



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio comparativo entre el  
método de barrenación larga  
en forma vertical y el método  
de barrenación en abanicos y  
su aplicación en un rebaje  
piloto**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero de Minas y Metalurgista**

**P R E S E N T A**

Misael Joaquin Camacho Gazca

**ASESOR DE INFORME**

Mtro. Gabriel Ramírez Figueroa



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

## **DEDICATORIA**

Agradezco a Dios por permitirme dar este paso tan importante en mi vida.

A mi familia por todo el apoyo y cariño incondicional hacia mi persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al grupo de docentes que colaboró en mi formación profesional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por permitirme recibir conocimiento en sus aulas y con ello poder contribuir al desarrollo de mi país de forma responsable.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	7
1.1 Localización y acceso .....	7
1.2 Clima y fisiografía .....	8
1.3 Comunidad de Velardeña .....	9
1.4 Datos históricos .....	10
1.5 Detalles del método de explotación .....	11
1.6 Procesos operativos en el avance de obra y producción de mineral .....	13
1.6.1 Avance de obra .....	13
1.6.1.1 Barrenación .....	13
1.6.1.2 Cargado y voladura .....	13
1.6.1.3 Amacice .....	14
1.6.1.4 Rezagado .....	14
1.6.1.5 Anclaje .....	14
1.6.2 Producción de mineral .....	15
1.6.2.1 Barrenación vertical y contrapozo de salida.....	15
1.6.2.2 Ranura y cortes posteriores .....	15
1.6.2.3 Rezagado.....	16
1.6.2.4 Relleno .....	16
1.6.2.5 Acarreo.....	17
2. GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO .....	18
3. RECURSOS MINERALES .....	21
4. GEOTECNIA Y CALIDAD DE LA ROCA.....	23
5. SELECCIÓN DE LA PLANTILLA DE BARRENACIÓN .....	26
5.1 Introducción.....	26
5.2 Características espaciales.....	26
5.3 Resultados.....	30
6. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LA BARRENACIÓN VERTICAL Y LA BARRENACIÓN EN ABANICOS .....	31
6.1 Barrenación vertical.....	31
6.2 Costos de la barrenación vertical .....	34
6.3 Barrenación en abanico .....	34
6.4 Costos de la barrenación en abanico.....	37
6.5 Otros factores que intervienen para la toma de decisiones en el método de barrenación.....	37
6.5.1 Reforzamiento de roca en los rebajes de producción .....	38
6.5.2 Reforzamiento de roca para el bloque de minado en abanico .....	38
6.5.3 Reforzamiento de roca para el bloque de minado en vertical ...	39
6.6 Análisis de tipo de explosivo .....	40
6.7 Ventajas y desventajas de la barrenación en abanico contra la vertical .....	41
6.8 Análisis comparativo de costos.....	43
7. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BARRENACIÓN VERTICAL EN UN REBAJE PILOTO.....	44
<b>CONCLUSIONES</b> .....	47
<b>DOCUMENTOS CONSULTADOS</b> .....	48
<b>ANEXO</b> .....	49

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como principio, realizar un análisis comparativo entre dos métodos de barrenación para el tumbado de mineral en los rebajes de producción.

La unidad minera objeto de este estudio, “Minera El Roble, Unidad Velardeña” muestra un particular interés en llevar a cabo un estudio comparativo entre los resultados que actualmente ofrece la plantilla de barrenación larga de tipo vertical, con respecto a una propuesta de plantilla de barrenación larga, pero en forma de abanico.

Como parte del análisis, se involucran aspectos relevantes como el tipo de obras de desarrollo que cada uno de ellos requiere, la disponibilidad del equipo, los consumos de acero, explosivos y la disponibilidad de los servicios por citar los más relevantes.

De manera complementaria, y para comprender mejor las variantes del método de explotación, se presenta un panorama general de la unidad minera, de aquí en adelante denominada como “unidad de negocios” en cuanto a su localización y acceso, clima y fisiografía, geología regional, geología estructural, tipo de yacimiento mineral y la morfología de los cuerpos mineralizados.

De igual forma, se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de barrenación arriba citados, el análisis de costos entre ambos y las conclusiones del estudio, que en este caso favorecen a la plantilla de barrenación larga de tipo vertical.

## INTRODUCCIÓN

El objetivo central del estudio consiste en garantizar que los métodos de barrenación larga utilizados en la unidad de negocio sean eficientes y productivos en función de la disponibilidad de los equipos en los rebajes de producción, con parámetros e indicadores económicos que permitan obtener un beneficio integral tanto en la explotación como en la extracción del mineral.

El método de explotación utilizado en el distrito minero de Velardeña, en el área de Antares Norte, está fundamentado en las características del yacimiento mineral tales como su potencia, inclinación, echado, así como sus características estructurales y el sistema de clasificación de la calidad de la roca *Rock Mass Rating* (RMR). El resultado de este análisis favorece la aplicación de la utilización del sistema de explotación de barrenación larga y, particularmente, desde el año 2013 se utiliza el de tipo vertical.

Es por ello que resulta relevante entender las características propias del depósito tales como su geología, recursos minerales disponibles, pero, sobre todo la geotecnia y la calidad de la roca, así como también su entorno social, climatológico y datos históricos.

Una breve explicación de los criterios teórico-prácticos para la selección de una plantilla de barrenación y los detalles técnicos de la explotación por bloques de la unidad de negocios, sirve como preámbulo para entrar en materia en el estudio en cuestión.

A partir de la necesidad de preparar más rápido los rebajes para su explotación, y habiendo decidido que la barrenación larga es adecuada para este tipo de macizo rocoso, se solicita un análisis comparativo entre las dos modalidades conocidas de barrenación larga, de tipo vertical o en forma de abanico, y se procede a elaborar un listado de factores para la ejecución de dicho análisis.

Uno de los aspectos relevantes tiene que ver con las obras de preparación de cada uno de ellos. Si bien se observa que la barrenación vertical es más eficiente, en términos de rapidez, las obras de preparación son más laboriosas y por lo tanto requieren de un mayor tiempo en su ejecución.

En el caso contrario, la barrenación en forma de abanico requiere mayor tiempo de ejecución que la vertical, pero sus obras de preparación son más cortas (en metros lineales).

También es necesario realizar un estudio de costos a través del cual se tomen en cuenta las variables que intervienen, tales como, las dimensiones de las obras tanto en metros lineales como en metros cúbicos, los datos técnicos de las plantillas como los diámetros, la profundidad, el peso específico de la roca y el factor de carga, y los insumos directos como los explosivos, el acero, la mano de obra, los materiales diversos y los costos de operación de los equipos, por citar los más relevantes.

Al momento de llevar a cabo el estudio comparativo en donde se evaluaron aspectos económicos, disponibilidad de equipo, rasgos operativos y experiencia del personal se tuvo mayor afinidad hacia la aplicación de la barrenación de tipo vertical, así como la realización de una prueba en un rebaje de producción piloto.

Finalmente, un listado de ventajas y desventajas de la barrenación vertical contra la barrenación en abanicos permite mostrar que ninguno es mejor o inferior que el otro, simplemente se trata de dos opciones que cada operación minera deberá tomar en cuenta en la búsqueda de la productividad y la mejora continua de sus actividades cotidianas.

En las conclusiones se presentan no sólo los aspectos económicos sino también el factor relacionado con el tiempo de preparación de los rebajes, mismo que cobra particular importancia para la compañía minera objeto del análisis.

# 1. GENERALIDADES

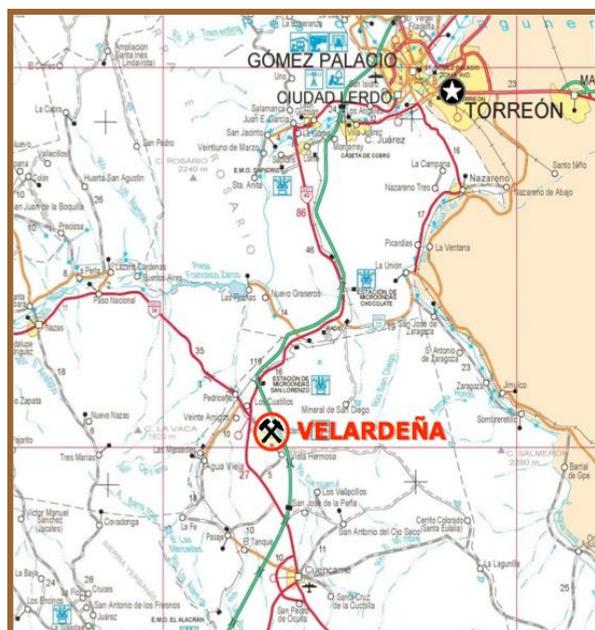
## 1.1 Localización y acceso<sup>1</sup>

La unidad minera Velardeña se localiza en la porción oriental del estado de Durango, limitado por las coordenadas: 25° 00' de latitud norte y 103° 20' de longitud oeste y a 1362 m de altitud y a una elevación media de 140 metros sobre el nivel del mar (Figura N° 1. Localización y acceso).

Se comunica desde la ciudad de Torreón, Coahuila, por la carretera federal número 49 y por autopista, a una distancia aproximada de 120 km.

El mineral de Velardeña se encuentra en el municipio de Cuencamé, a diez kilómetros al SE de Pedriceña, la que a su vez dista por ferrocarril 70 km de la ciudad de Torreón y 174 km de la ciudad de Durango.

La unidad Velardeña es estratégica para el grupo corporativo, dada su cercanía con la planta de fundición de MET-MEX Peñoles localizada en Torreón, Coahuila.



*Figura N° 1. Localización y acceso*

<sup>1</sup>Servicios Administrativos Peñoles, S.A de C.V, Minera Roble, Proyecto Velardeña, “Estudio de prefactibilidad a 6,000 TPD”. Torreón, Coahuila.

## 1.2 Clima y fisiografía<sup>2</sup>

Se trata de una zona semiárida en donde el clima predominante es seco semi-cálido. Según la clasificación climática de Köppen modificada, corresponde a un clima BS1hw, que es el menos seco de los climas de la serie BS (Figura N° 2), La temperatura media es de 21°C. La precipitación es de 243.7 mm anuales y la dirección de los vientos es suroeste al noreste moderado con velocidad de 2.1 a 6 m/s.

En cuanto a su fisiografía y geomorfología, la zona se localiza en el borde noroccidental de la provincia fisiográfica de la meseta central, en la subprovincia de las Sierras Transversas, presentando un estado de madurez con una topografía mixta.

Las corrientes fluviales de la zona drenan hacia las cuencas endorreicas o bien hacia los afluentes del río Nazas y del oriente agua naval, los que a su vez descargan con dirección al bolsón de Mapimi, siendo todas ellas de tipo intermitente de corta duración durante la época de lluvias.



*Figura N° 2. Poblado de Velardeña*

La geomorfología muestra características típicas de un ciclo de tierras semiáridas y áridas, que presentan un aspecto de submadurez a madurez, con abundantes valles y bajíos que han sido rellenados debido a la erosión de las sierras circundantes.

El tipo de drenaje en la región es en general dendrítico, donde muchos arroyos no forman un cauce definido, sino solo en el escurrimiento de laderas perdiéndose o infiltrándose en la zona de la planicie; aunque algunos de ellos presentan un patrón controlado por el fracturamiento derivado de los esfuerzos y las deformaciones creadas por la orogenia Laramide y la disipación posterior de esfuerzos.



*Figura N° 3. Distrito de Velardeña*

### **1.3 Comunidad de Velardeña<sup>3</sup>**

La comunidad de Velardeña se sitúa en el distrito minero formado por las sierras de Santa María y San Lorenzo al norte de la meseta central y al este de la Sierra Madre Occidental, a cuatro kilómetros de la carretera interoceánica en el tramo Cuencamé-Lerdo, Durango, a una elevación de 1400 msnm y una superficie de 153 km<sup>2</sup>.

Cuenta con alrededor de 2500 habitantes. Los terrenos en los que se ubica el poblado pertenecían a Industrial Minera México, S.A. (IMMSA), y actualmente se encuentra vigente un proceso de juicio legal para que estos sean cedidos a la comunidad de Velardeña.

El 95% de los jefes de familia saben leer y escribir contando en promedio con primaria terminada. Entre los habitantes mayores de edad el nivel de estudios es mucho menor.

La mayoría de las casas en Velardeña tienen servicio de agua y energía eléctrica.

Respecto al drenaje, algunos de los barrios están conectados a una tubería que lleva los desechos a una laguna de almacenamiento, cercana al arroyo.

La localidad cuenta con servicios de educación en los cuatro niveles, preescolares, primaria, secundaria y preparatoria técnica. Faltan servicios de recolección y confinamiento de basura.

#### 1.4 Datos históricos<sup>4</sup>

**1606.** Descubrimiento del distrito minero Velardeña. Inicia la producción industrial a finales del siglo XIX.

**1902.** Fue adquirida esta propiedad por la American Smelting & Refining Co (Asarco), y la antigua fundición fue sustituida por una moderna de 2500 toneladas de capacidad diaria, fundiendo también en ella los minerales obtenidos por compra a algunos de los negocios establecidos en aquella misma zona (Figura N° 4).

**1980.** IMMSA inicia la exploración del cuerpo Santa María por mineralización de Ag, Zn, Cu y Pb. Instala una planta con capacidad de 1000 tpd.

**2000.** IMMSA cierra operaciones por el bajo precio de los metales.

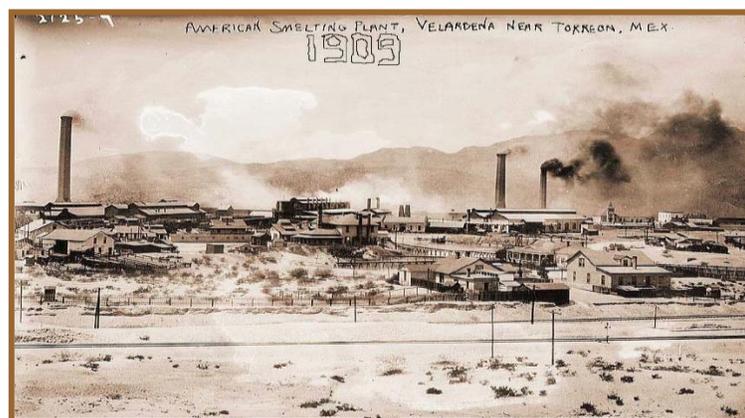
**2003.** Peñoles adquiere la parte accionaria de Outokumpu para tener el 100% del yacimiento.

**2005.** Peñoles adquiere infraestructura y concesiones de IMMSA. El distrito se consolida con un programa de exploración integral.

**2007.** Inicia la campaña de barrenación en superficie y la obra minera de preparación para llegar al cuerpo Antares Norte.

**2008.** Se definen los recursos minerales en los cuerpos Santa María, Antares Sur y Antares Norte.

**2009.** Se lleva a cabo la modelación geológica y la estimación de los recursos minerales para iniciar, en 2010, las obras de preparación.

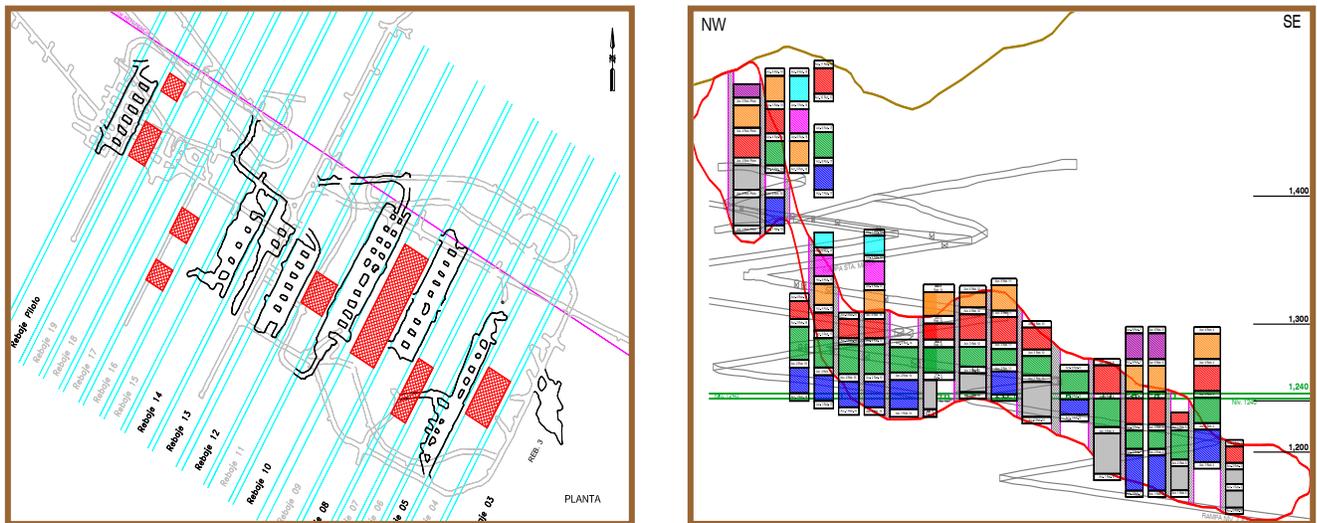


*Figura N° 4. Antigua fundición de Asarco en Velardeña – 1909*

## 1.5 Detalles del método de explotación

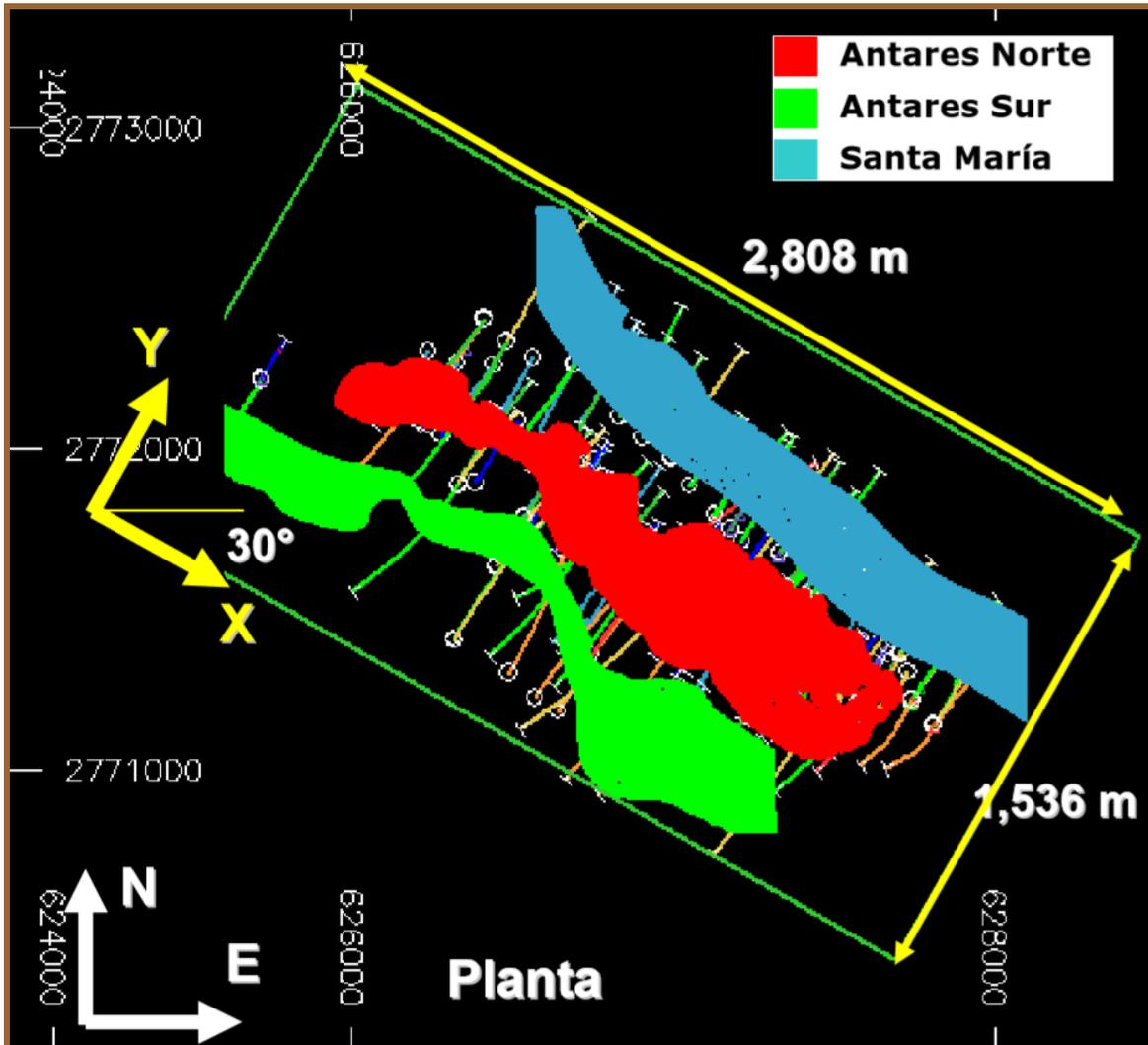
El cuerpo mineral es de tipo *skarn*, el cual tiene uniformidad tanto en su longitud como en su potencia. Dadas las condiciones anteriores es por lo que se decide hacer una combinación de métodos de minado (tumbe por subniveles / salones y pilares) debido a que cada bloque tiene sus particularidades en cuanto a longitud, potencia y altura de banco ya que existen diversas intercalaciones de tepetate en el cuerpo mineral en donde sería complicado un minado tradicional de tumbe por subniveles. Tampoco es posible disponer de un nivel general de acarreo ya que cada bloque tendrá su extracción en el nivel inferior.

No obstante que la calidad de roca es buena, se recomienda realizar el relleno de los rebajes para garantizar una mejor estabilidad y seguridad para el minado de los bloques posteriores. Se deberá empezar el relleno por la parte inferior (Figura N° 6, observar el color gris) y así sucesivamente continuar el minado en forma ascendente. Es importante tomar en cuenta que la explotación de los bloques deberá ser alternada, denominando a un grupo como “pares” y al otro como “nones”. Por ejemplo, un rebaje tipo “par” podrá ser explotado una vez que se ha rellenado el rebaje “non” y así en adelante.



**Figuras N° 5 y 6. Secciones de planta y longitudinal de los bloques a minar en el área de Antares Norte**

En la Figura N° 7 se muestra la uniformidad del cuerpo. Sustentado en estas características espaciales, se toma la decisión de implementar una explotación por medio del método de minado por “Barrenación larga”.

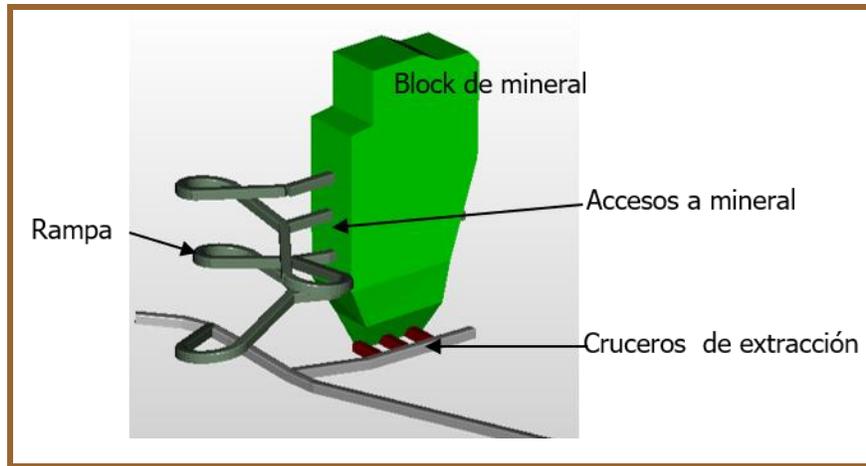


*Figura N° 7. Modelo geológico del yacimiento de Velardeña*

<sup>2, 3 y 4</sup> Servicios Administrativos Peñoles, S.A de C.V, Minera Roble, Proyecto Velardeña, “Estudio de prefactibilidad a 6,000 TPD”. Torreón, Coahuila.

## 1.6 Procesos operativos en el avance de obra y producción de mineral

El proceso da inicio con el desarrollo de una rampa con sección de 5.0 x 5.0 [m] con una pendiente negativa al 10%, ubicada al bajo del cuerpo (Figura N° 8), esto con la finalidad de llegar a la base del yacimiento mineral. Una vez colada la rampa, se desarrollan cruceros en su base, que servirán para la extracción del mineral, además de que ayudan a conocer con mayor detalle la potencia, inclinación y patrones de fracturamiento (levantamientos estructurales) del cuerpo mineral.



*Figura N° 8. Obras de preparación para block de mineral*

A continuación, se describen las principales actividades de trabajo para la preparación de un bloque de minado.

### 1.6.1 Avance de obra

#### 1.6.1.1 Barrenación

Se utilizan jumbos electrohidráulicos de un brazo para perforar 16 [ft] de longitud con un diámetro de 1 <sup>7</sup>/<sub>8</sub> [in]; 62 barrenos para una sección de 5 x 5 [m]; y una cuña de 9 barrenos de los cuales 5 son de alivio escareados a 4 [in] de diámetro.

#### 1.6.1.2 Cargado y voladura

Antes de empezar esta actividad, se debe amacizar el área verificando que no haya rocas abiertas o flojas por efecto de la barrenación, se sopletea cada barreno. Para el proceso de voladura se utiliza un equipo de cargado de ANFO. Se cargan 18 barrenos del contorno con explosivo de baja densidad con medida de 1x39 [in], 4 cartuchos por barreno, 33 con una pieza de alto explosivo de 1x 8 [in] (cebo) y 5.4 [kg/m] de ANFO con una densidad de 0.72 [g/cc], 6 barrenos de piso cargados con alto explosivo de 1 ½ x 39[in], 4 cartuchos por

barreno, 57 detonadores de diferentes tiempos de serie LP, 35 [m] de cordón detonante y 2 mechas de seguridad de 2.5 [m] cada una; el disparo se hace al final de cada turno.

### 1.6.1.3 Amacice

Una vez que el lugar esta ventilado (natural o forzada mediante equipo auxiliar de 20,000 y 30,000 pcm), este proceso es realizado con un equipo mecanizado para un alcance de 5.50 [m]. El amacice con barra está limitado sólo para tumbar rocas pequeñas (palomas) del cielo, tabla o tope de una obra.

### 1.6.1.4 Rezagado

Una vez que el lugar esta ventilado, regado y amacizado, se inicia con el rezagado, limpiando primero las tablas desde donde se hayan proyectado las rocas por efecto de la voladura, el equipo utilizado es un Scoop-Tram de 6.5 y 9 [yd<sup>3</sup>] para obras de preparación y rebajes respectivamente, el transporte de la rezaga con este equipo no debe ser mayor a 150 [m], vaciando el material directamente a un camión para su acarreo a superficie o traspaleado a una obra que sirva temporalmente de stock.

### 1.6.1.5 Anclaje

Antes de iniciar esta actividad se amaciza nuevamente. El equipo mecanizado de anclaje perfora a un diámetro de 38 [mm] y una longitud de 2.40 [m], siempre perpendicular a los estratos de la obra; los cartuchos de resina se introducen neumáticamente (14 piezas de 1 [in] de diámetro y 8 [ft] de longitud) con el mismo equipo e inmediatamente se coloca el ancla. Para las zonas de tepetate, se instalan anclas de acero de 5/8 de [in] de diámetro y 2.40 [m] de longitud y para las zonas de mineral son de fibra de vidrio con las mismas dimensiones. La distribución o plantilla es de 1.20 [m] x 1.20 [m] regularmente. Una vez que se han terminado las obras de preparación (Figura N° 9) y ya con las dimensiones del cuerpo bien definidas, se inicia la apertura del “sill” o subnivel en donde se instalará el equipo de barrenación larga con lo que se iniciará la etapa de tumbe de mineral.

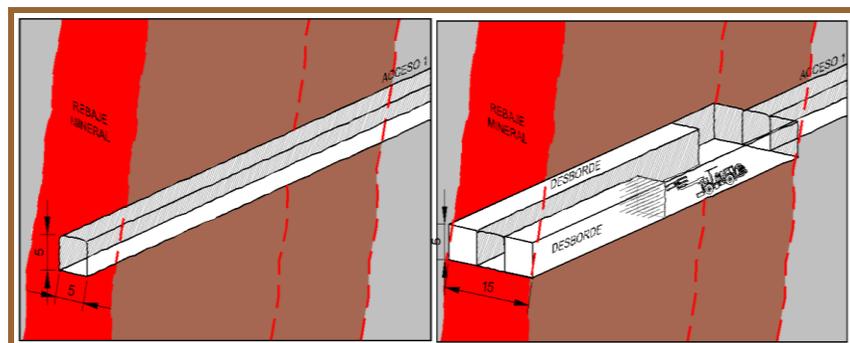


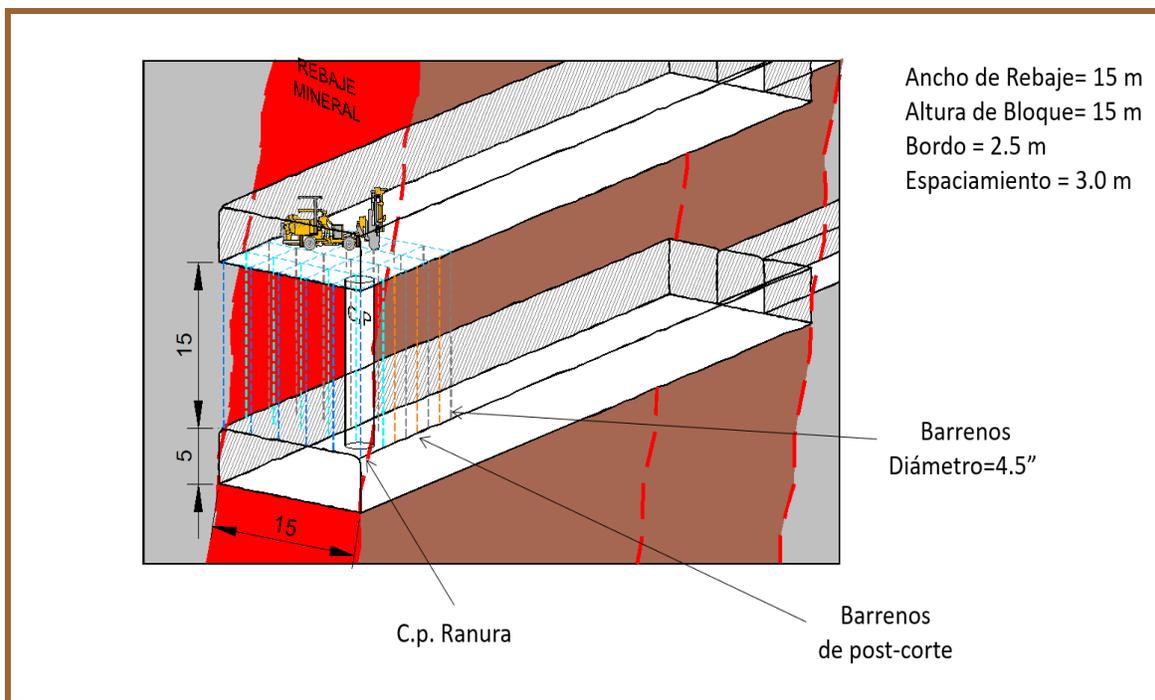
Figura N° 9. Preparación de obra inferior en el bloque de mineral

## 1.6.2 Producción de mineral

### 1.6.2.1 Barrenación vertical y contrapozo de salida

El método de minado para el cuerpo de Antares Norte, en donde la calidad de la roca es buena, es de rebajes primarios y secundarios con subniveles y barrenación vertical con bancos de 15 [m] a 30 [m] de potencia, diámetro de barrenación a 4 ½ [in]. La plantilla que se utiliza es de 2.50 [m] de bordo y 3.00 [m] de espaciamento y el relleno es con tepetate con un 2 a 3 % de cemento en los rebajes primarios.

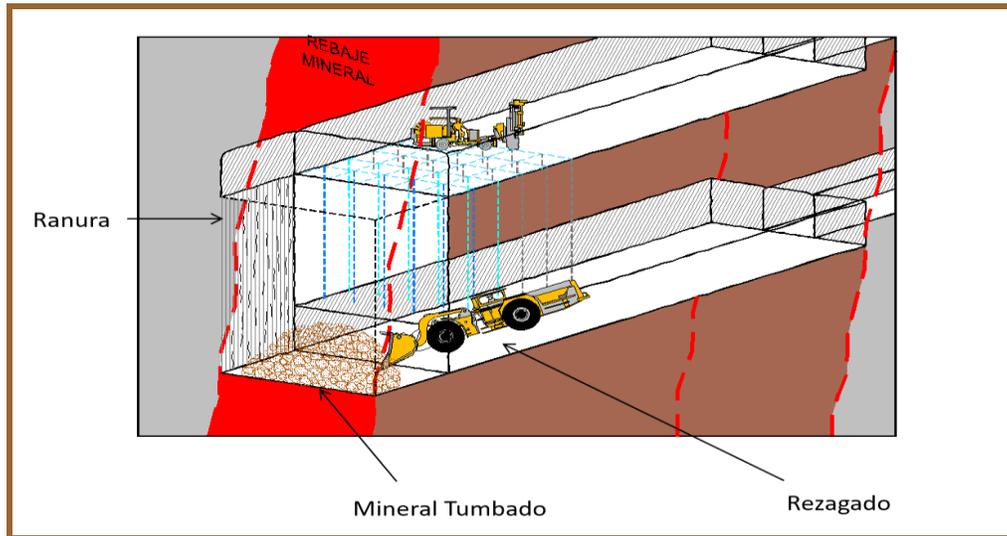
Una vez abierto el sill y el subnivel del rebaje, se cuela un contra pozo en un extremo del subnivel (Figura N° 10) para iniciar la perforación de forma vertical, posteriormente cargarlos y dispararlos y así obtener la cara libre.



*Figura N° 10. Inicio del proceso de barrenación de contrapozo y ranura en rebaje de producción*

### 1.6.2.2 Ranura y cortes posteriores

Terminado el contrapozo se procede con el disparo en etapas para lograr su abertura y así generar una salida (Figura N° 11). De forma sucesiva, se lleva a cabo la detonación de las primeras líneas de barrenación para obtener una nueva cara libre la cual servirá de salida para los cortes posteriores. Se comienza a rezagar el mineral tumbado por el acceso inferior y/o base del rebaje.



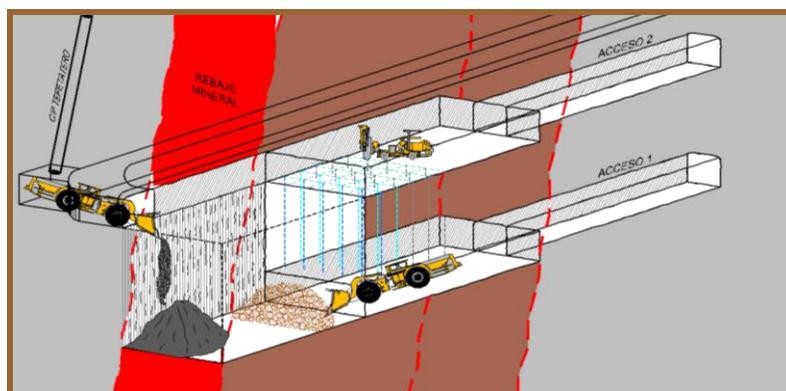
*Figura N° 11. Abertura de ranura en rebaje de producción*

### 1.6.2.3 Rezagado

Para esta actividad, la extracción continúa por la base del rebaje; de igual forma se avanza en la barrenación, el cargado y el disparo de los barrenos.

### 1.6.2.4 Relleno

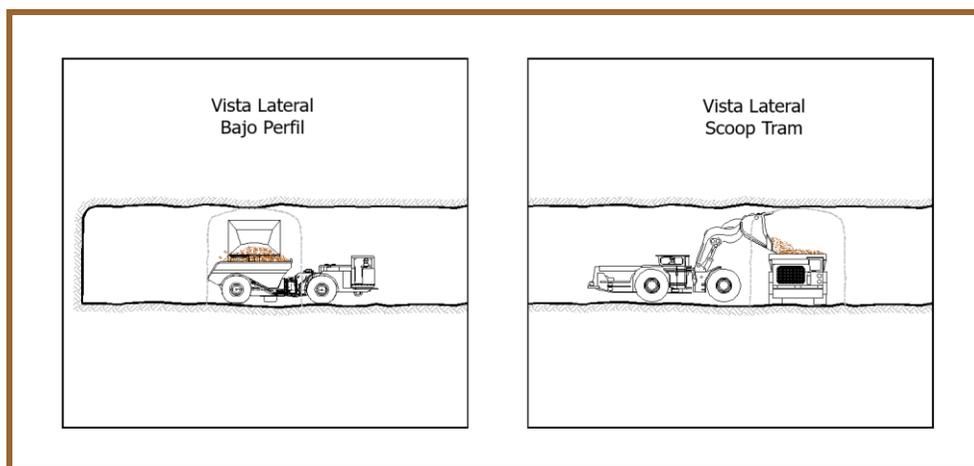
Una vez que se ha avanzado con la barrenación y el tumbe del rebaje, se continúa rezagando el mineral tumbado y se prepara un crucero lateral al cuerpo y un contrapozo por medio del cual se vacía el tepetate que servirá para comenzar a rellenar el hueco generado. Se comienza a rellenar de adentro hacia afuera, tal como se muestra en la Figura N° 12; el material empleado para el relleno es generado del desarrollo de las obras en estéril (tepetate). Existe un proyecto para poner en marcha un banco de agregados pétreos para satisfacer las necesidades de la operación.



*Figura N° 12. Inicio de la etapa de relleno en rebaje de producción*

### 1.6.2.5 Acarreo

El mineral tumbado por la barrenación larga se carga (Figura N° 13) directo al camión de bajo perfil (capacidad de 30 [Ton]), otra alternativa es traspalear el mineral a un lugar específico y/o cargadero, para posteriormente ser cargado a un camión y llevado a los patios de almacenamiento en superficie, de donde pasará a la trituración primaria o tolva de gruesos y continuar así con el proceso de beneficio.



*Figura N° 13. Cargado de mineral por medio de camiones de bajo perfil*

## 2. GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO<sup>5</sup>

Es dominada por las rocas calcáreas del cretácico y jurásico que afloran en las sierras, así como los depósitos volcánicos y vulcano clásticos del terciario y rellenos de fosas y depósitos de grandes abanicos aluviales formados principalmente por rocas clásticas terciarias y cuaternarias, como se puede observar en el plano geológico de la zona (Figura N° 14).

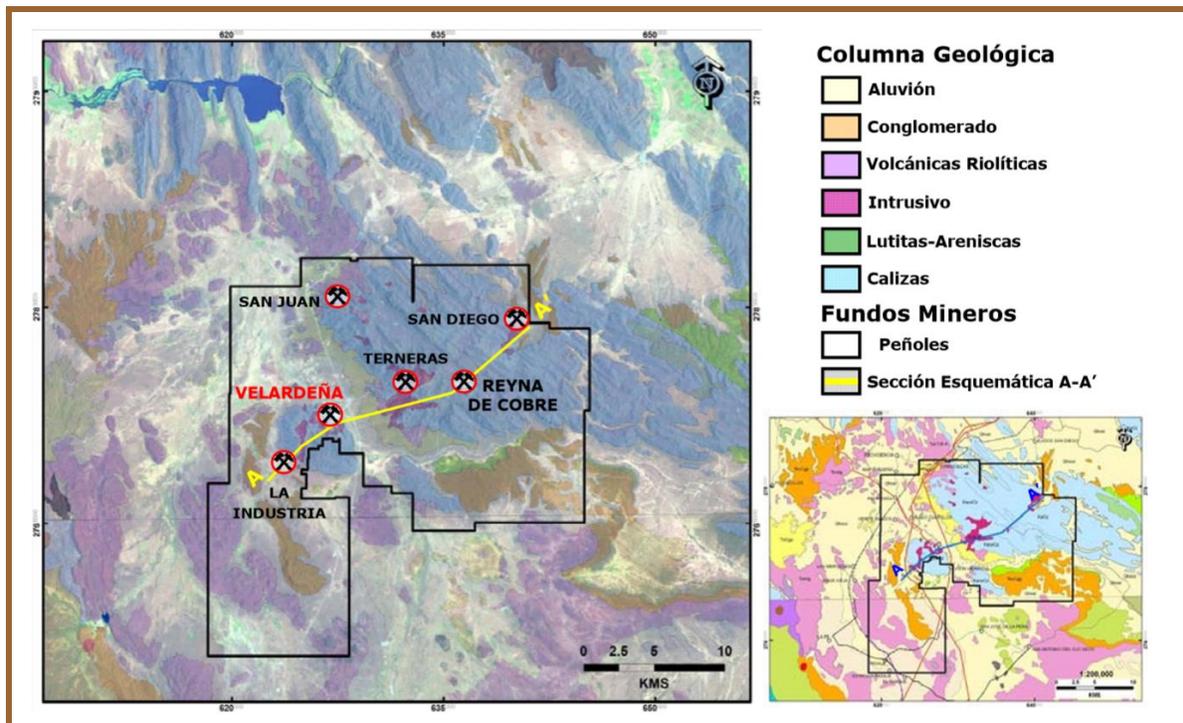
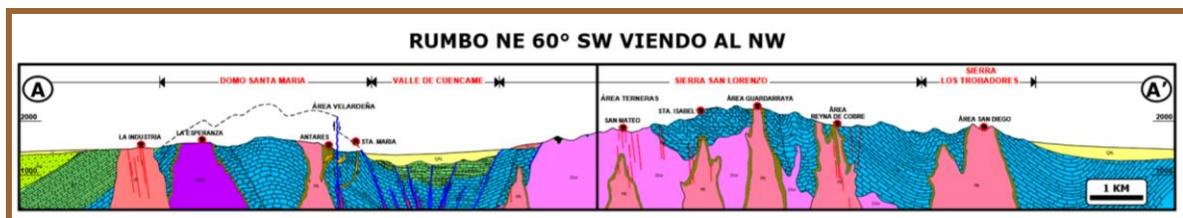


Figura N° 14. Geología del distrito Velardeña- Durango (exploración Torreón)

Ampliando la sección A-A' de la Figura N° 14 se puede observar la sección esquemática de la geología del Distrito Velardeña-Durango.



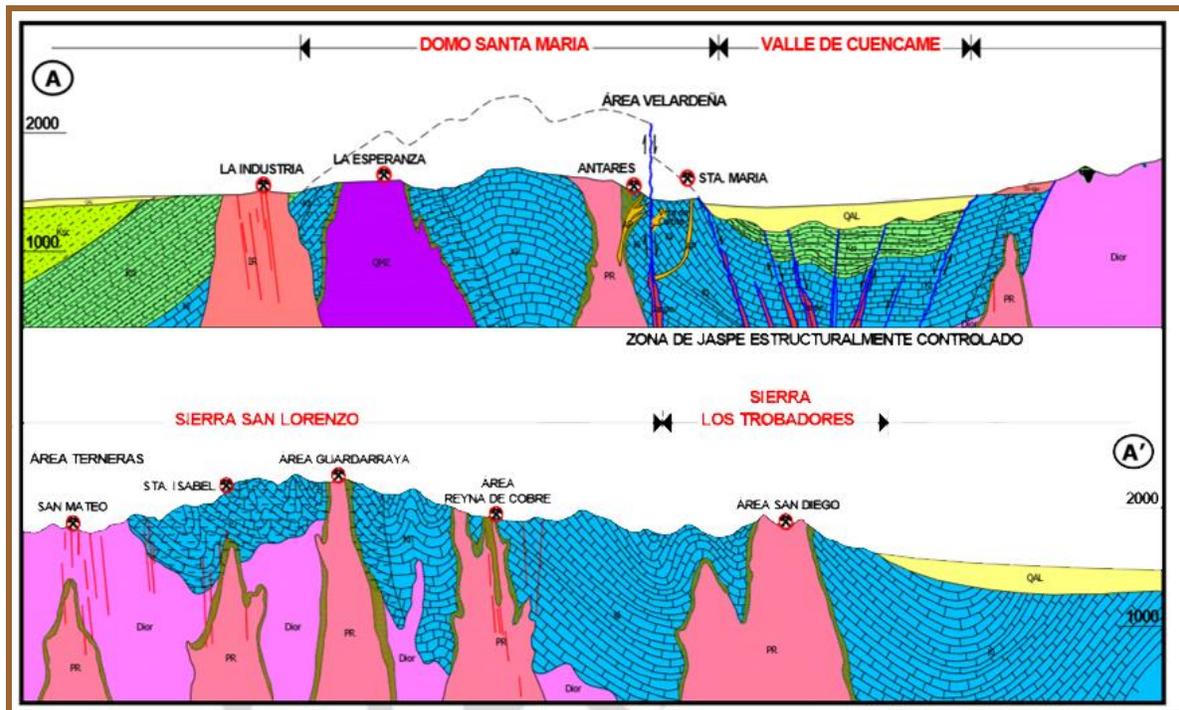


Figura N° 15 y 16. Amplificación de la sección A-Á de la geología del distrito Velardeña- Durango

Cretácico<sup>6</sup>

Formación Cuesta del Cura: esta es una unidad de rocas calizas con estratos medianos a delgados, con estratificación ondulada y abundantes lentes de pedernal.

Está cubierta por la formación Indidura en forma concordante y por las formaciones Clásticas Terciarias en forma discordante.

Formación Indidura: de edad cenomaniense tardío- turoniano, está formada por calizas delgadas de color gris con abundantes intercalaciones de lutitas de color gris verdoso, que se intemperiza a un color pardo rojizo, esta unidad presenta un contacto de tipo transición con la formación Caracol.

Formación Caracol: se caracteriza por una expresión fisiográfica que consiste en lomas o lomeríos pequeños de color pardo rojizo y está constituida por lutitas y areniscas interestratificadas de estratos delgados además presenta un contacto superior de tipo discordante con las rocas clásticas terciarias, aunque principalmente con el conglomerado.

Terciario: estos depósitos presentan fragmentos redondeados bien consolidados de calizas, arcosas limolitas y calcarenitas con algunos fragmentos de rocas volcánicas, presentando una coloración rojiza en general considerándose como depósitos.

Formación Vizcarra: está constituida por una secuencia de rocas piroclásticas y epiclásticas, con algunos derrames de lavas riolíticas intercaladas y escasos depósitos lacustres.

Esta unidad es en general horizontal y es poco resistente a la erosión, se encuentra en contacto discordante con la formación Ahuichila y las formaciones Cretácicas la cubren rocas de la formación La Zorra.

Formación La Zorra: está constituida por derrames andesíticos a basálticos con intercalaciones de areniscas, se ha asignado una edad mioceno plioceno, esta formación presenta superficies planas y terrazas que cubren de forma discordante a todas las otras formaciones y cretácicas antes descritas.

---

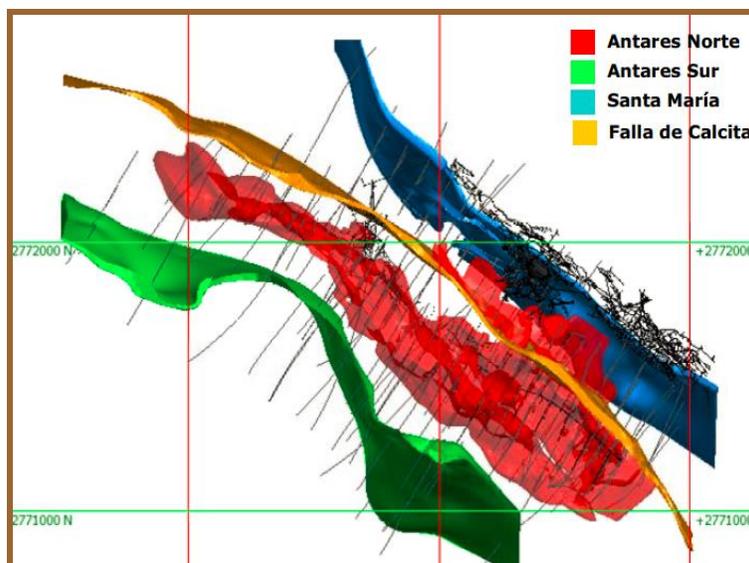
<sup>5, 6</sup> Servicios Administrativos Peñoles, S.A de C.V, Minera Roble, Proyecto Velardeña, “Estudio de prefactibilidad a 6,000 TPD”. Torreón, Coahuila.

### 3. RECURSOS MINERALES<sup>7</sup>

El cuerpo Antares Sur (Figura N° 17) se aloja en el contacto sur del pórfido riolítico. La mineralización ocurre como sulfuros diseminados y semimasivos en zona de skarn.

Su comportamiento es espacialmente irregular a veces localizado en el contacto del skarn – caliza y en ocasiones al contacto skarn- pórfido riolítico. La presencia de diques aplíticos no ha sido identificada en este cuerpo, los espesores varían de 2.0 a 40 [m] en zonas diseminadas a semi-masivas. Sus leyes de zinc son menores a la ley media (3.5%) del cuerpo Antares Norte y con bajo contenido de hierro.

La paragénesis mineralógica consiste en marmatita, pirrotita con escasa calcopirita. Los minerales de alteración son: andradita- grosuladita y piroxenos.



*Figura N° 17. Cuerpos minerales principales: Antares y Santa María*

El cuerpo Santa María se localiza en el borde norte del domo de Santa María asociado al contacto de un dique aplítico con extensión a rumbo de más de 1200 m y continuidad vertical de 500 m.

La mineralización ocurre como sulfuros masivos de Zn- Fe, As con valor de Pb y Ag; su espesor varía entre 1.0 y 8.0 m al alto y bajo del dique.

Las mejores leyes de Zn, Ag, Pb se localizan en la porción SE del dique. La mineralogía consiste en marmatita- esfalerita; galena, argentita, pirita y arsenopirita.

Los minerales de alteración se relacionan con la silicificación y marmolización en la zona de reemplazamiento del contacto dique-caliza (Figura N° 18).

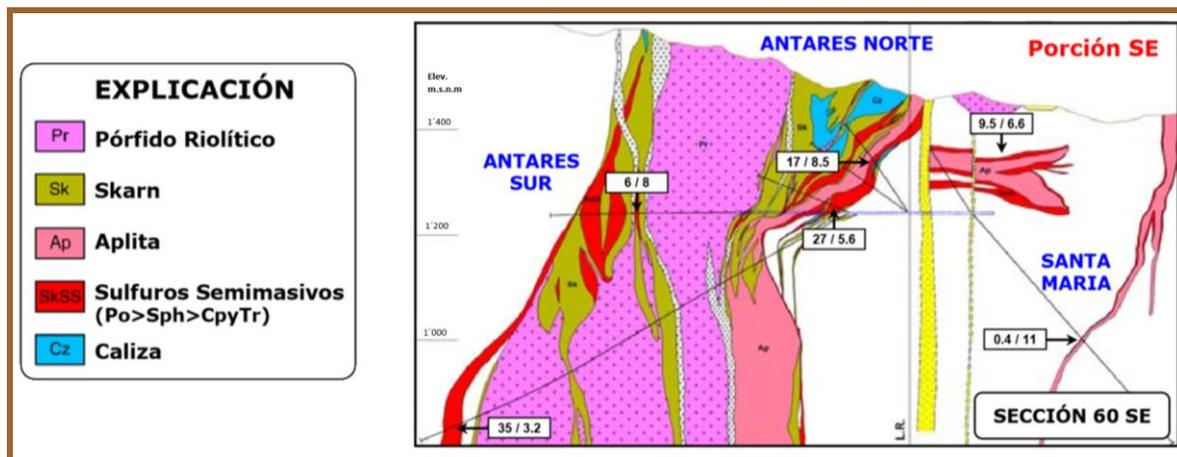


Figura N° 18. Sección geológica del yacimiento: 60° SE viendo al NW

## 4. GEOTECNIA Y CALIDAD DE LA ROCA<sup>8</sup>

En este capítulo se muestran, de manera general, los estudios realizados en torno a la geotecnia de la roca presente en el cuerpo mineralizado, así como el de su roca encajonante. Los alcances del trabajo no pretenden ahondar en el tema, sólo se limita a describir la litología de la roca, la calidad del macizo rocoso y las dimensiones de los rebajes, a través de estudios realizados por asesores internos y externos del Grupo Peñoles, para la aplicación del sistema de explotación por barrenación larga.

En octubre de 2006 se inició en Velardeña, por parte de la empresa citada, una campaña de barrenación a diamante, y a partir del mes de enero de 2007, comenzó la descripción y documentación de la información geotécnica relevante detectada en los núcleos sanos y poder elaborar el modelo geotécnico del yacimiento.

El volumen de trabajo realizado desde enero de 2007 hasta abril de 2009, comprendió la caracterización geomecánica de 127,780 m de barrenos a diamante, de los cuales 78,967 m corresponden a superficie y 48,813 m a barrenos de diamante en el interior de la mina.

Se realizó la caracterización geotécnica de los núcleos utilizando el criterio de evaluación de calidad de macizos rocosos RMR de Bieniawski.

En marzo de 2009 se seleccionaron seis litologías representativas de las diferentes rocas del yacimiento de Velardeña, con el propósito de enviarlas a un laboratorio para pruebas de mecánica de rocas. Las litologías seleccionadas fueron: caliza, aplita, pórfido riolítico, diatrema, andesita, caliza-lutita-arenisca.

De cada litología se analizaron muestras para la obtención de parámetros de mecánica de rocas; a continuación, se indican las características y el resumen de resultados de resistencia.

**Caliza:** roca calcárea de color gris claro a oscuro, presencia de pedernal, textura de grano fino a grano mediano en algunos casos sacaroide, formación Aurora y Cuesta del Cura (cretácico inferior). Resistencia de 72 a 117 Mpa con promedio de 86 Mpa.

**Aplita:** roca intrusiva (terciario) variando en color gris a blanco, de textura afanítica, resistencia de 21 a 122 Mpa, con promedio de 80 Mpa.

**Caliza lutita-arenisca:** roca calcárea variando de color gris negro a blanco.

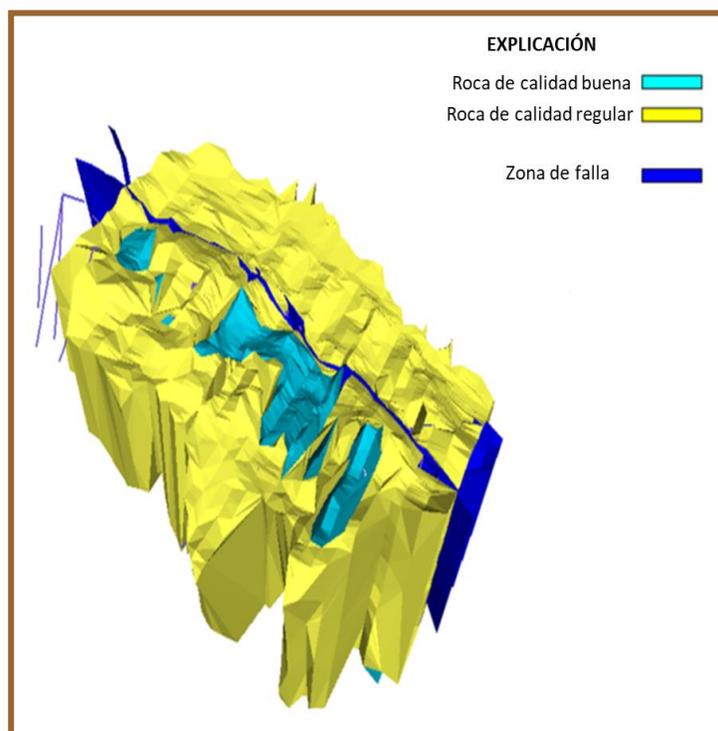
**Formación Cuesta de Cura:** (cretácico inferior) presencia de pedernal con textura que varía de grano fino y medio. Resistencia de 72 a 126 Mpa, con promedio de 96 Mpa.

**Andesita:** de color variado de café a verde oscuro, textura porfídica a grano fino. Resistencia de 90 a 126 Mpa, con promedio de 106 Mpa.

**Diatrema:** roca volcánica de tipo intrusivo (terciario) diatrema, de color blanco rosado a gris claro, textura de tipo brecha. Resistencia de 57 Mpa a 122 Mpa con promedio de 81 Mpa.

**Pórfido Riolítico:** roca de tipo intrusivo color gris, ocres variados en intensidades de claro a oscuro, de textura porfiritica, se presenta en algunos casos cristales de cuarzo, resistencia de 57 a 122 Mpa, con promedio de 85 Mpa.

La información de la calidad de la roca, RMR se capturó en secciones geológicas del yacimiento y se elaboró una interpretación en 3D de RMR de las rocas (Figura N°19).



*Figura N° 19. Modelo 3D de RMR de las rocas de Antares y Santa María*

En las Figuras N° 20 y 21 se muestran las dimensiones y características de los pilares de acuerdo con los estudios previos de mecánica de rocas y geotecnia para la explotación del cuerpo Antares Norte.

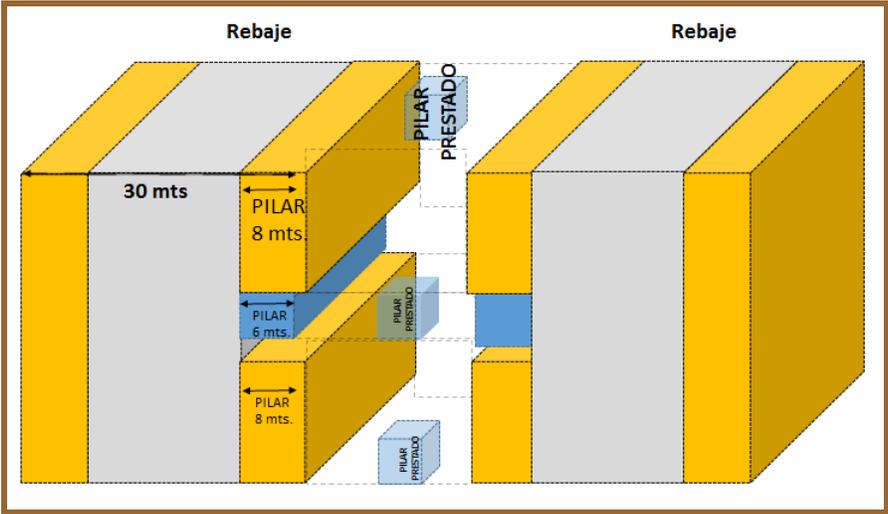


Figura N° 20. Vista isométrica de los rebajes y sus pilares

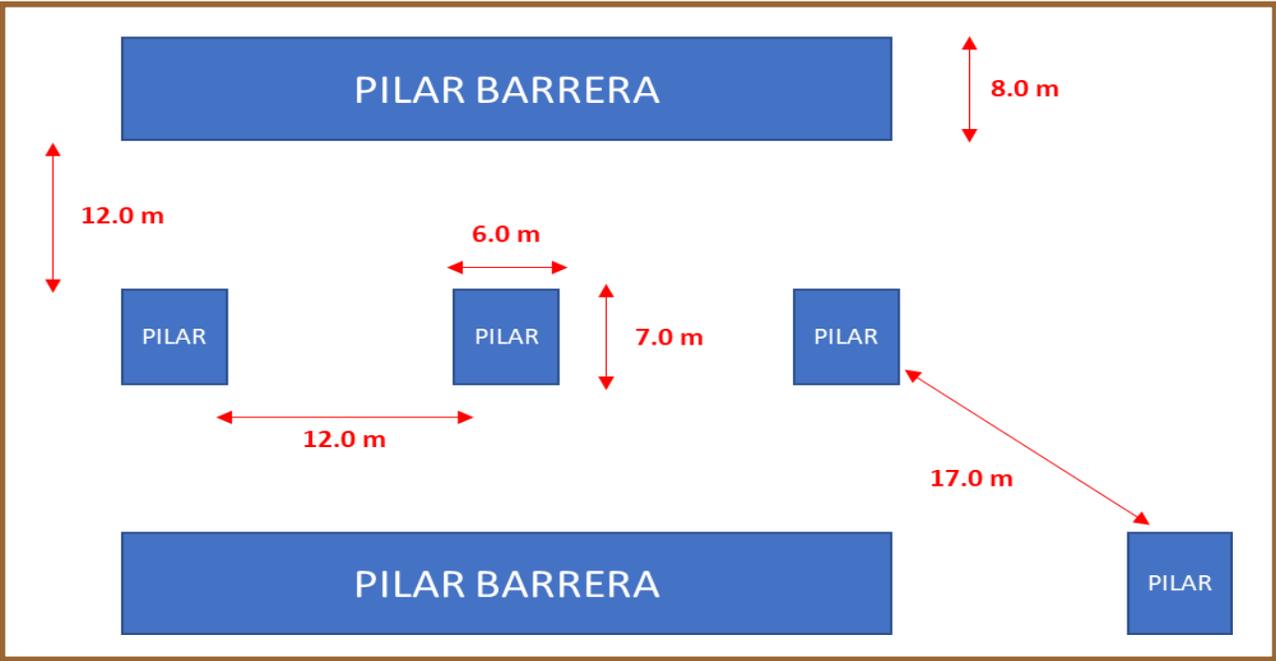


Figura N° 21. Vista de planta de los rebajes y sus pilares

<sup>7.8</sup> Servicios Administrativos Peñoles, S.A de C.V, Minera Roble, Proyecto Velardeña, “Estudio de prefactibilidad 6,000 TPD”, Torreón Coahuila.

## 5. SELECCIÓN DE LA PLANTILLA DE BARRENACIÓN

### 5.1 Introducción

Una plantilla consiste en un diseño de barrenos colocados adecuadamente y con una relación geométrica entre ellos y la cara libre. El espaciamiento entre los barrenos de una línea depende de dos variables: el tiempo de iniciación de los barrenos adyacentes y la relación de rigidez. (L/S).

### 5.2 Características espaciales

En el cálculo y diseño de las voladuras, las variables que se pueden controlar son las siguientes:

A. Geométricas (diámetro, longitud de carga, espaciamiento).

B. Químico-físicas del explosivo (tipos de explosivo, potencia, energía, etc.).

C. Iniciación de la voladura: se puede controlar el tiempo de salida de cada barreno (el tiempo se mide en milisegundos/barreno) y junto con esto, la secuencia de salida de la roca. Actualmente en el mercado existen sistemas pirotécnicos y electrónicos.

H= Altura de banco

S= Espaciamiento nominal

D= Diámetro del barreno

AV= Ancho de la voladura

L= Longitud del barreno

Be = Bordo efectivo

d = Diámetro del explosivo

Se= Espaciamiento efectivo

B= Bordo nominal

LV = Longitud de la voladura

T= Taco

J= Subbarrenación

I= Longitud de carga

v/w = Grado de equilibrio

T r = Tiempo de retardo

$\Theta$ = Ángulo de salida

La plantilla de barrenación inicial estaba representada con las siguientes características espaciales, B= 3.0 [m], E= 3.0 [m] tipo rectangular con una barrenación de costura en las tablas para el cuidado de los pilares cortina con un E =1.25 [m], con un diámetro de barrenación de 4 <sup>1/2</sup> [in].

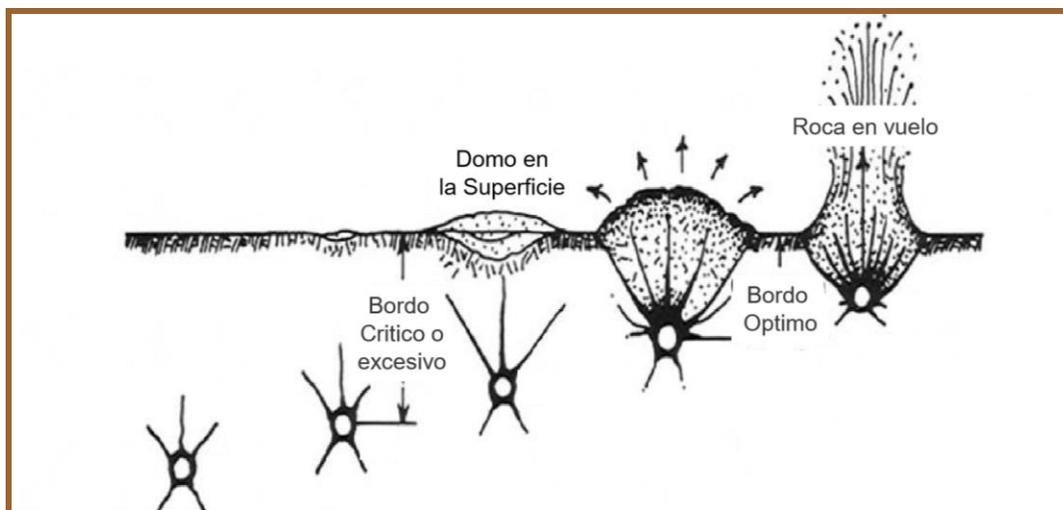
La aplicación de los parámetros iniciales de diseño no fue favorable en cuanto a la fragmentación (P80 en 30 [in]), por eso se tomó la decisión de cerrar los parámetros a B= 2.5 [m], E= 3.0 [m] con base en el siguiente análisis, en donde se muestra la metodología

con la cual se llegaron a estos resultados, así como su interpretación, aplicación y evaluación.

Para el diseño de plantillas de barrenación, existen diversos autores que toman como fundamento las variables de barrenación, del explosivo y de la roca. Algunos de ellos utilizan sistemas de ecuaciones complejas en donde sus parámetros son referenciados a factores geológicos como la resistencia de compresión simple de la roca, el índice de calidad de roca (RQD), la plasticidad y la velocidad sónica de la roca.

Es por ello que esta ecuación tiene una mayor demanda en su aplicación ya que contiene variables muy accesibles y de fácil acceso tales como el diámetro de barrenación, la densidad del explosivo y de la roca.

El bordo se define como la distancia más corta al punto de alivio al momento en el que un barreno detona. El alivio se considera normalmente como la cara libre, salida o bien como una cara interna creada por una hilera de barrenos que han sido disparados previamente con un retardo anterior, observar detalle en la Figura N° 22, de las distintas alternativas en el cálculo del bordo y sus afectaciones.



*Figura N°22. Efecto de la detonación de un explosivo en la roca para cinco espesores de bordo<sup>9</sup>*

Si los bordos son pequeños, la roca es lanzada a una distancia considerable de la cara. Los niveles de golpe de aire son muy altos y la fragmentación puede resultar demasiado fina. Por otro lado, si los bordos son muy grandes, dará como resultado el rompimiento trasero y el bronqueo de la cara final, se tendrán niveles de vibración significativamente más altos.

<sup>9</sup> Perforación y voladura de rocas en minería, E.T.S de Ingenieros de Madrid, 2013, Página 168, José Bernaola Alonso, Jorge Castilla Gómez, Juan Herrera Herbert.

A continuación, se muestra la ecuación que se tomó como base para el cálculo del bordo:

$$B = 0.012 \left( \frac{2 * SGe}{SGr} + 1.5 \right) De$$

Donde:

B= Bordo (m)

SGe= Gravedad específica o densidad del explosivo (g/cc)

SGr= Gravedad específica o densidad de roca (g/cc)

De= Diámetro del explosivo (mm)

Al aplicar la siguiente fórmula tenemos que:

$$B = 0.012 \left( \frac{2 * SGe}{SGr} + 1.5 \right) De$$

Variables	Valor
SGe	1.10 g/cc
SGr	3.2 g/cc
De	114.3 mm

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$B = 0.012 \left( \frac{2 * 1.10}{3.2} + 1.5 \right) 114.3 = \mathbf{2.91 [m]}.$$

Aplicando el (+/-) 10 % (Konya, 2009) el resultado oscila entre los valores de:

B= 2.61 [m]

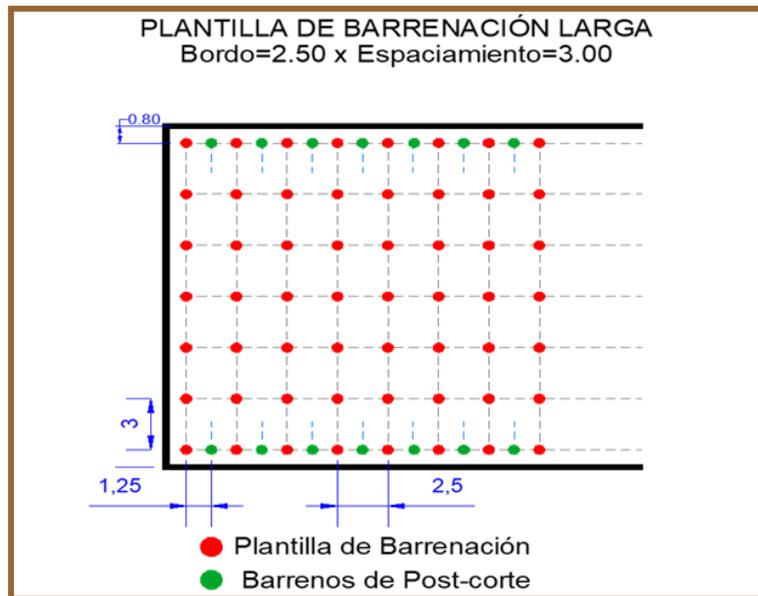
B= 3.20 [m], **igual a 3.00 [m]**

Para el espaciamiento se aplica la siguiente fórmula:

S= (1 a 1.4) \* B, unidades en [m]

S= (1) (2.91) = 2.91 [m], **igual a S= 3.00 [m]**

En función de los resultados obtenidos con los parámetros de diseño ( $B = 3.0$  m,  $E = 3.0$ ) y con los monitoreos de granulometría en las voladuras ( $P80 = 30$  in), se determinó reducir las dimensiones espaciales a  $B = 2.50$  [m], conservando el espaciamiento ( $E = 3.0$  [m]) y el post-corte de la barrenación de contorno ( $E = 1.25$  [m]), en donde la aplicación de estos nuevos parámetros generaron resultados positivos en la reducción de roca ( $P80 = 18$  [in]). Tomando estos nuevos valores ( $B = 2.50$  [m],  $E = 3.0$  [m] y post-corte con un  $E = 1.25$  [m]) como constantes en el diseño de las plantillas de barrenación en el sistema de minado por barrenación larga (Figura N° 23).



*Figura N° 23. Estándar en el diseño de la plantilla de barrenación*

Las consideraciones que deben tomarse en cuenta en una voladura son las siguientes:

- Fragmentación
- Sobrepresión del aire
- Roca en vuelo y
- Vibración del terreno

De forma general, entre mayor sea el diámetro del barreno mayores serán los problemas de sobrepresión de aire, roca en vuelo y vibración.

### 5.3 Resultados

En el Anexo se reproduce, con permiso de la empresa, el “Reporte de voladura barrenación larga” en donde se muestran los resultados obtenidos en el área de Antares Norte, acceso 5 de 14, de la aplicación de una barrenación vertical utilizando iniciadores electrónicos, y de donde se transcriben los siguientes resultados:

“La voladura en términos generales quedó bien, en cuanto a estabilidad del rebaje es aceptable por la parte inferior (4 del 14) requiere poco amacice, cielo y tablas estables, las tres tablas del bloque quedaron marcadas por medias cañas debido a la utilización de explosivo de baja densidad desacoplado dentro del barreno (rosario), la granulometría por la parte superior (5 del 14) tiende a tener una granulometría predominante de 12 [in] a 15 [in] en un 95 %, por la parte inferior (4 del 14) la fragmentación oscila entre 15 y 17 [in]”.

Es importante mencionar que estos resultados son generados una vez que fueron probados, evaluados y estandarizados los parámetros de barrenación, cargado y secuencia de disparo, que a continuación se describen como constantes de diseño:

Parámetros espaciales de barrenación.	B= 2.50 m. E= 3.0 m. E <sub>post-corte</sub> = 1.25 m.
Tiempo de retardo en el mismo barreno.	5 ms (milisegundos).
Tiempo de retardo entre barrenos de la misma hilera.	10 ms (milisegundos).
Tiempo de retardo entre líneas.	120 ms (milisegundos).
Densidad de agente explosivo.	0.60 - 0.70 g/cm <sup>3</sup> .
Densidad de la carga de fondo.	1.10 g/cm <sup>3</sup> .
Densidad de emulsión para la barrenación de post-corte o contorno.	0.85 g/cm <sup>3</sup> .

## 6. ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LA BARRENACIÓN VERTICAL Y LA BARRENACIÓN EN ABANICOS

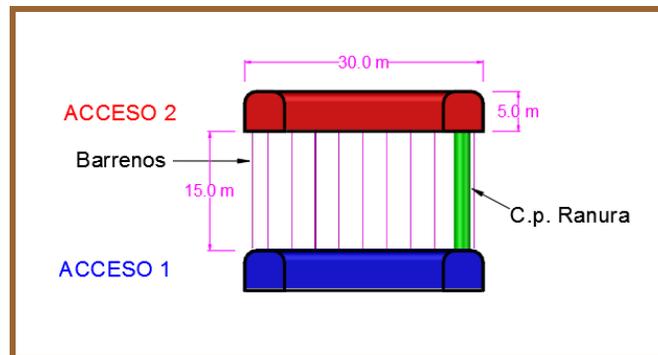
Con el objeto de disponer de distintos elementos para la toma de decisiones, se realizó un comparativo de costos entre las dos modalidades de plantillas de barrenación (vertical y en abanicos), considerando la preparación de un bloque de 100,800 [Ton] con el fin de contar con las mismas características de diseño y así poder determinar de manera numérica la cantidad de barrenación y preparación de obra (en metros) para ambos sistemas, uno en forma de abanico, y el otro, vertical.

Las dimensiones espaciales y los parámetros de barrenación planteados para ambos casos son los siguientes:

- Altura de banco = 15 [m]
- Longitud del rebaje = 30 [m]
- Potencia del rebaje = 70 [m]
- Parámetros de barrenación: bordo = 2.5 [m], espaciamento = 3.0 [m], diámetro de barrenación de  $4^{1/2}$  [in] y una aplicación de post-corte en ambas tablas del boque con un  $E = 1.25$  [m]

### 6.1 Barrenación vertical

Para llevar a cabo la barrenación vertical, es necesario preparar los bloques en ambos accesos (Figura N° 24), el superior representado en color rojo y el inferior representado en color azul. Se busca que todos los barrenos del acceso superior hacia el inferior tengan comunicación. En la misma Figura N° 24, se muestran las dimensiones espaciales del bloque de minado (altura de banco y potencia) en una vista lateral.



*Figura N° 24. Vista lateral de los bloques a preparar*

A continuación se describen las dimensiones de la obra y barrenación vertical que se requiere para la preparación y explotación de este método de minado.

### Obras de preparación:

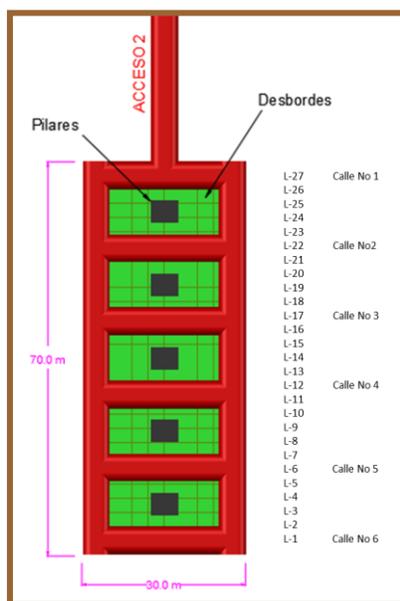
- Galerías de trabajo con una sección de 5.00 x 5.00 [m]
- Desarrollo de obra minera (avance y/o cuele) por 320 [m]
- Desarrollo de obra minera (desbordes) por 1,750 [m<sup>3</sup>] para el perfilamiento de pilares

### Barrenación larga:

- 27 líneas de barrenación
- 11 barrenos por línea equivalentes a 165 [m] (11barrenos por línea\*altura de banco)
- 4,455 [m] de barrenación (27 líneas de barrenación\*165 m)
- 108 barrenos de post-corte
- 1,620 [m] barrenos post-corte. (108 barrenos de post-corte\*altura de banco)
- 6,075 [m] totales de barrenación vertical (adición de los metros de barrenación más los metros de barrenación de post-corte)

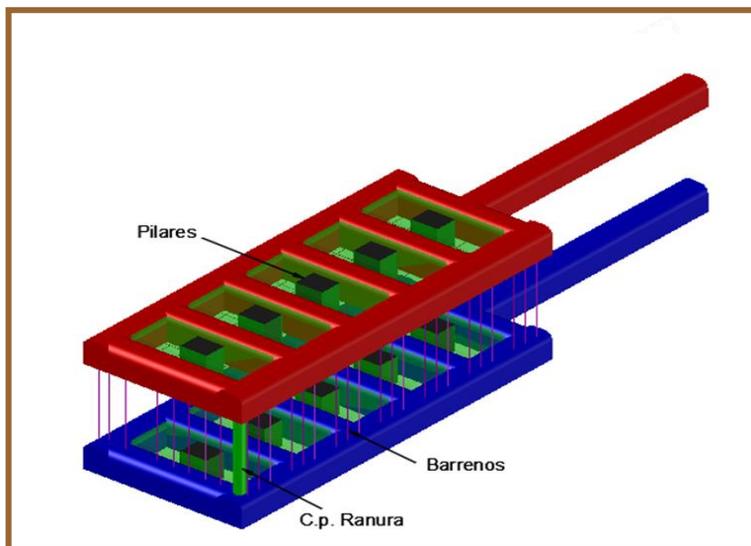
En la Figura N° 25 se muestra la representación del bloque en una sección de planta, en donde se pueden apreciar las obras de desarrollo tanto en avance (calles y contra-calles representadas en color rojo) como en el perfilamiento (desbordes representados en color verde) para su delimitación.

Como se ha mencionado anteriormente es necesario contar con esta preparación del bloque en ambos accesos (superior e inferior).



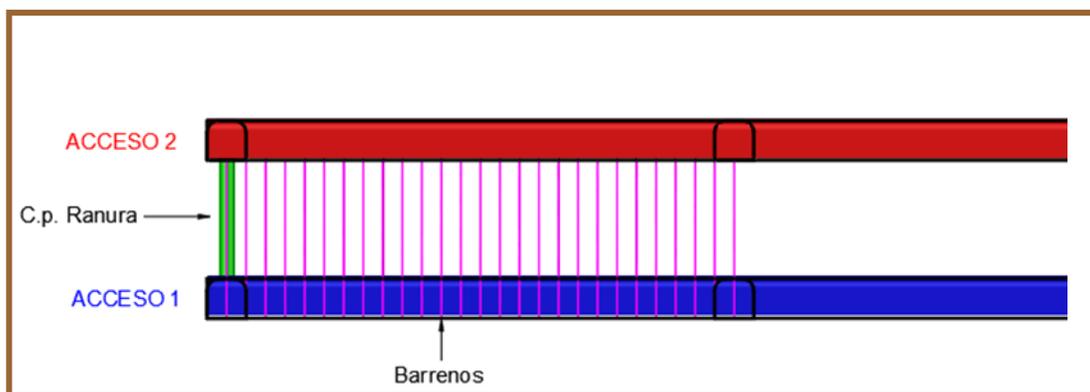
*Figura N° 25. Vista de planta de los bloques a preparar*

El resultado de la preparación en ambos niveles del bloque de minado se aprecia en la Figura N° 26, en donde ya se cuenta con las condicionantes de diseño para la aplicación de un sistema de barrenación de forma vertical. De manera cronológica, el ciclo de minado requiere de una salida (cara libre) por medio de un contrapozo ranura y consecuentemente el minado seccionado por bloques de tumba, que se dispara conforme a las necesidades operativas de la unidad de negocios.



*Figura N° 26. Isométrico del bloque*

En la Figura N° 27, se puede apreciar, de manera general, el detalle de las 27 líneas de barrenación en forma vertical para el tipo de minado por barrenación larga.



*Figura N° 27. Sección longitudinal del bloque*

## 6.2 Costos de la barrenación vertical

Una vez definidos los parámetros de diseño del bloque de minado, sólo queda estimar los costos que implican su preparación.

Para realizar este análisis, se toma como referencia una lista de precios del contratista de obra minera que opera en la unidad de negocios; se trata de valores aproximados y únicamente para fines de cálculo y desarrollo del ejercicio. La esencia del análisis tiene su fundamento en la cantidad de metros de avance por desarrollar y el perfilado de sus obras ( $m^3$ ), así como el metraje de perforación vertical.

CONCEPTO	COSTO
USD / m (desarrollo)	\$309.80
USD / $m^3$ (desbordes)	\$13.00
USD / m (barrenación vertical)	\$13.42

Aplicación de costos unitarios:

CONCEPTO	COSTO	UNIDADES	METROS	METROS CÚBICOS	TOTAL
Sección de 5.0 x 5.0 m	\$309.80	USD	640*	----	\$198,272.00
Desbordes	\$13.00	USD	-----	3,500	\$45,500.00
Barrenación vertical	\$13.42	USD	6,075	----	\$81,526.5
<b>COSTO TOTAL DE BARRENACIÓN VERTICAL</b>					<b>\$325,298.5</b>

*\*Involucra los metros de desarrollo de ambos accesos (320 [m] del acceso N°1 más 320 [m] del acceso N°2).*

## 6.3 Barrenación en abanico

Al igual que el caso anterior, se tomarán en cuenta las mismas consideraciones de diseño.

- Altura del banco = 15 [m]
- Longitud del rebaje = 30 [m]
- Potencia del rebaje = 70 [m]
- Parámetros de barrenación, Bordo = 2.5 [m], Espaciamiento = menor o igual a 3.0 [m], diámetro de barrenación de 4.5 [in] y una aplicación de pos corte en ambas tablas del boque con un E = 1.25 [m]

Obras de preparación:

- Galerías de trabajo con una sección de 5.00 x 5.00 [m]
- Desarrollo de la obra minera (avance y/o cuele) por 180 [m]

Barrenación larga:

- 27 líneas de barrenación
- 26 barrenos por línea
- 620[m] por línea equivalentes a 16,740 [m]
- 108 barrenos de post-corte equivalentes a 1,620 [m]
- 18,360 [m] totales
- B = 2.5 [m], E = 3.0 [m] menor o igual al fondo de la barrenación
- Ángulo de basculación entre barrenos de 5 grados

Dada la similitud con el caso anterior también es importante realizar la preparación para ambos niveles (superior e inferior).

A continuación, en la Figura N° 28, se muestra la preparación de las obras de desarrollo necesarias para la aplicación de este sistema de barrenación en forma de abanico. Se trata del cuele de obra por 180 [m] representados en color rojo.

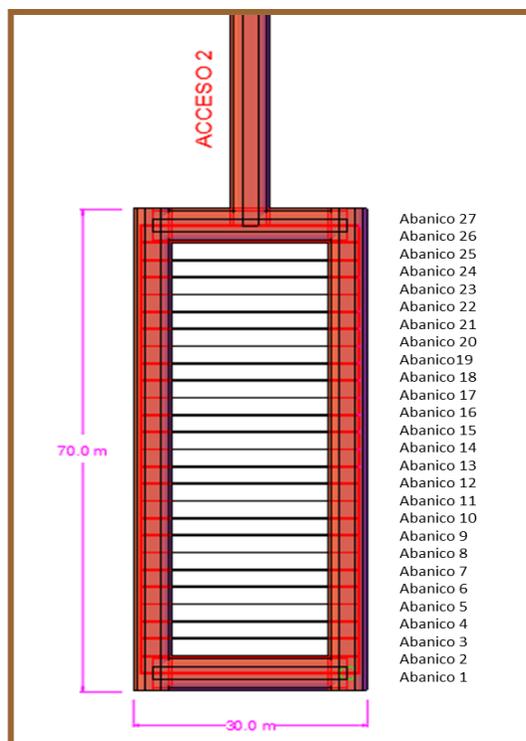
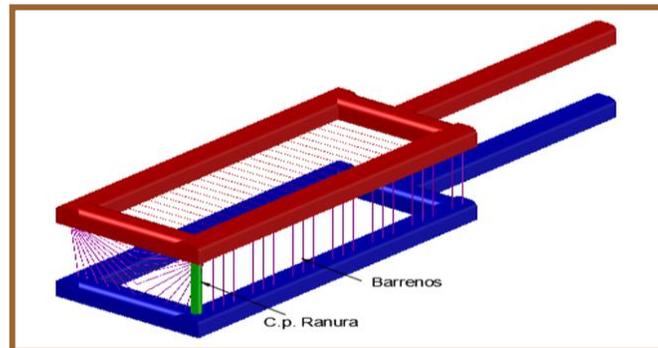
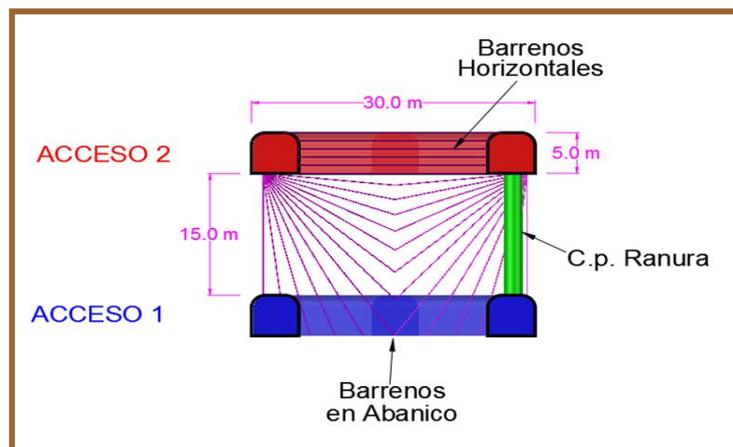


Figura N° 28. Sección planta de los bloques a preparar

En la Figura N° 29 se representa una vista isométrica del bloque, en donde se aprecia la preparación de la obra minera para ambos accesos (superior en color rojo e inferior en color azul), también se observa el diseño de barrenación en forma de abanicos, más adelante (Figura N° 30), se muestra con mayor detalle el diseño de barrenación en una vista frontal.

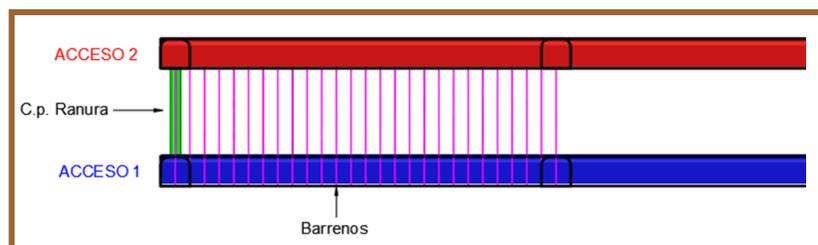


*Figura N° 29. Isométrico del bloque*



*Figura N° 30. Vista frontal del bloque de minado donde se aprecia el detalle de la barrenación en abanico*

Para finalizar, en la Figura N° 31 se observan las líneas de barrenación en abanico del rebaje, es importante mencionar que por el tipo de vista sólo se podrán observar líneas de barrenación vertical.



*Figura N° 31. Sección longitudinal del bloque*

#### 6.4 Costos de la barrenación en abanico

Para este caso se consideran los mismos indicadores económicos que en el punto 6.2. Las variables para este caso serán la cantidad de metros de desarrollo y la barrenación en forma de abanico. Aquí se puede observar que el desarrollo de obra es menor pero que el metraje de barrenación larga para este sistema de minado es mayor.

CONCEPTO	COSTO
USD / m (desarrollo)	\$309.80
USD / m <sup>3</sup> (desbordes)	\$13.00
USD / m (barrenación en abanico)	\$13.42

CONCEPTO	COSTO	UNIDADES	METROS	METROS CÚBICOS	TOTAL
Sección de obra 5.0 x 5.0 m	\$309.80	USD	360	0	\$111,528.00
Desbordes	\$13.00	USD	0	0	\$0.00
Barrenación en abanico	\$13.42	USD	18,360	0	\$246,391.20
<b>COSTO TOTAL DE BARRENACIÓN EN ABANICO</b>					<b>\$357,919.20</b>

#### 6.5 Otros factores que intervienen para la toma de decisión en el método de barrenación

Para robustecer la toma de decisiones, además de considerar los factores económicos, que este caso favorecen al método vertical, se evaluarán otros aspectos de seguridad con relación al reforzamiento de la roca (anclaje primario y secundario) para brindar al personal lugares más seguros de trabajo en todo el ciclo de preparación y explotación del rebaje.

Otro factor por evaluar consistirá en la cantidad de explosivo a emplear para ambas propuestas. Para la primera alternativa, se tendrá la comunicación de todos los barrenos en ambos niveles; con ello se garantiza que los barrenos estén libres de agua facilitando las condiciones de cargado y el empleo del agente explosivo como carga de columna. Para el segundo caso (barrenación en forma de abanico) se tendrán más del 90 % de los barrenos sin comunicación a causa del diseño propio en ambos niveles del bloque. Esto puede dificultar la preparación de los barrenos previo al cargado debido a la gran cantidad de detritos y agua contenida en ellos, obligando a la utilización del alto explosivo en todas las columnas de los barrenos.

### 6.5.1 Reforzamiento de roca en los rebajes de producción

Uno de los factores más importantes para la industria y principalmente en la minería, consiste en garantizar la seguridad de su personal por medio de barreras físicas, análisis de riesgos y dispositivos de seguridad que permitan evitar y reducir los accidentes en las áreas de trabajo.

Por esta razón, se muestra un estudio comparativo de las dos propuestas para el refuerzo de la roca (aplicación de anclaje primario y secundario) durante la preparación de los bloques de minado.

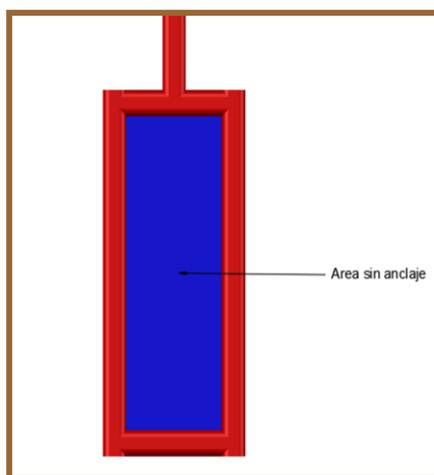
### 6.5.2 Reforzamiento de roca para el bloque de minado en abanico

Debido a la poca preparación de obra, 180 [m] para el acceso superior, el anclaje primario y secundario que se podrá instalar para este sistema de barrenación será muy limitado.

El refuerzo consiste en la instalación de anclas de fibra de vidrio con un diámetro de 38 [mm] y una longitud de 2.40 [m] distribuidos en una plantilla de 1.20 [m] x 1.20 [m]. Para el anclaje secundario se aplican cables de sobreesfuerzo con diámetro de 7/8 [in] y en las zonas de cuña de bajo ángulo, una longitud variable de 6 [m] y 10 [m] con la finalidad de evitar deslizamientos de los bloques preformados.

Dadas las condiciones de diseño de la preparación del bloque de minado, el área sin anclaje será considerable. Por lo anterior, no es posible garantizar la estabilidad en el cielo del rebaje minado al momento de su extracción, aunque el rezagado está considerado realizarse con equipos operados por medio de control remoto.

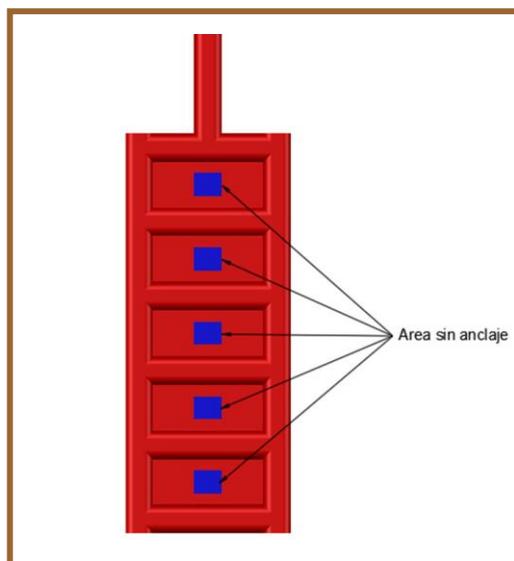
En la Figura N°32 se muestra en color azul el área sin reforzamiento y en color rojo el área soportada por medio del anclaje.



*Figura N° 32. Vista en planta en donde se observa el área sin reforzamiento*

### 6.5.3 Reforzamiento de roca para el bloque de minado en vertical

Para este arreglo, el área sin anclaje en el bloque de minado solo se ubicará en los pilares prestados (representados en la Figura N°33 en color azul), por ello, este sistema de barrenación sí garantiza la seguridad del personal, contando con un soporte en todo el proceso de preparación (avance y/o cuele de obra) así como durante la explotación del bloque de minado (cargado, voladura y rezagado de mineral). Es por ello que, además de contar con un factor económico favorable, también es más seguro.



*Figura N° 33. Preparación de bloque en donde se muestra el área sin anclaje*

Con este análisis comparativo, se observa que el área de influencia y/o factor de seguridad es mayor aplicando la barrenación vertical, ligado de manera directa a la preparación de la obra.

## 6.6 Análisis de tipo de explosivo

Uno de los insumos más importantes en la minería es el explosivo. Actualmente resulta ser la manera más económica de fragmentar la roca y es por ello que también es importante su consideración al evaluar ambos métodos de barrenación, vertical y en abanicos.

De manera general, como se mencionó al inicio del numeral 6.5 se tendrán dos tipos de escenarios, barrenos con agua y sin agua. Para el primer caso no existe otra alternativa que la utilización del alto explosivo, mientras que para el caso de los barrenos sin agua, el empleo del agente explosivo es posible en todos los barrenos.

A continuación, se muestra una tabla en donde se ve reflejado el costo de la utilización del alto explosivo y del agente explosivo para cada plantilla de barrenación:

ALTO EXPLOSIVO EN BARRENACIÓN DE ABANICOS										
BARRENOS	LONGITUD	CARGA DE FONDO	CARGA DE COLUMNA	TACO	ALTO EXPLO/BARRENO	*KG EXPLO/METRO	KG EXPLO/BARRENO	KG EXPLO/LÍNEA	COSTO EXPLO/KILO	COSTO/LÍNEA
22	17 m	2 m	12.50 m	2.50 m	14.50 m	11.23	163	3582.37	1.75 USD	<b>\$6,269.15</b>

*Tabla de costos con relación a la utilización del alto explosivo*

AGENTE EXPLOSIVO EN BARRENACIÓN VERTICAL										
BARRENOS	LONGITUD	CARGA DE FONDO	CARGA DE COLUMNA	TACO	ALTO EXPLO/BARRENO	*KG EXPLO/METRO	KG EXPLO/BARRENO	KG EXPLO/LÍNEA	COSTO EXPLO/KILO	COSTO/LÍNEA
11	15 m	2.50 m	10.00 m	2.50 m	12.50 m	6.1	76	838.75	0.84 USD	<b>\$704.55</b>

*Tabla de costos con relación a la utilización de agente explosivo*

Con este análisis es posible determinar que la opción más viable y económica favorece a la utilización del agente explosivo (ANFO) como carga de columna en los barrenos dados de forma vertical.

## **6.7. Ventajas y desventajas de la barrenación en abanico contra la vertical**

Por otra parte, realizando un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos, es posible destacar que el minado por barrenación vertical ofrece más ventajas como a continuación se describe para cada uno de ellos:

### **Barrenación vertical. -**

#### **Ventajas. -**

- Menor costo para la preparación y explotación de bloques que en abanicos, menor tiempo de los equipos de barrenación en los rebajes de producción (tiempo promedio de barrenación por tubo 13 minutos, longitud de tubo 1.80 m, altura de banco 15 m, tiempo de perforación por barreno 2 hrs (+/- 5%)
  - 6,075 m para la barrenación vertical (6,075 m \* 2 hrs = 12,150 hrs)
  - 18,360 m para la barrenación en abanico (18,360 m \* 2hrs = 36,720 hrs)
- Menor tiempo de las máquinas de barrenación en los rebajes de producción
- Mejor control operativo de la barrenación
- No requiere una supervisión personalizada
- Ritmo de producción de moderado a alto
- Método altamente mecanizado
- Seguro, se cuenta con un área mayor de anclaje en el proceso de extracción
- Las operaciones unitarias se realizan de forma simultánea
- Disponibilidad de la carga
- Mejor visibilidad en el rezagado a control remoto por parte del operador
- Costos bajos en el cargado de barrenos con explosivo al utilizar agente explosivo como carga de columna

#### **Desventajas. -**

- Elevado costo de desarrollo
- Obras de preparación y desarrollo lentas
- Método no selectivo
- Problemas de inestabilidad cuando las voladuras de producción no son cuidadas
- Mayor necesidad de refuerzo para cuidar detalles estructurales (fallas, cuñas)
- Rezagado por la parte del desplante, forzosamente con equipo a control remoto
- Voladuras controladas utilizando iniciadores electrónicos
- Tiempo de espera de 24 horas después de realizar una voladura de producción para evaluar el rebaje y continuar con el ciclo de extracción

## Barrenación en abanico

### Ventajas. -

- Menor costo en la preparación y el desarrollo de los bloques
- Ritmo de producción de moderado a alto
- Método altamente mecanizado
- Disponibilidad de la carga
- Menor costo en el reforzamiento de la roca

### Desventajas. -

- Mayor costo en la preparación y explotación de los rebajes de producción; son **\$32,620.7 USD** más por cada bloque que en la barrenación vertical
- Mayor tiempo del equipo de barrenación en los rebajes de producción por la cantidad de abanicos por barrenar
- Método de explotación no selectivo
- Supervisión detallada en la barrenación por la desviación de los barrenos que se pueda generar
- Utilización de alto explosivo en el cargado de los barrenos
- Bitácora más detallada de cada barreno que cuente con información de su longitud, inclinación, desviación por fallas estructurales y otros
- Menor área de sostén por la poca preparación en el nivel superior
- Rezagado por la parte del desplante, forzosamente rezagado con equipo a control remoto
- Mayor experiencia del operador del equipo de rezagado para la extracción y cargado del mineral
- Voladuras controladas utilizando iniciadores electrónicos
- Tiempo de espera de 24 horas después de realizar una voladura de producción para evaluar el rebaje y continuar con el ciclo normal de extracción
- Equipo de barrenación cuente con una calibración periódica del sensor de grados o ángulo de basculación para barrenar conforme a proyecto
- Levantamiento de barrenos con equipo especializado para determinar su longitud e inclinación para cada barreno

Para finalizar se considera que el sistema de barrenación vertical es la alternativa más viable, redituable y sencilla ya que cuenta con más ventajas técnicas y lo más importante, que ya se cuenta con experiencia en la aplicación de este método.

## 6.8. Análisis comparativo de costos

Para concluir, se procede con el análisis comparativo entre los costos de la barrenación vertical y la barrenación en abanicos, encontrándose un diferencial de \$32,620.7 USD por cada bloque, siendo la barrenación vertical la de menor costo:

CONCEPTO	COSTO EN USD
Barrenación vertical	\$325,298.5
Barrenación abanicos	\$357,919.2

<b>DIFERENCIAL</b>	<b>\$32,620.7</b>
--------------------	-------------------

De acuerdo con el análisis planteado, el sistema de barrenación vertical resulta más económico que el de barrenación en abanicos, y más aún, no sólo debe considerarse la parte económica sino también la disponibilidad de los equipos de barrenación en los rebajes de producción, así como la seguridad del personal en todo el ciclo de minado. Este tipo de indicadores llegan a ser determinantes en la toma de decisiones.

Por la diferencia de metros entre ambos sistemas (*vertical: 6,075 m, en abanico: 18,360 m*), en el primer caso los equipos permanecen un tiempo menor que en el segundo, siempre y cuando se cumpla en tiempo y forma con los presupuestos de desarrollo (*cuele de obras*) con indicadores del 90% en la eficiencia de disparo.

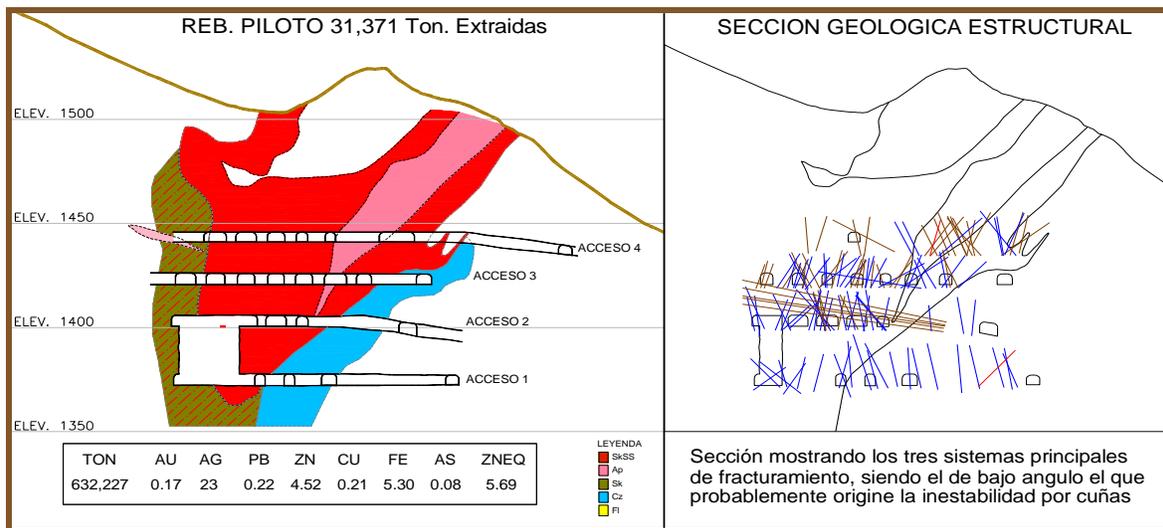
## 7. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BARRENACIÓN VERTICAL EN UN REBAJE PILOTO

A continuación, se muestra la aplicación del sistema de barrenación vertical en un rebaje piloto de la unidad de negocios.

### Características del rebaje

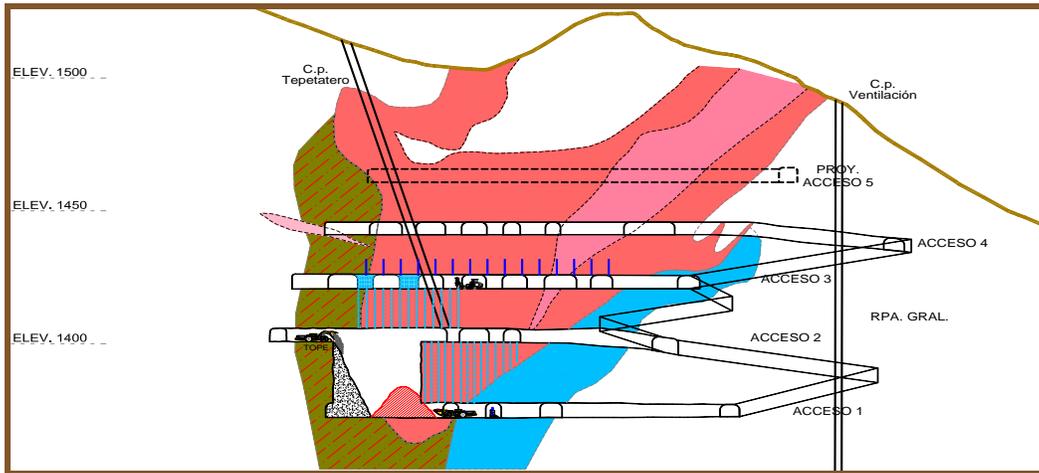
La mineralización está limitada al alto por el skarn y al bajo por la caliza; existe también un dique aplítico asociado con la mineralización.

Todas las rocas son de buena calidad con un diseño de subniveles de un ancho de 30 [m], un largo promedio de 71 [m] y bancos de 15 [m]. El soporte primario con anclas de fibra de vidrio de 2.40 [m] distribuidas en plantilla de 1.20 x 1.20 [m], perforación para voladura de 4<sup>1/2</sup> [in] de diámetro y plantilla de 2.50 [m] B x 3.00 [m] E, barrenos de post-corte con separación de 1.25 [m] en las tablas de cada banco.

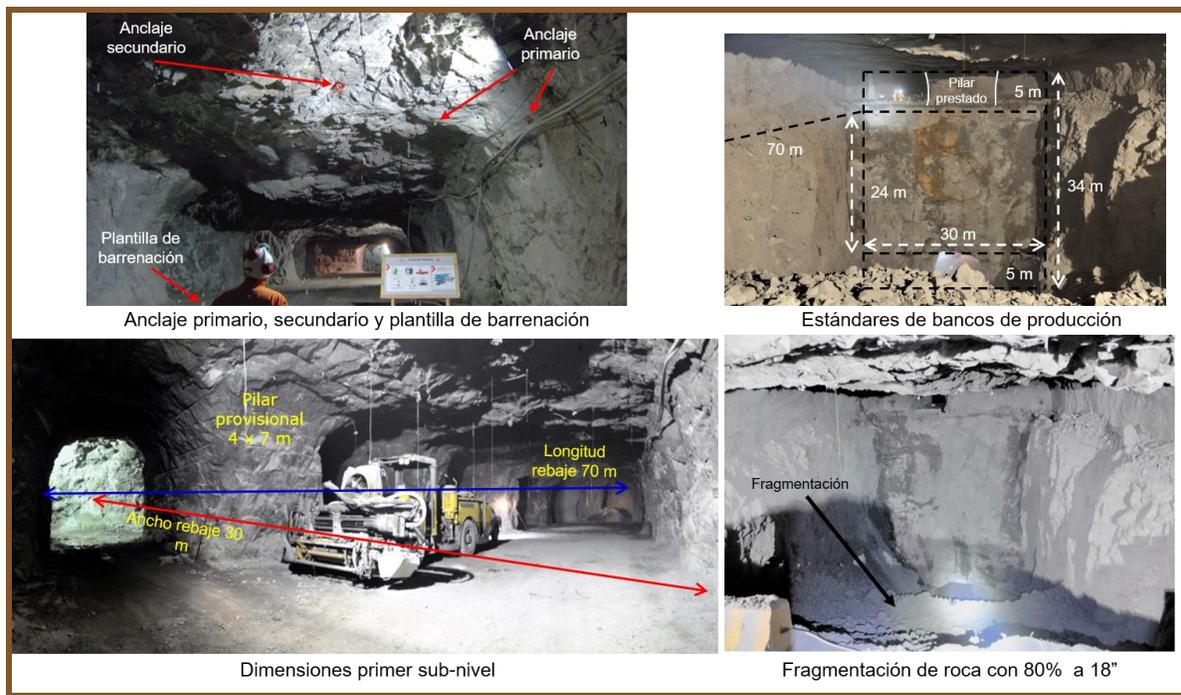


**Figura N° 34. Sección longitudinal geológica estructural de rebaje piloto**

Como se indica en la sección longitudinal de la Figura N° 34, se cuenta con 4 subniveles. El relleno deberá estar a una distancia mínima de 15 [m] del talud del banco; el soporte secundario de cables de acero de 6 [m], instalados en una plantilla de 6.0 x 5.2 [m], que de acuerdo con el levantamiento estructural y de manera puntual deberá ser modificada donde se ubiquen cuñas.



**Figura N° 35. Sección longitudinal mostrando el ciclo de minado: barrenación, rezagado y relleno**



**Figura N° 36. Representaciones del estándar en los rebajes de producción con sistemas de soporte, dimensiones requeridas en base a estudios estructurales y granulometría**



*Figura N° 37. Resultado de la voladura en el acceso 4 del rebaje piloto mostrando el detalle del cuidado de los pilares cortina. Con la aplicación de la barrenación de post-corte se genera un buen marcaje de las medias cañas garantizando con ello su estabilidad; la granulometría se presenta en un rango P80 de 18 [in]. Las figuras representan, a escala, el tamaño de una persona*

## CONCLUSIONES

En este trabajo se puede observar que la variación del costo entre ambos sistemas de barrenación es mínima. Se puede concluir que el análisis económico entre ambos sistemas no es un factor contundente para determinar el cambio a un sistema de barrenación abanicado. Es por ello que se analizan dos factores más, directamente ligados a la seguridad del personal, y proporcionando lugares de trabajo más seguros por medio del reforzamiento de la roca con la instalación del anclaje primario y secundario. Esto con la finalidad de que los equipos de rezagado siempre tengan un cielo estable al momento de realizar sus actividades de trabajo.

El otro factor que refuerza la toma de decisiones consiste en la utilización del explosivo en el cargado de barrenos, en donde se favorece el sistema de barrenación en forma vertical.

Haciendo referencia en el comparativo se destaca que el minado por medio de la barrenación vertical es viable desde el punto de vista técnico ya que ofrece más ventajas operativas que se describen a continuación:

- Menor tiempo de los equipos de barrenación en los rebajes de producción (tiempo promedio de barrenación por tubo 13 minutos, longitud de barra de 1.80 m, altura de banco 15 m, tiempo de perforación por barreno 2 hrs (+ /- 5%)
  - 6,075 m para la barrenación vertical
  - 18,360 m para la barrenación en abanico
- Mejor control operativo de la barrenación
- No requiere una supervisión personalizada
- Ritmo de producción de moderado a alto
- Método altamente mecanizado
- Seguro, se cuenta con un área mayor de anclaje para el proceso de extracción
- Disponibilidad de la carga
- Mejor visibilidad en el rezagado a control remoto por parte del operador

Para finalizar se considera que el sistema de barrenación vertical es la alternativa más viable y redituable y, lo más importante, que ya se cuenta con experiencia en la aplicación de este método de producción.

## DOCUMENTOS CONSULTADOS

Departamento de Geología (2013). Características del macizo rocoso [Presentación en Power Point]. Velardeña Durango. Recuperado en agosto 2016

EXSA (sin año). Manual práctico de voladura. 4ª edición

García, E. CONABIO. "Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García)" Escala 1:1000,000. México, 1998. Consultado en el mes de octubre del año 2018 en: <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/PDFs/ANEXOCLIMA.pdf>

Konya. Calvin J., Albarrán, Enrique, "Diseño de voladuras". Impresos Santiago, México, D.F., 2009

Perforación y voladura de rocas en minería, E.T.S de Ingenieros de Madrid, 2013, Página 168, José Bernaola Alonso, Jorge Castilla Gómez, Juan Herrera Herbert

Servicios Administrativos Peñoles, S.A de C.V., Minera Roble, Proyecto Velardeña, "Estudio de prefactibilidad a 6,000 TPD". Torreón, Coahuila

## **ANEXO**

*4 de enero de 2016*

Reporte de voladura barrenación larga

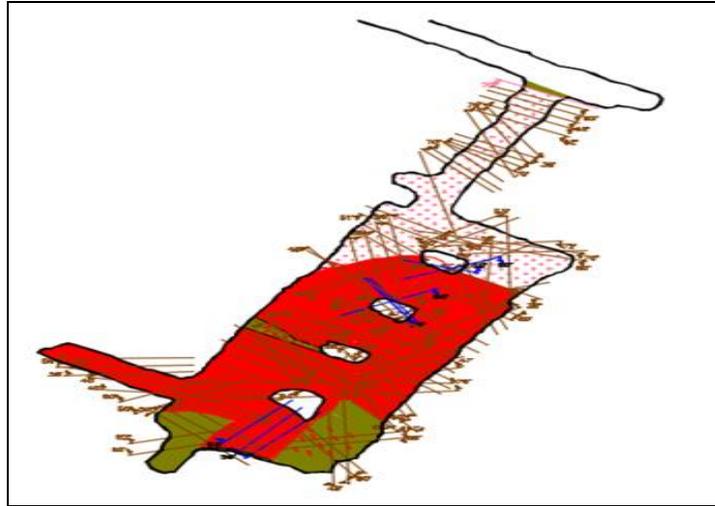
Estimados todos, envío el reporte de la voladura realizada en el área de Antares Norte el 21 de diciembre en el acceso 5 del 14 utilizando iniciadores electrónicos.

Atte.

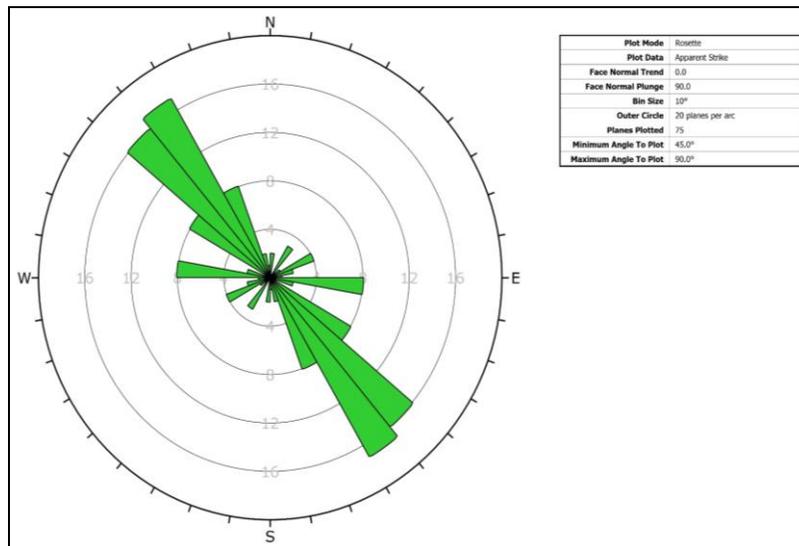
DEPARTAMENTO DE MINA BARRENACIÓN LARGA

Misael Joaquin Camacho Gazca

## Información estructural



Sección estructural en planta del acceso 5 del 14



Roseta estructural del 5 del 14

DATOS DE LA VOLADURA		OBSERVACIONES	
Área:	Antares Norte		
Tipo de Roca	Skarn	Mineral	
Densidad Mineral (g/cc)	3.2		
Plantilla	Tres bolillo		
Número de líneas	5		
Total de barrenos	125		
Bordo (m)	2.5		
Espaciamiento (m)	3.0		
Taco (m)	2.0		
Diámetro de barrenación(in)	4 <sup>1/2</sup>		
Altura de banco (m)	22		
Sub barrenación (m)	NO APLICA	NO APLICA	
Toneladas quebradas	25,712		
Factor de Carga (Kg/ton)	0.32		
Sistema de Iniciación	Electrónica		
Retardo entre barrenos (ms)	10 ms		
Retardo entre líneas (ms)	12 ms		
Fragmentación P80 (In)	18 [in]		
VIBRACION			
LUGAR DE MEDICION	SISMOGRAFO	DISTANCIA	LECTURA
PUNTO 1	Micromate	85 m	18.49 mm/ s
EXPLOSIVO EMPLEADO			
Cartuchos/sacos	Unidad	Producto	Observaciones
315	7875 kg	ANFO	Densidad de 0.60 g/cm <sup>3</sup>
144	200 kg	Emulsión 1 <sup>1/2</sup> x 39"	Dos cargas por barreno
432	225 kg	Baja densidad 1x 39"	Utilizado en rosarios
<b>TOTAL</b>	<b>8300 kg</b>		

De acuerdo con el levantamiento real realizado en el lugar de la voladura se muestra la siguiente información:

### Plantilla general

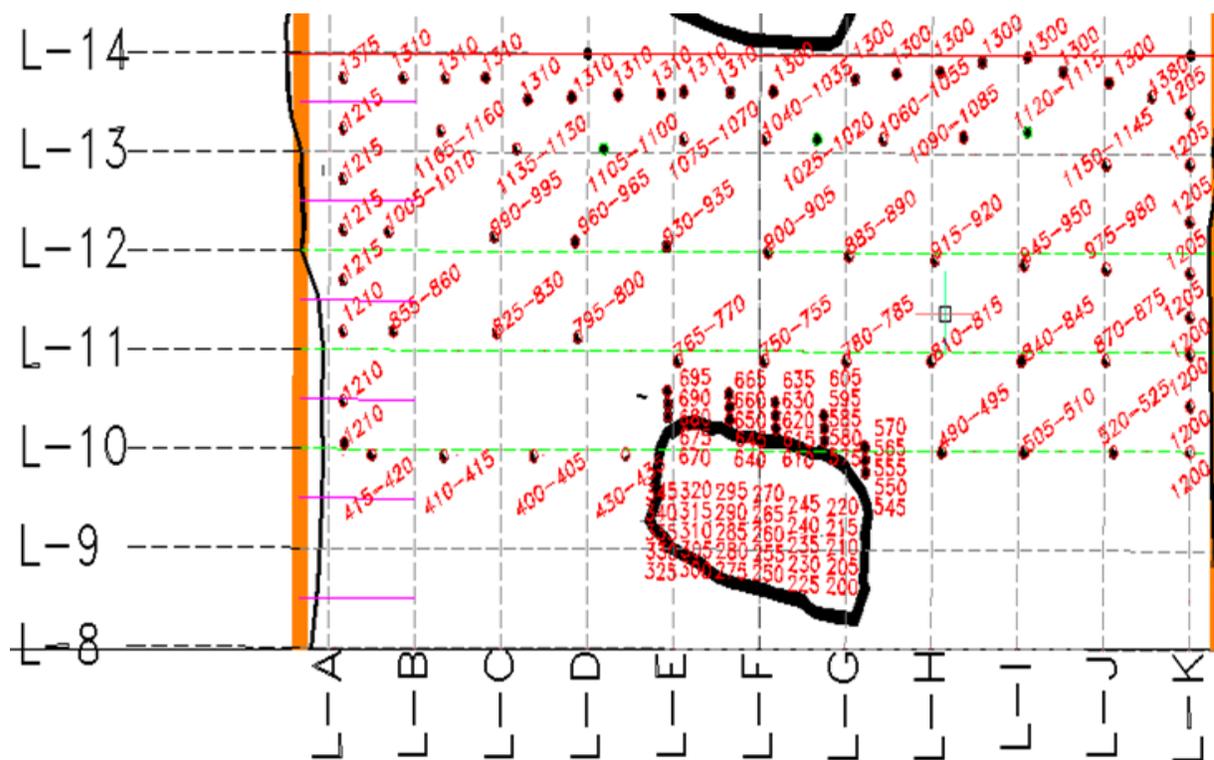


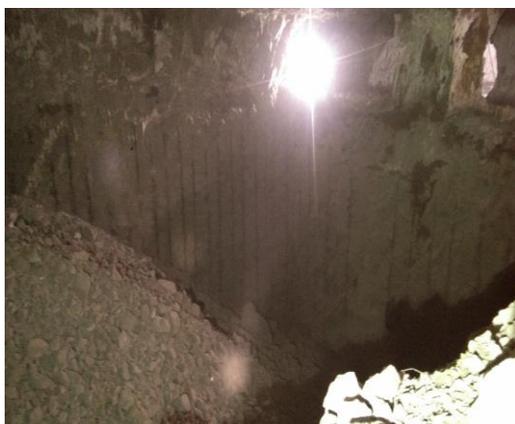
Imagen mostrando la distribución de barrenos y la secuencia de disparo

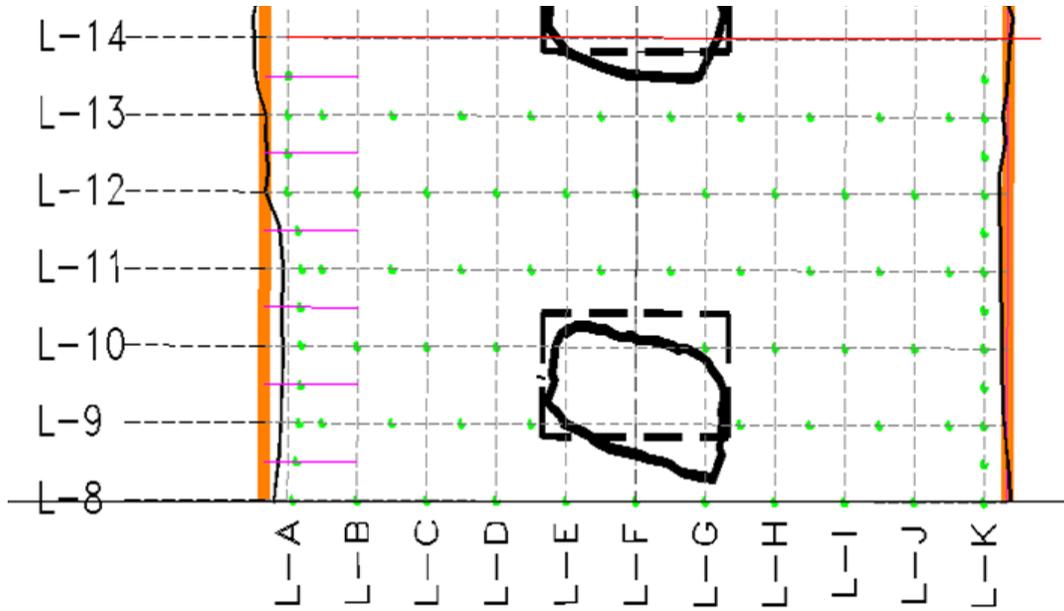
## Kilogramos de explosivo detonado por retardo

Para una longitud del banco de 22 m se utilizaron 5 sacos de ANFO de baja densidad y dos cartuchos con medida de 1 ½ x 39” equivalente a 128.76 Kg de explosivo con una secuencia de disparo dada por dos iniciadores para un mismo barreno, detonando 64.38 Kg de explosivo para cada iniciador, siendo *la carga máxima de 67 Kg en uno de los barrenos de producción.*

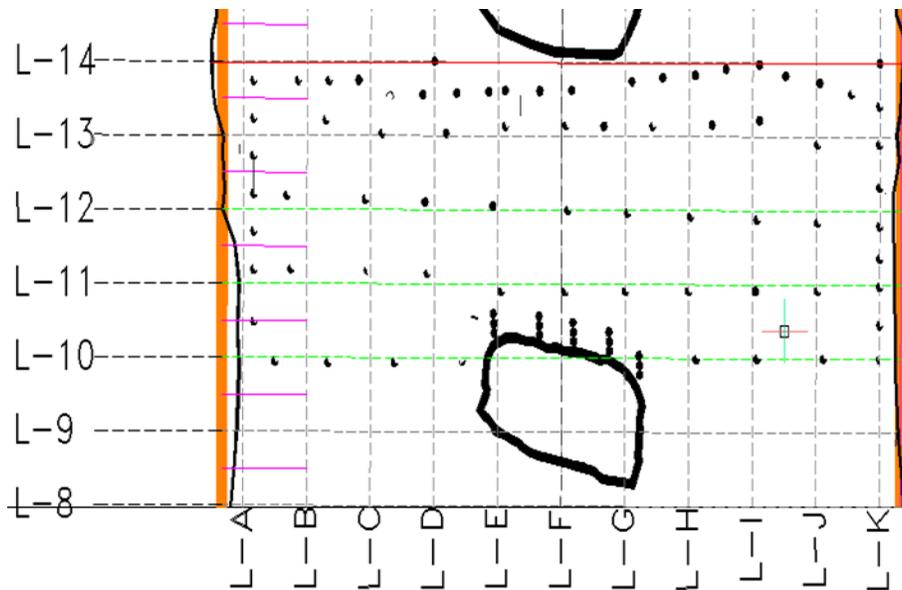
## Resultados

La voladura en términos generales quedo bien, en cuanto a estabilidad del rebaje es aceptable por la parte inferior (4 del 14 ) requiere poco amacice, cielo y tablas estables, las tres tablas del bloque quedaron marcadas por medias cañas debido a la utilización de explosivo de baja densidad desacoplado dentro del barreno (rosario), la granulometría por la parte superior (5 del 14) tiende a tener una granulometría predominante de 12 in a 15 in en un 95 %, por la parte inferior (4 del 14) la fragmentación oscila entre 15 y 17 in.





**Plan del diseño de barrenación**



**Real del diseño de barrenación**

## **Vibración**

En los resultados emitidos por el sismógrafo estamos dentro del rango, las medidas que se emiten en este reporte es el vector suma para la velocidad de la partícula fue de 18.49 [mm/s].

En las gráficas muestra un comportamiento más homogéneo debido a que se controló la cantidad de explosivo detonada fuera la misma para ambas cargas dentro del barreno.

## **Sobre rompimiento trasero**

Sin sobre rompimiento, sin pateo, sin bronqueo.

## **Proyección de roca**

De 15 [m] a 19 [m].

## **Fragmentación**

- Por el 5 del 14
  - Gruesos mayores a 30[in] = 1%
  - 20 a 30 [in] = 10 %
  - 10 a 19 [in] = 84 %
  - Finos a 9 [in] = 5%
  
- Por el 4 del 14
  - Gruesos mayores a 30[in] = 1%
  - 20 a 30 [in] = 10 %
  - 10 a 19 [in] = 84 %
  - Finos a 9 [in] = 5%

# Sismograma

Date/Time Vert at 14:50:26 December 21, 2015  
 Trigger Source Geo: 0.508 mm/s  
 Range Geo: 254.0 mm/s  
 Record Time 3.0 sec at 1024 sps  
 Operator/Setup: ....factory.mmb

Serial Number UM6915 V 10-74 Micromate ISEE  
 Battery Level 3.8 Volts  
 Unit Calibration January 19, 2015 by Instanetal  
 File Name \_\_TEMP.EVT

## Notes

Location: VELARDE A  
 Client: PE OLES  
 User Name: ANTONIO MANZANARES  
 General:

Microphone Linear Weighting  
 PSPL \*\*\* pa.(L) at 0.356 sec  
 ZC Freq 3.8 Hz  
 Channel Test Passed (Freq = 19.7 Hz Amp = 1401 mv )

	Tran	Vert	Long	
PPV	6.865	18.16	12.04	mm/s
ZC Freq	85	>100	73	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.040	0.163	0.181	sec
Peak Acceleration	0.719	1.331	0.866	g
Peak Displacement	0.062	0.027	0.024	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.3	7.1	Hz
Overswing Ratio	4.4	3.8	4.0	

Peak Vector Sum 18.49 mm/s at 0.163 sec  
 \*\*\* : Out of Range

