



Universidad Nacional Autónoma de  
México

---

Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO ENTRE DOS  
PLANTILLAS DE BARRENACIÓN, EN UNA CANTERA EN EL  
ESTADO DE HIDALGO

**TESINA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

PRESENTA:

JOSÉ ALFREDO SÁNCHEZ HUITZIL

DIRECTOR DE TESINA:

ING. MAURICIO MAZARI HIRIART



MÉXICO, D.F.

2016

A la Facultad de Ingeniería, a los profesores y a la Universidad, por la formación que me han dado.

# Índice

RESUMEN.....	IX
INTRODUCCIÓN .....	XII
PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA.....	XIII
I. GENERALIDADES.....	1
I.1 ASPECTOS GENERALES.....	1
I.1.2 Localización. ....	1
I.1.3 Cantera. ....	2
I.1.4 Geología.....	2
I.1.5 Reservas .....	5
I. 2 CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES. ....	5
II. TEORÍA DE LOS EXPLOSIVOS.....	6
II.1 VOLADURA Y EXPLOSIVOS.....	6
II.1.2 Explosivos. ....	6
II.2 DESCRIPCIÓN.....	7
II.2.1 Agente explosivo ANFO. ....	7
II.2.2 Sistema de iniciación electrónica. ....	8
II.2.3 Escáner 200 .....	9
II.2.4 Explosivo de alta densidad o alto explosivo. ....	10
II.3 PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS.....	11
II.3.1 Potencia. ....	12
II.3.2 Densidad o gravedad específica. ....	12
II.3.3 Velocidad de detonación (VOD). ....	12
II.3.4 Presión de detonación.....	12
II.3.5 Gases.....	13
II.3.6 Las propiedades actuando sobre el macizo rocoso .....	13
II.4 MECANISMOS DE FRAGMENTACIÓN DE LA ROCA .....	13
II.4.1 Onda de choque.....	13

II.4.2 Presión de gas .....	13
II.4.3 Rigidez. Propiedad del banco .....	16
II.4.4 Proceso de fragmentación. ....	17
II.5 RADIO DE RUPTURA .....	18
II.5.1 Zona 1. Pulverizada. ....	18
II.5.2 Zona 2. Zona severamente fracturada. ....	19
II.5.3 Zonas 3 y 4 .....	19
III. ANÁLISIS DE LAS PLANTILLAS DE BARRENACIÓN Y PROPUESTA.....	20
III.1 EXPLOTACIÓN. ....	20
III.1.1 La Condesa.....	20
III.1.2 Proceso de barrenación. ....	21
III.1.3 Cargado. ....	22
III.1.4 Detonación.....	23
III.1.5 Sobre rompimiento trasero.....	25
III.1.6 Observaciones en campo.....	27
III.2 PLANTILLA DE BARRENACIÓN. ....	27
III.3 ANÁLISIS DE LOS ARREGLOS GEOMÉTRICOS .....	27
III.3.1 Arreglo geométrico cuadrado .....	29
III.3.2 Arreglo geométrico propuesto .....	31
III.3.3 Arreglo geométrico cuadrado segundo caso.....	33
III.4 CONTROL DE ROCA EN VUELO. ....	34
III.4.1 Tiempo de retardo .....	34
III.4.2 Taco adecuado .....	35
III.4.3 Cama de tierra.....	35
III.5 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS. ....	36
III.6 ANÁLISIS FINANCIERO.....	36
III.6.1 Análisis de la plantilla de barrenación actualmente utilizada.....	36
III.6.1.1 Precios unitarios de los productos utilizados. ....	37
III.6.1.2 Costo por tonelada de la plantilla cuadrada.....	38
III.6.2 Análisis de la plantilla de barrenación propuesta. ....	38
III.6.2.1 Cálculos y formulas. ....	39

III.6.2.2 Costo por tonelada en la plantilla propuesta.....	42
III.6.3 COMPARACIÓN. ....	43
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	44
BIBLIOGRAFÍA .....	47

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Alimentación y trituración primaria .....	XIV
Ilustración 2. Grietas radiales hacia la cara libre .....	IX
Ilustración 3. Estratos.....	X
Ilustración 4. Localización Jasso Hidalgo .....	1
Ilustración 5. Localización geográfica.....	2
Ilustración 6. Localización geológica .....	3
Ilustración 7. Carta geológica-minera E14-2. SGM .....	4
Ilustración 8. Estratos geológicos.....	5
Ilustración 9. Agente explosivo ANFO marca Amex .....	7
Ilustración 10. Iniciador <i>uni tronic</i> .....	9
Ilustración 11. Escáner 200 .....	10
Ilustración 12. Blast box 310 .....	10
Ilustración 13. Alto explosivo .....	11
Ilustración 14. Fragmentación radial .....	14
Ilustración 15. Grietas radiales.....	15
Ilustración 16. Doblamiento asimétrico.....	16
Ilustración 17 a y b. Doblamiento asimétrico.....	16
Ilustración 18. Zonas en el radio de ruptura .....	18
Ilustración 19. Cantera .....	20
Ilustración 20. Perforación con Track Drill .....	21
Ilustración 21. a, b , c y d Cargado de barrenos.....	22
Ilustración 22. Voladura en progreso.....	24
Ilustración 23. Sobre-rompimiento trasero, debido a un bordo excesivo.....	25
Ilustración 24. Sobre rompimiento trasero debido a la rigidez excesiva.....	26
Ilustración 25. Modelo del banco de explotación.....	28
Ilustración 26. Arreglo geométrico de 3 x 3 [m] .....	29
Ilustración 27. Roca de sobre tamaño resultante de la voladura.....	30
Ilustración 28. Superficie esperada .....	30
Ilustración 29. Plantilla triangular.....	31

Ilustración 30. Nueva configuración .....	32
Ilustración 31. Superficie plano .....	33
Ilustración 32. Arreglo geométrico de 3 x 3 [m] .....	34
Ilustración 33. Asignando tiempos de 17 ms .....	35
Ilustración 34. Arreglo cuadrado.....	37
Ilustración 35. Plantilla marcada en campo.....	38
Ilustración 36. Arreglo propuesto.....	39

## *Índice de tablas*

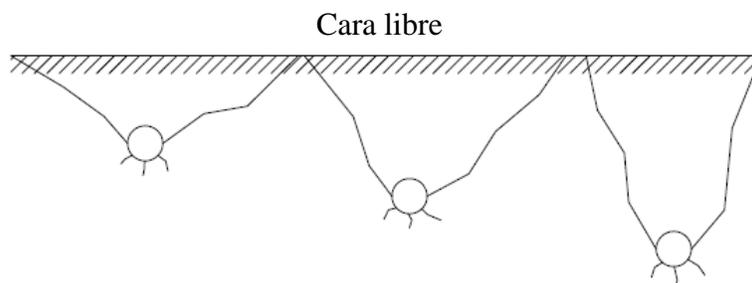
Tabla 1. Características de la plantilla utilizada .....	XIII
Tabla 2. Mezcla de nitrato de amonio y diésel.....	7
Tabla 3. Propiedades de los iniciadores electrónicos .....	8
Tabla 4. Tolerancia de los detonadores .....	24
Tabla 5. Datos obtenidos en campo para la plantilla de barrenación .....	36
Tabla 6. Total de artificios y explosivo.....	37
Tabla 7. Precios unitarios de artificios .....	37
Tabla 8. Costo por tonelada en plantilla cuadrada.....	38
Tabla 9. Densidad del explosivo por metro lineal .....	40
Tabla 10. Tabla de resultados.....	41
Tabla 11. Costo por tonelada en plantilla triangular .....	42
Tabla 12. Tablas comparativas .....	43

## Resumen.

La cantera “La Condesa” se encuentra localizada a 7 km al Este de la fábrica de cemento (ciudad cooperativa Cruz Azul) y a 80 kilómetros de la Ciudad de México. Sus coordenadas son: 19° 58' 51" O y 99° 16' 43"N. Se llega por la carretera México-Querétaro, tomando la salida a Tepeji del rio, antes de llegar a Tula. En el yacimiento se tiene una roca caliza de alta pureza con un 95 % de  $\text{CaCO}_3$ , que es la materia prima utilizada para la fabricación de cemento.

Para el desarrollo de la solución a la problemática post-voladura, hay que comprender cómo es que funcionan los explosivos. De acuerdo a las definiciones que han escrito diversos autores, se puede dar una definición general: *los explosivos son una mezcla de sustancias, las cuales proporcionan mediante una descomposición química en un lapso muy corto de tiempo, una gran cantidad de gases a altas temperaturas y presiones, ocasionando el fracturamiento de la roca.*

Así pues, la selección de un sistema de iniciación, cargado, barrenación y todo el trabajo que conlleva un proceso de explotación, resulta crítico para el éxito de una voladura. El sistema de iniciación no sólo controla la secuencia de disparo de barreno a barreno, sino que también afecta la cantidad de vibración generada por una voladura, el tamaño de fragmentación producida y el rompimiento trasero. Cuando detona un explosivo, una onda de esfuerzo se mueve a través de la roca uniformemente en todas direcciones alrededor de la carga. Entonces las grietas radiales se propagan predominantemente hacia la cara libre.



**Ilustración 1. Grietas radiales hacia la cara libre**

La roca extraída, es caliza de color gris claro a gris oscuro. Se observan estratos de un metro de potencia y una inclinación de 30 grados aproximadamente. La calidad estructural de la roca varía de buena, regular y mala. En algunas zonas presenta cavernas en los estratos. Cuando esto ocurre, dificulta la extracción mediante explosivos.



**Ilustración 2. Estratos**

En general el macizo rocoso presenta una calidad y continuidad regular en gran parte de su anchura y longitud. Existen zonas fragmentadas que son el resultado de la voladura, y se forman a lo largo del perímetro de los bancos en explotación debido a parámetros mal manejados en el proceso de explotación. En ocasiones se detectan cavernas en los barrenos y estas provocan una pérdida de energía del explosivo. En una observación y toma de datos en campo, se pudo observar que de cien barrenos perforados, tres presentaron caverna y cuatro presentaron presencia de agua en un porcentaje mínimo. Hasta donde se pudo observar no existía aún la presencia de fallas que afectaran la explotación.

Para el desarrollo, búsqueda y propuesta de la solución a la problemática, una herramienta útil, es el *software* de dibujo asistido por computadora *AutoCAD*, he aquí algunos pasos a seguir del procedimiento:

- Se dibuja un modelo en tres dimensiones de un banco de explotación, -uno por cada arreglo geométrico a analizar- en el cual se observe perfectamente los elementos que componen todo el proceso antes de la voladura.
- De dicho modelo, se saca el esquema para la plantilla cuadrada de tres por tres metros (la que es actualmente utilizada) y otra en arreglo triangular que es la propuesta.
- Se evalúan ambas y se concluye cual podría dar mejores resultados, con base en los resultados obtenidos de los estudios y análisis que se presentan en los modelos.

Al final del presente trabajo, se dan los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones.

## Introducción

En la cantera “La Condesa” se tienen problemas derivados de su actual método de voladura, cuyos resultados además de producir una fragmentación inadecuada que genera problemas de “sobre-tamaño” o tamaños inadecuados de la roca, deja patas en las bases de los taludes, genera proyección de roca también llamada “roca en vuelo” o “escopetazos”, pisos desnivelados, así como también bancos de explotación con alturas y ángulos de inclinación poco homogéneos y la cara del talud dañada. Esto se ha adoptado como algo “normal” y que, en algún punto del avance de la explotación, se tendrán bancos obstruidos por mucho material de “sobre-tamaño”. Este sobre-tamaño ha causado accidentes no fatales, pero con daño a la maquinaria. Así mismo existe el problema con el acarreo, ya que los pisos van quedando irregulares y castigan a los neumáticos de las unidades de carga reduciendo su vida útil.

Este trabajo propone analizar, desarrollar y plantear las soluciones factibles a la problemática resultante de sus prácticas de voladura para reducir en lo mínimo la utilización de métodos de post-voladura como el *moneo* y *plasteo*, así como el uso constante del martillo neumático. El objetivo anterior se realiza desarrollando y aplicando la teoría y uso de explosivos, modificando los parámetros de la plantilla de barrenación actualmente utilizada, tomando como base lo aprendido en los años de teoría y prácticas.

## Planteamiento de la problemática.

En cantera la condesa actualmente se tiene una producción de 3,500 toneladas por día, las cuales se obtienen por medio del método de explotación de “banqueo descendente”, con bancos de una altura de producción de 11 metros y 1 metro de sub-barrenación para el control de pisos. Para ello se cuenta con el siguiente equipo mecánico:

- Dos perforadoras neumáticas del tipo *TrackDrill*, marca *Ingersoll Rand* con martillo en el fondo y compresor independiente para cada perforadora. Con una velocidad de perforación promedio de 20 [m/h].
- Barras de acoplamiento de 3 [m] de longitud.
- El diámetro de la broca de perforación es de 4.5 pulgadas.
- Cargador frontal Caterpillar Modelo 966H con un cucharón de ~ 4 m<sup>3</sup> de capacidad.
- Camiones fuera de carretera de 50 toneladas marca *Euclide*.

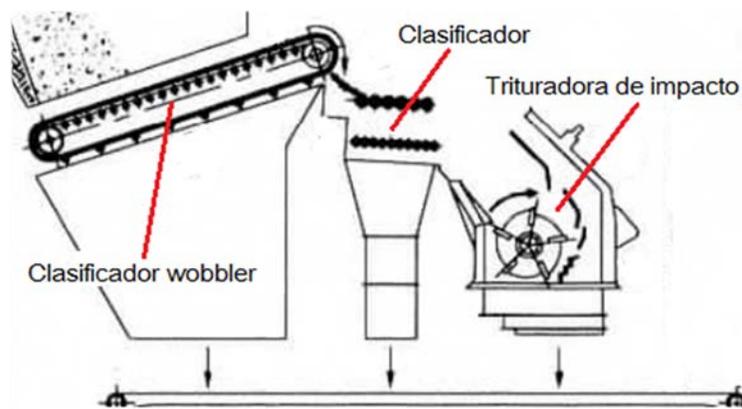
La plantilla de barrenación utilizada tiene las siguientes características:

**Tabla 1. Características de la plantilla utilizada**

Tipo de plantilla	Cuadrada
Bordo	3 [m]
Espaciamiento	3 [m]
Diámetro de barrenación	4.5 [pulg]
Longitud de barrenación (varía <sup>1</sup> )	12 [m]
Sub-barrenación	1 [m]
~	

<sup>1</sup> La longitud varía principalmente para ir controlando el nivel de pisos, además de la pericia del perforista quien en ocasiones perfora de más o queda corto.

El material quebrado es transportado por medio de camiones fuera de carretera y es vertido al alimentador *wobbler* marca *Hazemag* de rodillos elípticos con una capacidad de 1200 TPH que por sus características, admite tamaños de rocas de un máximo de 1300 [mm] de largo y/o ancho. La trituración primaria se lleva a cabo con una trituradora de impacto (trituradora de martillo) con una capacidad de 1200 TPH. El material procesado es depositado y transportado por medio de una banda hasta la trituración secundaria. Pues bien, se tiene un conflicto con la granulometría post-voladura de la roca que en algunas ocasiones supera los 1300 [mm] (que es el tamaño máximo que admite el alimentador), además de que, la cara del talud en ocasiones queda dañada. Estas rocas que son de dimensiones mayores también llamadas “*cuartones*”, han ido acumulándose por vario tiempo en los pisos de los bancos actualmente en explotación y con el tiempo han ido obstruyendo la explotación.



**Ilustración 3. Alimentación y trituración primaria**

Se aplican con frecuencia, maniobras de post-voladura (*moneo* y *plasteo*) para poder reducir su tamaño, así como la utilización excesiva de un martillo neumático el cual con frecuencia es enviado a mantenimiento, una de las causas es que puede ser debido a una mala o errónea operación. Esta gran acumulación de *cuartones*, ha ido obstruyendo y entorpeciendo el proceso de explotación obligando al personal a abrir otras frentes de operación en diferentes puntos del mismo nivel para así obtener la producción diaria.

En ocasiones existe la presencia de roca proyectada (*roca en vuelo*) tanto hacia la parte frontal e incluso hacia la parte posterior de banco, en ésta última, queda regada una “cama” de rocas de diferente granulometría en el piso superior del banco. Al tiempo que se va rezagando el material, se puede observar que el piso presenta protuberancias y/o concavidades, obligando a la maquinaria o bien a rellenarlas o a tratar de romper las protuberancias para poder dejar el piso lo más parejo posible. La presencia de *patas* daña los cucharones del cargador frontal y cuando esto pasa toda la operación se detiene.

# I. Generalidades

## I.1 Aspectos Generales.

### I.1.2 Localización.

La planta cementera Cruz Azul se encuentra ubicada en Ciudad Jasso; fue fundada en los terrenos del municipio de Tula de Allende en el estado de Hidalgo, en el año de 1954 como una comunidad cooperativa para albergar la vivienda de los trabajadores del principal complejo industrial cementero mexicano que pasa a manos mexicanas. Oficialmente llamada Ciudad Cooperativa Cruz Azul, una ciudad industrial mexicana, es un importante centro de desarrollo industrial cementero del país, el cual comenzó con la distribución de cal. Con la llegada de los ingleses y su tecnología, empezaron a fabricar cemento portland.



Ilustración 4. Localización Jasso Hidalgo

### I.1.3 Cantera.

La cantera “La Condesa” se encuentra localizada a 7 km al Este de la fábrica de cemento (ciudad cooperativa Cruz Azul) y a 80 kilómetros de la Ciudad de México. Sus coordenadas son: 19° 58' 51” W y 99° 16' 43” N. Se llega por la carretera México-Querétaro, tomando la salida a Tepeji del rio y antes de llegar a Tula.

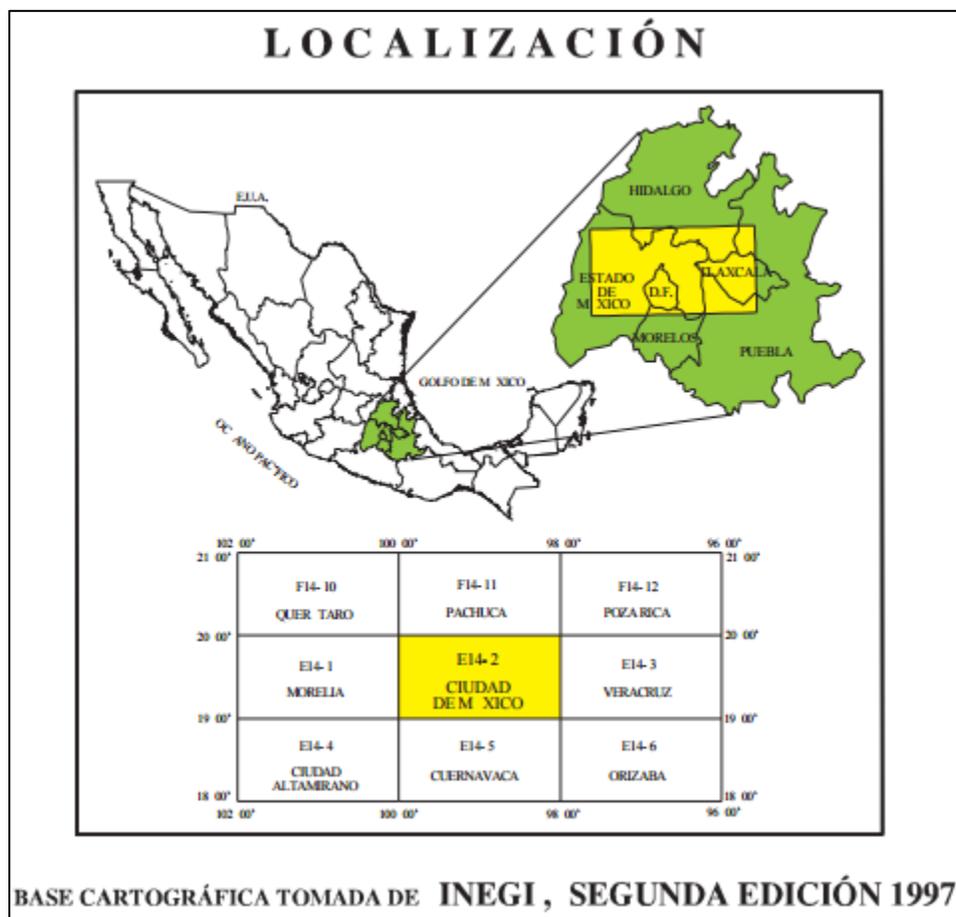


Ilustración 5. Localización geográfica

### I.1.4 Geología

Se tiene una roca caliza de alta pureza con un 95 % de  $\text{CaCO}_3$  que es lo necesario para considerarse como materia prima, esencial para la fabricación del cemento. La roca caliza es de color gris claro a gris oscuro. Se observan estratos de alrededor de cincuenta centímetros a un metro de potencia. La calidad (estructural) de la roca varía de mala, regular y mayormente buena. En algunas zonas presenta un fracturamiento parcial y en otras presenta cavernas en los estratos; cuando estas se presentan dificultan la extracción mediante explosivos.

Parte de la información de la geología local se obtuvo de la página del Servicio Geológico Mexicano, de la carta geológico-minera con el nombre de “Ciudad de México E14-2” que abarca a la ciudad de México, Edo. De México, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo y Morelos, como se muestra en la imagen (# tal); la carta forma parte de la provincia fisiográfica de la zona neovolcánica. La parte norte de la carta, donde se encuentra ubicada el área de explotación realizado por Cruz Azul, corresponde a rocas sedimentarias de la cuenca de Zimapan. (SGM, 2007)



**Ilustración 6. Localización geológica**

Existe presencia de roca caliza y margas de la formación Tamabra, a las que le sobreyacen discordantemente margas y lutitas de la formación Soyatal; estos sedimentos forman parte de la cuenca de Zimapan.

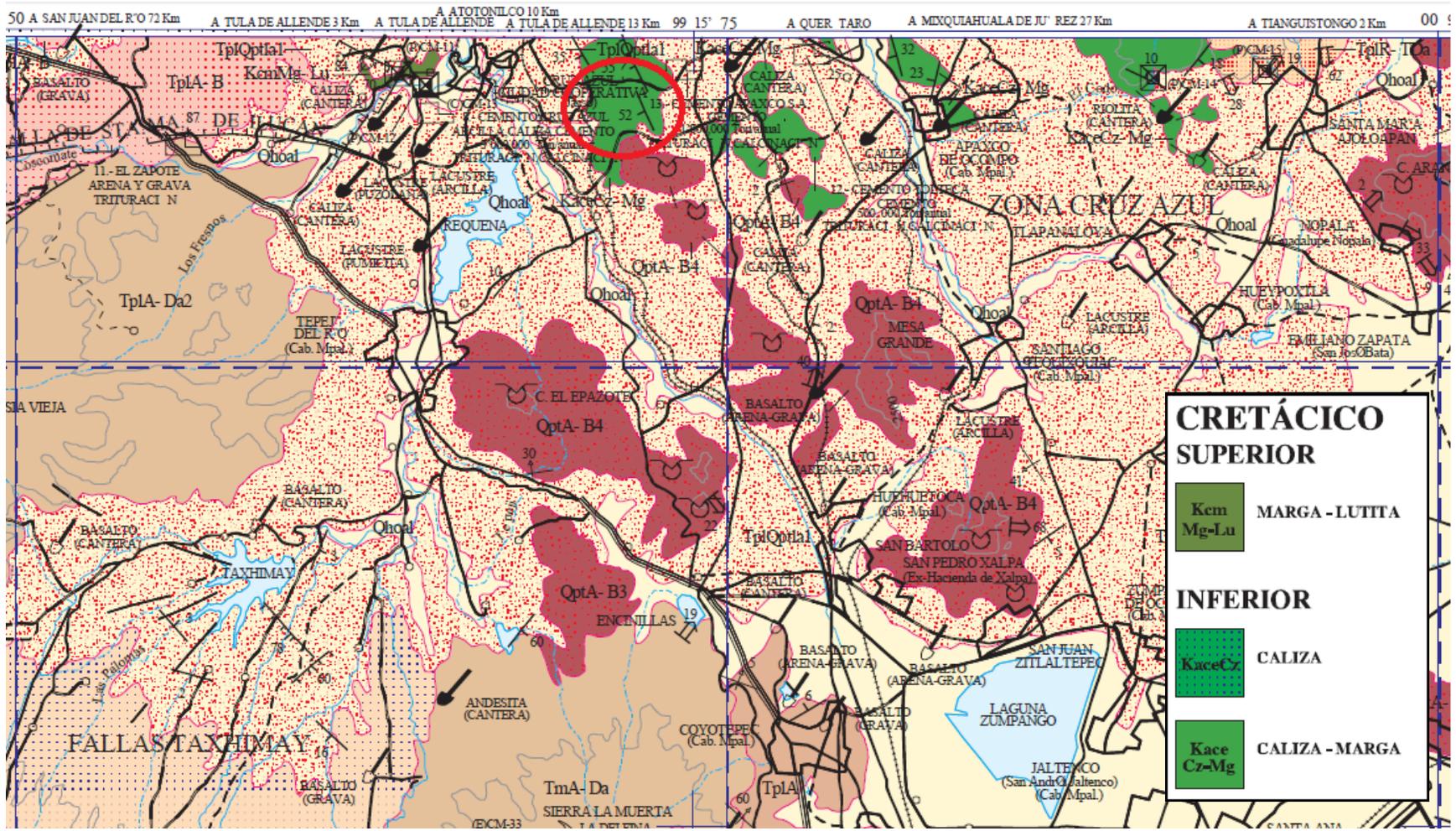


Ilustración 7. Carta geológica-minera E14-2. SGM

### **I.1.5 Reservas**

Las reservas probadas son alrededor de 100, 000,000 toneladas. Actualmente se está explotando el banco número siete de la cantera, la cual está proyectada hasta para dieciocho bancos, más sin embargo los estudios geológicos no cesan.

### **I. 2 Condiciones geológicas locales.**

En general el macizo rocoso presenta una calidad de regular a buena, y una continuidad uniforme. Existen zonas fragmentadas que son el resultado de la voladura, y se forman a lo largo del perímetro de los bancos en explotación, debido probablemente, a parámetros mal manejados en el proceso de explotación. En ocasiones se detectan cavernas en los barrenos y éstas provocan una pérdida de energía del explosivo. En una toma de datos en campo se pudo observar que de cien barrenos perforados, cinco presentaron caverna y cuatro presentaron presencia de agua en un porcentaje mínimo. Hasta donde se pudo observar no existía aún la presencia de fallas que afectaran la explotación.



**Ilustración 8. Estratos geológicos**

## **II. Teoría de los explosivos.**

### **II.1 Voladura y explosivos**

Se presenta un compendio de los tipos de explosivos -y sus propiedades- que son utilizados actualmente en las voladuras en la cantera “La Condesa”. Cada una de estas propiedades, representa un factor del cual va a depender que se obtenga un buen resultado de la voladura.

#### **II.1.2 Explosivos.**

De acuerdo a las definiciones que han escrito diversos autores, se puede dar una definición general: *son una mezcla de sustancias las cuales proporcionan, mediante una descomposición química en un lapso muy corto de tiempo, una gran cantidad de gases a altas temperaturas y presiones, ocasionando el fracturamiento de la roca.* Por lo tanto hay que saber aprovechar la energía que desprenden para poder utilizarla de la forma más aprovechable posible. Los explosivos están presentes en los trabajos de minería, la construcción y la industria, y su uso es peligroso si no se manipulan de acuerdo a las normas establecidas. Su mal uso ha causado muchos accidentes graves y muy peligrosos, es por esto que, el conocerlos y estudiarlos nos da una ventaja a la hora de relacionarnos con ellos. Es por eso que se deben tomar medidas de seguridad además de los requisitos establecidos por la SEDENA para la compra, venta y almacenamiento de explosivos para la industria de la minería (RFA-EX004).

El uso de los explosivos en la industria de la minería, constituye una herramienta irremplazable hasta la fecha, por su economía y eficacia. Se dividen principalmente en: explosivos de alta densidad o alto explosivo, agente explosivo e iniciadores. El agente explosivo es una sustancia que requiere de un explosivo de alta densidad para detonar y a su vez el de alta densidad requiere un iniciador. El agente explosivo utilizado por excelencia es el Nitrato de Amonio y Diésel (ANFO).

## II.2 Descripción

### II.2.1 Agente explosivo ANFO.

Se utiliza agente explosivo ANFO (por sus siglas en ingles *Ammonium Nitrate Fuel Oil*), es una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo, desde gasolinas a aceites de motor, en un 94 % y se utiliza principalmente como carga de columna, NO es resistente al agua y se inicia con un explosivo de alta densidad.



Ilustración 9. Agente explosivo ANFO marca Amex

### Producción de energía del ANFO

Cuando se elaboran mezclas de nitrato de amonio y diésel, pueden ocurrir variaciones. La cantidad de diésel agregado al nitrato de amonio es extremadamente crítica desde el punto de vista de la eficiencia de la detonación. Para obtener la liberación de energía óptima es deseable una mezcla que contenga:

Tabla 2. Mezcla de nitrato de amonio y diésel

Nitrato de amonio	94.5 %
Diésel	5.5 %

Si la mezcla contiene sólo del 2 al 4% de aceite, una cantidad significativa de energía se desperdicia y el explosivo no se desempeña apropiadamente. (J. Konya & Albarrán N., 2009)

## II.2.2 Sistema de iniciación electrónica.

La selección de un sistema de iniciación resulta crítica para el éxito de una voladura, éste no solamente controla la secuencia de disparo de barreno a barreno, sino que también afecta la cantidad de vibración generada por una voladura, el tamaño de fragmentación producida y el rompimiento trasero. Actualmente en la cantera “La Condesa”, se están utilizando iniciadores del tipo electrónicos marca *uni tronic*<sup>TM</sup>,

Estos iniciadores proporcionan una gran ventaja sobre los no eléctricos, ya que son muy exactos y totalmente programables. En conjunto con el scanner 200 de Orica<sup>TM</sup>, se toman los datos de cada detonador y estos son únicos e irrepetibles gracias a que cuentan con un código de barras, por lo tanto se elimina la posibilidad de error ya que son testeados en la malla de conexión antes de su detonación.

### Propiedades de los iniciadores *uni tronic* (Orica, 2015)

Tabla 3. Propiedades de los iniciadores electrónicos

Resistencia a la tensión (Kg) / (lb)	20 / 40
Peso de la carga explosiva (mg)	900
Longitud x diámetro de la cápsula (mm)	89 x 7.6
Material de la cápsula	Cobre
Programación (ms)	+ - 1
Tiempo de retardo máximo (segundos)	10
Precisión	+ - 0.03 %



**Ilustración 10. Iniciador *uni tronic***

### **II.2.3 Escáner 200**

Con este singular aparato, se escanean todos y cada uno de los iniciadores electrónicos. Se presenta una breve síntesis del funcionamiento en conjunto con los iniciadores. Se programa previamente el tiempo que va a existir entre barrenos y barrenos. Una vez asignado éste tiempo se comienza a escanear desde un tiempo “cero” para el primer barrenos o detonador; al ir escaneando el código de barras de cada uno de los iniciadores se va sumando automáticamente el tiempo previamente programado.

Es por ello que es de suma importancia, que se escanee en el orden en que se va a realizar la voladura. El tiempo entre “líneas” que se le asigna a la plantilla, es sumado manualmente una vez que se comienza a escanear el iniciador de dicha “línea”. Después, éste escáner con toda la información recolectada, es conectado al aparato receptor *blast box 310* (el cual es el que proporciona el pulso eléctrico) para testear y saber en qué parte del circuito éste está abierto, es decir existe una nula conexión del detonador con la línea *troncal* de corriente. Éste procedimiento se aplica a toda la malla del circuito, detectando así errores de conexión antes de su detonación.



Ilustración 11. Escáner 200



Ilustración 12. Blast box 310

#### II.2.4 Explosivo de alta densidad o alto explosivo.

La emulsión empacada *Senatel™ Magnafrac™* es la utilizada en el proceso de explotación de la cantera “La Condesa”, es un explosivo robusto y sensible a un detonador. Es de color amarillo, de una consistencia similar a la masilla y de medidas de 2 pulgadas de ancho por 16 pulgadas de largo.

Las emulsiones explosivas son del tipo denominado “agua en aceite” en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua. Este grupo mantiene las propiedades de los hidrogeles, pero a su vez mejora dos características fundamentales como son la potencia y la resistencia al agua.



**Ilustración 13. Alto explosivo**

### **II.3 Propiedades de los explosivos.**

Los explosivos tienen muchas propiedades, las cuales entran en juego una vez que la reacción química ha comenzado. Una de las partes para poder desarrollar la solución a la problemática presentada, son estas propiedades de las cuales se abordan las de mayor importancia. En el presente trabajo se citan algunas propiedades, que son fundamentales para poder reducir lo menos posible, problemas como una alta vibración en el macizo rocoso, por ejemplo. Una vez que comenzó la detonación, unas centésimas de segundo después, se da lugar a una serie de fenómenos. Se libera energía química y el explosivo pasa de sólido a un gas con una temperatura y una presión muy elevados, que al estar confinados en un espacio tan reducido como lo es el barrenado, puede alcanzar y sobrepasar las 100 000 atmósferas.

Los explosivos tienen características individuales, cada una de ellas es muy importante y requiere de ser evaluada para determinar la utilidad potencial de un explosivo específico para una aplicación específica\*. Estas características son las siguientes. \* (Atlas de México S.A. de C.V., 1988):

### **II.3.1 Potencia.**

El término potencia o fuerza, se define como la cantidad de energía contenida en un explosivo y el trabajo que éste es capaz de realizar. Existen dos formas comerciales para clasificar la fuerza de un explosivo: la fuerza en peso, que compara el explosivo sobre la base de su peso y la fuerza en cartucho y a granel, que lo compara sobre la base de su volumen.

### **II.3.2 Densidad o gravedad específica.**

Es el peso por unidad de volumen, usualmente expresada en gramos por centímetro cúbico. Esta propiedad permitirá al usuario distribuir su carga dentro del barreno de acuerdo a las características de la roca a fragmentar.

### **II.3.3 Velocidad de detonación (VOD).**

Se define como la velocidad a la que la reacción de detonación se extiende a través de una columna de explosivo, ya sea en el cartucho o en el barreno. Esta velocidad deberá ser igual o mayor que la velocidad sónica de la roca a fragmentar. Al incrementar la velocidad, el explosivo produce un efecto mayor de fragmentación. Las velocidades de detonación confinadas para explosivos comerciales, varían de 1,500 a 7,600 m/s.

### **II.3.4 Presión de detonación.**

Usualmente medida en *Kilo bares*, es generalmente considerada como la presión en la zona de choque delante de la zona de reacción. La presión repentina creada, fragmentara los materiales en vez de desplazarlos, y es aceptada como la que da a un explosivo una habilidad llamada “poder fragmentador”. La presión de detonación de un explosivo depende del grado de confinamiento en que éste se encuentre, por lo tanto es importante no dejar huecos vacíos en el barreno.

### **II.3.5 Gases.**

Cuando un explosivo es detonado, la mayoría de los productos resultantes son vapor o gases. Los principales elementos del total de vapores o gases son óxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrógeno sulfurado.

### **II.3.6 Las propiedades actuando sobre el macizo rocoso**

Ahora bien, después de comprender las propiedades de los explosivos, se procede a ver cómo es que, estas propiedades actúan en el macizo rocoso. Algunas actúan en un radio muy pequeño y otras se extienden a todo lo largo y ancho del macizo hasta disiparse por completo. Se presenta el desarrollo de los mecanismos de fracturación, ya que ésta es otra parte fundamental para poder entender el porqué de la constante en los malos resultados que se han estado obteniendo en las voladuras.

## **II.4 Mecanismos de fragmentación de la roca**

Estos mecanismos actúan y se hacen presentes al momento en que las cargas confinadas en los barrenos son detonadas. Liberan una gran cantidad de energía, las cuales se dividen principalmente en tres y que contribuyen a la fragmentación de la roca cuando las cargas están confinadas en los barrenos.

### **II.4.1 Onda de choque**

Después de que la reacción química ha comenzado, la primera propiedad es liberada, la cual es la onda de choque. Ésta provoca e inicia micro fracturas en las paredes del barreno, también provoca micro fracturas en las discontinuidades ya existentes en el bordo. Este pulso de presión transitorio se disipa rápidamente.

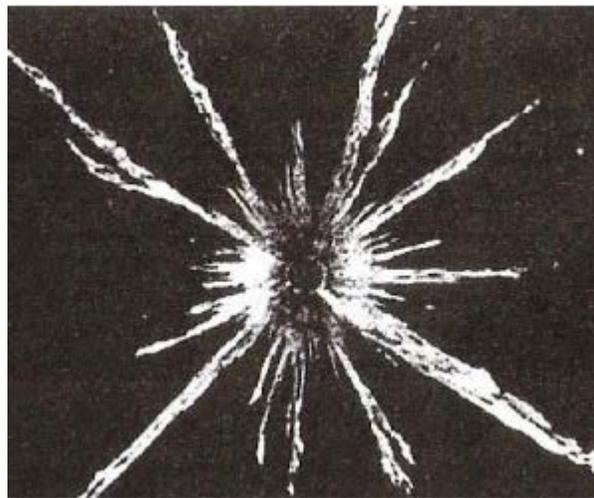
### **II.4.2 Presión de gas**

La presión de gas es muy importante ya que es la que va a producir el fracturamiento y desplazamiento dentro de un radio determinado, es de mucha importancia como lo mencionan los libros (Orica, 2015) y (J. Konya & Albarrán N., 2009).

Los dos mecanismos principales de fragmentación de la roca son el resultado de la presión de gas sostenida dentro del barreno. El explosivo sólido se transforma en gas durante el proceso de detonación, el barreno actúa de forma similar a un recipiente cilíndrico de presión. Las fallas en estos recipientes tales como tuberías de agua o líneas hidráulicas, ofrecen una analogía a este mecanismo de fragmentación de roca.

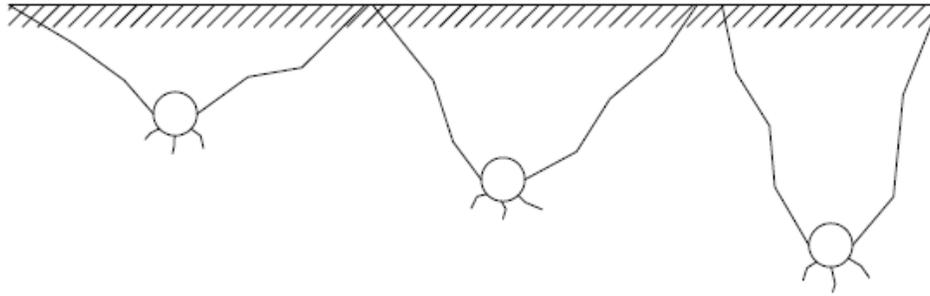
Cuando el recipiente se somete a una presión excesiva, la presión ejercida de forma perpendicular a las paredes del recipiente, provoca que se fracture en el punto más débil de éste. Si un barreno es considerado como un recipiente de presión, esperaríamos que las fracturas se orientaran paralelamente al eje del barreno.

Un barreno se sobre presuriza casi de forma instantánea y por lo tanto no falla en el punto más débil de la pared, en vez de ello, fallará simultáneamente en muchos puntos. Cada fractura resultante se orientará paralela al eje del barreno. Este fenómeno de falla comúnmente es llamado agrietamiento radial (Ilustración 6).



**Ilustración 14. Fragmentación radial**

La dirección y extensión del sistema de grietas radiales pueden ser controladas seleccionando la distancia adecuada del barreno a la cara (bordo). (Ilustración 7)



**Ilustración 15. Grietas radiales**

### **Alta presión.**

El siguiente mecanismo principal de fragmentación ocurre cuando el agrietamiento radial ha concluido. Éste afecta la fragmentación perpendicularmente al eje de la carga. La onda de esfuerzo (choque) ha causado fracturación menor o micro fracturas en las paredes del barreno y en las discontinuidades del bordo. La presión sostenida del gas que sigue a la presión de choque, somete a las paredes del barreno a una tensión debido a los esfuerzos radiales generados y provoca que las micro fracturas crezcan. La alta presión de los gases extiende las fracturas por todo el bordo.

Este bordo en roca sólida (masiva) se transforma de una masa sólida, en una que está rota en muchas piezas por las grietas radiales, con forma de cuña o rebanadas de pastel. Estas cuñas son de forma de columnas, soportando el peso del bordo. Las columnas se hacen más débiles si la proporción entre la longitud y el diámetro o la relación de esbeltez aumenta.

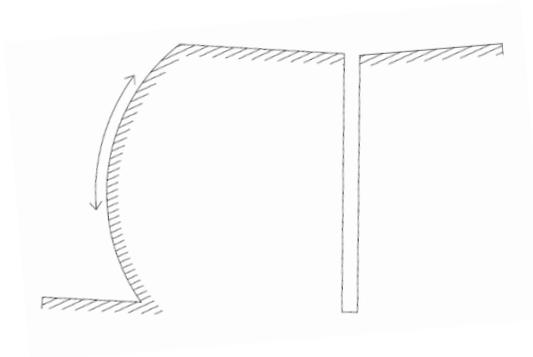
Por lo tanto, una vez que un bordo masivo se transforma en piezas tipo cuña, con una altura de banco fija, se debilita drásticamente debido a que la relación de esbeltez se ha incrementado. El proceso no se ha completado ya que el barreno que se expande contiene aún gases a muy altas presiones.

Estos gases someten a las cuñas a fuerzas que actúan perpendicularmente al eje del barreno. Se puede decir que estas fuerzas empujan hacia el punto de alivio o la línea de menor resistencia. Debe haber alivio disponible perpendicular al eje del

barreno para que las cargas contenidas en éste funcionen adecuadamente. Si no hay alivio, sólo se formarán grietas radiales y los barrenos harán cráteres o el taco saldrá disparado hacia arriba.

### II.4.3 Rigidez. Propiedad del banco

En la mayor parte de las operaciones, el primer movimiento visible ocurre cuando la cara se arquea hacia afuera cerca del centro, es decir, la porción central de la cara se está moviendo más rápido que la parte inferior o superior del bordo.



(Ilustración. 8)

#### Ilustración 16. Doblamiento asimétrico

Este tipo de arqueo o acción de doblaje no siempre ocurre. Se pueden dar casos donde en lugar de que el centro se arquee hacia afuera, es la parte inferior o superior del bordo la que se desplaza hacia afuera como se muestra en la Ilustración 9 a y b.

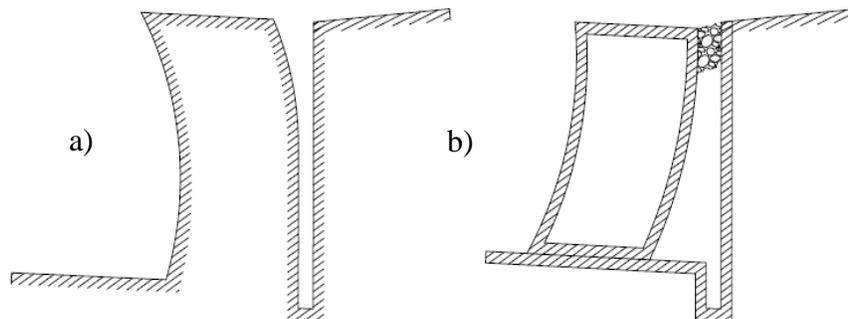


Ilustración 17 a y b. Doblamiento asimétrico

El factor de rigidez relaciona el espesor de una viga con su longitud. El efecto puede ser explicado usando un lápiz. Es relativamente fácil romper el lápiz con la fuerza ejercida con los dedos. Sin embargo si se ejerce la misma fuerza en un lápiz de 5 centímetros de longitud, resulta más difícil romperlo. El diámetro del lápiz no ha cambiado, lo único que cambió fue su longitud. Un fenómeno similar de rigidez ocurre en las voladuras. La roca del bordo es más difícil de romper por falla cortante cuando la altura del banco se aproxima a la longitud del bordo. Cuando la altura del banco es muchas veces la longitud del bordo, la roca del bordo se rompe con mayor facilidad.

#### **II.4.4 Proceso de fragmentación.**

Al detonar el explosivo, una onda de esfuerzo se mueve a través de la roca uniformemente en todas direcciones alrededor de la carga. Entonces las grietas radiales se propagan predominantemente hacia la cara libre. Después de que el proceso de las grietas radiales ha terminado, gases a altas presiones penetran por las grietas hasta aproximadamente  $2/3$  de la distancia entre el barreno y la cara libre a través de todo el sistema de grietas radiales.

Sólo después de que el gas ha tenido tiempo de penetrar en el sistema de grietas, los esfuerzos en la cara son de magnitud suficiente para causar que la cara se mueva hacia afuera. Antes de que la cara empiece a moverse y doblarse hacia afuera, se crean fracturas en la tercera dimensión como resultado de la falla por doblamiento.

## II.5 Radio de ruptura

El grado del daño y de fracturación alrededor de un barreno, puede ser analizado en cuatro zonas, como se muestra en la Ilustración 9 (Company, 1987).

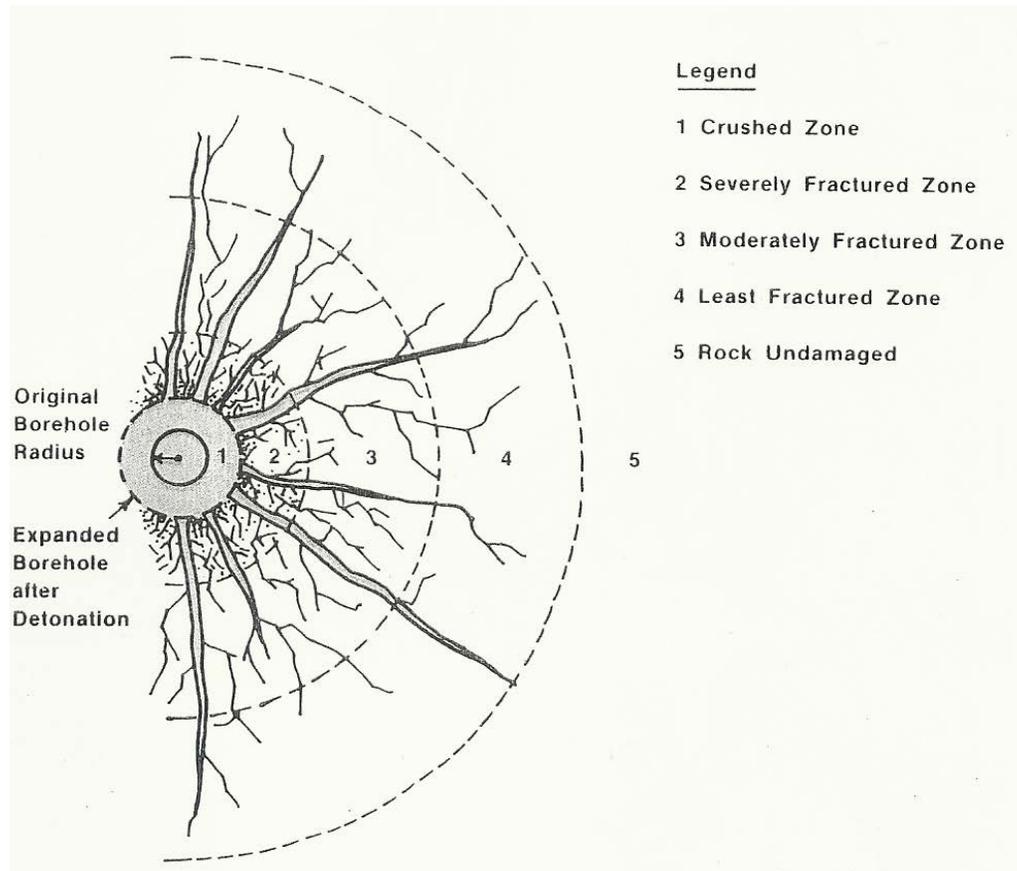


Ilustración 18. Zonas en el radio de ruptura

### II.5.1 Zona 1. Pulverizada.

Se encuentra exactamente alrededor del barreno, y es donde el explosivo libera e induce esfuerzos y presiones que exceden de 40 a 400 veces el rango de la fuerza de resistencia de compresión de la roca. Estas altas presiones actúan en contra de la pared del barreno por ende, triturará y pulverizará la masa rocosa circundante a la perforación, causando daño de manera muy severa. En esta zona, la rigidez elástica de la roca se vuelve insignificante.

### **II.5.2 Zona 2. Zona severamente fracturada.**

En esta zona, las fracturas presentan de una trituración alta o severa, a una donde solamente presenta una deformación parcial con fisuras. La extensión del agrietamiento ocurre a partir de una formada previamente por los componentes tangenciales de la onda de choque y/o por la infiltración de gas a presión.

### **II.5.3 Zonas 3 y 4**

La tensión de la onda de choque disminuye, y las fracturas disminuyen su extensión en un menor grado, debido a que la amplitud de la onda se va atenuando significativamente. Mucha de la energía original liberada en la detonación ha sido consumida en forma de calor y fricción en el fracturamiento de las zonas 1 y 2. La intensidad de la tensión de compresión es ahora mucho más pequeña que la fuerza de compresión de la roca, así que ya no ocurren fracturas ni agrietamientos. Sin embargo, aún la tensión tangencial de la onda, es lo suficientemente grande como la resistencia de la roca.

### **III. Análisis de las plantillas de barrenación y propuesta.**

#### **III.1 Explotación.**

Es de suma importancia, conocer todo el proceso, desde la perforación; la manera en que se vierte el explosivo; el cebado; la carga de fondo; la alineación de los barrenos; etc. Ya que la mala aplicación de cualquiera de estos procesos puede estar ocasionando, sin saberlo, resultados no deseados y que a la larga se han vuelto una constante.

##### **III.1.1 La Condesa.**

El minado se lleva a cabo mediante el método de *banqueo descendente*. Se accede con un camino principal y se abren bancos con la geometría establecida en el diseño. Se tiene proyectado hasta ahora dieciocho bancos de los cuales, actualmente se encuentran en el banco número siete.



**Ilustración 19. Cantera**

### Ciclo de operación.

El ciclo de operación representa el orden en los trabajos de explotación de cualquier operación minera.

Barrenación – cargado de barrenos – voladura – rezagado o acarreo.

### III.1.2 Proceso de barrenación.

La perforación debería ser de 12 [m] de longitud, sin embargo esto no se cumple a cabalidad; en ocasiones la perforación queda corta o más larga por medio metro o más. Esto es claramente un factor que afecta directamente al resultado de la voladura.



Ilustración 20. Perforación con Track Drill

Se cuenta con dos perforadoras neumáticas tipo *TrackDrill* de la marca *Ingersoll Rand* con martillo en el fondo (ilustración 16); cada una con su compresor independiente, barras de acoplamiento de 3 [m] de longitud y un diámetro de broca de perforación de 4.5 [pulg]. Con una velocidad de perforación de 20 [m/h], en condiciones estándares, es decir, esto ocurre cuando el macizo rocoso no presenta discontinuidades.

### III.1.3 Cargado.

Una vez que se ha perforado toda la plantilla de barrenación, se procede a “preparar” los barrenos. De un saco de ANFO de 25 [kg], se vierte un cuarto de su contenido total, esto para preparar una “cama” para el alto explosivo. Éste último es abierto por uno de sus costados superiores, y es por ahí donde es introducido el iniciador electrónico, como se muestra en la ilustración 15a y 15b.



Se realiza el cebado. Se deja caer con suavidad hasta el fondo del barreno. Ahora ya está lista la “carga de fondo”. Se vierte el resto del contenido del ANFO hasta llegar a la longitud medida deseada.



**Ilustración 21. Cargado de barrenos**

En caso de que exista presencia de agua o de cavernas el ANFO es colocado en una bolsa plástica de forma cilíndrica, y es llenado de igual manera. El diámetro de

la bolsa plástica es aproximadamente de dos tercios del diámetro total del barreno (ilustración 15d), por lo tanto la cantidad de explosivo se reduce en un tercio para dicho barreno.

## **Explosivos**

Los explosivos proporcionan energías de las cuales algunas no ayudan y hay que saber controlarlas. Por otra parte están las energías que se les debe aprovechar al máximo posible. Aquí se muestran dichas energías:

- I. Energía de Choque.- Es la primer energía liberada en la reacción química y son las que crean las micro fracturas radiales.
- II. Energía de Gas.- Libera una fuerza de compresión y luego de tensión y ésta es la que fragmenta la roca.
- III. Vibración.- Es debida a la energía liberada y esta se transmite a través del macizo rocoso. Causa conflictos cuando se está cercano a una zona habitada.
- IV. Sonora.- Considerado como ruido y debe ser controlado, más si se encuentra cerca de una zona habitada.

### **III.1.4 Detonación**

Una vez cargados todos los barrenos, se realiza la conexión de los detonadores a la línea troncal o principal. La teoría marca que debe existir un tiempo mínimo entre barrenos de 8 [ms]. En la práctica, se dejan tiempos de 9 [ms]. Los datos y observaciones de campo, dejan en evidencia que algo está mal, lo más probable es que los tiempos son muy cortos ya que se tienen resultados no deseados. Los detonadores electrónicos *elevan el precio*, sin embargo, la posibilidad de que alguno no detone, es cercana a cero, es decir es seguro en un 99.99 %. Antes de hacer la detonación la *blast box* detecta todas las anomalías con respecto a las conexiones de los iniciadores. Así pues, se asegura una voladura más controlada.



**Ilustración 22. Voladura en progreso**

El 70 % del resultado de una voladura depende de la barrenación y un 30 % de los explosivos.

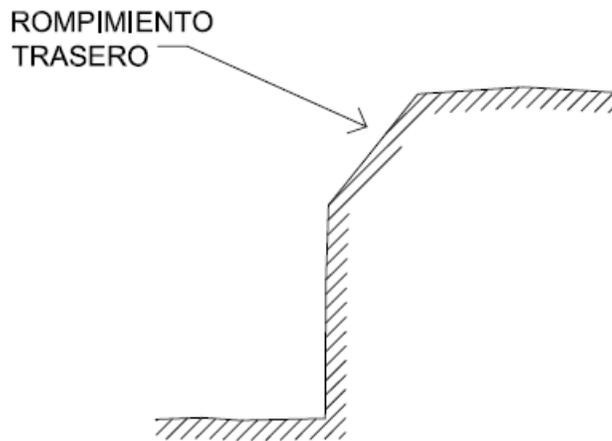
**Tabla 4. Tolerancia de los detonadores**

Tolerancia (error) en los detonadores.	
Pirotécnicos	+ / - 10 %
Electrónicos	+ / - 0.001 %

### III.1.5 Sobre rompimiento trasero.

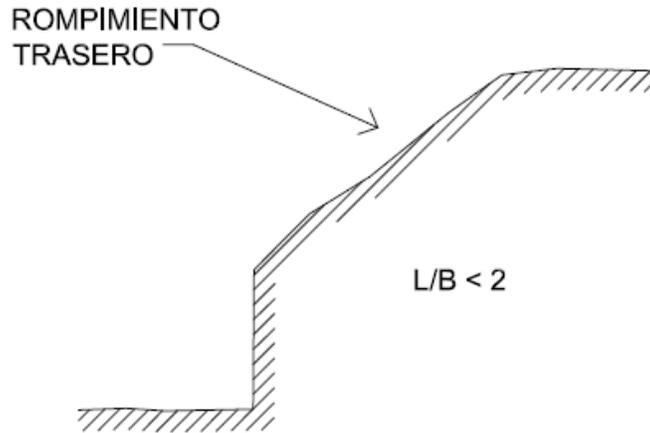
En ocasiones se presenta un fenómeno conocido como “sobre rompimiento trasero”, pero esto se puede deber a varias causas. Para ello es preciso apoyarse del libro de Konya (J. Konya & Albarrán N., 2009).

Puede deberse a un bordo excesivo para los barrenos, lo que causa que el explosivo rompa y agriete en forma radial más allá de la última fila de barrenos (Ilustración 17).



**Ilustración 23. Sobre-rompimiento trasero, debido a un bordo excesivo**

Los bancos que tienen una rigidez excesiva, es decir, con un  $(L/B) < 2$ , provocarán más levantamiento y sobre-rompimiento cerca de la boca del barreno (Ilustración 18). Los tacos largos en bancos rígidos, también promueven el sobre-rompimiento trasero.



**Ilustración 24. Sobre rompimiento trasero debido a la rigidez excesiva**

El retardo de tiempo inadecuado de fila a fila puede provocar sobre-rompimiento trasero si este tiempo es demasiado corto, lo que resulta en un confinamiento excesivo en las últimas filas de la voladura.

Si los barrenos son cortos, con factores  $L/B$  bajos, debido a un bordo excesivo, la solución al problema será el cambiar a barrenos de diámetro menor, reduciendo con esto el bordo e incrementando el factor de rigidez. Aunque este procedimiento no puede aplicarse de manera regular a todas las operaciones. Por lo tanto se deben utilizar otras técnicas para cortar limpiamente los barrenos en la parte superior. (J. Konya & Albarrán N., 2009)

Una vez que el material es fragmentado, el piso nuevo queda endeble, entonces es aquí donde la pericia del operador del cargador frontal es extremadamente crítica, porque pueden ocurrir dos cosas, o bien puede excavar más allá del nuevo piso y dejar una oquedad o sin saberlo puede existir una “pata” y dañar el cucharón del cargador, dejando fuera de servicio la maquinaria y cortando así todo el ciclo de operación. Algunas máquinas ejercen un empuje considerable y pueden, por lo tanto, excavar más allá del límite de la voladura dañando severamente el contorno final.

### **III.1.6 Observaciones en campo.**

Al momento de detonar existe “roca en vuelo” y en ocasiones esta proyección de roca es hacia la parte trasera. Las causas pueden ser dos factores principalmente. Primero: el taco está corto o no se respeta conforme a lo planeado; dos: el tiempo de detonación entre barrenos están cortos y esto genera que la roca aún no se desplace, cuando el siguiente barreno ya detonó, creando un confinamiento, entonces, al no encontrar cara libre sale proyectado hacia la parte superior trasera. Estos son algunos de los problemas que se pretende resolver al analizar la plantilla de barrenación.

### **III.2 Plantilla de barrenación.**

Para poder aprovechar al máximo y con mayor eficiencia la energía liberada por los explosivos, es necesario tener una distribución geométrica de barrenos correcta, es decir, donde el área de no influencia sea la mínima. El análisis que se presenta estudia, desarrolla y propone una modificación al arreglo geométrico; se comparan y estudian ambos casos: el que se utiliza actualmente y uno propuesto.

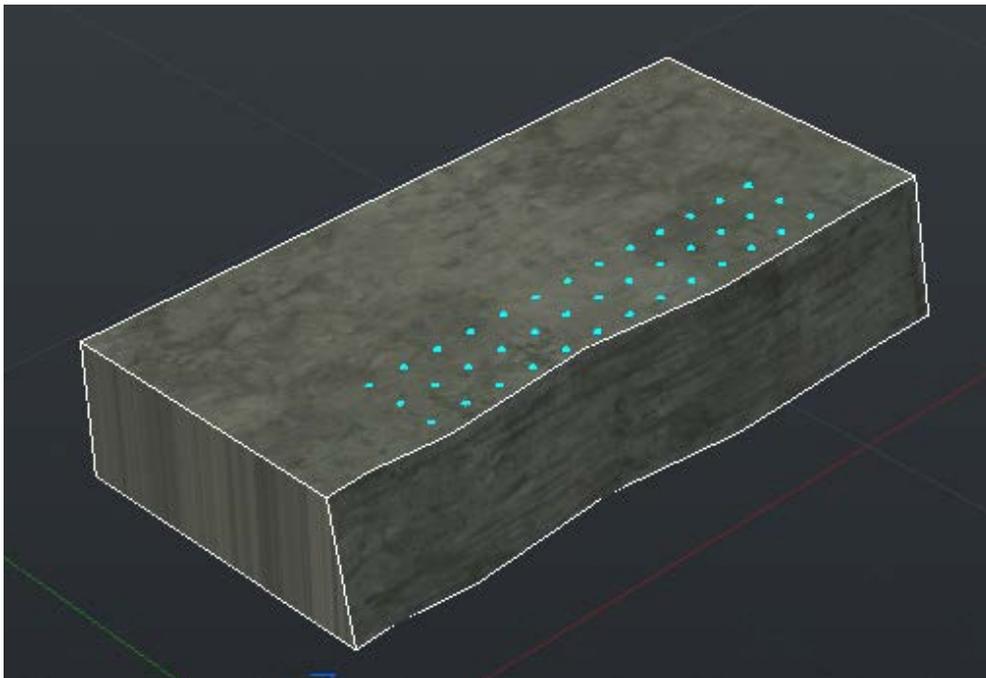
### **III.3 Análisis de los arreglos geométricos**

Para una gran parte del desarrollo, búsqueda y propuesta de la solución, se utiliza el *software* de dibujo asistido por computadora *AutoCAD*. He aquí el procedimiento:

- Se dibuja y presenta un modelo en tres dimensiones de un banco de explotación, -uno por cada arreglo geométrico a analizar- en el cual se observe los elementos que componen el proceso antes de la voladura.
- De dicho modelo, se saca el esquema para la plantilla de barrenación cuadrada de tres por tres metros (actualmente utilizada) y otra en arreglo triangular que es la propuesta.

- La plantilla de barrenación, consta de treinta y nueve barrenos distribuidos en un arreglo cuadrado de tres por tres metros con treinta y un barrenos para el arreglo triangular.
- Se muestra y señalan los componentes como: longitud de barrenación, sub-barrenación, carga de columna, taco y área de influencia de cada uno de los barrenos que debe ser llevado a cabo de forma puntual.
- Un punto medular en este trabajo es el estudio del área de influencia y de NO influencia que existe entre los barrenos, ya que se demostrara que dicha área puede ser reducida, al igual que el número de barrenos.
- El análisis del punto anterior se aplica a los dos casos de plantillas (cuadrado y triangular propuesto).
- Se realiza el análisis financiero y se comparan ambos resultados.

Modelo del banco de explotación a estudiar.



**Ilustración 25. Modelo del banco de explotación**

### III.3.1 Arreglo geométrico cuadrado

Analizando el arreglo que actualmente es utilizado, se describe el área de influencia y de no influencia que tiene cada uno de los barrenos, es decir, el área que cubre cada barreno para poder fragmentar el macizo rocoso.

Si se sabe que la plantilla está definida con un bordo y espaciamiento igual a 3 [m], entonces se toma la siguiente deducción: el área que va a fragmentar cada barreno tiene un diámetro igual a tres metros. Entonces el área de influencia de cada barreno queda delimitado por las líneas amarillas como se muestra en la ilustración 23.

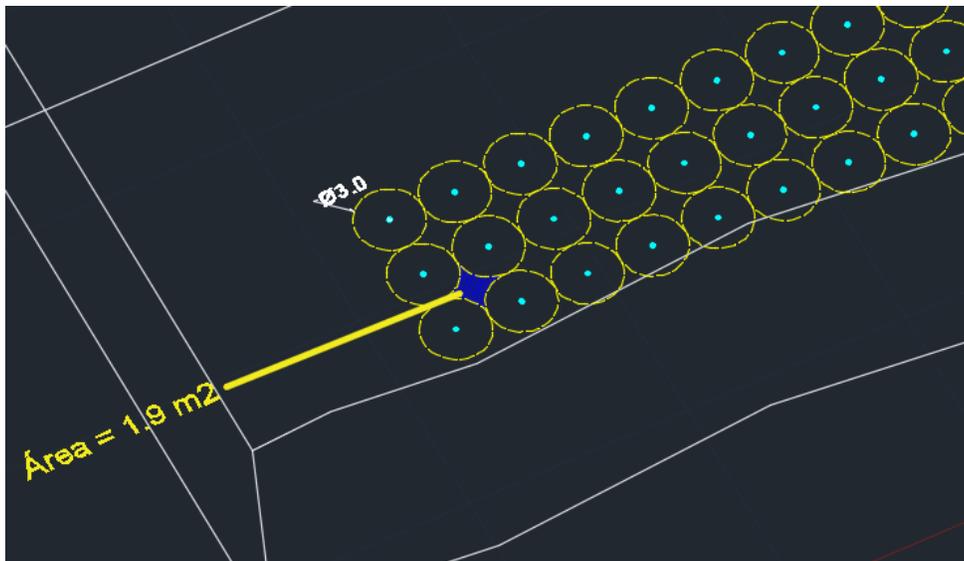


Ilustración 26. Arreglo geométrico de 3 x 3 [m]

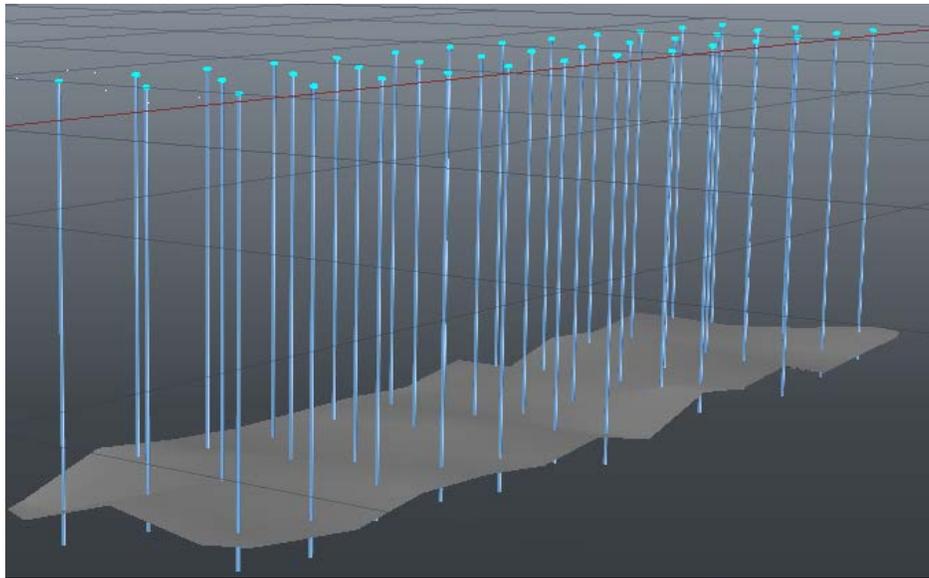
Utilizando las herramientas del software, se obtiene el valor del área de no influencia (ilustración 23), y es igual a:

$$1.9 \text{ [m}^2\text{]}$$



**Ilustración 27. Roca de sobre tamaño resultante de la voladura**

Superficie esperada



**Ilustración 28. Superficie esperada**

### III.3.2 Arreglo geométrico propuesto

Un método conocido y que se aplica en campo nos dice que para un diámetro de perforación conocido (en pulgadas), será el valor *aproximado* del borde en metros. Por lo tanto, la plantilla que utiliza el personal de la cantera debería ser cercana a un borde de 4 [m], sin embargo está más cerrada para el diámetro de perforación que se utiliza.

Proponiendo la modificación del arreglo geométrico, se procede a realizar la toma de datos en campo. El procedimiento consistió en marcar una línea recta perpendicular a la última línea de barrenos, a una distancia de 3 [m] graduando dicha línea cada 25 [cm], con el objetivo de conocer hasta dónde abarca el área de influencia de los barrenos de la última fila. El procedimiento se llevó a cabo en tres detonaciones en una semana. Los valores obtenidos fluctúan entre 1.7 [m] y 2 [m]. Se obtiene el promedio, de dicha distancia, para comodidad se ajustó a 1.75 [m] que es igual al radio de influencia de cada barreno. Por lo tanto el nuevo diámetro propuesto será de 3.5 metros, como se muestra en la Ilustración 26

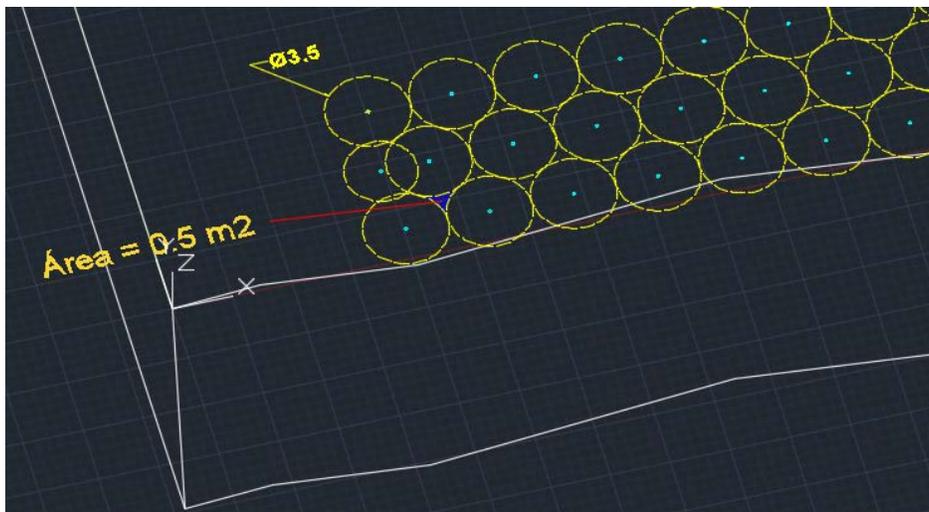
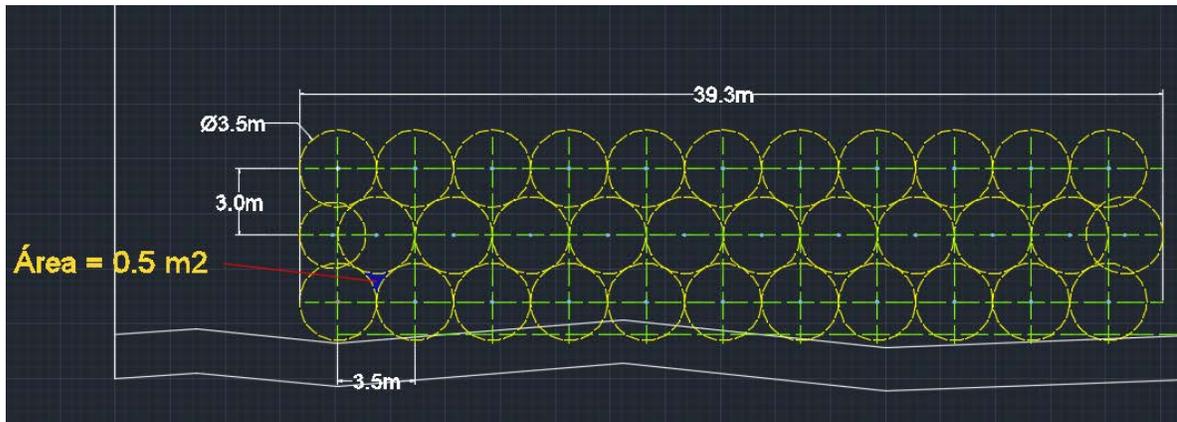


Ilustración 29. Plantilla triangular

El diámetro de cobertura efectiva, comprobado con el análisis de áreas y que incluso puede ser mayor, para cada barreno, es de 3.5 [m], el ajuste del nuevo arreglo geométrico se realiza con base en éste. La circunferencia de cobertura dibujada en color amarillo, se hace coincidir de manera que se toquen entre sí en un solo punto cada uno de estas circunferencias.



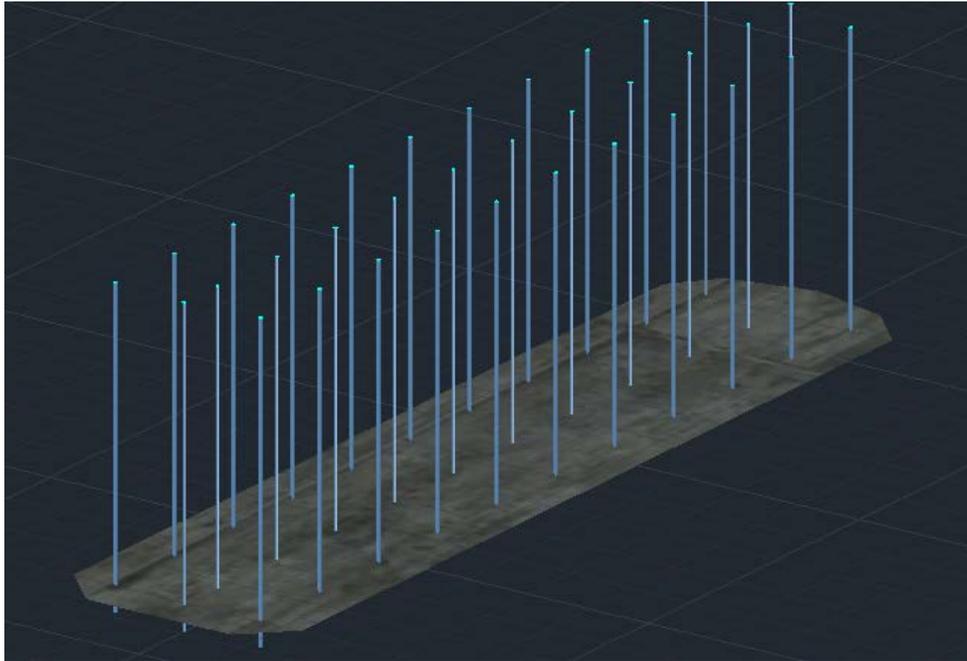
**Ilustración 30. Nueva configuración**

De esta manera queda configurado el nuevo arreglo geométrico de 3 [m] por 3.5 [m] (ilustración 23). Nuevamente, se obtiene el área de no influencia resultando ser igual a 0.5 [m<sup>2</sup>] como se muestra en la Ilustración 27.

Al comparar ambas áreas de influencia teóricamente:

$$A2 = 0.5 \text{ [m}^2\text{]} < A1 = 1.9 \text{ [m}^2\text{]}$$

Superficie esperada



**Ilustración 31. Superficie plano**

Así pues, queda demostrado que se reduce en más de un 50 %, eliminando así la posibilidad de que resulten rocas de sobre-tamaño, tales que representen una dificultad a la hora del acarreo, o al alimentador de la trituradora primaria.

### **III.3.3 Arreglo geométrico cuadrado segundo caso.**

Con éste estudio práctico realizado, se puede aplicar el mismo diámetro de influencia para todos los barrenos de la plantilla de barrenación actualmente utilizada (ilustración 28), sin embargo el número de barrenos sigue siendo el mismo, el área de *no influencia* es muy cercana a la del arreglo triangular, propuesto y el costo por tonelada sigue siendo el mismo, como se demuestra más adelante.

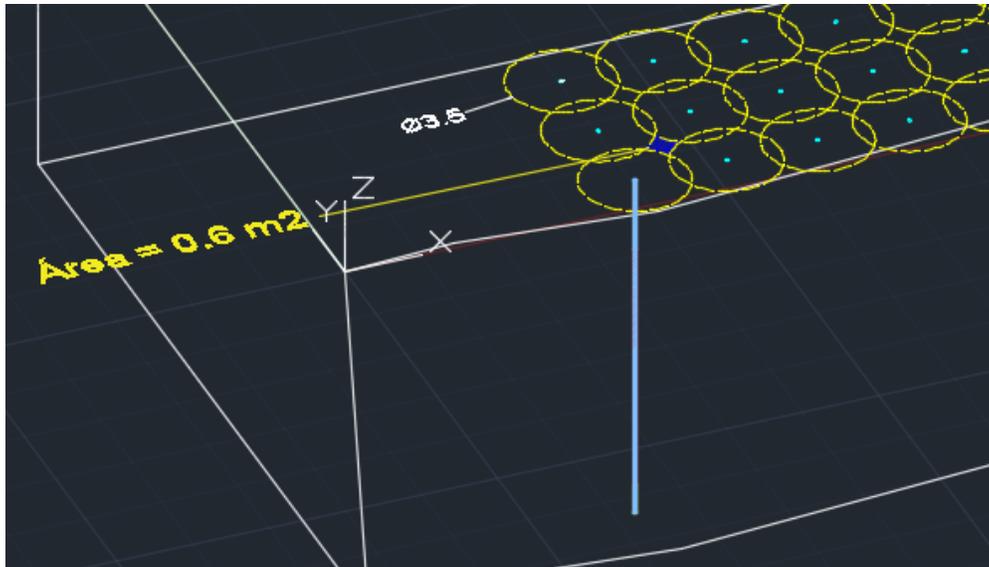


Ilustración 32. Arreglo geométrico de 3 x 3 [m]

### III.4 Control de roca en vuelo.

En varias ocasiones se presenta lo que se conoce como roca en vuelo, ésta se origina en la cara del banco y en la parte superior del mismo. Es el resultado del escopeteo de los barrenos. Este escopeteo es *normalmente* causado por un tiempo de retardo inadecuado o bien por un taco insuficiente y/o muy corto, el cual permite que la carga de explosivo suba demasiado dentro del barreno.

#### III.4.1 Tiempo de retardo

Para el control de la roca en vuelo una solución práctica es incrementar el tiempo de retardo entre filas, esto puede y debería solucionar el problema. De acuerdo con las entrevistas realizadas y la bibliografía utilizada, para una roca caliza de una calidad regular, el tiempo mínimo de retardo que debía existir entre barreno y barreno, es de 8 [ms]. En la práctica se les está asignando 9 [ms] como tiempo mínimo de retardo. Esto está generando un confinamiento entre los barrenos de las últimas filas, es decir, aún la roca no se desplaza cuando ya la última fila detonó, por lo tanto la única salida que encuentra es la parte superior.

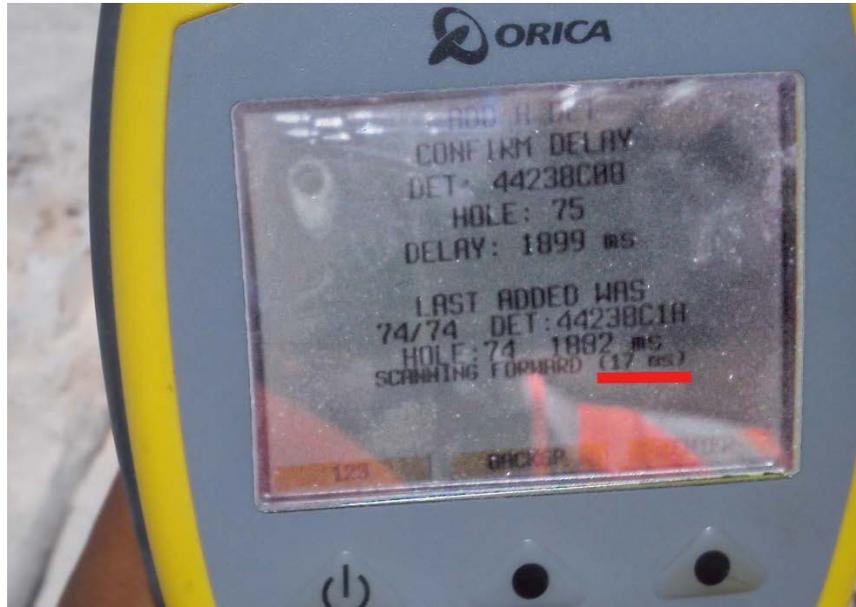


Ilustración 33. Asignando tiempos de 17 ms

#### III.4.2 Taco adecuado

Una de las causas por la cual se tiene proyección de roca hacia la parte superior del banco, es debido a barrenos sobrecargados o a tacos insuficientes, principalmente. Es muy común que se utilice como taco el detrito de la barrenación; este producto es muy fino y provoca que la columna de explosivo quede más confinado. Un taco bien definido, con gravilla de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, puede controlar la proyección de roca generada por estas causas.

#### III.4.3 Cama de tierra

Otra opción es, utilizar una cama de tierra\* que actúe como *tapete* en la voladura, para restringir la roca en vuelo potencial. \* (J. Konya & Albarrán N., 2009)

### **III.5 Introducción al análisis.**

Se calculan de manera teórica el taco, la distancia de la sub-barrenación, el factor de carga, la cantidad de agente explosivo por barreno y la cantidad total de explosivo a utilizar. Se analizan y comparan los datos obtenidos con los que se manejan actualmente en la cantera “La Condesa”.

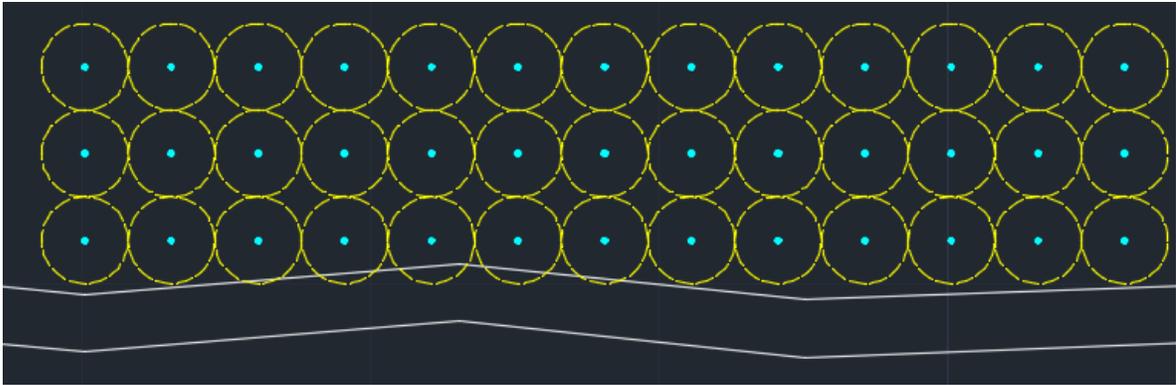
### **III.6 Análisis financiero.**

#### **III.6.1 Análisis de la plantilla de barrenación actualmente utilizada.**

Como se mostró en capítulos anteriores, se utiliza un arreglo cuadrado con un bordo de tres metros y un espaciamiento de tres metros; como se muestra en los datos obtenidos en campo:

**Tabla 5. Datos obtenidos en campo para la plantilla de barrenación**

Bordo	3 [m]
Espaciamiento	3 [m]
Diámetro de broca	4.5[pul]
Altura de banco	12 [m]
Densidad de roca	2.6 [g/cc]
Taco (promedio)	2.5 [m]
Sub-barrenación	1 [m]
Factor de Carga	3.2 sacos de ANFO por barreno



**Ilustración 34. Arreglo cuadrado**

Se usan 3.2 sacos de agente explosivo ANFO con una densidad de 0.85 [g/cc] por barrenos cargados. Utilizando la plantilla del modelo realizado, que contiene trece barrenos por fila, por tres filas, se tiene un total de treinta y nueve barrenos. Por lo tanto se pueden realizar los siguientes cálculos:

**Tabla 6. Total de artificios y explosivo**

39 barrenos en total	1040 [Kg] por línea x 3 líneas = 3120 Kg ANFO
Toneladas totales *	10951.2 [Ton]
Detonadores <i>uni tronic</i>	39 piezas
<i>MagnafracTM</i>	39 piezas
Rollo de cable	1 rollo

\*Ton total = (bordo) x (espaciamiento) x (altura) x (densidad) x (# de barrenos)

### III.6.1.1 Precios unitarios de los productos utilizados.

De acuerdo a la siguiente tabla de precios: *Septiembre 2014.*

**Tabla 7. Precios unitarios de artificios**

PRODUCTO	PRECIO UNITARIO (MN)
ANFO BULTO DE 25 KG	\$ 391.50
ALTO EXPLOSIVO CAJA CON 26 PZAS.	\$ 1,377.74
DETONADOR <i>UNITRONIC</i> CAJA CON 66 PZAS.	\$ 270.96
ROLLO DE ALAMBRE DE 400 [M]	\$ 1,928.00

### III.6.1.2 Costo por tonelada de la plantilla cuadrada.

Se obtienen los resultados siguientes. Costo por tonelada.

**Tabla 8. Costo por tonelada en plantilla cuadrada**

TONELADAS TOTALES	10951.2 [TON]
COSTO VOLADURA	
ANFO 125 SACOS	\$ 48, 937.50
ALTO EXPLOSIVO 2 CAJAS	\$ 2,755.48
INICIADORES 1 CAJA	\$ 270.96
ROLLO DE ALAMBRE	\$ 1,928.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 53, 891.94</b>
<b>COSTO POR TONELADA</b>	<b>\$ 4.92</b>

Ilustración de una plantilla marcada y lista para comenzar la perforación.



**Ilustración 35. Plantilla marcada en campo**

### III.6.2 Análisis de la plantilla de barrenación propuesta.

Con la plantilla de barrenación ya definida (3 x 3.5 [m]) Se procede a calcular los parámetros de la voladura. Para realizar el análisis se calculará: la sub-

barrenación, el taco, el factor de carga, carga de columna, cantidad de sacos de agente explosivo (ANFO). Finalmente se comparan ambas plantillas de barrenación.

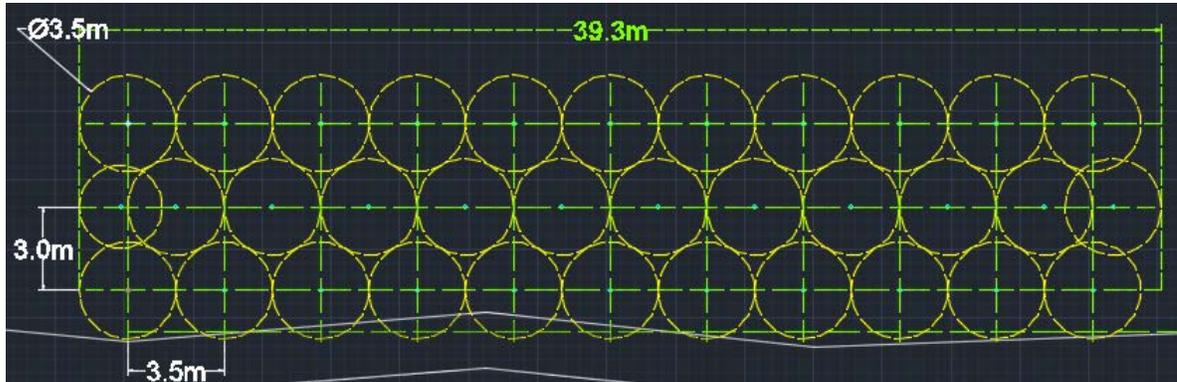


Ilustración 36. Arreglo propuesto

### III.6.2.1 Cálculos y formulas.

Se calculan los parámetros siguientes:

**Taco (T).** Puede estar en un rango de entre 0.8 a 1 veces el bordo, es decir:

$$T = (0.8 - 1) \times (\text{bordo})$$

**Sub-barrenación (J).** Este valor se calcula a partir del bordo y está entre un quinto y la mitad del valor numérico del bordo:

$$J = (0.2 - 0.5) \times (\text{bordo})$$

**Factor de Carga (F.C.)** Expresado en kilogramos por tonelada

$$FC = \frac{(LB - T) * (DC) + (CF)}{(B) * (E) * (h) * (\rho)}$$

LB = Longitud de barreno

T = Taco

DC = Densidad de Carga

CF = Carga de Fondo (en Kg)

B =bordo  
 E = Espaciamiento  
 h = Altura de banco  
 ρ = Densidad de la roca

Entonces, para el factor de carga tenemos:

- Diámetro de barrenación – 4 ½ [pulg]
- Densidad del ANFO - 0.85 [g/cc]

De la siguiente tabla de *densidades de carga*, se obtiene la densidad en kilogramos por metro lineal, que es la que se necesita para el cálculo del factor de carga. Para una densidad del agente explosivo igual a 0.85 g/cc y un diámetro de barrenación de 4 ½ pulgadas, el valor es igual:

**8.72 [kg/m]**

**Tabla 9. Densidad del explosivo por metro lineal**

		DENSIDADES DE CARGA						
		DENSIDADES (KGS/MTL)						
		0.60	0.80	0.85	1.00	1.10	1.15	1.20
D	1.00	0.30	0.41	0.43	0.51	0.56	0.58	0.61
	1.25	0.48	0.63	0.67	0.79	0.87	0.91	0.95
A	1.50	0.68	0.91	0.97	1.14	1.25	1.31	1.37
	1.75	0.93	1.24	1.32	1.55	1.71	1.78	1.86
M	2.00	1.22	1.62	1.72	2.03	2.23	2.33	2.43
	2.25	1.54	2.05	2.18	2.57	2.82	2.95	3.08
E	2.50	1.90	2.53	2.69	3.17	3.48	3.64	3.80
	2.75	2.30	3.07	3.26	3.83	4.22	4.41	4.60
R	3.00	2.74	3.65	3.88	4.56	5.02	5.25	5.47
	3.50	3.73	4.97	5.28	6.21	6.83	7.14	7.45
O	4.00	4.87	6.49	6.89	8.11	8.92	9.33	9.73
	4.50	6.16	8.21	8.72	10.26	11.29	11.80	12.32
N	5.00	7.60	10.14	10.77	12.67	13.94	14.57	15.20
	5.50	9.20	12.26	13.03	15.33	16.86	17.63	18.40
P	6.00	10.95	14.60	15.51	18.24	20.07	20.98	21.89
	6.50	12.85	17.13	18.20	21.41	23.55	24.62	25.69
U	7.00	14.90	19.87	21.11	24.83	27.32	28.56	29.80
	7.13	15.46	20.61	21.90	25.76	28.34	29.63	30.92
A	7.88	18.88	25.18	26.75	31.47	34.62	36.19	37.76
	8.00	19.48	25.95	27.57	32.44	35.68	37.30	38.92
D	8.50	21.97	29.29	31.12	36.62	40.28	42.11	43.94
	9.00	24.63	32.84	34.89	41.05	45.16	47.21	49.26

**Carga de agente explosivo por barreno (Cb)**

$$Cb = [(LB - T)*(DC)] - 1$$

### Número de sacos

$$NS = \frac{(FC) * (Toneladas\ totales)}{25}$$

Las expresiones matemáticas anteriores, se introducen a una hoja de cálculo obteniéndose la siguiente tabla:

**Tabla 10. Tabla de resultados**

Espaciamiento	3.5	[m]		
Bordo	3	[m]		
Prof. del barreno	12	[m]	Producción Total =	546.000 [Ton/h]
Φ	4.5	[pulg]		<b>11138.4</b> [Ton]
ρ	2.6	[Ton/m3]	Volumen por barreno =	327.6 [Ton]
Velocidad de perforación	20	[m/h]	Taco con gravilla	
			Min	2.4 [m]
			Max	3 [m]
			Promedio	2.7 [m]
Total de barrenos	34		Sub-barrenación	1 [m]
Densidad del ANFO	0.85	[g/cc]	Carga por barreno	80.1 [kg/barreno]
			F.C.	<b>0.251</b> [Kg/Ton]
			Número de sacos	108.93

### III.6.2.2 Costo por tonelada en la plantilla propuesta

Utilizando la tabla 7 de precios unitarios.

**Tabla 11. Costo por tonelada en plantilla triangular**

Toneladas totales	11138.4 [Ton]
<b>COSTO VOLADURA</b>	
ANFO 109 sacos	\$ 42,673.50
Alto explosivo 2 cajas	\$ 2,755.48
Iniciadores 1 caja	\$ 270.96
Rollo de alambre	\$ 1,928.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 47,627.94</b>
<b>Costo por tonelada</b>	<b>\$ 4.28</b>

### III.6.3 Comparación.

Como resultado se muestra una comparación costo-beneficio entre ambas plantillas de barrenación. Se puede ver la diferencia en el costo por tonelada.

**Tabla 12. Tablas comparativas**

TONELADAS TOTALES	10951.2 [TON]
COSTO VOLADURA	
ANFO 125 SACOS	\$ 48, 937.50
ALTO EXPLOSIVO 2 CAJAS	\$ 2,755.48
INICIADORES 1 CAJA	\$ 270.96
ROLLO DE ALAMBRE	\$ 1,928.00
TOTAL	\$ 53, 891.94
<b>COSTO POR TONELADA</b>	<b>\$ 4.92</b>

Toneladas totales	11138.4 [Ton]
COSTO VOLADURA	
ANFO 125 sacos	\$ 42,673.50
Alto explosivo 2 cajas	\$ 2,755.48
Iniciadores 1 caja	\$ 270.96
Rollo de alambre	\$ 1,928.00
TOTAL	\$ 47,627.94
<b>COSTO POR TONELADA</b>	<b>\$ 4.28</b>

## IV. Conclusiones y recomendaciones

Mediante el uso y desarrollo de cálculos matemáticos con base en la teoría y conocimientos adquiridos en la licenciatura, se concluye que el nuevo diseño de la plantilla de barrenación así como todos los factores que intervienen de igual manera tales como el bordo, espaciamiento, taco y factor de carga, entre otros, puede efectuar cambios significativos, para mejorar la actual explotación que se lleva a cabo en ésta cantera.

Incluso el efecto de estos cambios se podría ver reflejado en los costos de producción por tonelada como se demostró en las tablas de costo por tonelada producida. Que si bien son en el orden de centavos, multiplicados por miles de toneladas por año se ve con muchísima más claridad reflejada esta diferencia.

Para cambiar de un método de explotación que adolece de buenos resultados, a uno más efectivo y productivo se debe realizar los siguientes puntos:

- I. Trabajar con el nuevo modelo de barrenación, con base en el arreglo triangular con las especificaciones mencionadas en el presente trabajo.
- II. El trazado de la plantilla de barrenación en campo, deberá ser marcado por el departamento de topografía, con el objetivo de eliminar barrenos mal posicionados, disminuyendo la posibilidad de tener un área de no influencia entre barrenos, la cual es un factor para la aparición de la roca de dimensiones excesivas. Permitirá tener una mejor precisión en las medidas del bordo y espaciamiento.
- III. La profundidad de cada uno de los barrenos que conformen la plantilla, deberá ser la misma para todos. Con esto se pretende homogeneizar la altura de los bancos, pero principalmente la eliminación de los pisos irregulares así como las “patas” en la base del talud resultante. El objetivo principal es lograr un piso más uniforme.

- IV. Se vio que el tiempo de detonación entre barrenos (9 [ms]) es muy corto, por lo tanto, se recomienda alargar este intervalo, comenzando por duplicarlo (~18 [ms]) y de ahí ir modificando según sea el resultado. Con esta medida se espera eliminar uno de los factores que da origen a la “roca en vuelo”. Con este paso se asignará un correcto tiempo para que la roca alcance a ser desplazada entre cada una de las líneas a detonar.
- V. El cargado de los barrenos debe cumplirse a lo establecido en el presente trabajo, eliminando de esta manera otro factor que propicia la “roca en vuelo”, y es que debe evitarse el sobre cargado de los barrenos y un taco reducido, pues esto solamente provocaría un escopeteo hacia arriba.
- VI. Para reducir el daño a la cara del nuevo talud resultante, se debe tener en cuenta que los factores que están en juego son: cuidar el correcto alineamiento de la fila de barrenos, su espaciamiento y el correcto tiempo entre filas asignado. Se podría utilizar barrenos de pre-corte, pero éstos aumentarían los costos. Será necesario realizar primero las pruebas modificando los tiempos entre filas como indica el punto IV.

Siguiendo estos puntos en conjunto con la experiencia del personal, es altamente probable que el problema se reduzca en un porcentaje mayor al cincuenta. Es importante hacer mención que hay otro factor muy importante en juego y que no podemos cambiar; dicho factor es la geología. Si la geología es similar conforme va avanzando la explotación, será correcto seguir utilizando el modelo propuesto. Si las condiciones cambian se tendrá que ir modificando las variables, pues hay que recordar que hay que adaptarnos al yacimiento y no tratar de adaptar el yacimiento a nosotros.

“No esperes resultados diferentes si siempre haces lo mismo”

*Albert Einstein.*



## Bibliografía

- Atlas de México S.A. de C.V. (1988). *Uso de explosivos en México*. Mexico: Depto. Técnico de Atlas de México.
- Company, A. P. (1987). *Explosives and rock blasting*. Dallas Texas U.S.A.: Atlas Company.
- Flores, D. C. (Agosto de 2014). Gerente Corporativo de Yacimientos y Materias Primas. (A. Sánchez, Entrevistador)
- Hernández, G. G. (Agosto de 2014). Jefatura de explotación, Cruz Azul. (A. Sánchez, Entrevistador)
- J. Konya, C., & Albarrán N., E. (2009). *Diseño de voladuras*. México: Impresos Santiago S.A. de C.V.
- Jacobo, J. C. (Agosto de 2014). Jefatura del departamento de Geología, Cruz Azul. (A. Sánchez, Entrevistador)
- Langefors, U., & Kihlstrom, B. (1976). *Técnica moderna de voladura de rocas*. España: URMO S. A. de Ediciones.
- López Aburto, V. M. (2013). *Diseño de operaciones mineras a cielo abierto*. Mexico Universidad Nacional Autónoma de México.: Facultad de Ingeniería.
- Orica, E. (2015). *Orica Mining Services*. Obtenido de [http://www.diexa.cl/page/product/Explosivos\\_Encartuchados%28dinamitas\\_y\\_Emulsiones%29/Senatel\\_MAGNAFRAC.pdf](http://www.diexa.cl/page/product/Explosivos_Encartuchados%28dinamitas_y_Emulsiones%29/Senatel_MAGNAFRAC.pdf)
- SGM, C. y. (Diciembre de 2007). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de <http://www.sgm.gob.mx/>