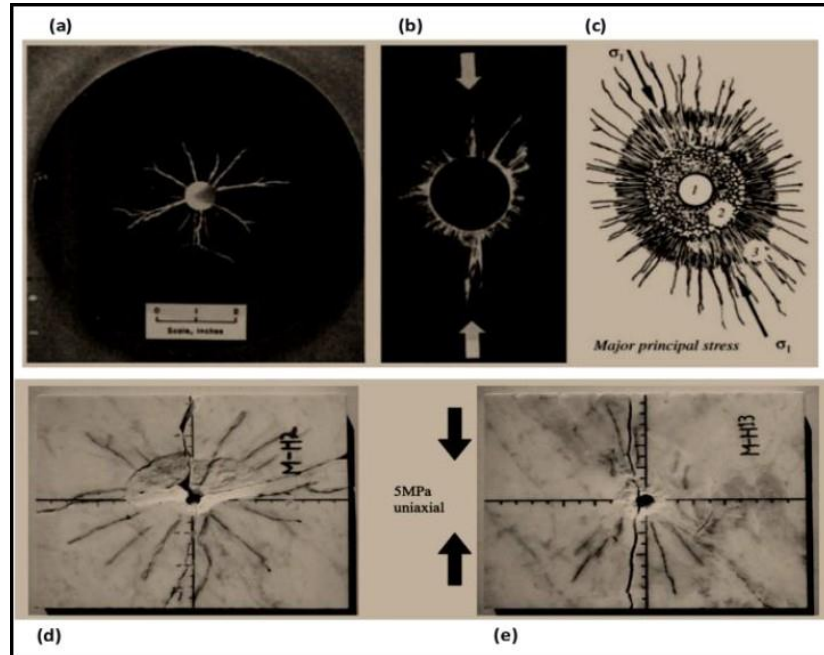
Antes debemos recordar y considerar la importancia de los esfuerzos in situ, anisotropía y orientación de los esfuerzos en la efectividad de los resultados a obtener. Se observa de forma clara como las fracturas tienden a extenderse en la dirección del esfuerzo principal mayor (**Figura 17**), lo cual ha sido probado por distintos autores a través de modelamientos, laboratorio y resultados de terreno.



**Figura 17:** Ejemplos de resultados de fracturas con esfuerzos según diseño teórico  
Fuente: mina Esmeralda. El Teniente

Como se menciona anteriormente (Jung et al) realizando pruebas de laboratorio llegó a la conclusión; y señaló que las fracturas se tenderán a alinear con la dirección del esfuerzo principal mayor (Jung et al., 2001). Luego, con algunas suposiciones, Aydan (2013) llega a la conclusión que en el caso de un ambiente de esfuerzos anisotrópico, la zona de intenso fracturamiento se extiende más allá de un diámetro de la perforación en la dirección del esfuerzo principal menor. Adicionalmente, Aydan (2013) demostró a través de experimentos en laboratorio y pruebas en terreno que la zona de extensión de fracturas se ve mucho más afectada por la anisotropía de esfuerzos in situ que la zona ampliamente fragmentada.

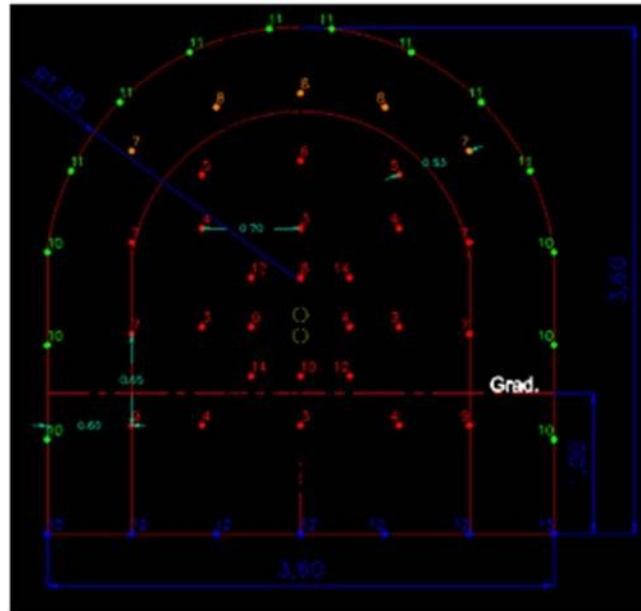
**Figura 18**



**Figura 18:** Observaciones experimentales y en terreno de influencia de los esfuerzos en la generación de fracturas de la roca (a, b y c (Aydan, 2013) d y e (Jung et al., 2001)).  
 Fuente: Aydan, 2013. Jung et al. 2001.

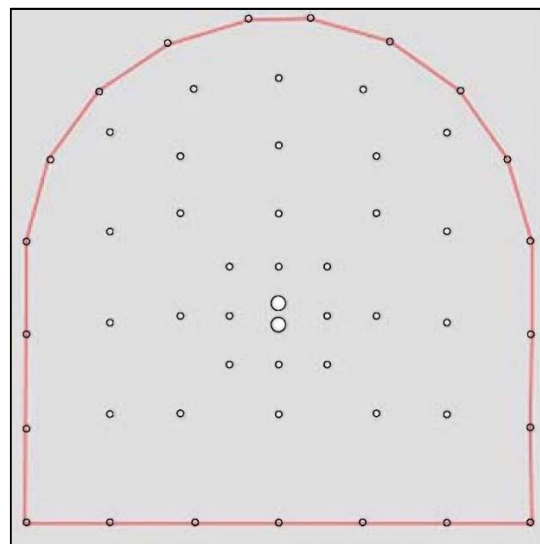
Conclusión: en un ambiente de mayores esfuerzos disminuye la efectividad de una tronadura. El alcance de las fracturas disminuye y no se logra dañar de igual modo el macizo que en un ambiente sin condición de esfuerzos.

Para realizar nuestro modelamiento primero se comienza realizando un modelamiento con el explosivo que actualmente se utiliza y una sección tipo de avance horizontal con sus respectivas características de diagrama de perforación de Sección 3,6 x 3,6 m, **Figura 19**.



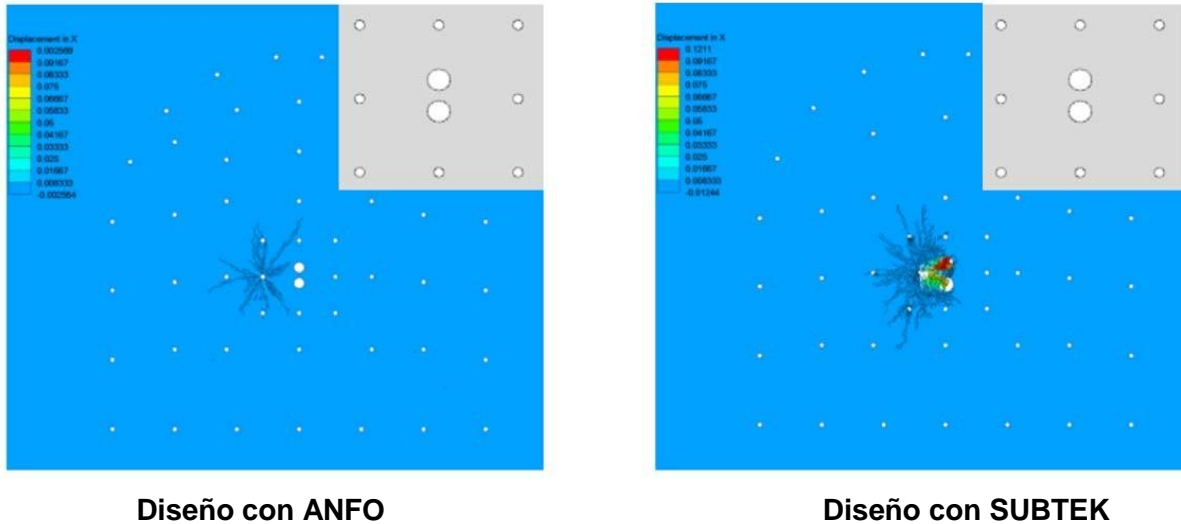
**Figura 19:** Diseño modelamiento de sección 3,6 x 3,6m.  
Fuente: Mina Esmeralda- El Teniente (2017).

Luego se ingresa el diseño para modelamiento como lo muestra la **Figura 20**.



**Figura 20:** Diseño para modelamiento (MBM).  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez teniendo el diseño de diagrama se realiza una modelación mediante la comparación de detonación del primer tiro del cuele con ambos explosivos, evidenciando que el cambio de explosivo muestra un desplazamiento en el eje X hacia los tiros de alivio como lo muestra la **Figura 21**.

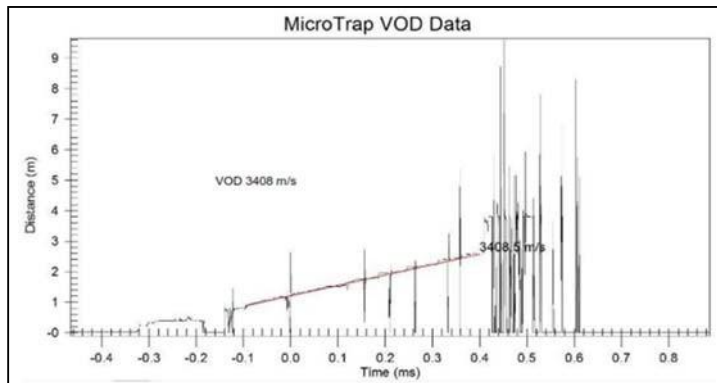


**Figura 21:** Comparación de explosivos en simulación en tronaduras de primer tiro del cuele.  
Fuente: Elaboración propia, mediante modelación MBM (ORICA).

Al realizar el modelamiento se obtuvieron las siguientes imágenes las cuales aclaran que con ANFO se nota que el efecto de los tiros auxiliares de corona logra incluso por si sólo generar sobre excavación.

Primero debemos señalar que la velocidad de detonación del ANFO es de 3408 m/s, Se encuentra dentro del rango de velocidad propia de los ANFOs cargados en diámetro de 45 mm.

**Figura 22**

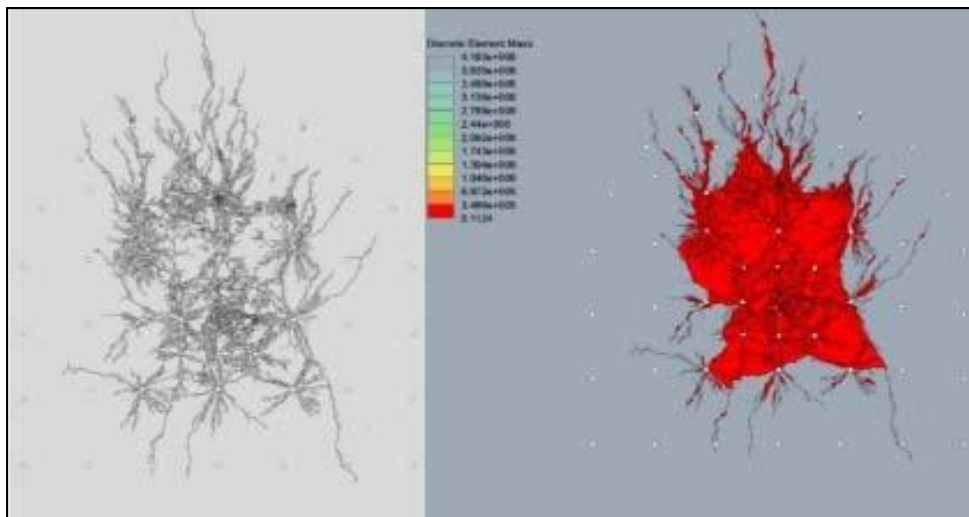


**Figura 22:** Velocidad de detonación del ANFO.  
Fuente: ORICA S.A.

Se observa que el mecanismo de fractura del ANFO / SUBTEK es totalmente distinto. El ANFO crea fracturas extensas pero discretas (Crack Zone) **Figura 213**.

Los Inputs utilizados para la modelación con ANFO son:

- Litología: CMET (Complejo Máfico El Teniente)
- Esfuerzos in situ  $s_1 = 31,1 - 34,5$  (Mpa);  $s_2 = 18,7 - 26,7$  (Mpa);  $s_3 = 7,8 - 17,9$  (Mpa)
- Esfuerzos promedio utilizados  $s_2 = 25$  (Mpa)  $s_3 = 15$  (Mpa)
- Explosivo ANFO, Densidad carguío 0,92 (g/cc).



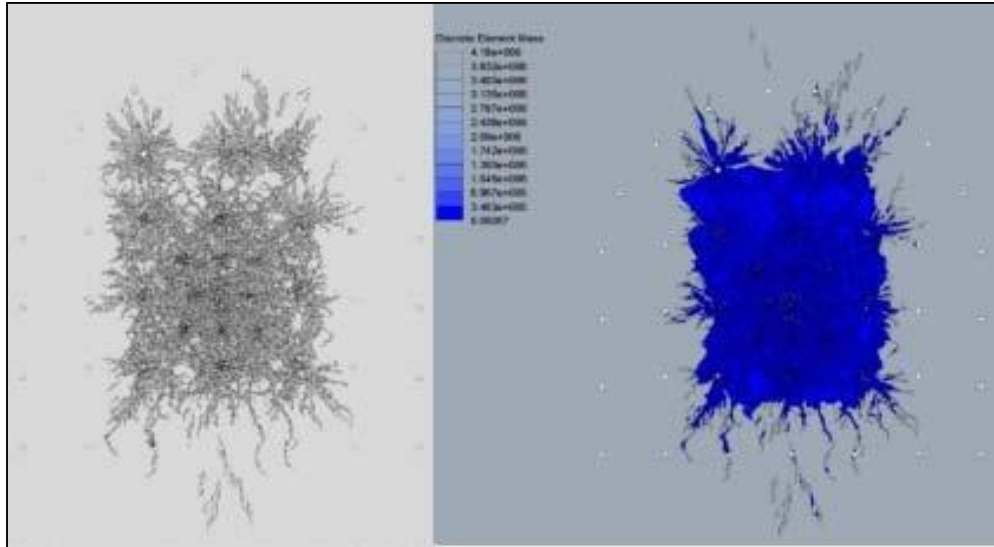
**Figura 23:** Diseño original (con auxiliar corona): generación de fracturas y granulometría resultante. (ANFO).

Fuente: Elaboración propia, mediante modelación MBM (ORICA)

Mientras que el SUBTEK (**Figura 23**) 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.

Los Inputs utilizados para la modelación con SUBTEK fueron los siguientes:

- Litología: CMET (Complejo Máfico El Teniente)
- Esfuerzos in situ  $s_1 = 31,1 - 34,5$  (Mpa)  $s_2 = 18,7 - 26,7$  (Mpa)  $s_3 = 7,8 - 17,9$  (Mpa)
- Esfuerzos promedio utilizados  $s_2 = 25$  (Mpa)  $s_3 = 15$  (Mpa)
- Explosivo Emulsión SUBTEK, Densidad carguío 1,20 (g/cc).



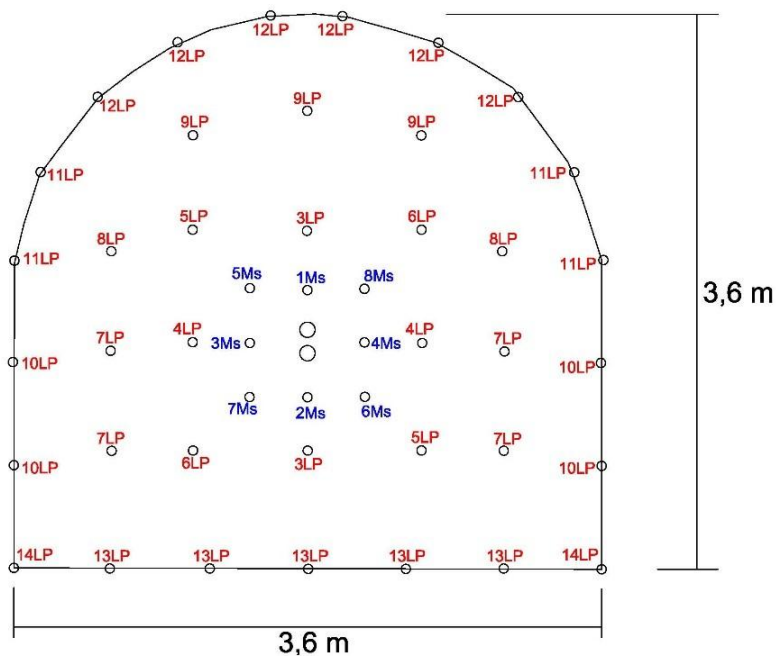
**Figura 24:** Generación de fracturas y granulometría resultante. (SUBTEK)  
Fuente: Elaboración propia, mediante modelación MBM (ORICA)

En las **Figura 23** en color rojo (ANFO) y **Figura 24** color azul (SUBTEK) se muestra la roca que hasta ese momento de la tronadura está completamente fracturada. Esto indica que el ANFO deja espacios sin romper roca y contribuye a una fragmentación más gruesa.

Debido al limitado acceso a la información y pruebas de terreno solo están disponible como evidencia de una menor sobre excavación la simulación de la fragmentación realizada por el modelo MBM y las características del explosivo SUBTEK que según la información presentada permitirían esperar una reducción de la sobre excavación. Por lo tanto, a efectos de una evaluación preliminar se asume que el explosivo SUBTEK reducirá la sobre-excavación de un 30% actual a un 20%, para determinar si es rentable el cambio al explosivo SUBTEK. Se deberán hacer pruebas en terreno para medir si esta reducción es la esperada.

## CAPITULO 6: COMPARACIÓN DE COSTOS DE LOS EXPLOSIVOS SUBTEK Y ANFO EN UNA TRONADURA. (Fuente: Elaboración propia)

Utilizando como ejemplo el diagrama de perforaciones para una sección de avance horizontal de 3,6 x 3,6, se realiza una comparación de materiales utilizados en una tronadura y luego desglosaremos los valores para obtener la diferencia en cuanto a costos de utilizar uno u otro explosivo.



**Figura 25:** Diagrama de disparo utilizado para comparación de costos  
Fuente: Elaboración propia.



## 6.1 Detalle de costos por el uso del explosivo SUBTEK en una tronadura.

Costo de Explosivo SUBTEK CHARGE					
Sección 3,6 X 3,6					
EXPLOSI VOS	CANTI DAD POR FRENTE	Unidad	\$ Unitario	US\$ Unitario	Costo Total CLP s/IVA
SUBTEK CHARGE	150	Kg	\$ 730	1,11	\$ 109.500
TRONEX 1 1/8 X 8"	158	Cart.	\$ 240	0,36	\$ 37.920
SOFRON 1 1/16 X 20"	84	Cart.	\$ 510	0,77	\$ 42.840
TERMALITA	12	m/l	\$ 127	0,19	\$ 1.520
25 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
75 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
125 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
175 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
250 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
350 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
400 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
600 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
600 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
1000 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
1400 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
1800 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
2400 LP	4	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 5.244
3000 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
3800 LP	3	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 3.933
4600 LP	4	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 5.244
5500 LP	4	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 5.244
6400 LP	6	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 7.866
7400 LP	5	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 6.555
8500 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 27.827</b>	<b>\$ 42,23</b>	<b>\$ 252.086</b>

**Tabla 7:** Costos de una tronadura con explosivo Emulsión SUBTEK.  
Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Detalle de costos por el uso del explosivo ANFO en una tronadura.

Costo de Explosivo ANFO					
Sección 3,6 X 3,6					
EXPLOSIVOS	CANTIDAD POR FRENTE	Unidad	\$ Unitario	US\$ Unitario	Costo Total CLP s/IVA
ANFO	92,5	Kg	\$ 330	0,50	\$ 30.525
TRONEX 1 1/8 X 8"	158	Cart.	\$ 240	0,36	\$ 37.920
SOFRON 1 1/16 X 20"	84	Cart.	\$ 510	0,77	\$ 42.840
CORDON DETONANTE	45	m/l	\$ 205	0,31	\$ 9.225
TERMALITA	12	m/l	\$ 127	0,19	\$ 1.520
25 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
75 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
125 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
175 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
250 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
350 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
400 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
600 Ms	1	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 1.311
600 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
1000 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
1400 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
1800 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
2400 LP	4	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 5.244
3000 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
3800 LP	3	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 3.933
4600 LP	4	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 5.244
5500 LP	4	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 5.244
6400 LP	6	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 7.866
7400 LP	5	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 6.555
8500 LP	2	c/u	\$ 1.311	1,99	\$ 2.622
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 27.632</b>	<b>\$ 41,93</b>	<b>\$ 182.336</b>

**Tabla 8:** Costos de una tronadura con explosivo ANFO.  
Fuente: Elaboración propia.

### **6.3 Detalle de ahorro en costos en una tronadura con explosivo SUBTEK para una sección de 3,6 x 3,6 con 20% de sobre excavación (Elaboración propia)**

Para realizar el análisis de costos utilizaremos de ejemplo la sección de avance horizontal de 3,6 x 3,6 los antecedentes son:

- Sección 3,6 x 3,6
- Total avances sección año 2017, 1518 m.
- Metros cuadrados de la sección 11,57 m<sup>2</sup>
- Avance efectivo de disparo 3,3 m.
- Densidad de la roca 2,6 T/m<sup>3</sup>
- Costo operación LHD US\$68 Hr.
- Productividad LHD 55 T/Hr.
- Costo total operación LHD US\$1,24 Ton.
- Costo fortificación US\$240 m/lineal
- Perímetro de la sección 12,9 m/lineal
- Sobre excavación ANFO 30% promedio.
- Sobre excavación SUBTEK 20% promedio.
- Diferencia costo ANFO vs SUBTEK US\$50,4

Al ejecutar una tronadura en forma correcta y no generando sobre excavación el total de toneladas obtenidas serían 99,3 Ton, pero como existe un 30% de sobre excavación generado por la utilización de ANFO este tonelaje aumenta a 129,1 Ton, con una densidad de la roca de 2,6 T/m<sup>3</sup>.

Como se pudo comprobar mediante el software con el modelo MBM quedó en evidencia que el explosivo SUBTEK genera menos sobre excavación, sin conocer cuánto porcentaje menos obtendremos.

Para el caso de cálculo de costos, se asume un 20% de sobre excavación, lo que entrega 119,1 Ton de material a extraer. Esto hace una diferencia de 10 Ton menos de sobre excavación si se usa ANFO.

Por concepto de ahorro de operación de un equipo LHD tenemos que el costo es de US\$ 1,24 Ton. Entonces para obtener el costo total de ahorro llevamos ese valor a la diferencia obtenida

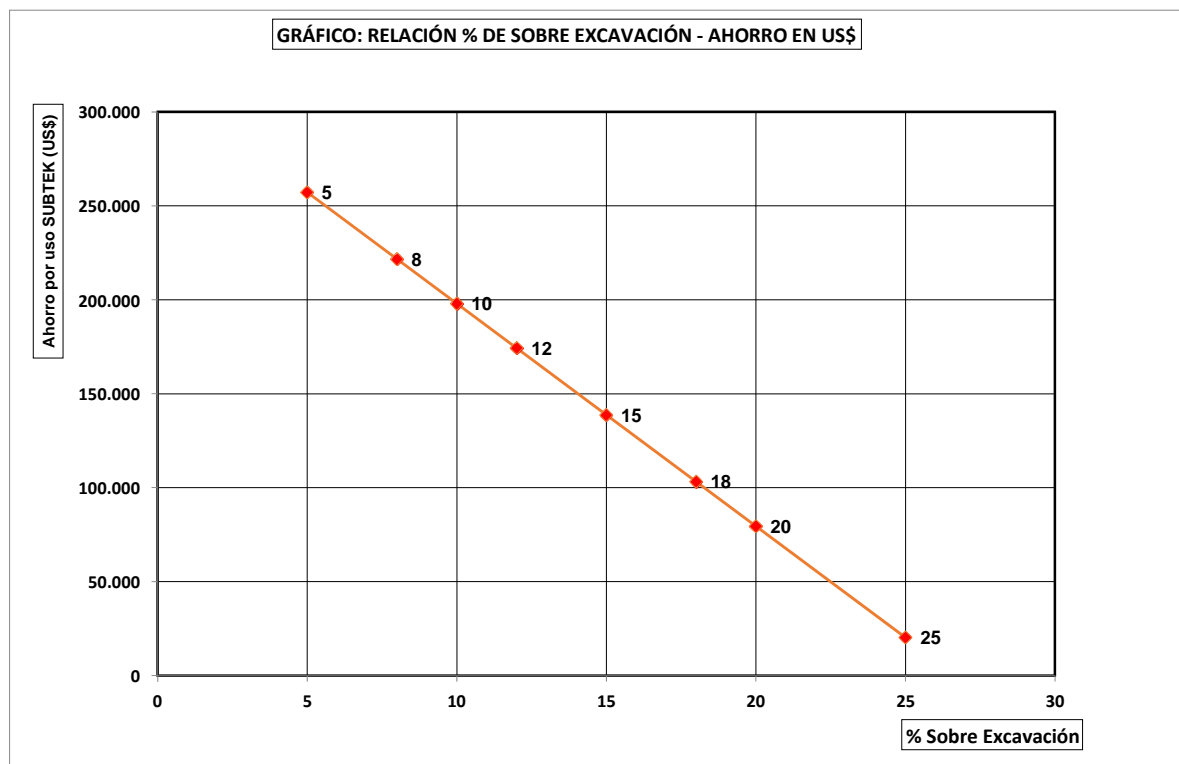
entre el 30% de S.E por ANFO y 20% S.E. por SUBTEK. Obteniendo un ahorro de US\$12,3 por disparo debido a la operación del LHD.

En cuanto a la fortificación, diferencia obtenida entre el **30% de S.E por ANFO y 20% S.E. por SUBTEK**. Nos entrega un ahorro de 1,3 m/lineales, que llevados al costo de fortificación nos da como resultado US\$310 por disparo.

El total de ahorro por utilizar explosivo SUBTEK es de US\$322 el cual corresponde a operación LHD más fortificación Schotcrete. Si a este total le restamos la diferencia entre el costo del ANFO y el costo del SUBTEK (US\$105,6) nos da un total de US\$216 de ahorro por disparo.

En resumen si durante el año 2017 para la sección de 3,6 x 3,6 se realizaron 1518 m. de avance con 3,3 m de avance efectivo por disparo, nos entrega un total de 460 disparos durante ese periodo. Utilizaremos un factor de ajuste del 80% de efectividad de disparos. Nos entrega un total de **US\$79.589** de ahorro al haber utilizado el explosivo SUBTEK.

El gráfico siguiente nos muestra el ahorro en US\$ bajo distintos escenarios de sobre excavación utilizando el explosivo SUBTEK. **Figura 26**



**Figura 26:** Costos ahorro en diferentes escenarios de sobre excavación por uso del explosivo SUBTEK  
Fuente: Elaboración propia.

En el **Capítulo 11: Anexos** del informe encuentran las tablas con el detalle los cálculos obtenidos.

## CAPÍTULO 7: Análisis de DAFO – CAME de los Explosivo SUBTEK

### 7.1 Análisis DAFO del explosivo SUBTEK



#### Debilidades:

- ✓ El costo del SUBTEK, son más elevados si lo comparamos con el explosivo ANFO. El precio puede afectar en una alza al presupuesto de explotación en los avances horizontales.
- ✓ Los equipos que se utilizan para el caguío del explosivo limiten la planificación de avance al no poder cumplir con la dimensiones mínimas.

#### Amenazas:

- ✓ Al obtener buenos resultados en tronadura, la demanda del explosivo SUBTEK aumente llevando a encarecer el producto.
- ✓ La aparición de un nuevo explosivo el cual tenga características similares al SUBTEK pero que sea de un costo más económico.

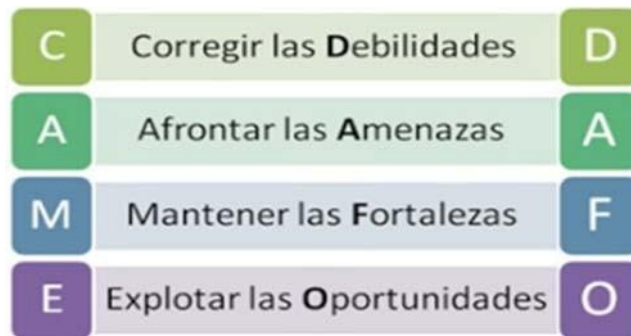
#### Fortalezas:

- ✓ Tiene excelente resistencia al agua como característica propia del SUBTEK.
- ✓ Se controla la sobre excavación, lo que disminuye los costos extras de algunas de las etapas del ciclo de minado.

### Oportunidades:

- ✓ Aumenta la producción en los avance del desarrollo de labores horizontales. Lo que disminuye las interferencias en las etapas del ciclo minado.
- ✓ Capacitación permanente del personal para la correcta utilización del explosivo SUBTEK, con la finalidad de no generar mal gastos de su uso.

## 7.2 Análisis CAME del explosivo SUBTEK



### Corregir:

- ✓ Al implementar las tronaduras con el explosivo SUBTEK, poder generar redes de apoyo con los distribuidores para así lograr trazar valores más bajos.

### Afrontar:

- ✓ Al no poder controlar el valor del producto, si debemos controlar la correcta utilización de este.
- ✓ Estar abierto a las nuevas tendencias de explosivos. Con la finalidad de obtener mejores resultados tanto económicos como de desarrollo.

### Mantener:

- ✓ La características técnicas del SUBTEK, son favorables a la condiciones de la mina y a las labores horizontales.

- ✓ Controlar el porcentaje de la sobre excavación, con inspecciones en terreno posterior a cada tronadura con la finalidad de no descuidar el avance de las secciones.

**Explotar:**

- ✓ Cumplir de mejor manera con las dimensiones de las secciones, como por ejemplo un correcto diagrama de disparos.
- ✓ Capacitar al personal con charlas y evaluaciones de la correcta utilización del explosivo SUBTEK, para que el mal uso de este no genere un aumento costos.



## **CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES**

Se concluye que actualmente en mina Esmeralda se cuenta con un problema de sobre excavación que alcanza un 30% en promedio, esto puede ser ocasionado por varios factores como operacionales, geológicos, explosivo utilizado etc. Al realizar el estudio enfocado en el explosivo llegamos a la conclusión que existen alternativas al ANFO que pueden ser probadas y llegando a buenos resultados como es el caso de la Emulsión SUBTEK CHARGE ya que una de las características bastante relevantes es su velocidad de detonación, mientras mayor sea mejor se comportara la tronadura en cuanto a no generar mayor fracturamiento y por ende mayor sobre excavación.

Una herramienta muy práctica e importante son los software y sus modeladores, en nuestro caso, al ejecutar la modelación, los ejemplos obtenidos denotan una reducción de fracturas de la roca, lo cual podemos pensar que al utilizar la alternativa de explosivo SUBTEK nos debería generar menor sobre excavación. Esto no se vería reflejado hasta que luego de una tronadura, se midiera in situ mediante topografía cual es el resultado real de la sobre excavación.

Otro resultado que indirectamente se puede obtener es la mejor granulometría del material tornado esto llevando a economizar eventualmente procesos posteriores a las tronaduras.

Lo que genera cierta duda es en los costos asociados a uno u otro explosivo y la conveniencia de cambiar ya que si bien el explosivo SUBTEK tiene mejor comportamiento en la generación de fracturas, los resultados de granulometría y de sobre excavación. Pero tiene un costo más elevado.

En lo que respecta a costos vs sobre excavación se pudo demostrar que con el explosivo SUBTEK se genera menos toneladas de material por disparo, ya que actualmente utilizando ANFO se genera un 30% de sobre excavación. Esta cantidad menos de material ayudaría a tener una mejor eficiencia en ciclo de avances de minado.

El total de ahorro potencial por el uso de SUBTEK en una sección de 3,6 x 3,6 con una sobre excavación del 20% (estimada), con un total de avances de 1518 m/lineales, nos entrega como resultado un total de US\$79.589 (\$52.448.908, valor dólar de \$659) de ahorro durante el año 2017 para la sección antes mencionada.

## **CAPÍTULO 9: RECOMENDACIONES**

Podemos señalar lo importante que es la tecnología hoy en día, más si gracias a software destinado a la minería nos permitan crear distintos escenarios para posteriormente proyectarlos en nuestras faenas. Sin lugar a dudas los modelos como es el caso de MBM nos ayudan a hacernos una idea y nos acercan a resultados óptimos los cuales se reflejarán en los costos al planificar un proyecto y en la buena ejecución de los trabajos.

Algunas recomendaciones:

- Mantener siempre bajo control los resultados de cada tornaduras, con la finalidad de ver cómo se comportan los niveles de sobre excavación.
- Capacitar constantemente al personal que opera en las labores de barrenado y carguío de explosivos, para evitar malas prácticas de trabajos.
- Estar actualizado en software y sistemas de modelación que están apareciendo en el mercado ya que cada día traen nuevas mejoras.
- Como el caso del punto anterior tener siempre considerado inversiones en tecnologías, esto nos ayudará a poder mirar desde otro punto de vista nuestras labores (realizando modelaciones) para ver cómo podemos mejorar nuestros proyectos y costos.

## **CAPÍTULO 10: BIBLIOGRAFIA**

ORICA Chile S.A. 2018. Sesión de manejo modelo MBM para simulación de tornaduras.

Mina Esmeralda-El Teniente, 2017. Antecedentes e información de tronaduras y sobre excavación.

ENAEX, 2017. Catálogo características ANFO a granel.

ORICA Mining Service 2017. Catálogo características SUBTEK CHARGE.

HK Verma, RD Dwivedi, P. Pal Roy y PK Singh, 2016. Causes, impact and control of overbreak in underground excavations. Pág. 29 a 34

CDT. Buenas Prácticas en la Construcción Minera, 2015. Mesa de Trabajo de Productividad, Consejo Minero - Cámara Chilena de la Construcción (CChC). Informe Técnico.

Contreras C. Camila F., 2015. Simulación como herramienta para la planificación de la preparación minera en minería tipo block/panel Caving” Tesis Título de Ingeniera Civil de Minas. Universidad de Chile.

Hyongdoo Jang, Erkan Topal, 2013. Optimizing overbreak prediction based on geological parameters comparing multiple regression analysis and artificial neural network. Pág. 161 a 169

Lavado David, 2014. Metodología de asignación de recursos en desarrollos minería subterránea. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Memoria de Ingeniería Civil de Minas.

Ponce Valdés R., 2009. Análisis con y sin forzamiento del crecimiento del Sector Oeste de Mina Esmeralda. Tesis Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.

EYENESA, 2009. Manual para consulta de características de los explosivos.

Music G, Andrés A., 2007. Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal, mina El Teniente. Tesis Título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile.

Celhay, F., Burgos, L., Pereira J., 2006 (Congreso geológico Agosto 2006). Geología proyecto nuevo nivel mina, división El Teniente, Codelco-Chile.

S. Paul Singh, Peter Xavier, 2005. Causes, impact and control of overbreak in underground excavations. Pág. 63 a 71

Arriagada José. 1991. Manual de explosivos. IRECO Chile Ltda.

## CAPÍTULO 11: ANEXO

### 11.1 Costos de avances horizontales año 2017 sección de 3,6 x 3,6 (Elaboración propia)

Toneladas por disparo					
sección	m <sup>2</sup> sección	Avance efectivo (m)	m <sup>3</sup> disparo	Densidad roca (t/m <sup>3</sup> )	Total Ton/disparo ideal (Ton)
3,6 x 3,6	11,57	3,3	38,2	2,6	99,3

Toneladas por disparo con 30% sobre excavación explosivo ANFO						
sección	m <sup>2</sup> sección	Avance efectivo (m)	Sobre excavación (%)	m <sup>3</sup> disparo	Densidad roca (t/m <sup>3</sup> )	Total Ton/diparo (Ton)
3,6 x 3,6	11,57	3,3	30	49,6	2,6	129,1

Toneladas por disparo de sobre excavación con explosivo SUBTEK CHARGE							
sección	m <sup>2</sup> sección	Avance efectivo (m)	Sobre excavación (%)	m <sup>3</sup> disparo	Densidad roca (t/m <sup>3</sup> )	Total Ton/diparo (Ton)	Total ahorro por uso SUBTEK (Ton/disp)
3,6 x 3,6	11,57	3,3	25	47,7	2,6	124,1	5,0
3,6 x 3,6	11,57	3,3	20	45,8	2,6	119,1	9,9
3,6 x 3,6	11,57	3,3	18	45,1	2,6	117,1	11,9
3,6 x 3,6	11,57	3,3	15	43,9	2,6	114,2	14,9
3,6 x 3,6	11,57	3,3	12	42,8	2,6	111,2	17,9
3,6 x 3,6	11,57	3,3	10	42,0	2,6	109,2	19,9
3,6 x 3,6	11,57	3,3	8	41,2	2,6	107,2	21,8
3,6 x 3,6	11,57	3,3	5	40,1	2,6	104,2	24,8

Costos operación LHD			Dólar = \$659
Costo operación LHD (US\$/Hr)	Productividad LHD (Ton/Hr)	Costo total LHD (US\$/Ton)	Costo total LDH (CLP\$/Ton)
68	55	1,24	814,8

Ahorro operación LHD					
Explosivo	Total Ton/diparo (Ton)	Costo total LHD (US\$/Ton)	Costo total operación LHD (US\$)	Ahorro LHD (US\$)	Ahorro LHD (CLP\$/Ton)
Disparo ANFO (30% S.E.)	129,1	1,24	159,6	12,3	8.088
Disparo SUBTEK (20% S.E.)	119,1	1,24	147,3		

<b>Cantidad de Shotcrete</b>				
Explosivo	Perimetro Sección (m/lineal)	Sobre excavación (%)	Perimetro total Sección (m/lineal)	Ahorro total (m/lineal)
Disparo ANFO	12,9	30	16,8	1,3
Disparo SUBTEK	12,9	20	15,5	

<b>Fortificación (Valor US\$240 m/lineal)</b>			
Ahorro metro lineal (m)	Valor Fortificación m/lineal (US\$)	Total Fortificación m/lineal (US\$)	Total Fortificación m/lineal (CLP\$)
1,3	240,0	309,6	204.026

<b>Total uso SUBTEK (por disparo)</b>			
Item	Valor Item (US\$)	Total Item (US\$)	Total ahorro (CLP\$)
Marina (LHD)	12,3	321,9	212.115
Fortificación	309,6		

<b>Total general uso SUBTEK (por disparo)</b>			
Item	Costos (US\$)	Total ahorro (US\$)	Total ahorro (CLP\$)
Ahorro por uso de SUBTEK	321,9	216	142.524
Costo adicional SUBTEK	105,6		

<b>Total ahorro potencial por utilizar SUBTEK (sección de 3,6 x 3,6)</b>						
Sección	Total avances sección año 2017 (m)	Avance efectivo por disparo (m)	Total disparos (año 2017)	Factor de ajuste	Ahorro potencial (US\$)	Ahorro potencial (CLP\$)
3,6 x 3,6	1518	3,3	460	80%	<b>79.589</b>	<b>52.448.908</b>