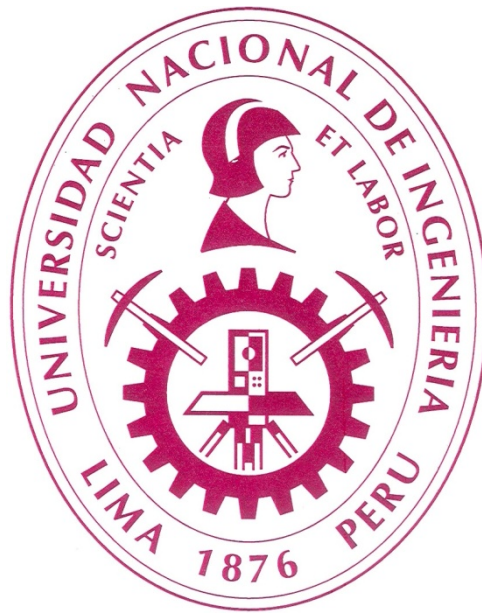


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y
METALÚRGICA**



METODO DE VOLADURA TENSIONAL UTILIZANDO CAMARAS DE AIRE

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

**PRESENTADO POR:
JUAN CARLOS ROJAS CUBA**

**Lima – Perú
2010**

AGRADECIMIENTO

Agradezco a nuestro Padre, por haber tenido la Paciencia y el Amor de esperar a que yo decidiera despertar.

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional de Ingeniería y a todos quienes la conforman, desde catedráticos, trabajadores y compañeros de estudio, porque todos han contribuido al profesional y ser humano que soy.

Mi profundo agradecimiento a cada una de las personas y amigos con los que he compartido mi vida profesional y personal, porque de ellos continúo aprendiendo y convirtiéndome en una persona de mayor servicio hacia nuestra sociedad, comunidad y país.

DEDICATORIA

En memoria de Teresita mi mamá, que me colmo de paz y amor hasta el último día de su vida.

A Hubert mi papá, que con pocas palabras, pero con mucho ejemplo y paciencia, me guía aún hacia la felicidad interior.

A mis hermanos Jesús, Ana y Elba por compartir sus alegrías y tristezas conmigo.

A mi compañera de toda la vida Jessica mi esposa, que me regala hoy sus mejores años y me enseña a amar.

Y a mis niñas: Daniela, Gabriela, Rafaella, Ghimela y Mikaela, porque en ellas encuentro la fuerza para ser feliz y por iluminar cada uno de mis amaneceres.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla la explicación teórico práctica del uso de las cámaras de aire en los taladros de voladura, partiendo de experiencias ya realizadas anteriormente en otras partes del mundo, validándolas en nuestro entorno más cercano y generalizándolas para todo uso en el proceso de voladura.

Principalmente persigue demostrar que es factible continuar optimizando la transmisión de energía del explosivo al macizo rocoso, para ello se propondrá un modelo matemático que nos ayude a cuantificar el fenómeno.

Se reformularan los conceptos de teoría de cráter y el de la sobre perforación como parámetro de diseño de la voladura. Así mismo, demostraremos que su utilización puede inclusive mejorar la fragmentación.

Los beneficios económicos, de seguridad y operativos que la aplicación de esta técnica brindara al proceso de la voladura y por extensión a la operación de minado en general, se pueden resumir en: disminución de la sobre perforación hasta en un 100%, reducción de la columna explosiva entre un 16 a 25%, debido a

esto se produce una reducción del factor de carga, lo cual generara proporcionalmente los siguientes beneficios: contracción de la eyección de tacos, reducción de “*Fly Rock*”, disminución onda aérea y atenuación de las vibraciones en el terreno hasta en un 33%. Además se mejora la fragmentación hasta en un 25%, inclusive haciéndola más homogénea. El sistema se ha logrado utilizar en rocas desde 80 MPa hasta 230 MPa, manteniendo la misma malla, secuencia de salida y tipos de explosivo.

Todo lo antes mencionado nos anuncia que su aplicación está lejos de quedar circunscrita a las actúales aplicaciones y quedara aun mucho por continuar investigando, el presente trabajo busca motivar futuras investigaciones que nos ayuden a encontrar nuevos modelos matemáticos que nos permitan entender mejor el proceso que ocurre al interior de las cámaras de aire.

INDICE GENERAL

INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
HIPOTESIS DE FUNCIONAMIENTO	6
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE CARGAS	6
1.2 PRIMERA ETAPA: MOVIMIENTO INICIAL DESPUÉS DE LA DETONACIÓN	7
1.3 SEGUNDA ETAPA: PROCESO DE EQUILIBRIO.....	8
1.4 TERCERA ETAPA: TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA AL MEDIO ...	10
1.5 CUARTA ETAPA: REFLEXIÓN DE LAS ONDAS DE CHOQUE	11
1.6 QUINTA ETAPA: INTERACCIÓN DE TALADROS CON CÁMARA DE AIRE EN EL FONDO	12
1.7 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL FENÓMENO	14
CAPITULO II	
FUNDAMENTO TEORICO	19
2.1 PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA AL MACIZO ROCOSO	19
2.1.1 Proceso de fracturamiento	19
2.1.2 Descripción del proceso.....	21
2.1.3 Teoría de Cráter	22
2.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	27
2.4 RESULTADOS GENERADOS POR USO DE LAS CÁMARAS DE AIRE.....	28

2.5	REFERENCIAS HISTÓRICAS DE SU APLICACIÓN.....	29
2.5.1	Aplicación de la cámara de aire inferior en minas a cielo abierto.....	30
2.5.2	Aplicación de cámaras de aire en minería subterránea.....	36
CAPITULO III		
	ANÁLISIS DE SU APLICACIÓN PRÁCTICA	40
3.1	ANÁLISIS DE LA LÍNEA BASE DEL PROCESO ACTUAL DE LA VOLADURA.....	40
3.1.1	Identificación de parámetros y variables de diseño previos	41
3.2	POSIBILIDADES DE USO	43
3.2.1	Ubicación dentro del diseño de Carga	43
3.2.2	Dimensionamiento optimo de la cámara	43
3.3	RESTRICCIONES DE USO	45
3.3.1	Por condiciones restrictivas del macizo rocoso	46
3.3.2	Por condiciones operativas	46
3.4	TIPOS DE ACCESORIOS PARA CREAR CÁMARAS DE AIRE.....	47
3.4.1	Tipo Bolsas auto-inflables	47
3.4.2	Tipo globos inflables	48
3.4.3	Tipo tapones plásticos.....	48
3.4.4	Tipo espaciadores de madera.....	48
3.5	METODOLOGÍA APLICADA.....	49
3.5.1	Pruebas piloto	49
3.5.2	Pruebas a escala industrial	56
3.5.3	Resultados obtenidos de las pruebas.....	60
CAPITULO IV		
	ANÁLISIS DE LOS BENEFICIOS ECONOMICOS	72
4.1	BENEFICIOS QUE SE OBTIENEN DIRECTAMENTE.....	72
4.2	ESCALAMIENTO ECONÓMICO DE LOS RESULTADOS.....	74
	CONCLUSIONES.....	77
	RECOMENDACIONES.....	82
	GLOSARIO	84
	BIBLIOGRAFIA	85

APENDICE A	88
RESULTADOS DE FRAGMENTACIÓN, RENDIMIENTO DE PALA Y NIVEL FINAL DEL PISO, DE PRUEBAS EN ESCONDIDA.....	88
APENDICE B	89
ANÁLISIS RESULTADOS DE USO CÁMARAS DE AIRE EN MINA ESCONDIDA - CHILE....	89
APENDICE C	90
MODELO DE HOJA LEVANTAMIENTO INFORMACIÓN (ANVERSO).....	90
MODELO DE HOJA LEVANTAMIENTO INFORMACIÓN (REVERSO)	91
APENDICE D	92
HOJA TIPO DE ESPECIFICACIONES BÁSICA DE DISEÑO DE CARGA	92
APENDICE E	93
EJEMPLOS DE TIPOS DE TAPONES PARA CREAR CÁMARAS DE AIRE	93
APENDICE F.....	94
PROCEDIMIENTO PARA INSTALAR ACCESORIO DEL TIPO TAPÓN PLÁSTICO CON CUERDA	94
APENDICE G	98
PROCEDIMIENTO PARA INSTALAR ACCESORIO DEL TIPO TAPÓN PLÁSTICO CON VÁSTAGO	98
APENDICE H.....	101
CUADRO RESUMEN DE PRUEBAS REALIZADAS CON EL ACCESORIO TAPÓN PLÁSTICO	101
CUADRO RESUMEN DE COSTOS Y AHORROS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS CON EL ACCESORIO TAPÓN PLÁSTICO	102
APENDICE I.....	103
RESULTADOS OBTENIDOS EN AVANCES (TÚNELES)	103
APENDICE J	105
RESULTADOS OBTENIDOS EN PRODUCCIÓN	105

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1-1. Diagrama de carga Tradicional vs. Cámara de Aire	7
Figura 1-2. Primera Etapa: Movimiento Inicial Después de la Detonación	8
Figura 1-3. Segunda Etapa - Proceso de Equilibrio	9
Figura 1-4. Tercera Etapa: Transmisión de la Energía al Medio	10
Figura 1-5. Cuarta Etapa: Reflexión de las Ondas de Choque.....	11
Figura 1-6. Quinta Etapa: Interacción de Taladros con Cámara de Aire al Fondo.....	12
Figura 1-7. Interacción de Taladros con columna explosiva en la sobre perforación	13
Figura 1.8. Incremento de la presión.....	15
Figura 1.9. Detonaciones prematuras en el tubo de choque.....	16
Figura 1-10. Energía Cinética al fondo del taladro	17
Figura 1-11 Energía Cinética generada por el uso de cámaras de aire	18
Figura 2-1. Oscilograma de desplazamiento de frente de ondas de choque cuando se detona una carga continúa.	20
Figura 2-2. Fractura de Roca por Explosivos	21
Figura 2-3. Geometría voladura de cráter	22
Figura 2-4. Importancia de la profundidad escalar	24
Figura 2-5. Zonas de pobre o nula fragmentación.	25
Figura 2-6. Volumen cámaras de aire	26
Figura 2-7. Arreglos de cámaras de aire	27
Figura 2-8. Oscilograma de velocidad del frente de choque cuando se usan cámaras de aire	28
Figura 2-10. Mina Carbón en Kentucky.	31
Figura 2-9. Esquema explotación casting.	31
Figura 2-11. Voladura Tradicional en Casting.....	32
Figura 2-12. Secuencia inicial de voladura	33
Figura 2-13. Esquema con perforación secundaria	34
Figura 2-14. Secuencia de voladura con cámaras de aire	34

Figura 3-1. Perfil de Fracturas y Tensión, como resultado de diferentes Geometrías de Cargas	43
Figura 3-2. Efecto de la configuración de la cámara de aire sobre la fragmentación en bloques de concreto	45
Figura 3-3. Esquema de carguío con columna completa y sobre perforación.	51
Figura 3-5. Dos cargas de explosivo separado por columna de aire intermedio de 3 pies y una columna de aire en el fondo de 3 pies sin sobre perforación.	52
Figure 3-4. Columna completa de explosivo con una cámara de aire de 0.91 metros en el fondo del taladro y sin sobre perforación.	52
Figura 3-6. Ejemplo de una instrumentación completa en 6 1/4 pulgadas de diámetro de taladro interceptado por un taladro de 3 pulgadas con cable.	53
Figura 3-7. Vista en planta del disparo completo y tiempos de secuencia acumulados.....	55
Figura 3-8. Ejemplo de una instrumentación completa en escala normal, listo para el disparo.	56
Figura 3-9. Grafico de desplazamiento versus tiempo.....	61
Figura 3-10. Velocidad de partícula versus distancia escalar para dos disparos completos.	65
Figura 3-11. Forma de la pila para ambos disparos completos.....	66
Figura 3-12. Registro de cotas de piso	71
Figura 3-13. Productividad de palas.....	71
Figura 4-1. Proyección de ahorros netos en un año	74
Figura 4.2 Proyección de ahorros incluyendo ahora un metro de perforación	75
Figura 4-3. Rango de ahorros proyectados con los resultados de las pruebas realizadas a escala industrial.	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Resultados voladura en producción mina subterránea.....	39
Tabla 3-1. Datos generales operaciones mineras donde se realizaron las pruebas con cámaras de aire	57
Tabla 3-2. Resumen de las pruebas realizadas en cada operación minera.....	57
Tabla 3-3. Resultados de la Fragmentación para Disparo Normal y con cámara de aire.....	62

INTRODUCCION

La voladura de rocas constituye una de las operaciones unitarias críticas dentro del ciclo de minado, por lo tanto cualquier mejora que se realice en su proceso significará una mejora en las actividades siguientes del ciclo de minado.

Conscientes que desde que se crearon las mezclas de compuestos químicos para producir explosivos y convertir su contenido energético en fuerzas mecánicas que logren fragmentar el medio rocoso, estas han venido siendo optimizadas y por lo tanto reduciendo la energía efectiva que es transmitida al medio, lo que se propone ahora es demostrar la efectividad de utilizar cámaras de aire dentro de los taladros de voladura, dando como resultado lo que hemos dado por llamar Voladura Tensional. La utilización planificada de esta técnica redundará en beneficios económicos, técnicos y finalmente optimizara la utilización de la energía entregada por el explosivo.

Tradicionalmente el método por el cual se fragmenta la roca es lograr que las mezclas explosivas liberen grandes cantidades de gases, los mismos que

originarán que las rocas sean fracturadas principalmente por fuerzas de compresión, es más cuando deseamos establecer el grado de dificultad que determinadas características físicas del macizo rocoso van a representar para las etapas de perforación y voladura, se suele recurrir al concepto de “resistencia a la compresión de la roca”, sin embargo poco o nada se presta a la característica de resistencia a la tracción de la roca, la cual para este estudio representara el nuevo parámetro que nos permitirá optimizar el uso de la energía generada por los explosivos y transmitida al medio.

Las aplicaciones de cámaras de aire tienen ya una larga historia de uso. La referencia más antigua respecto de su uso en taladros de producción data del año 1893 por trabajos de Knox (Knox, 1893), según como lo reportan Liu y Katsabanis (1996). En el pasado, Melnikov y Marchenko (1971), Fourny (1981), Chiappetta y Memmele (1987), Bussey y Borg (1988), Rowlands (1988), Mead (1993) y Moxon (1993) condujeron sendos experimentos de campo y estudios modelo utilizando cargas explosivas con cámaras de aire y confirmaron las ventajas de esta técnica respecto de los métodos tradicionales de voladura. La voladura con cámaras de aire ha sido empleada en una variedad de aplicaciones, tales como: pre-corte, control de vibraciones y proyección de rocas, reducción de finos y optimización de los resultados económicos de las voladuras alrededor del mundo.

Los principales objetivos que persigue la presente investigación son los que se mencionan a continuación:

- Demostrar que es factible continuar optimizando la transmisión de energía del explosivo al medio (macizo rocoso).
- Establecer un modelo matemático que defina el fenómeno.
- Replantear el concepto de teoría de cráter y por ende el de la sobre perforación como parámetro de diseño de la voladura.
- Demostrar que su utilización puede inclusive mejorar la fragmentación.
- Cuantificar los beneficios económicos, de seguridad y operativos que la aplicación de esta técnica brindara al proceso de la voladura y por extensión a la operación de minado en general.

El empleo de la técnica de voladura tensional, tiene como alcance todas las aplicaciones en que sea necesaria la voladura de rocas –sea ésta a cielo abierto o subterránea y aplicada en minería y/o construcción–, en la que se utilicen explosivos –los mismos que pueden ser a granel o encartuchados–.

El principal atenuante para su aplicación permanente radica en las restricciones operativas al momento de implementar su uso en las operaciones de voladura, las mismas que van desde el armado ideal de los taladros, lo práctico o complicado que puede ser la instalación del dispositivo elegido para crear la cámara de aire, o las características geomecánicas del macizo rocoso a fragmentar.

El mecanismo que gobierna la voladura que produce la fragmentación por medio de las cámaras de aire no es completamente entendido y su uso no siempre mejora los resultados en todos los tipos de roca. Todas las posibles áreas

potenciales para la aplicación de la voladura tensional en los taladros de producción, tanto en minería superficial como subterránea están aún por determinarse.

Para ello partimos del concepto de que la energía entregada al medio rocoso por el proceso de la voladura puede mejorarse, en términos de eficiencia y eficacia, es decir que puede producir mejores resultados tanto técnicos como económicos.

Seguidamente se planteara que utilizando espacios vacios dentro de los taladros de voladura –cámaras de aire–, es factible optimizar la transmisión de la energía creada por la detonación de los explosivos, hacia el medio rocoso; lo cual es absolutamente viable, además de crear mejores condiciones de seguridad en las voladuras y estaremos en el camino de seguir reduciendo las cantidades de explosivos para fragmentar al macizo rocoso.

Por todo ello, podemos afirmar que nuestra investigación tendrá principalmente un enfoque cuantitativo ya que recurrirá a la recolección de datos de campo, los mismos que se han obtenido de pruebas piloto realizadas por investigadores, previo a esta investigación y complementada por pruebas de campo a escala industrial en las cuales tomó parte activa el autor.

Las razones de implementar este método de voladura tensional con cámaras de aire ha sido en el inicio obtener mejores resultados económicos en cuanto a eficacia del proceso en sí, sin embargo, a medida que su uso se ha hecho más extendido ahora se busca que paralelamente su aplicación signifique una redefinición de los parámetros de diseño de una voladura en cuanto se refiere a la

longitud efectiva de los taladros de perforación y la cantidad de explosivos que vamos a cargar en ellos.

Una razón fundamental en su aplicación, es también el poder trasladar su uso intensivo a la minería subterránea, en la cual su aplicación se justifica mas por el hecho de producir menos daño al macizo rocoso y por ende a toda la estructura que significa una mina, sin descuidar que su correcta utilización nos ayudara a mejorar las condiciones de seguridad.

CAPITULO I

HIPOTESIS DE FUNCIONAMIENTO

La hipótesis que se postula a continuación describirá dos procesos en paralelo, el de la aplicación tradicional a columna completa de carga explosiva dentro de un taladro de voladura, versus la aplicación de una cámara de aire en el fondo del taladro, esto se hace con fines didácticos, para que se capte con claridad el principio de funcionamiento del método.

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE CARGAS

A continuación presentamos un esquema (Figura 1-1) de los diagramas de carga para las condiciones previamente establecidas, donde:

H = Altura de banco

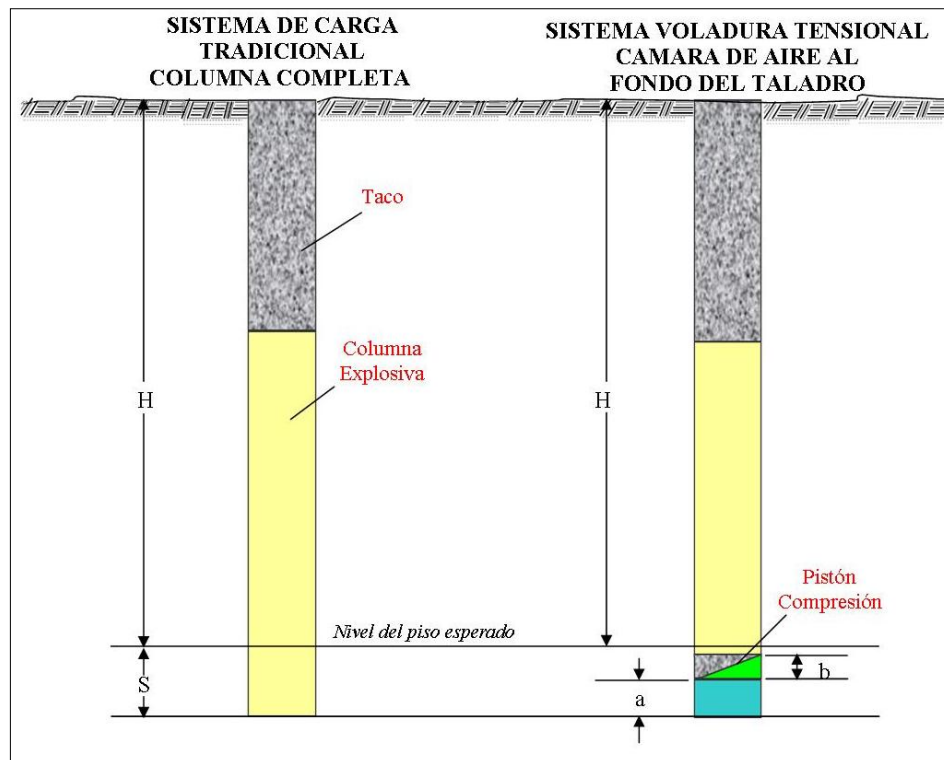
S = Sobre perforación

a = Longitud de la cámara de aire

b = Longitud de accesorio mas masa de detritus

La longitud b que corresponde al dispositivo que creará la cámara de aire, incluye una pequeña masa de detritus de la perforación, la que varía de acuerdo al diámetro del taladro, a este conjunto accesorio – masa detritus, lo llamaremos “pistón de compresión”, más adelante se describirán las distintas alternativas de que se disponen en la actualidad respecto de dichos dispositivos, para crear la cámara de aire.

Figura 1-1. Diagrama de carga Tradicional vs. Cámara de Aire

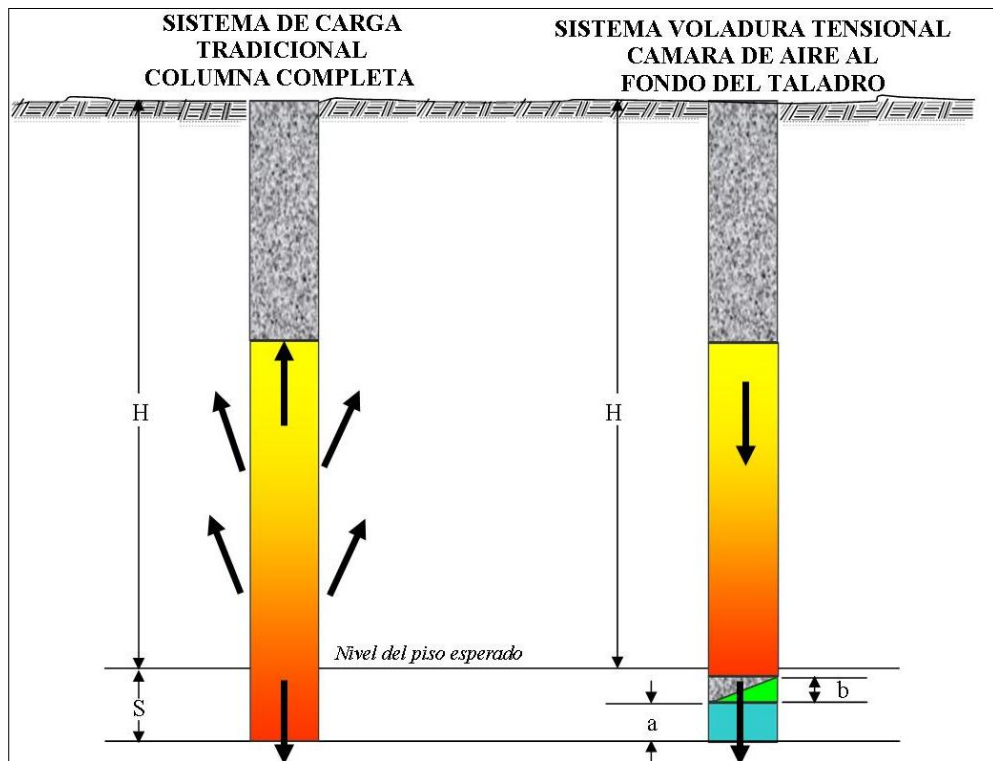


1.2 PRIMERA ETAPA: MOVIMIENTO INICIAL DESPUÉS DE LA DETONACIÓN

Cuando se inicia el proceso de la detonación, se genera una alta temperatura la que a su vez inicia el desplazamiento de una onda de choque y simultáneamente se comienzan a generar grandes volúmenes de gases; en el caso del taladro

cargado a columna completa, dicho fenómeno generara esfuerzos de compresión sobre el macizo rocoso inmediato; sin embargo en el caso del taladro con cámara de aire, el mismo fenómeno de altas temperaturas y presiones tomara en cambio el camino de menor resistencia, ósea el que le permite la cámara de aire (Peterson 2002, Chiappetta 2004), que para la explicación de la presente investigación se ha colocado en el fondo del taladro. En la siguiente figura se puede apreciar un esquema de esta etapa.

Figura 1-2. Primera Etapa: Movimiento Inicial Después de la Detonación



1.3 SEGUNDA ETAPA: PROCESO DE EQUILIBRIO

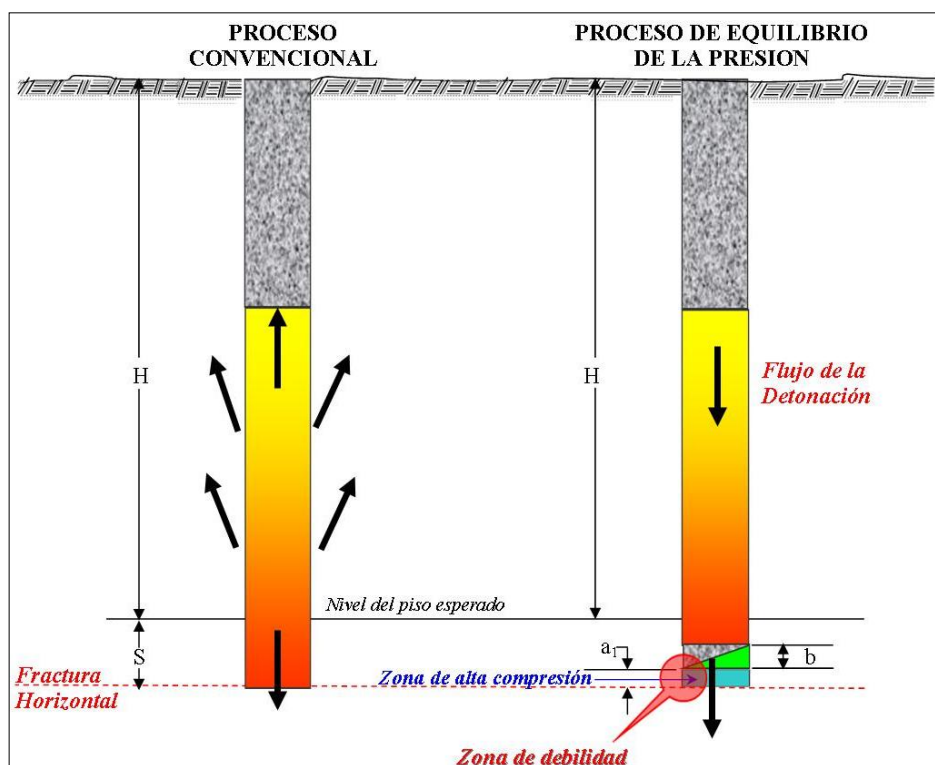
La cámara de aire obliga a equalizar la presión, es decir en la zona donde no hay explosivo la presión se incrementara rápidamente hasta equilibrarse con la presión que se está generando producto de la detonación del explosivo.

Esto debido a que por ofrecer una menor resistencia, el flujo de la detonación es en primera instancia hacia el fondo del taladro perforado.

Nuestro llamado pistón de compresión, encabeza la onda de detonación hacia el fondo del taladro, originando que la longitud de la cámara de aire se reduzca rápidamente “ a_1 ” produciendo así una zona de alta compresión, esto ocasionara que una multitud de ondas de compresión vayan llegando al fondo del taladro.

Estas fuerzas al no encontrar un lugar por donde escapar buscaran que hacerlo en la intersección que conforman el plano del fondo del taladro y el de la pared del taladro, lo que consecuentemente originara una zona de debilidad y la que finalmente creará una fractura que se expandirá en forma horizontal hacia los taladros vecinos, tal como podemos apreciar en la Figura 1-3.

Figura 1-3. Segunda Etapa - Proceso de Equilibrio



1.4 TERCERA ETAPA: TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA AL MEDIO

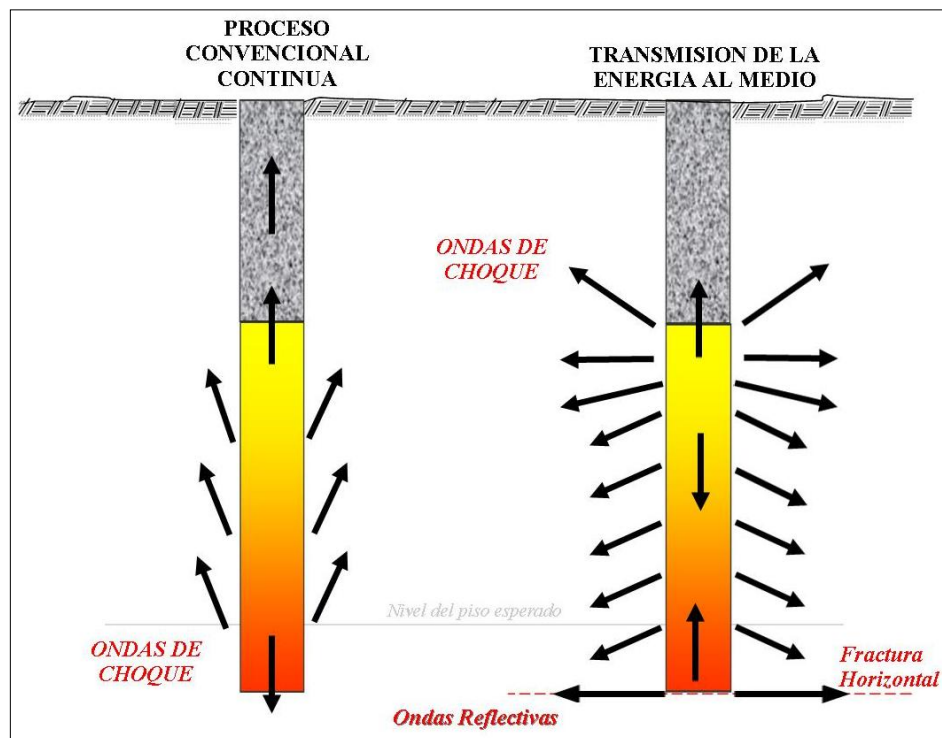
Producto de la fractura horizontal en el fondo de la voladura (fondo de cada una de los taladros) se generan multitud de ondas reflectivas, las mismas que chocan con las ondas de choque provenientes de la detonación.

Es así, que esta multitud de ondas de choque secundarias son propagadas al medio en forma de pulsos (Melnikov 1971).

Debido a las ondas reflectivas ascendentes, el flujo de detonación es desviado hacia el costado y fondo del medio colindante (Figura 1-4).

Simultáneamente, ondas de choque se propagan por la fractura horizontal formada con anterioridad en el fondo del taladro, creando una especie de pre-corte que se forma y extiende por la interacción con los taladros colindantes.

Figura 1-4. Tercera Etapa: Transmisión de la Energía al Medio

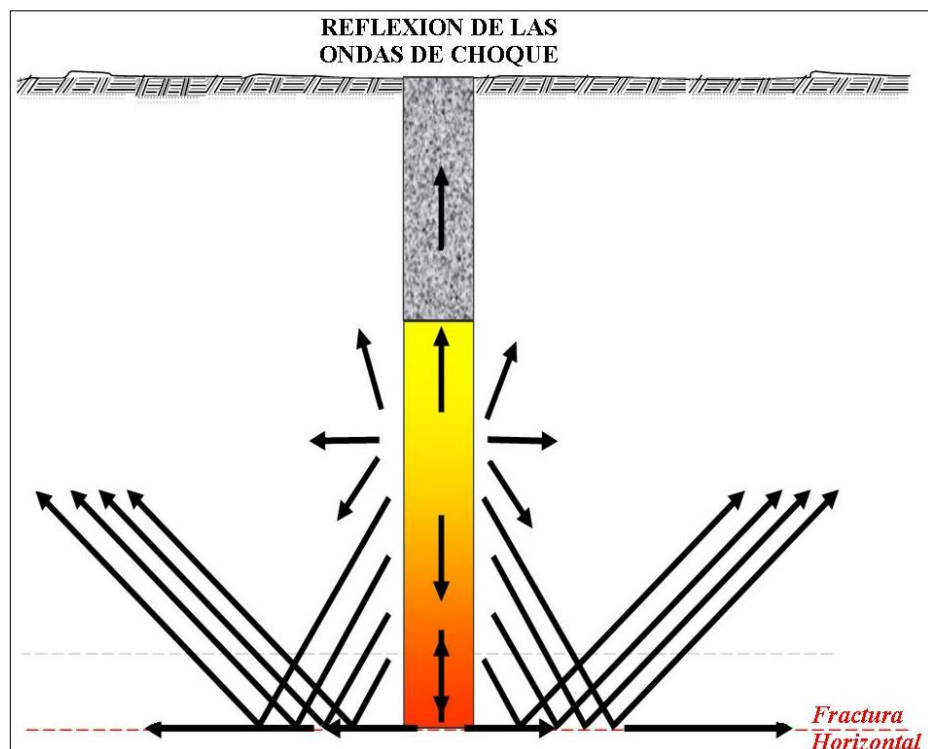


1.5 CUARTA ETAPA: REFLEXIÓN DE LAS ONDAS DE CHOQUE

Para este momento, habiendo avanzado el proceso de la detonación y observando que los gases de la detonación ya han hecho desaparecer la cámara de aire, se afirma que las ondas de choque ahora son reflejadas al atravesar el cambio de medio, formado por la fractura horizontal al fondo de la voladura. Estas ondas de choque son reflejadas en forma ondas de corte y de compresión de mayor intensidad que las que las originaron, y se desplazan en forma de olas de choque.

Siempre debemos de tener presente que las ondas de tensión ofrecen más cantidad de daño a la roca. Por lo tanto, no olvidar que para fracturar la roca con un mínimo de esfuerzo y energía, el material debe cargarse principalmente con tensión (Persson 1994).

Figura 1-5. Cuarta Etapa: Reflexión de las Ondas de Choque

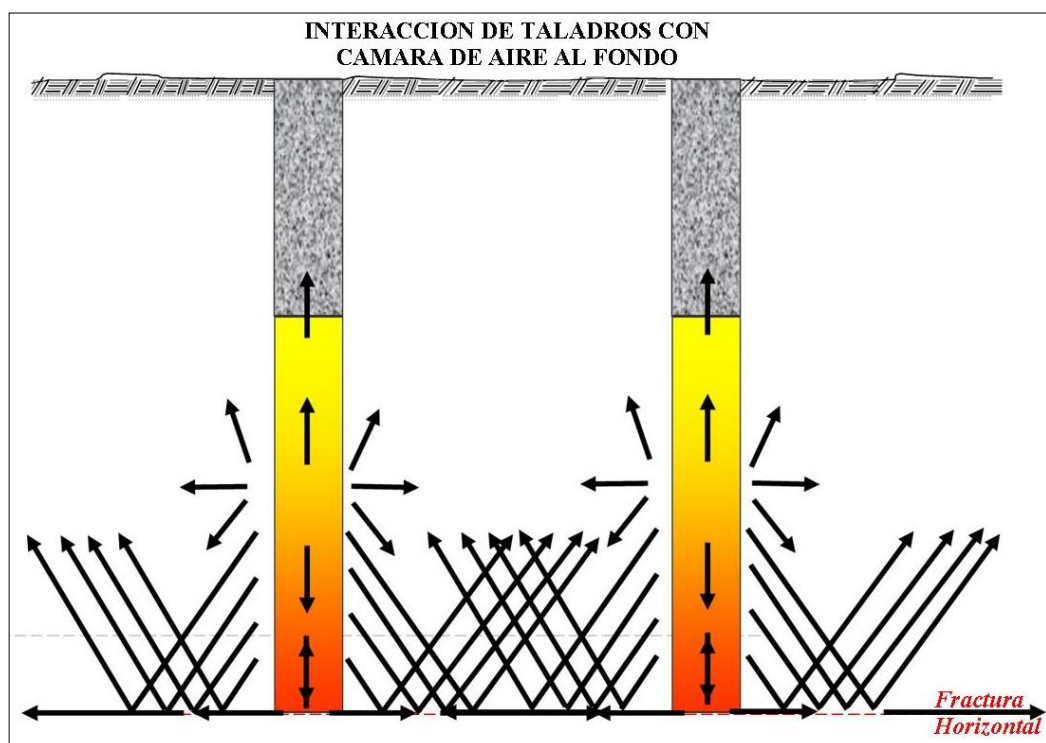


1.6 QUINTA ETAPA: INTERACCIÓN DE TALADROS CON CÁMARA DE AIRE EN EL FONDO

Continuando con el proceso, las ondas de tensión son reflejadas de regreso hacia la formación debido a que existe un cambio de medio (fractura horizontal).

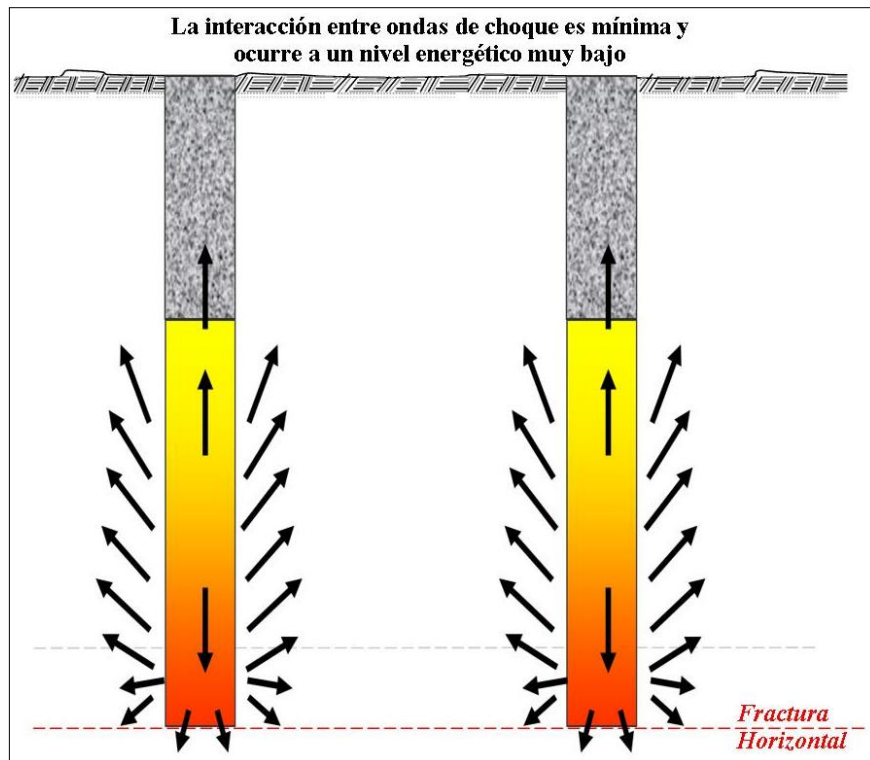
Al mismo tiempo, dichas ondas de tensión continúan su interacción con las otras ondas de tensión originadas por el proceso de los taladros vecinos, esta interacción no es aun bien entendida, se deduce que una multitud de reflexiones son propagadas al medio a causa de esta interacción (ver Figura 1-6).

Figura 1-6. Quinta Etapa: Interacción de Taladros con Cámara de Aire al Fondo



En la voladura convencional, la interacción de ondas prácticamente no existe, ya que su interacción es mínima y ocurre a un nivel energético muy bajo, como se aprecia en la Figura 1-7.

Figura 1-7. Interacción de Taladros con columna explosiva en la sobre perforación



Finalmente como corolario de nuestra hipótesis podemos afirmar que con éste sistema se establece que:

“El método de transporte de la energía a la formación, es tan importante como los elementos que la crearon”.

Vale decir que los ingenieros de minas o los técnicos encargados del diseño y ejecución de la voladura deben de tener muy en cuenta la manera en cómo se va a transferir la energía del explosivo al medio rocoso, para producir el daño o

fragmentación deseados, no bastara como hasta ahora, el solo considerar las características físico químicas de los explosivos.

1.7 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL FENÓMENO

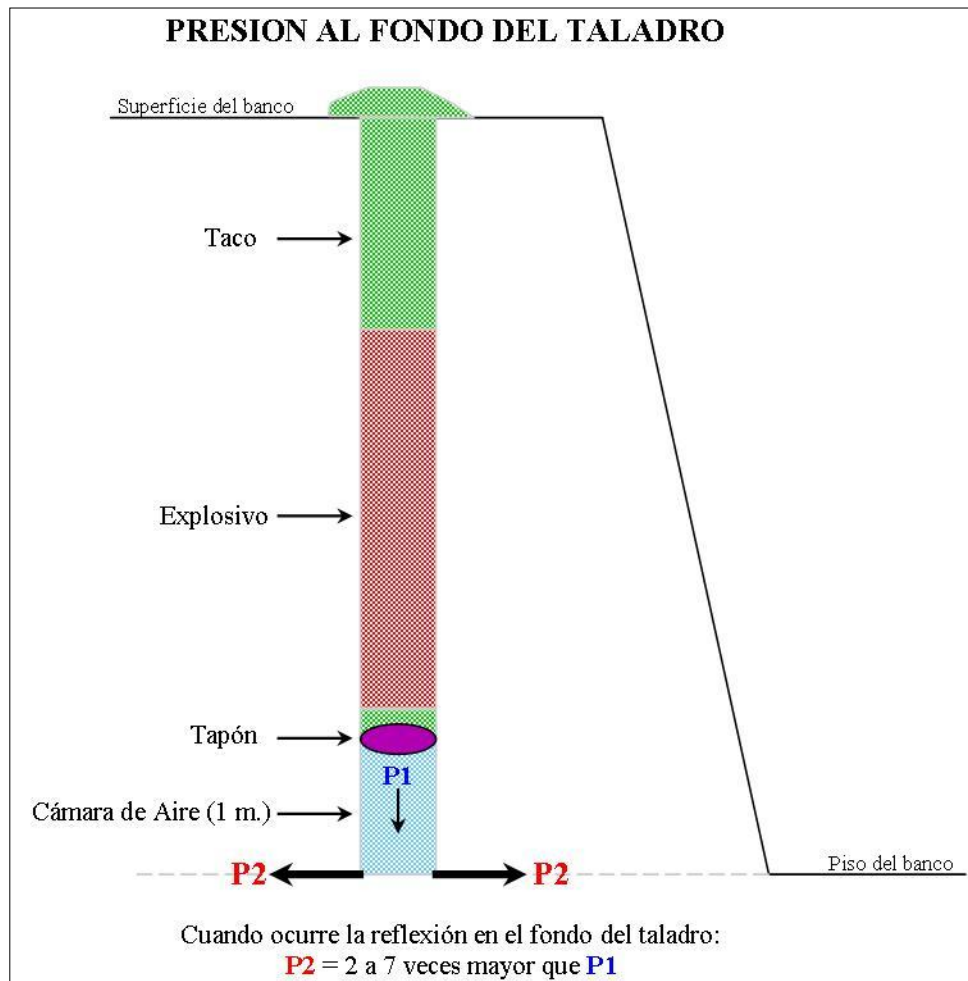
Lo que sucede en el fondo del taladro con el sistema de voladura tensional, puede ser explicado en términos de presión y/o Energía Cinética. Como ya se menciono, cuando un explosivo detona en un taladro, la alta temperatura producida por la detonación siempre tomara el camino de menor resistencia.

La cámara de aire en el fondo será la primera en estar sujeto a una intensa onda de choque viajando a través de ella. Cuando el frente de la onda de choque inicial golpee el fondo del taladro, la velocidad de la onda de choque disminuirá, reflejándose desde el fondo del taladro e incrementando la presión en ese punto.

En este instante, un impacto secundario separado proveniente de los productos de la explosión adiciona otro impulso al fondo del taladro. El efecto combinado es que la presión resultante P_2 en el fondo del taladro puede ser incrementada de dos a siete veces respecto de la presión inicial P_1 , ver Figura 1.8.

La fuente del punto de incremento de la presión es suficiente para crear un plano de fractura y fragmentación en el fondo del taladro. En esencia, la suma de la energía de la onda primaria más los productos de la explosión secundarios son mucho más eficientes que una carga cilíndrica continua y concentrada en el fondo del taladro, pero esto sucede solo cuando la longitud de la cámara de aire en el fondo del taladro y la masa del tapón son apropiadamente diseñadas para unas determinadas condiciones de campo y sistemas de explosivos (Chiappetta 2004).

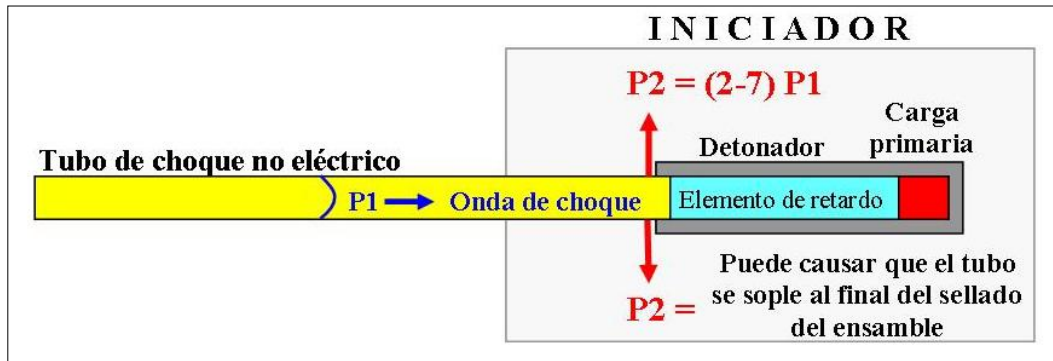
Figura 1.8. Incremento de la presión



Haciendo un paréntesis, cuando el tubo de onda de choque no-eléctrico fue introducido dentro de la industria minera a partir de 1970, los mismos mecanismos en el efecto de vacío en el aire causaban el soplado del tubo de choque en la zona del ensamble de sellado entre el tubo y el detonador, lo que causó detonaciones prematuras en muchos disparos.

En este caso, el lado soplado ignoraba el elemento de retardo mediante una detonación prematura del iniciador. Hoy este problema no existe, pero el mecanismo que originaba dicha falla en los años 70 fue idéntico a los efectos que ocurren ahora con la aplicación de la cámara de aire en el fondo del taladro (Chiappetta 2004). Ver Figura 1.9.

Figura 1.9. Detonaciones prematuras en el tubo de choque



Continuando con la explicación de este fenómeno en términos de la Energía Cinética (E_c) la cual es entregada en el fondo del taladro, podemos ver en la Figura 1.10 la modelización matemática de lo que sucede en la cámara. La energía cinética se define por la siguiente relación:

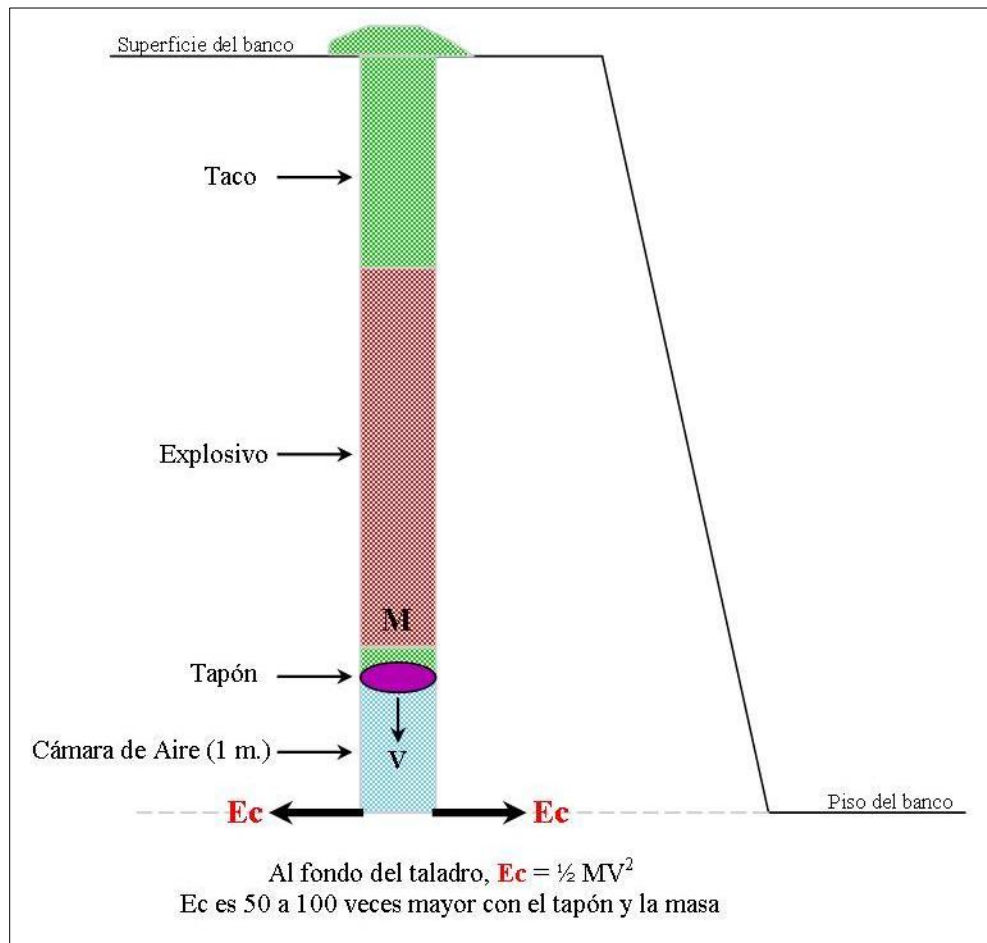
$$E_c = \frac{1}{2} \times M \times V^2 \dots\dots\dots(1.1)$$

Para nuestro caso:

$M =$ Masa del pistón de compresión, que se puede medir y que está constituida por el detritus de la perforación adicionado al tapón; este conjunto es necesario para lograr obtener la suficiente velocidad y poder comprimir el aire en la cámara. La cantidad de detritus a agregar está en función del diámetro del taladro y como regla practica su altura variara en el rango de 1 a 1.5 veces el diámetro del mismo del taladro.

$V =$ Velocidad de detonación de los gases que van atravesando la cámara, y cuyo frente es encabezado por el pistón de compresión; medida en m/s.

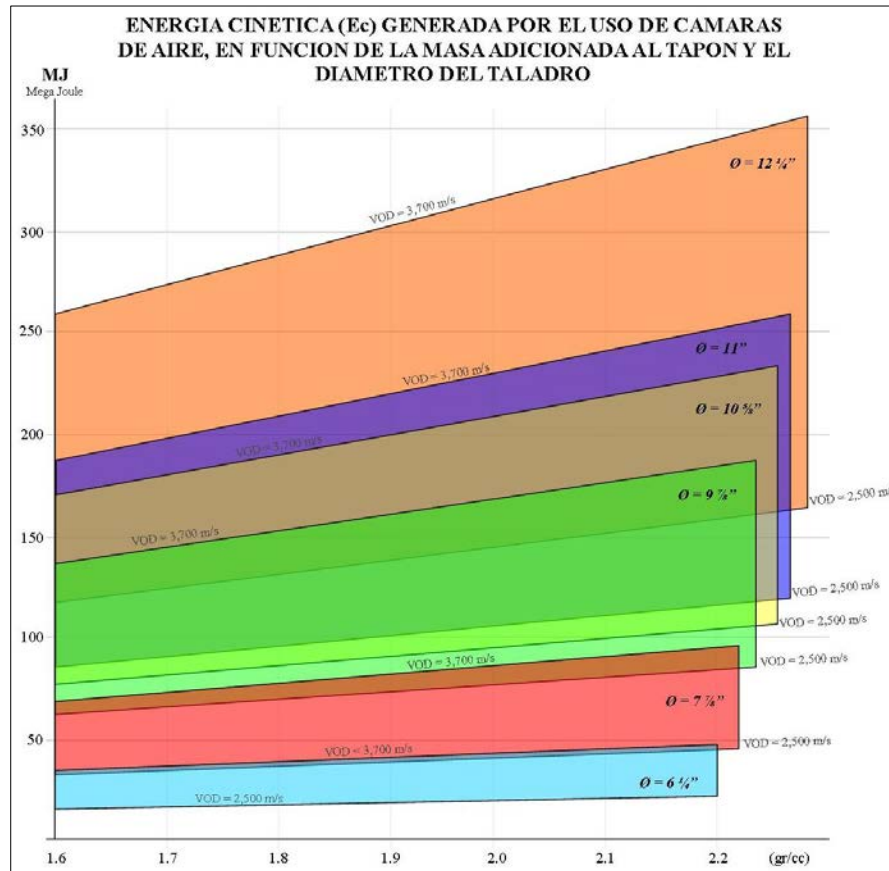
Figura 1-10. Energía Cinética al fondo del taladro



La E_c en el fondo del taladro puede estar en el orden de 50 y hasta 100 veces mayor de sus valores normales, dependiendo de la correcta selección de la masa del tapón y la correcta longitud de la cámara de aire.

Según pruebas realizadas por Chiappetta (2004), se encontraron VOD entre 300 a 3,700 m/s, dependiendo de la masa adicionada al tapón, la longitud de la cámara de aire, el explosivo a ser usado, el diámetro del taladro y la resistencia de la roca. En la Figura 1-11, se muestra la cantidad de energía que se ha calculado teóricamente para rangos de VOD que van desde los 2,500 hasta los 3,700 m/s.

Figura 1-11



Esta nueva técnica de voladura con cámaras de aire nos permite variar y controlar la intensidad de la presión o Ec en el fondo del taladro según nuestras necesidades, debido a ello es que puede ser utilizada en formaciones de roca desde muy suaves hasta muy duras, incluyendo formaciones con alto buzamiento.

Sin embargo, pueden existir errores al momento de seleccionar los parámetros de diseño correctos y estos a su vez nos pueden conducir a resultados muy pobres en determinada voladura, por lo tanto para la selección inicial del diseño es altamente recomendable que validemos la técnica en el medio donde deseamos aplicarla.

CAPITULO II

FUNDAMENTO TEORICO

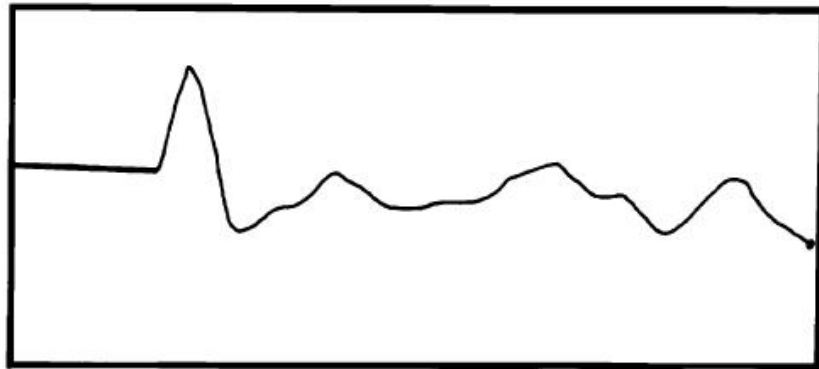
2.1 PRINCIPIOS DE MECÁNICA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA AL MACIZO ROCOSO

2.1.1 Proceso de fracturamiento

Para entender claramente el principio de funcionamiento de las cámaras de aire, debemos tener claro también el principio bajo el cual ocurre el fenómeno en condiciones a columna completa con explosivos.

En este caso cuando una carga cilíndrica es detonada, las presiones dentro del taladro se elevan instantáneamente y las ondas de choque se expanden hacia el área externa resultando esto en la formación de un núcleo de fracturas y el inicio del movimiento del medio. Como se puede apreciar en la Figura 2-1, en el oscilograma de la velocidad de desplazamiento de la onda de choque, el movimiento del medio causado por la carga cilíndrica es caracterizado por la presencia de rápidas oscilaciones amortiguadas (Melnikov 1971).

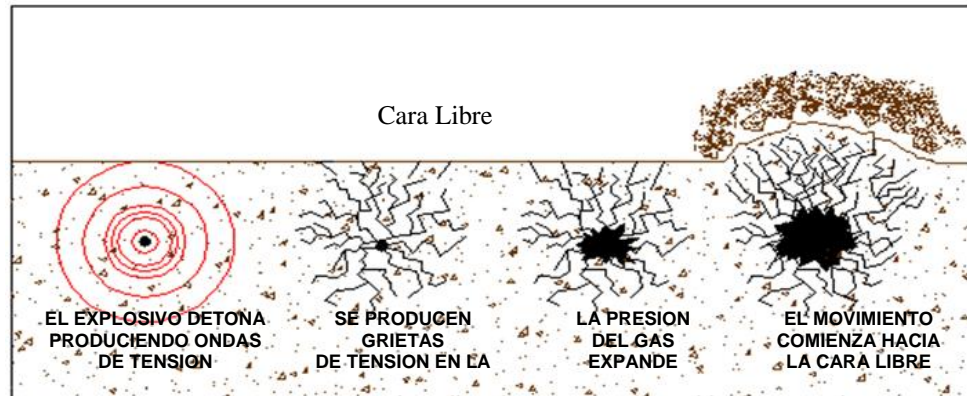
Figura 2-1. Oscilograma de desplazamiento de frente de ondas de choque cuando se detona una carga continúa.



Fuente: Melnikov 1971

Posteriormente y bajo la influencia de las altas presiones, los gases a alta presión comienzan a ensanchar el taladro (Figura 2-2), actuando como una cuña para expandir las grietas, tanto las originadas por la voladura como las formadas previamente y sumándose a ello la deformación debido a la trituración del medio rocoso circundante al taladro. Después del paso de la onda de compresión, el medio adquiere pronto un estado de equilibrio estático. En ese momento ya no hay más transferencia de energía al medio, y la presión de los productos de la explosión en el taladro son balanceados mediante tensiones en los límites de la zona elástica. (Melnikov 1971).

Figura 2-2. Fractura de Roca por Explosivos



2.1.2 Descripción del proceso

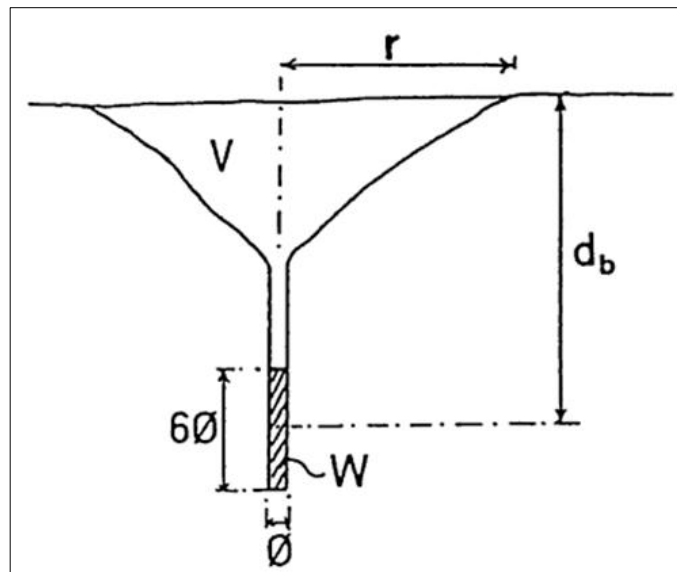
El proceso de fragmentación de la roca ocurre en cuatro pasos claramente definidos. Cuando detona un explosivo, una onda de esfuerzo se mueve a través de la roca uniformemente en todas direcciones alrededor de la carga. Entonces las grietas radiales se propagan predominantemente hacia la cara libre. 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 taladro 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 fuera, se crean fracturas en la tercera dimensión como resultado de la falla por cortante o doblamiento (Konya 1998).

2.1.3 Teoría de Cráter

El concepto de voladura de cráter con una carga aplicada en un taladro que hace ángulos rectos con la superficie y su desarrollo en los métodos de voladura de uso común, es generalmente atribuido a Livingston (Persson 1994). Una voladura de cráter es una voladura en la cual una carga pequeña esférica o muy cercana a una esfera es detonada debajo de la superficie y que se extiende lateralmente en todas las direcciones más allá del punto donde el material circundante será afectado por la voladura.

En la figura 2-3 se muestra un esquema de la geometría de la voladura en cráter, donde: V es el volumen del cráter, d_b es la profundidad medida desde la superficie y a la cual se encuentra el centro de gravedad de la carga colocada dentro del taladro, r es el radio del cráter, W el peso de la carga y \emptyset el diámetro del taladro.

Figura 2-3. Geometría voladura de cráter



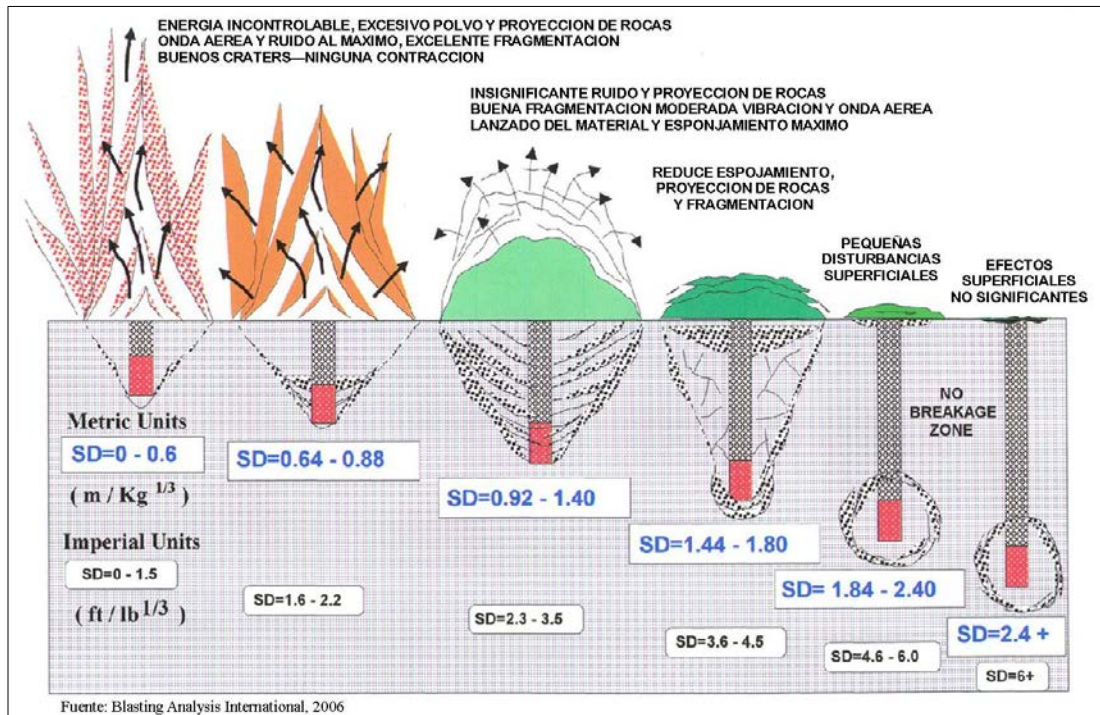
Además se puede apreciar que la longitud de la carga es 6 veces el diámetro de la carga. La voladura de cráter se utiliza como una herramienta para estudiar el fenómeno de la voladura, el rendimiento de los explosivos y la volabilidad de los distintos tipos de macizos y materiales rocosos. Se ha demostrado que existe una relación contundente entre la energía del explosivo y el volumen de material que es afectado por la voladura y además dicha relación es afectada por la ubicación de la carga.

Livingston logro determinar la siguiente expresión empírica que demuestra la que relación energía-presión existe:

$$N = E_s W^{1/3} \dots\dots\dots(2.1)$$

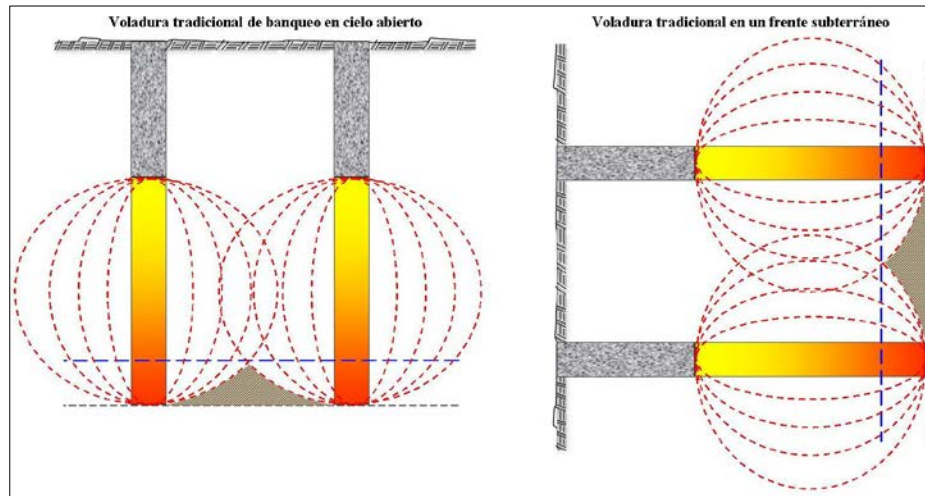
Donde N es la distancia crítica en la cual el rompimiento de la superficie que esta exactamente encima de la carga esférica no excede el límite especificado, E_s es el factor de energía presión (constante dada para una combinación explosivo-roca) y W el peso de la carga explosiva (Persson 1994), en la Figura 2-4 se aprecia la influencia de la profundidad escalar (SD) en la creación del cráter.

Figura 2-4. Importancia de la profundidad escalar



Es por todas estas razones que los diseños de perforación requieren que cada taladro deba tener una parte de su longitud perforada más allá del límite de minado; es así que la línea azul en la Figura 2-5, representa el piso planificado en una mina superficial o el avance máximo posible en obras de túnel o techo de un caserón, la línea negra representa el fondo de la perforación y el área sombreada es la zona donde el explosivo no logra romper la roca. Es por ello que en minería superficial se tiene que realizar siempre la sobre perforación para asegurar el nivel del piso deseado; caso similar ocurre en tunelería pero en este caso se habla de porcentaje de avance.

Figura 2-5. Zonas de pobre o nula fragmentación.



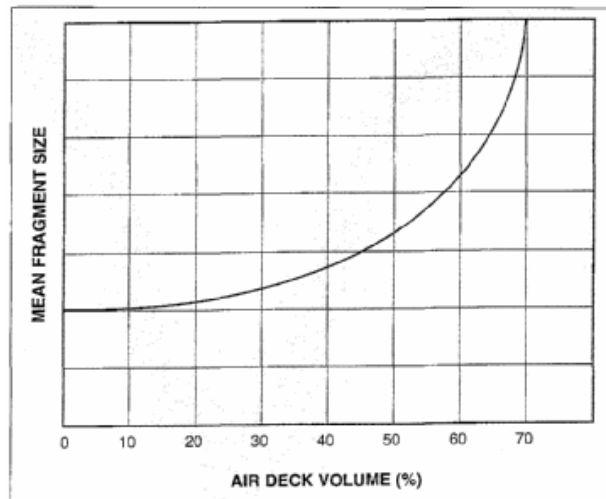
2.2 DEFINICIÓN DE CÁMARA DE AIRE

- Es un espacio vacío, libre de la presencia del explosivo que se esté cargando en el resto de la columna, y creado dentro de los taladros de voladura mediante diversos dispositivos que hemos generalizado con el nombre de “tapón”.
- Puede ocupar entre un 30% a 40% por volumen del total de la columna que originalmente iría cargada de explosivos, sin experimentar un deterioro significativo en cuanto a fragmentación.

La Figura 2-6 muestra resultados de una investigación realizada en Australia (Cleeton 1997). El volumen de la cámara de aire está expresado como un porcentaje (o proporción) del volumen del explosivo más el volumen del aire atrapado en la cámara de aire. En efecto, esta es la cantidad de explosivos que puede ser removida del taladro y substituida con aire (o aún agua). Similares experiencias se llevaron a cabo en el

Reino Unido, donde se confirmaron volúmenes de cámaras de aire de entre 25% a 30%, en todo tipo de rocas sin pérdidas notables en la fragmentación.

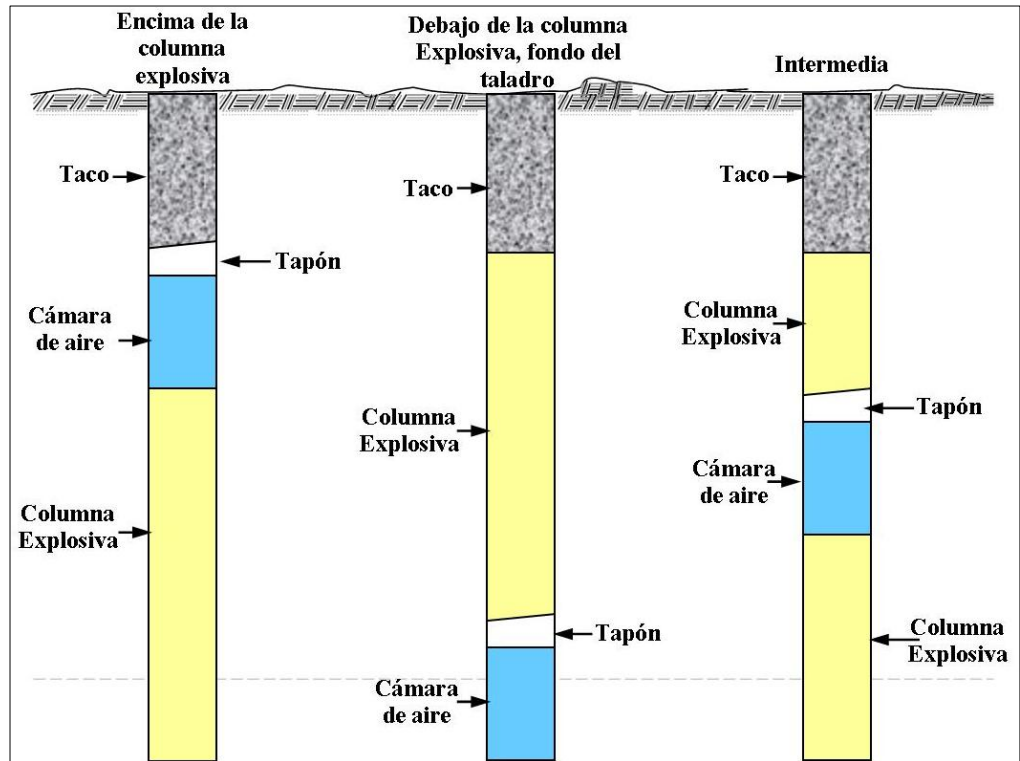
Figura 2-6. Volumen cámaras de aire



Fuente: Revista Quarry Management, Abril 2007

- Puede ser ubicada en la parte superior, media o inferior de la carga explosiva en la Figura 2-7 se aprecia los tres arreglos más usados.
- El tamaño y la posición de la cámara de aire cambia la fragmentación y el levantamiento de la voladura, por lo tanto estos parámetros deberán de ser seleccionados de acuerdo a los requerimientos particulares de cada aplicación, sea taladros de producción, de contorno, de línea de amortiguación, así como de las características del macizo rocoso.

Figura 2-7. Arreglos de cámaras de aire

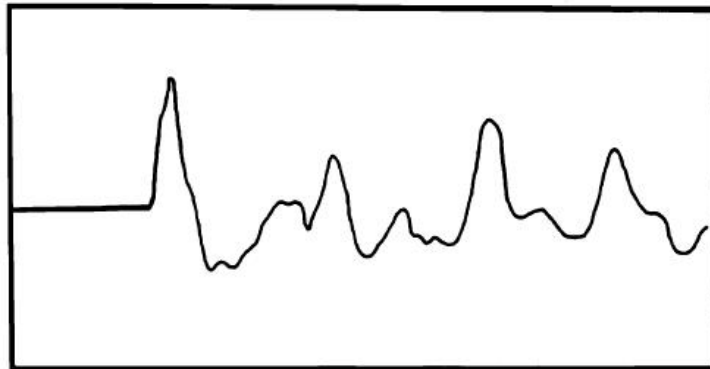


2.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Investigaciones y pruebas realizadas por Melnikov (1971) demostraron que las cargas activadas con cámaras de aire producen una interferencia de las ondas de tensión y una disminución de la presión pico. La Figura 2-8 muestra el oscilograma de desplazamiento de velocidades del frente de la onda de choque en el medio cuando se detona una carga con cámaras de aire, en ella podemos apreciar que después del paso de la onda de compresión, el medio experimenta un impulso adicional. Análisis de los procesos hidrodinámicos en el taladro han demostrado que luego de la detonación de dos partes de la carga, los productos de la explosión comienzan a expandirse dentro de la cámara de aire, la onda de choque se difunde dentro del medio rocoso produciendo un núcleo de micro

fracturas de una manera similar al producido por una columna continua de explosivo. Entonces la cámara de aire es completamente llenada con los gases en expansión producto de la explosión, dichos gases se proyectan en una gran proporción, la misma que excede la velocidad de movimiento de las paredes del taladro.

Figura 2-8. Oscilograma de velocidad del frente de choque cuando se usan cámaras de aire



En consecuencia, las cámaras de aire incrementan la duración de la acción de la onda de choque sobre el medio que la rodea (Melnikov 1971), esto debido a una serie de pulsos causados por las reflexiones de las ondas de presión después de la detonación dentro un taladro. Además, con cámaras de aire, la tensión máxima aplicada sobre la roca que la rodea, es menor que la tensión extrema aplicada por el explosivo en columnas sólidas.

2.4 RESULTADOS GENERADOS POR USO DE LAS CÁMARAS DE AIRE

- Reducen la presión inicial aplicada por la carga explosiva.

- Sin embargo, incrementan la duración del pulso de presión.
- Reducen efectivamente reduce la energía utilizada para pulverizar la roca cerca del taladro.
- Al mismo tiempo, incrementan la cantidad de energía transmitida a más distancia dentro de la roca.
- Por otro lado investigaciones de la Universidad de Maryland realizadas por Torrence y validadas por (Moxon 1991), nos indican que la presión no es tan intensa como la producida por una columna sólida. Sin embargo, la efectividad de las ondas de choque o tensión se extienden sobre un mayor volumen de roca.
- Estudios han indicado, que cámaras de aire incrementan la duración de la acción de las ondas de choque sobre el material, de 2 a 5 veces.

2.5 REFERENCIAS HISTÓRICAS DE SU APLICACIÓN

Desde el comienzo de la era industrial, en voladura de rocas también se busco optimizar el uso de la energía explosiva, como ya se menciona anteriormente los principales hitos que señalaron distintos investigadores fueron:

- 1940 Melnikov & Marchenko; Surface Blasts
- 1961 Univ. of Missouri; Mid-column air decks
- 1980 Univ. of Maryland; Modelling
South Africa; Pre splitting
Atlas Powder Co; Field tests
- 1987 Chiappetta & Mammele; Air Deck

- 1999 Intec; Test in Evergreen
- 2001 R. F. Chiappetta; Nueva Técnica Voladura
- 2006 W.L. Fourney; Borehole Pressures in an Air Decked

Todos estos estudios y pruebas empíricas resultaron en el desarrollo de: Nuevas Técnicas de Voladuras, Productos explosivos y Accesorios especiales.

Entre ellos podemos mencionar:

- Cargas desacopladas
- Técnicas de pre corte
- Voladura de Contorno en Minería Subterránea
- Emulsiones de Pequeño diámetro para pre cortes
- Explosivos de baja densidad
- Cámaras de aire
- Elementos o accesorios plásticos, bolsas, retenedores de taco

2.5.1 Aplicación de la cámara de aire inferior en minas a cielo abierto

Las cámaras de aire se implementaron a fines de la década del 90 en la minería de carbón en EEUU. Para conocer un poco de estas importantes operaciones, una breve reseña. El combustible para la generación termoeléctrica en EEUU es el carbón. Los tres principales estados productores de carbón en EEUU son: West Virginia, Kentucky y Wyoming. Los métodos de explotación en estas minas de carbón son: cielo abierto tradicional y el casting, este último

consiste en explotar la capa superior estéril del manto de interés, con perforación, voladura y desplazamiento con Draglines y Buldózer del material ver Figura 2-9.

La capa superior de estéril puede tener espesores de 10 a 30 m como en el caso que se puede apreciar en la Figura 2-10

Figura 2-9. Esquema explotación casting.

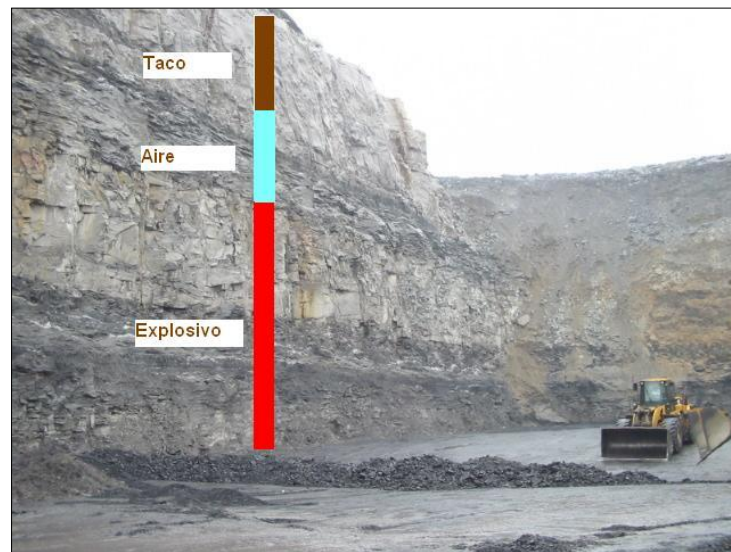


Figura 2-10. Mina Carbón en Kentucky.



Durante la segunda mitad de la década 1990, el bajo precio del carbón y alto costo de explotación, comienza a inquietar a las compañías mineras de carbón de EEUU. Uno de los problemas que complica la operación es la alta dilución generado por la detonación de los taladros de voladura en el contacto estéril – carbón. Como se aprecia en Figura 2-11

Figura 2-11. Voladura Tradicional en Casting



La operación minera Evergreen tenía un esquema de explotación con perforación en gran diámetro, hasta una profundidad de 2 a 3 m sobre el manto de carbón, ya que cuando no hacían eso se producían grandes pérdidas de carbón por la dilución con el desmonte, como se puede apreciar en la secuencia de la Figura 2-12; luego de la perforación con equipos grandes la capa de estéril que cubría el remanente de mineral era extraída con perforación y voladura en pequeño diámetro, operación lenta y de alto costo, ver Figura 2-13.

Es así, que en esta operación se realizan las primeras pruebas con cámara de aire inferior, la perforación primaria de producción comienza a disminuir la

distancia al manto de carbón, hasta llegar a eliminar dicha capa, con buenos resultados de piso y eliminando el daño al manto de carbón, en la secuencia de imágenes de la Figura 2-14 su puede apreciar cómo es que se llega a prescindir completamente de la perforación secundaria.

Dado que los resultados obtenidos se explicaban dado la alta estratificación del cuerpo mineralizado, es que se decide probar el sistema en una mina sin estratificación, es decir, un cuerpo masivo o pórfido cuprífero.

Figura 2-12. Secuencia inicial de voladura

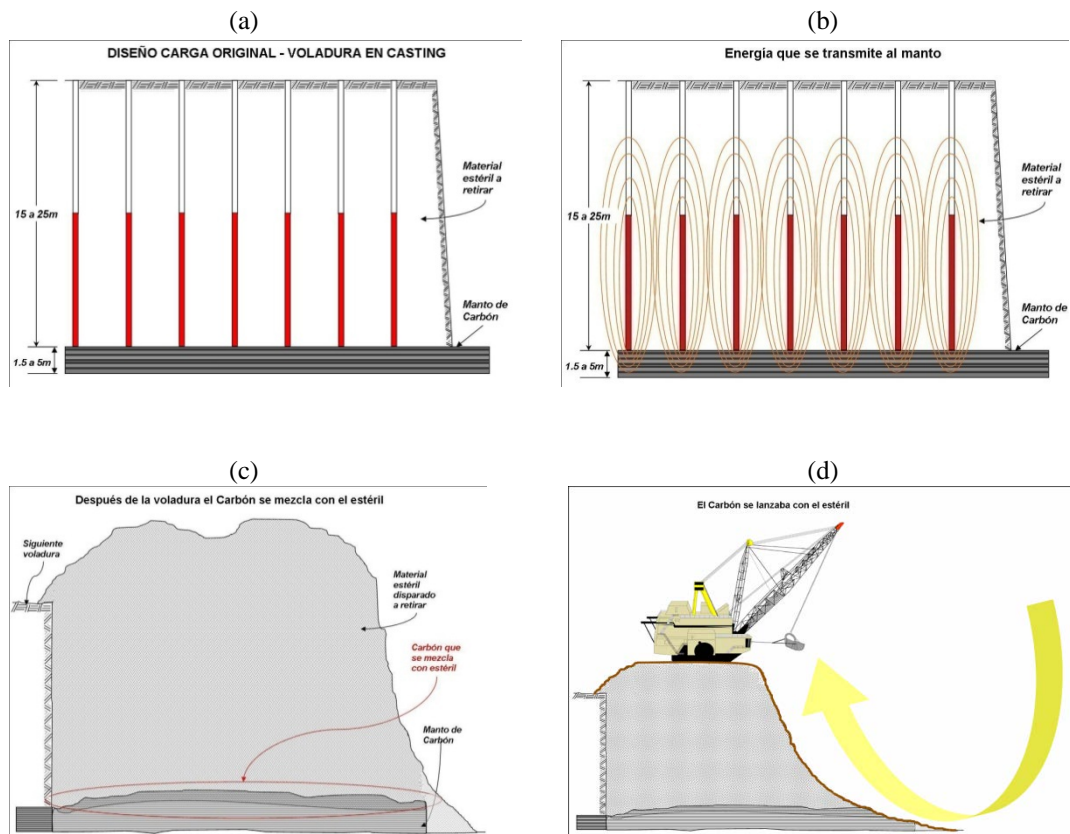


Figura 2-13. Esquema con perforación secundaria

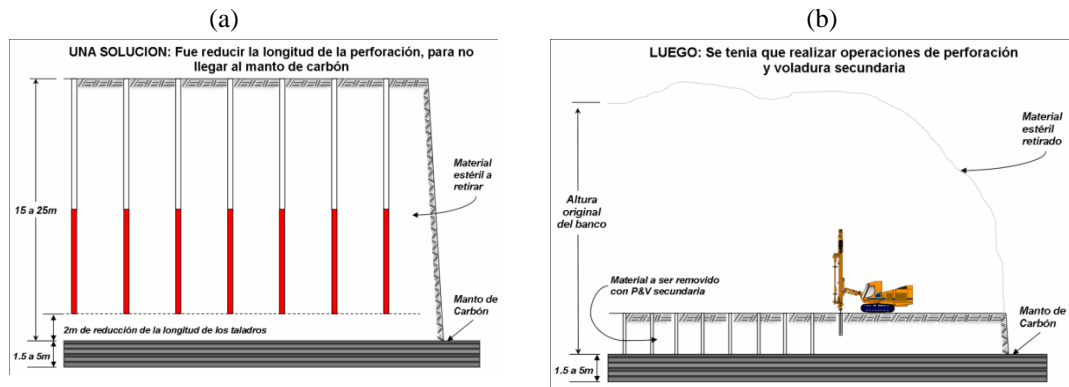
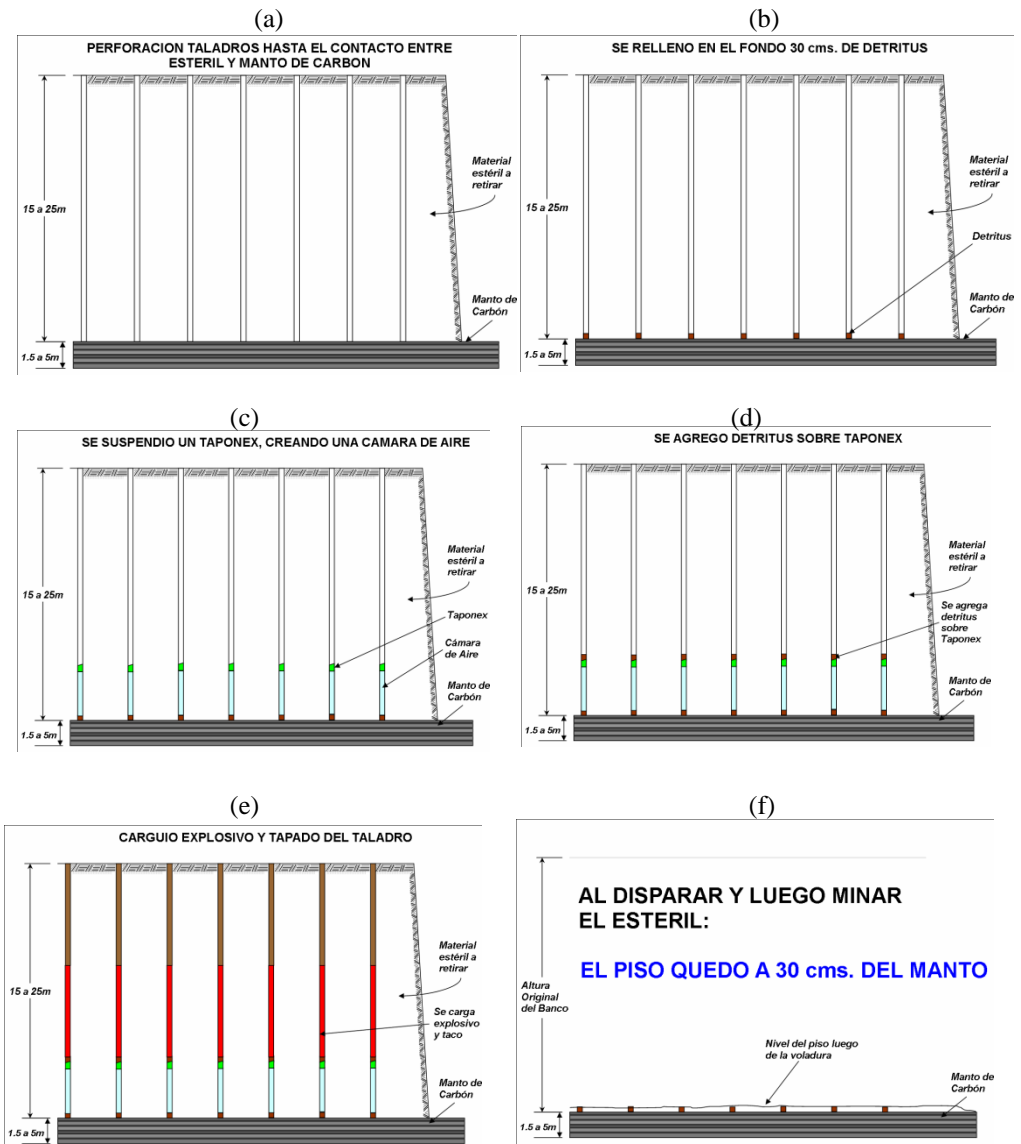


Figura 2-14. Secuencia de voladura con cámaras de aire



Para corroborar el sistema se trasladan las pruebas a una mina de cobre en Chile (Correa 2000), y desde el mes de Agosto de 2000 se realizaron un gran número de voladuras utilizando de cámaras de aire para reducción de la sobre perforación, completando aproximadamente 8.500.000 toneladas removidas, sin presentarse problemas de pisos altos o mala fragmentación del material.

Para validar el sistema se realizó un muestreo a dos voladuras tradicionales (Apéndice A - Tabla N° 1) y a diez voladuras con cámaras de aire (Apéndice A - Tabla N° 2), para realizar las comparaciones necesarias, en las cuales se registraron:

- Los parámetros propios del proceso de voladura.
- Medición de fragmentación del material volado con apoyo de software Wipfrag.
- Medición topográfica de pisos resultantes después del trabajo del equipo de carguío.
- Rendimiento de los equipos de carguío en ton/hr. neta

Del análisis de los datos obtenidos de estas pruebas, en esta mina de cobre en Chile, se pudo apreciar una reducción en el factor de carga de explosivos de aproximadamente un 36% (Apéndice A), mientras que no se aprecia un impacto negativo en el resultado de piso. En cuanto al rendimiento de los equipos de carguío, según lo que se muestra en el Apéndice B (Gráfico N° 1) se observa que no existe una diferencia significativa entre las voladuras tradicionales y con cámaras de aire, lo que se valida con el resultado de los análisis de fragmentación presentados en el Gráfico N° 2 del mismo Apéndice B.

Cabe destacar que los rendimientos de pala presentados son rendimientos netos y no efectivos, por lo que existen algunos factores no concernientes a la voladura que influyen negativamente en el rendimiento.

Finalmente podemos afirmar que los resultados que se obtienen entregan los mismos beneficios que en la mina de carbón, corroborando que la técnica funciona independientemente de la conformación estructural de la mina.

2.5.2 Aplicación de cámaras de aire en minería subterránea

En las operaciones de dos compañías mineras de la zona de Copiapó, III Región – Chile, se probó la técnica de voladura con cámaras de aire y se desarrollaron los accesorios prototipos para crear este efecto (Araya 2008).

Se eligieron las zonas adecuadas, se revisó el diseño de ingeniería y los resultados reales obtenidos en cada una de ellas, para establecer la línea base o situación actual, el cual sería el punto de comparación.

- **Voladuras en avances horizontales**

En desarrollo las pruebas se realizaron en avance horizontal, con perforación paralela de 4.0 m de profundidad (3.80 m real), con un diámetro de 45 mm. en una sección de 5.0 x 4.0 m., cargas explosivas de ANFO fueron iniciadas con cebos de emulsión encartuchada y detonadores no eléctricos.

La cámara de aire fueron ubicadas al fondo de cada taladro excepto los arranques y tenían un largo de 0.30 m.

En el Apéndice I, se detallan los resultados de estas pruebas en avances.

- **Resumen de resultados obtenidos en avance**

1. Se consiguió un aumento de avance por disparo de 7.9 %.
2. El programa mensual de desarrollo es de 1.000 m tradicionalmente logrado con 323 disparos. Si se hacen usando la técnica de colocar una cámara de aire al fondo lo pueden hacer con 294 voladuras.
3. El ahorro potencial conseguido equivalente a 29 disparos o 98 m más de avance. Si se considera 600 US\$/m de avance (dato proporcionado por Cia Minera), se tiene un ahorro por año de US\$ 710.000.

- **Voladuras de Producción**

Se obtuvieron resultados en dos sectores:

1. **Caserón A:** Método de explotación SLS modificado. Cuerpo mineralizado vertical, con dimensiones de 60 m de altura, 40 m de ancho y 60 m de largo. Perforación DTH en 4 ½” tipo banqueo, es decir, vertical y sub-inclinada, con carguío de explosivo de ANFO, iniciado con cebo de Pentolita y detonador no eléctrico.

Por lo difícil y riesgoso de medir el avance del techo del caserón se tomo la decisión, en el caso de Producción, de usar una cámara de aire intermedia y el control del techo se controló con equipo con láser.

2. **Caserón B:** Método de explotación SLS tradicional. Cuerpo mineralizado en forma de manto inclinado 30° con una potencia de 15 m, con ley de 6% de cu, las dimensiones del bloque son: 43m alto, 47 de largo.

Para comprobar esta técnica de voladura se programa el uso de Cámaras de aire en un caserón, el cual necesitaba del cuidado de las paredes y techo de los tiros de banqueo, ya que el sector presenta una alta ley y la sobre excavación de este se traducía en dilución de ella.

Este caserón consta de 13 corridas de tiros de banqueo perforados en 4" $\frac{1}{2}$.

Las pruebas se realizan en 8 de ellas. Con las 5 primeras se establece la línea base para comparar.

- **Resultados en producción bloque B**

1. El resultado económico por concepto de consumo de explosivo que se obtuvo es un ahorro potencial de 21% (ver Tabla 2-1), tanto en taladros secos y con agua.
2. La ley del sector estimada por el departamento de geología (in situ) antes de mover el mineral se estimó en un 6%. La extracción del caserón y el resultado de las pruebas se logró obtener un promedio de 5% en la ley de cobre. El techo se mantuvo mientras se realizó la extracción.
3. En las pruebas realizadas se logró apreciar que la granulometría del material volado era bastante homogénea y sin presencia de bolones lo que

permite reducir los costos por concepto de voladura secundaria, carguío y transporte.

Tabla 2-1. Resultados voladura en producción mina subterránea

TABLA DE RESULTADOS			
Parametros de Voladura	Unidad	Sistema Tradicional	Voladura con Camara
Factor de Carga	grs / m3	1 013,30	800,23
Factor de Carga	grs / Ton	375,30	296,38
Ahorros	%		-21%

En el Apéndice J, se muestran los detalles de los resultados resumidos anteriormente, para las voladuras en producción.

CAPITULO III

ANALISIS DE SU APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 ANÁLISIS DE LA LÍNEA BASE DEL PROCESO ACTUAL DE LA VOLADURA

Sea que se trate de voladura en minas a cielo abierto o en minas subterráneas, existen parámetros previos a la voladura y posteriores a ella, los cuales debemos de conocer y cuantificar para poder establecer un punto de referencia a partir del cual podamos observar las mejoras en dichos parámetros, una vez aplicado algún cambio sobre ellos.

Para obtener toda esta información se requerirá ser ordenados y metódicos, por lo que se sugiere emplear formatos definidos previamente, un ejemplo de ello se incluye en el Apéndice C, similarmente el Apéndice D nos muestra un ejemplo de una parte de la data recolectada por el Apéndice C.

3.1.1 Identificación de parámetros y variables de diseño previos

Deberemos de identificar y cuantificar los siguientes parámetros:

- De los datos generales de la operación:

Mineral que se extrae, leyes típicas, producción diaria, esta subcontratado el servicio de voladura.

- De los objetivos de la mina:

Reducir consumo de explosivos, eliminar la sobre perforación, dejar la superficie del banco inferior siguiente intacta, reducir las vibraciones, reducir la proyección de rocas, golpes de aire o gases tóxicos del disparo, mejorar la fragmentación.

- Del diseño de malla:

Burden, espaciamiento, sobre perforación, altura de banco, diámetro de perforación, secuencias de amarre tipo, número promedio de taladros por disparo.

- Del diseño de carga:

Longitud de carga, longitud de taco, carga de fondo si existiera, factor de carga y/o potencia, utilización de algún tipo de retenedor de taco, material del taco.

- De los explosivos:

Tipo de explosivos, si se está utilizando algún sensibilizante, tipo de iniciadores, VOD típico del explosivo, densidades, potencia relativa en peso, tipo de detonadores.

- De los parámetros de perforación:

Velocidad de penetración, velocidad de rotación, empuje aplicado según tipo de roca,

- De las características del macizo rocoso:

Tipo de roca, velocidad de onda de choque (sónica), dureza de la roca, densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la atracción, modulo de Young, índice de Poisson, RMR, estructuras geológicas predominantes, sistemas de diaclasas, los taladros tienen agua.

- De los aspectos económicos:

Costos de explosivos, costo por metro perforado, costo totales de perforación y voladura, costo de minado.

- De los resultados post voladura:

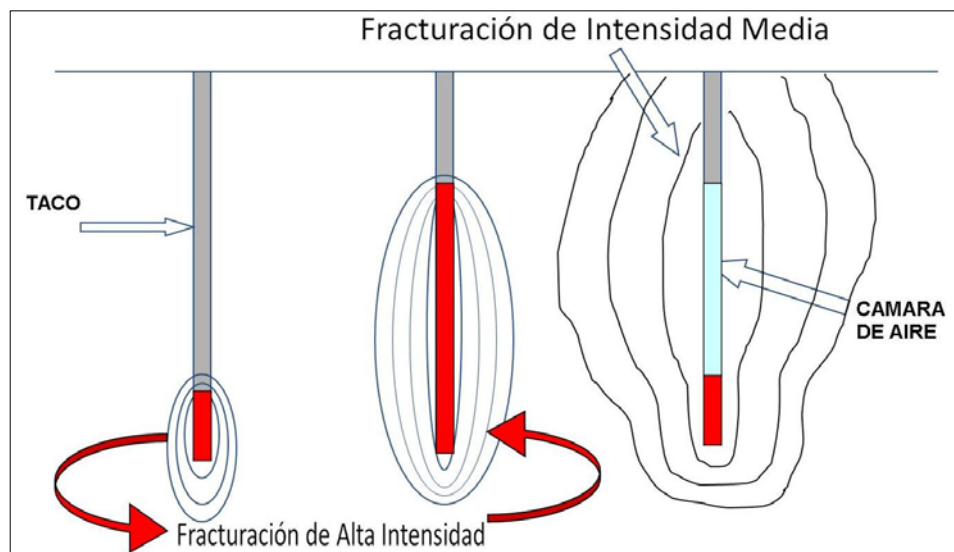
Fragmentación del material volado, esponjamiento de la pila, onda aérea, vibraciones, niveles de los pisos o frentes, índices (KPI) de productividad equipos de carguío y acarreo.

3.2 POSIBILIDADES DE USO

3.2.1 Ubicación dentro del diseño de Carga

Como ya se reviso en el capítulo 2, las posiciones más comunes de las cámaras de aire fueron graficadas según lo mostrado en la Figura 2-7, sin embargo existirán más posibilidades de utilizar cámaras, y esto dependerá de las necesidades y resultados que busquen alcanzar los operadores de las minas. La Figura 3-1 nos muestra el fracturamiento posible cuando colocamos una cámara de aire a lo largo de toda la columna, como en el caso de líneas amortiguadas.

Figura 3-1. Perfil de Fracturas y Tensión, como resultado de diferentes Geometrías de Cargas



3.2.2 Dimensionamiento óptimo de la cámara

Experimentos de Melnikov nos proporcionan una guía para el cálculo de la longitud de la cámara de aire según:

$$L_{ad} = a \cdot L_c \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde “a” es un factor entre 0.15 y 0.35, L_{ad} es la longitud de la cámara de aire en metros y L_c es la longitud de la columna de carga incluyendo la cámara de aire en metros.

En función del diámetro, se puede utilizar la siguiente relación:

$$L_{ad} = b \cdot D_c \dots \dots \dots (3.2)$$

Donde “b” es un factor entre 8 y 12 y D_c es el diámetro de la carga en metros.

Moxon (1991), llevo a cabo diversos ensayos de detonaciones de prueba a escala de laboratorio aplicadas sobre bloques de concreto y otros monitoreos de ejercicios de campo para determinar el efecto de las cámaras de aire y su posición, en los resultados de la fragmentación.

De estas pruebas se obtuvieron las siguientes observaciones prácticas:

Como regla práctica, el volumen de la cámara de aire deberá decrecer con el incremento de la resistencia de la roca.

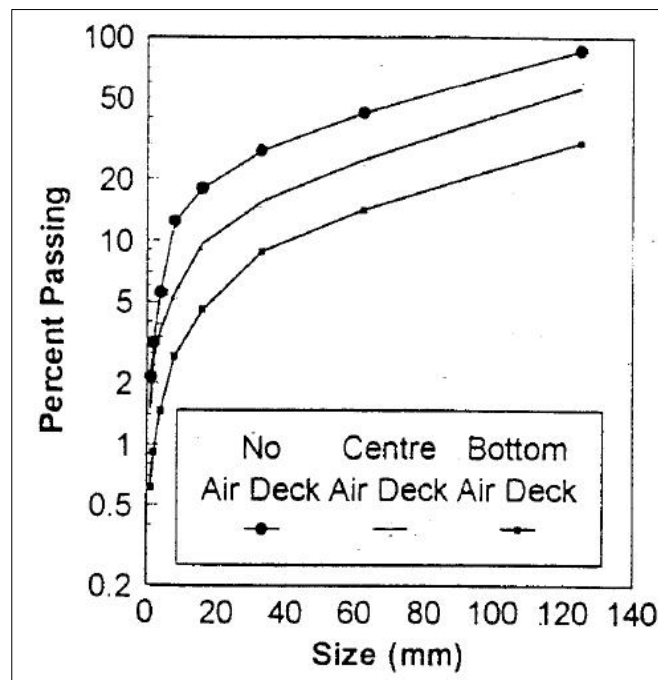
La Figura 3-2 ilustra los efectos de la configuración de las cámaras de aire en la distribución del tamaño de la fragmentación. Por lo general, una cámara de aire a media columna produce fragmentación más fina que las cámaras colocadas, tanto en la parte alta como por debajo de la columna explosiva; esto debido a que por la repetida colisión y oscilación entre las ondas de choque frontal y las

reflejadas en las partes finales del taladro, es que se producen altas presiones y una mayor duración de las ondas de choque. Sin embargo, a pesar de estas ventajas de este arreglo geométrico, su aplicación no es tan práctica, como se explicara más adelante.

3.3 RESTRICCIONES DE USO

En la medida que el uso de la técnica de voladura tensional se use de manera intensiva en las operaciones de voladura, se irán encontrando las soluciones a los inconvenientes aislados que en la actualidad existen para su aplicación a gran escala. Por el momento, debemos de difundir más la técnica y de esa manera coadyuvar a que el proceso avance. A continuación describiremos objetivamente las restricciones que el autor ha identificado a la fecha.

Figura 3-2. Efecto de la configuración de la cámara de aire sobre la fragmentación en bloques de concreto



3.3.1 Por condiciones restrictivas del macizo rocoso

Principalmente cuando encontramos que las propiedades de resistencia a la compresión del macizo rocoso es superior por experiencia a los 250 MPa.

Cuando los taladros que entrega la perforación, no logran armar adecuadamente, inclusive en muchos casos se da el caso de que ni bien se terminan de perforar hay que cargarlos con explosivos; en muchos de estos casos los taladros se cierran rápidamente y no permiten la instalación de ningún accesorio que cree las cámaras de aire.

Debido a la presencia de vacíos (geodas) dentro del macizo rocoso, eso impedirá que el accesorio tenga un lugar para poder encapsular la cámara.

3.3.2 Por condiciones operativas

Cuando el dispositivo elegido para crear la cámara demanda mucha mano de obra y demanda demasiados pasos para llevarlo a cabo.

Cuando el dispositivo requiere de otros insumos para su instalación, sea por ejemplo aire comprimido, como lo que requerirá un compresor de aire cautivo en la zona de carguío.

Cuando el dispositivo está compuesto por muchas piezas y pierde de esta forma practicidad para su instalación.

Por ejemplo, cuando deseamos instalar una cámara de aire intermedia entre dos columnas explosivas, esto no será óptimo, ya que deberemos de colocar doble

prima, además de buscar que la detonación de ambas cargas sea en el mismo instante, con lo que nos veríamos obligados a utilizar cordón detonante, con el atenuante de perder carga explosiva por su uso, o en su defecto se podrían iniciar ambas cargas mediante el uso de detonadores electrónicos, lo cual es lo ideal para el proceso, pero oneroso a la vez.

3.4 TIPOS DE ACCESORIOS PARA CREAR CÁMARAS DE AIRE

El mercado de estos productos ha experimentado un crecimiento vertiginoso, en la actualidad es mucha la oferta de calidad, y desde nuestro punto de vista cada dispositivo posee ventajas operativas sobre uno y otro, obviamente dependiendo de en qué situación o característica específica, tenga la aplicación particular de cada operación.

3.4.1 Tipo Bolsas auto-inflables

Estas bolsas auto inflables, consisten de una bolsa plástica que se encuentra dentro de una bolsa gruesa de rafia y en la cual básicamente se libera un gas. Requieren un tiempo de 20 a 30 segundos para liberar el gas suficiente para inflar la bolsa al diámetro del taladro en que se está instalando. Existen versiones que traen una lata de aerosol, la cual se activa presionando en un punto predeterminado de ella; otros traen una bolsa de vinagre y bicarbonato de sodio, que se mezclan cuando se rompe la bolsa donde está el vinagre y genera un gas.

3.4.2 Tipo globos inflables

Este tipo de dispositivos consisten de pelotas de jebe, que se inflan con aire comprimido, por lo que requieren tener cautivo a un equipo que les proporcione el aire comprimido para su instalación.

3.4.3 Tipo tapones plásticos

Estos accesorios no requieren de ningún producto químico, ni gas o aire para poder instalarse, tienen la ventaja de que se instalan inmediatamente y no hay que esperar algún lapso de tiempo para su completa activación, en contra posición, a veces no pasa por algunos taladros, sobre todo aquellos donde el terreno no permite que los taladros armen bien.

3.4.4 Tipo espaciadores de madera

Consisten en estructuras de madera constituidas por dos discos de madera del diámetro del taladro en que se esté trabajando, y unidos por una vara de madera también, la misma que le da la longitud a la cámara.

Casi todos los dispositivos anteriormente mencionados deben ser instalados utilizando cuerdas, las mismas que deben de medirse para cada taladro, ya que la profundidad de instalación para cada taladro es particular y depende casi siempre de la cota del piso donde se esté operando. Por el contrario, hay algunos dispositivos que llevan una madera adherida al dispositivo, dicha madera es de la longitud que deseamos para la cámara de aire, usualmente de un metro de longitud, pero en este caso necesitan ser instalados sobre un punto de apoyo

sólido, que pueden ser el fondo del taladro o una superficie que evite el hundimiento de la madera. El Apéndice E, incluye una muestra de los distintos accesorios que están disponibles en el mercado.

Así mismo el Apéndice F, nos muestra el procedimiento de instalación de un accesorio del tipo tapón plástico con cuerda y el Apéndice G, nos muestra el procedimiento para la instalación del mismo accesorio plástico pero en su versión con vástago.

3.5 METODOLOGÍA APLICADA

3.5.1 Pruebas piloto

Como parte de la validación de la técnica, BAI (Chiappetta 2004) realizó pruebas a escala total como las dieron por llamar, a continuación resumimos los aspectos generales de la misma:

- **Pruebas de Caracterización en Taladros Específicos**

Secciones transversales de la distribución de la carga en el taladro para tres pruebas a escala total en taladros específicos son ilustradas en las Figuras 3-3, 3-4 y 3-5. Todos los taladros fueron de 6 ¼ pulgadas de diámetro, perforados a profundidades promedio de 48 pies (14.6 metros) y usando 12 pies (3.66 metros) de roca triturada (detritus) de tamaño entre ¼ - ½ pulgadas, como taco en la parte superior del taladro. Los explosivos utilizados fueron una combinación consistente de Heavy ANFO y ANFO. El burden fue mantenido entre 14 a 18 pies (4.27 a 5.49 m) a lo largo de la altura del banco. La Figura 3-3 describe

como los taladros eran cargados normalmente en la mina con una columna de explosivos, 3 pies (0.91 m) de sobre perforación y 12 pies (3.66 m) de detritus arriba.

El taladro de prueba mostrado en la Figura 3-4 fue cargado con una columna de explosivos más pequeña, 3.66 metros para el detritus arriba, una cámara de aire de 0.91 metros en el fondo del taladro y sin sobre perforación.

En la Figura 3-5, la carga del taladro consiste de dos longitudes iguales de explosivo (decks) separadas por una cámara de aire intermedio de 0.91 metros, 3.66 metros de detritus arriba, una cámara de aire de 0.91 metros en el fondo del taladro y también sin sobre perforación. En este caso, tanto el deck superior como el inferior de explosivos fueron detonados simultáneamente. La cámara de aire que separa los decks de explosivos, requiere una detonación simultánea precisa de los dos decks de explosivos.

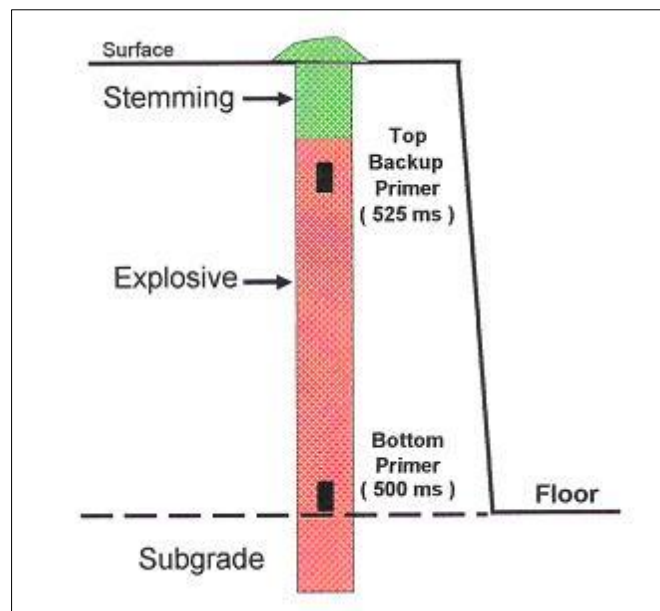
Notar que la cantidad total de explosivos fue reducida en un 17% para el taladro cargado con cámara de aire en el fondo (Figura 3-4), y en un 25% para el taladro con doble cámara de aire (Figura 3-5), lo relativo a la carga típica normal utilizada en la prueba se muestra en la Figura 3-3.

El propósito de estas pruebas en taladros específicos fue:

- Establecer las medidas de control inicial mediante la eliminación de muchas de las variables de diseño de voladura inherentes en disparos a escala total.

- Verificar que el total del explosivo y los sistemas de instrumentación funcionen como se espera, y,
- Verificar que el tapón plástico funcione confiablemente según lo diseñado y permanezca en su lugar dentro del taladro durante las operaciones de carguío de explosivos.

Figura 3-3. Esquema de carguío con columna completa y sobre perforación.



Pero el aspecto más importante que se monitoreo en los taladros de prueba fue cuantificar la velocidad del pistón de compresión y la velocidad de desplazamiento del frente de gas a través de las cámaras de aire en el fondo del taladro.

Figure 3-4. Columna completa de explosivo con una cámara de aire de 0.91 metros en el fondo del taladro y sin sobre perforación.

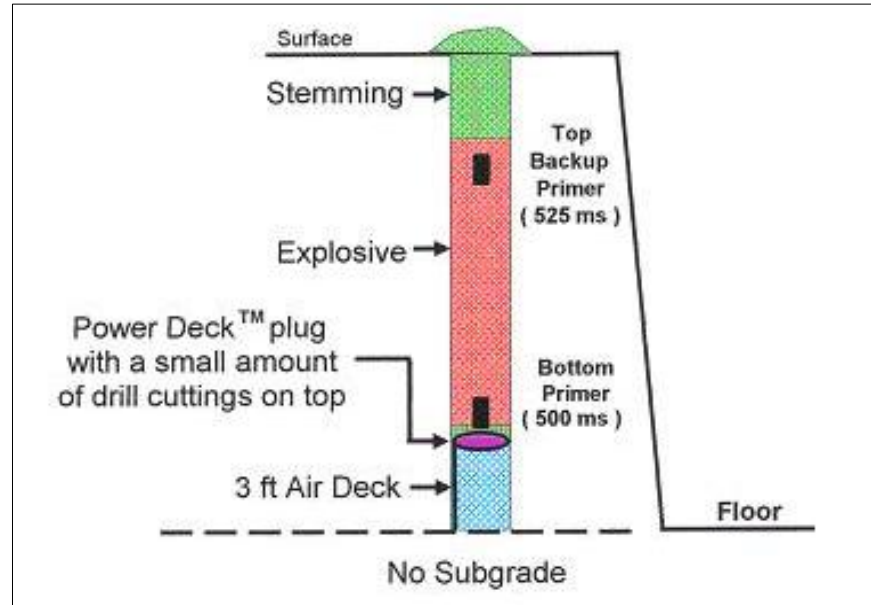
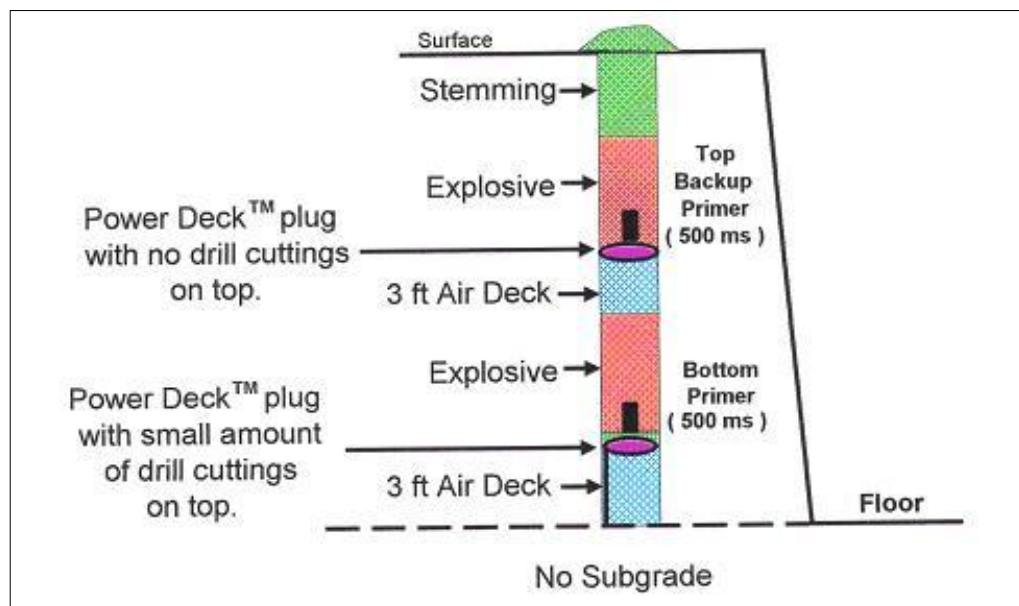
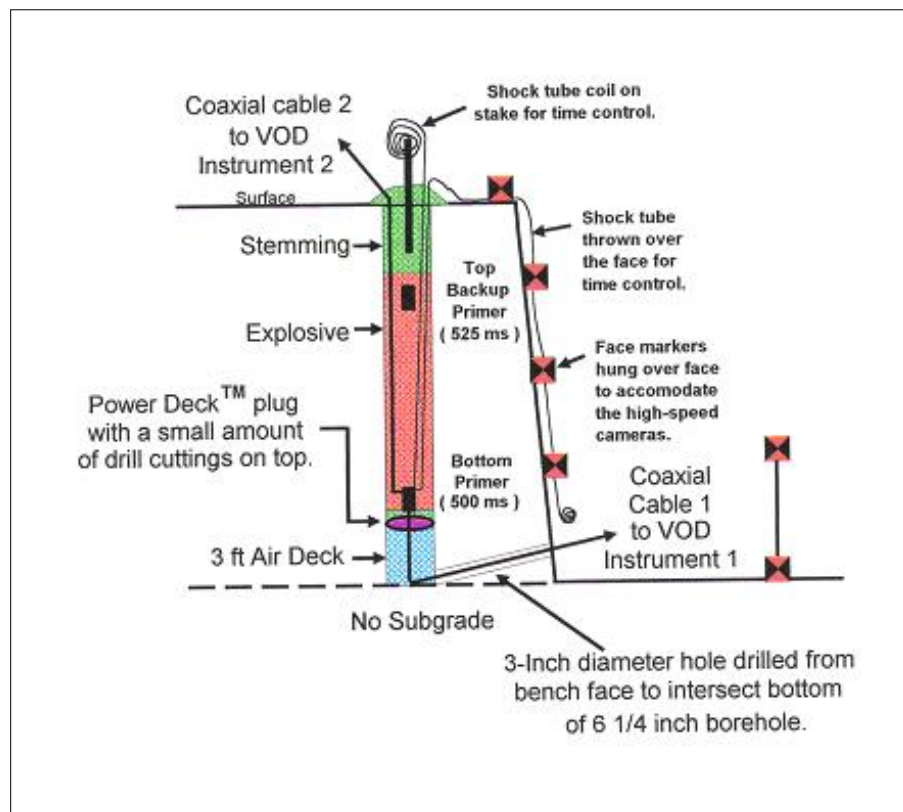


Figura 3-5. Dos cargas de explosivo separado por columna de aire intermedio de 3 pies y una columna de aire en el fondo de 3 pies sin sobre perforación.



Con el fin de conseguir esto, fue necesario perforar un taladro pequeño de 3 pulgadas de diámetro, desde cerca del pie de la cara libre hasta intersectar el taladro vertical de 6 1/4 pulg según lo que se muestra en la Figura 3-6. La intención fue tener un pequeño taladro de 3 pulg atravesando el fondo del taladro vertical y por ende el fondo de las cámaras de aire de 1 metro.

Figura 3-6. Ejemplo de una instrumentación completa en 6 1/4 pulgadas de diámetro de taladro interceptado por un taladro de 3 pulgadas con cable.



- **Sistemas de Instrumentación Usados para el Monitoreo**

Una sofisticada cantidad de Sistemas de Instrumentación para voladuras que utilizan la más alta tecnología fueron empleados por BAI para monitorear los taladros específicos y los disparos a escala total. La instrumentación consistió de

un sistema de cámara de video de alta resolución HRS-1 para inspeccionar el taladro, dos sistemas VODR-1, un sistema de video de alta velocidad Motion Meter 1000, una cámara de alta velocidad LOCAM, el sistema de análisis de fragmentación digital SPLIT-Desktop, un sistema topográfico láser convencional, y varios sismógrafos digitales White Industrial Seismology.

- **Disparos a Escala Total**

Dos disparos de 30 taladros a escala total fueron monitoreados para evaluar las diferencias de los resultados de la voladura entre carguío normal de taladros como el mostrado Figura 3-3 y el carguío de taladros como el mostrado en la Figura 3-4. Los taladros en el disparo a escala total fueron perforados con 1 a 1,3 m de sobre perforación y cargados con una columna completa de explosivos. Los taladros en el disparo con cámaras de aire fueron perforados sin sobre perforación, pero cargados con 16% menos de explosivo y las cámaras de aire de 1,0 m en el fondo. El taco superior fue mantenido igual a 3.66 metros para ambos disparos. El nivel de piso, fragmentación, las vibraciones del terreno y los perfiles de la pila de mineral roto fueron los principales puntos de interés en los resultados de la voladura a escala total.

Todas las otras variables de diseño de la voladura tanto para el disparo normal como para el disparo con cámaras de aire permanecieron constantes. Figura 3-7 ilustra una vista de planta de la malla de perforación y los tiempos acumulados para los retardos utilizados.

Los parámetros de diseño general para ambos disparos fueron: número de taladros = 30, número de filas = 2, malla de perforación (B x E) = 4.27 metros x

4.88 metros, profundidad del taladro = 14.3 – 15.5 metros, y diámetro del taladro = 6 ¼ pulgadas. Ambos disparos fueron realizados en el mismo banco, una de detrás de otra, con el fin de eliminar cualquier influencia geológica estructural.

Ambos disparos fueron también instrumentados para monitorear el tiempo exacto de salida de cada taladro y los resultados del movimiento de la cara libre. Figura 3-8 ilustra uno de los disparos a escala total el cual ha sido completamente instrumentado y preparado para ser disparado.

Es importante notar que previo a la detonación de los dos disparos a escala total, tanto los parámetros de diseño de la voladura como la geometría de la cara del banco fueron totalmente optimizados.

Figura 3-7. Vista en planta del disparo completo y tiempos de secuencia acumulados.

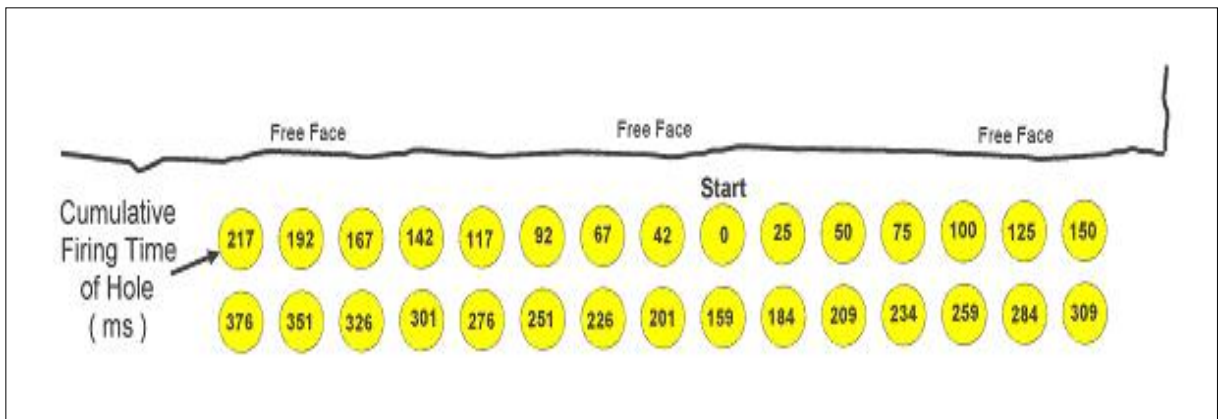
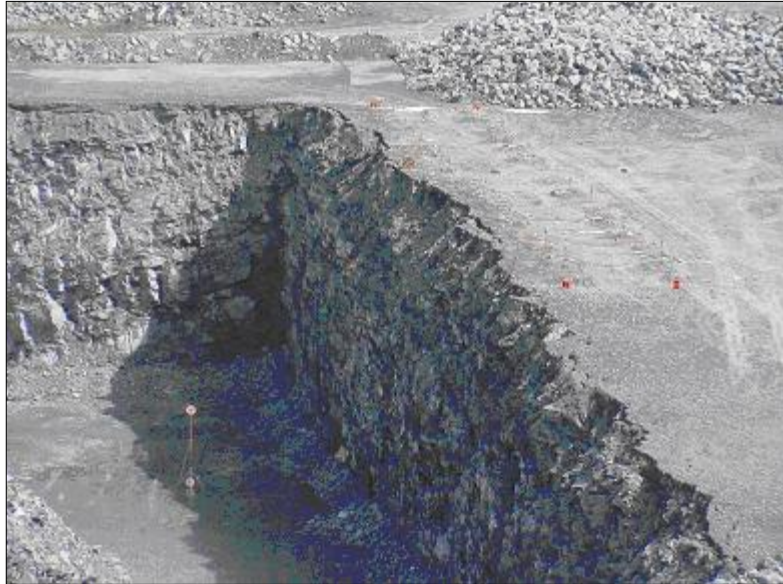


Figura 3-8. Ejemplo de una instrumentación completa en escala normal, listo para el disparo.



3.5.2 Pruebas a escala industrial

Desde principios del año 2005 se dieron inicio a programas de pruebas dirigidos por el autor, en la aplicación de cámaras de aire en distintas operaciones mineras a cielo abierto en el Perú.

El Apéndice H muestra la totalidad de pruebas realizadas, fueron 27 pruebas en un lapso de aproximadamente casi dos años y medio en cinco operaciones mineras de la gran minería, en yacimientos mineros tipo pórfidos, skarn y disseminados de oro.

En la Tabla 3-1, se muestran los principales datos de las operaciones donde se realizaron las pruebas, cabe señalar que los datos de movimiento de material por día y la vida estimada de la mina son datos que corresponden a los años 2005 al 2007, fechas en que se realizaron las pruebas.

Tabla 3-1. Datos generales operaciones mineras donde se realizaron las pruebas con cámaras de aire.

Mina	Zona	Tipo Operación	Mineral que explota	Tipo yacimiento	Consumo Explosivos TM/mes	Tipo Explosivo Utilizado	Mín / des removido TM/día	Vida Estimada de la mina (años)
A	Norte	Cielo abierto	Cu, Zn, Mo	Skarn	3,500	Anfo, Hanfo	400,000	20
B	Norte	Cielo abierto	Au	Diseminado	4,500	Anfo, Hanfo	600,000	5
C	Sur	Cielo abierto	Cu	Porfido	2,000	Anfo	220,000	45
D	Norte	Cielo abierto	Au	Diseminado	1,000	Hanfo	110,000	10
E	Sur	Cielo abierto	Cu	Skarn	1,300	Anfo, Hanfo	200,000	3

En la Tabla 3-2, se muestran en que minas se realizaron cada una de las pruebas detalladas en el Apéndice H, además se indica las características básicas de los diseños de malla, diámetros típicos de cada operación y el número aproximado de taladros que se perfora mensualmente.

Tabla 3-2. Resumen de las pruebas realizadas en cada operación minera.

Mina	Pruebas realizadas en cada mina	Total Pruebas realizadas por mina	Malla		Altura Banco (long. Perfor.)	N° Taladros perforados por mes	Diámetros perforación (pulg)					
			B	E			9	9 7/8	10 5/8	11	12 1/4	
			(m)	(m)								
A	1-3-7-8-9-10-11-12-15	9	7.00 9.00 6.50	8.50 10.50 7.50	15	3,500		X				X
B	2-4-5-6-13-14-16	7	5.20 5.50	6.00 6.35	10-12	15,000	X	X	X			
C	17-18-19-20-21-22	6	10.50	12.12	15	3,150					X	
D	23	1	7.50	8.66	10	3,000	X					
E	24-25-26-27	4	6.50	7.50	15	2,150						X

Como se deduce de la tabla anterior, la técnica se utilizó con éxito en diámetros de perforación desde 9 pulgadas hasta 12 ¼ pulgadas de diámetro de

taladro y en bancos desde 10 metros hasta 15 metros de altura, tanto en desmonte como en mineral y en rocas de dureza suave, media y media-dura.

Se instalaron un poco más de mil setecientos accesorios plásticos para generar un número igual de cámaras de aire, lo que represento aproximadamente el 30% del número total de taladros disparados en esas pruebas y un 33% del tonelaje total roto en las mismas pruebas.

Solo en dos pruebas se redujo la sobre perforación, este paso no lo han dado aun muchas operaciones mineras, sin embargo es un aspecto que se debe de seguir explorando para aplicar ese cambio y comprobar que se puede extraer ese beneficio también.

En todos los caso los niveles de piso esperados fueron alcanzados sin inconvenientes y la fragmentación fue la misma que venía se obteniendo sin el uso de la técnica.

Las pruebas realizadas siguieron el siguiente protocolo:

- Se estableció la línea base de acuerdo a lo enunciado en el punto 3.1.1.
- En base a esta información y de mutuo acuerdo con el usuario se definieron las áreas donde sería más factible poder usar cámaras de aire, siempre se tuvo el criterio de ir de menos a más, es decir:
 - Primero en desmonte, luego en mineral.
 - De la roca más suave hacia la más dura.
 - Del menor impacto a la producción, al mayor impacto.

- Una vez definidas las áreas se coordina con las instancias operativas de la operación y se procede de acuerdo a lo indicado en los Apéndices D y/o E.
- Se efectúan las mediciones de vibraciones durante la voladura (si es requerido).
- Se anotan todos los resultados visuales de la voladura, sean generación de gases, humos, proyecciones de rocas, esponjamiento de la pila, fragmentación superficial.
- Se programan y efectúan seguimientos al proceso de minado de los equipos de carguío de la mina (palas, cargadores), para:
 - Analizar fragmentación de la pila, mediante software de análisis de imágenes.
 - Observar que los niveles de pisos finales después del minado sean los programados.
 - Analizar rendimientos de los equipos de carguío, eso nos dará una idea de cuan duro o suelto puede haber quedado el material por la voladura.
- Finalmente se elaboran los respectivos reportes, realizando estimaciones económicas y técnicas de los beneficios obtenidos.

3.5.3 Resultados obtenidos de las pruebas

- **De las pruebas piloto**

- **Resultados en los Taladros**

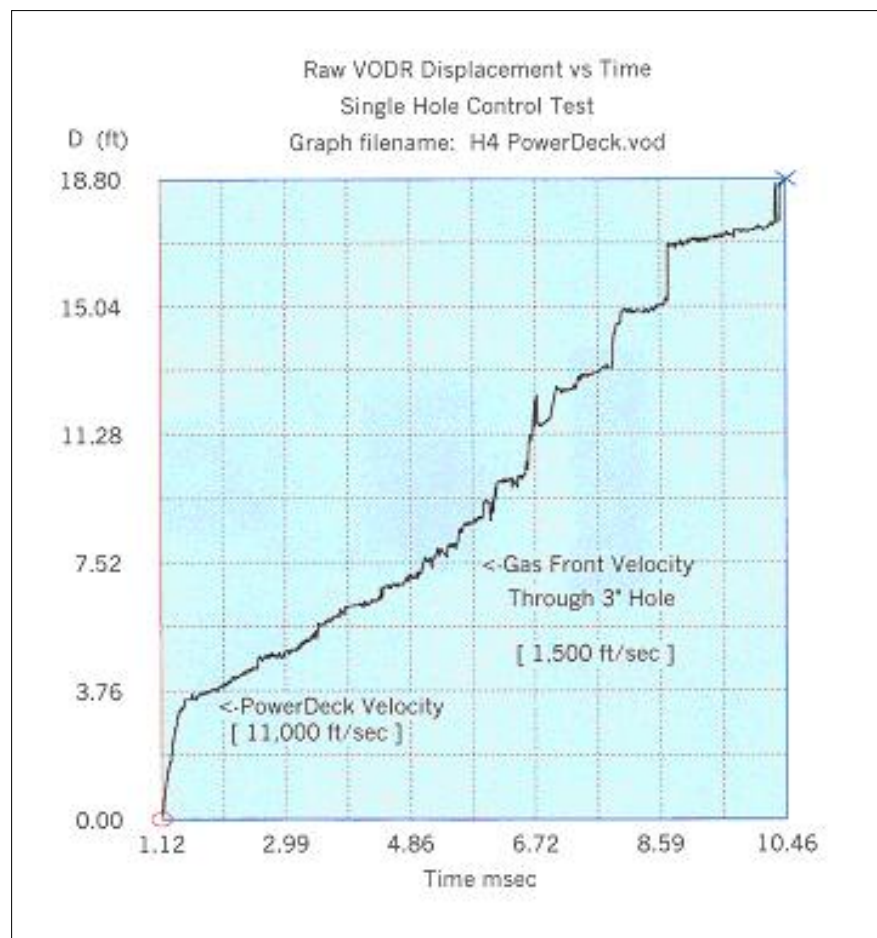
Los resultados de la voladura de los tres taladros ilustrados no mostraron diferencias significativas en términos de fragmentación, niveles de piso, rompimiento en la superficie del siguiente banco, el grado de desplazamiento de la pila de material y la forma del mismo. Esto en cambio tiene un mayor significado en vista del hecho que los taladros contienen cámaras de aire y que se uso entre 17% y 25% menos cantidad de explosivo y sin sobre perforación en la perforación.

Figura 3-9 ilustra un registro de velocidad típica en un gráfico desplazamiento versus tiempo generado por la cámara de aire y la velocidad de desplazamiento del frente de gas a través de una cámara de aire típico de 3 pies en el fondo de un taladro vertical de 6 ¼ pulgadas de diámetro, y luego continuando a través del pequeño taladro de 3 pulgadas e interceptando la cara libre. En este caso, la velocidad del accesorio plástico alcanzo los 11,000 pies/seg. (3,353 metros/seg.), y el frente de gas en expansión a través del pequeño taladro de 3 pulgadas que interseca la cara libre alcanzo aproximadamente 1,500 pies/seg. (457 metros/seg.).

Dependiendo del tipo de explosivo, diámetro del taladro, tipo de roca en términos de su integridad y resistencia, longitud de la cámara de aire,

y la cantidad de masa del detritus (taco) encima del accesorio plástico; la velocidad del frente de gas a través de la cámara de aire en el fondo del taladro, puede variar entre 1,000 a 12,000 pies/seg. (305 a 3,658 metros/seg) aproximadamente. La velocidad del frente de gas a través del pequeño taladro de 3 pulgadas que conecta a la cara libre puede variar solo entre 1,000 a 4,000 pies/sec (305 a 1200 metros/seg). Según nuestra experiencia, esta es la primera vez que alguien realiza este tipo de mediciones en un entorno de voladura a escala total. El significado de estas mediciones serán explicadas posteriormente.

Figura 3-9. Grafico de desplazamiento versus tiempo.



En la figura anterior se muestra la grabación de la señal en el iniciador sobre el accesorio plástico (0.0 pies), continuando a través de la cámara de aire de 1,0 m en el fondo del taladro y atravesando finalmente por el taladro de 3 pulgadas hasta la cara libre.

○ **Resultados de la Fragmentación**

La Fragmentación de los dos disparos a escala total en términos de porcentaje acumulado estándar de material de determinado tamaño es listada en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Resultados de la Fragmentación para Disparo Normal y con cámara de aire.

	<u>Disparo Normal</u>	<u>Disparo con Cámara de Aire</u>	<u>Porcentaje de Reducción con Disparo con Cámara de Aire</u>
Numero de Imágenes combinadas	32	37	
Mínimo Tamaño Medido	2.50 pulg	2.10 pulg	—
Tamaño P20	2.86 pulg.	2.17 pulg	24%
Tamaño P50	6.53 pulg	4.90 pulg	25%
Tamaño P80	11.33 pulg.	8.97 pulg	21%
Máximo Tamaño Medido	25.13 pulg	24.86 pulg	—

La diferencia de mayor importancia en la distribución del tamaño de la fragmentación fue encontrada en los tamaños (mallas) P20, P50 y P80. En todos los casos, los resultados del disparo con la cámara de aire significaron una reducción en el tamaño de la fragmentación de aproximadamente 24% para la malla P20, 25% para la malla P50 y 21%

para la malla P80. Así la distribución del tamaño de la fragmentación fue reducida substancialmente en el disparo con cámara de aire.

No se encontraron diferencias significantes entre ambos disparos para el rango de tamaño más grande entre 24 y 25 pulgadas, debido a que el máximo tamaño fue originado básicamente por el sistema de fracturas estructurales. Para la calibración de nuestra prueba, el sistema de fragmentación digital fue insuficiente para obtener el contenido de finos debajo de las 2 pulgadas.

El análisis por fragmentación digital es extremadamente subjetivo y es propenso a errores experimentales, sistemáticos, de muestreo y análisis. Para minimizar estos errores, se utilizó más de 2 meses y medio para calibrar el sistema de fragmentación digital. La calibración tomó en cuenta el índice de imágenes combinadas desde el tope de la pila de material y en las secciones transversales durante la fase minado (retiro del material con la pala), comparaciones contra tamaños de pilas conocidos, las características de la pila de material, el tamaño relativo de la imagen respecto de los controles dimensionales y los efectos del clima.

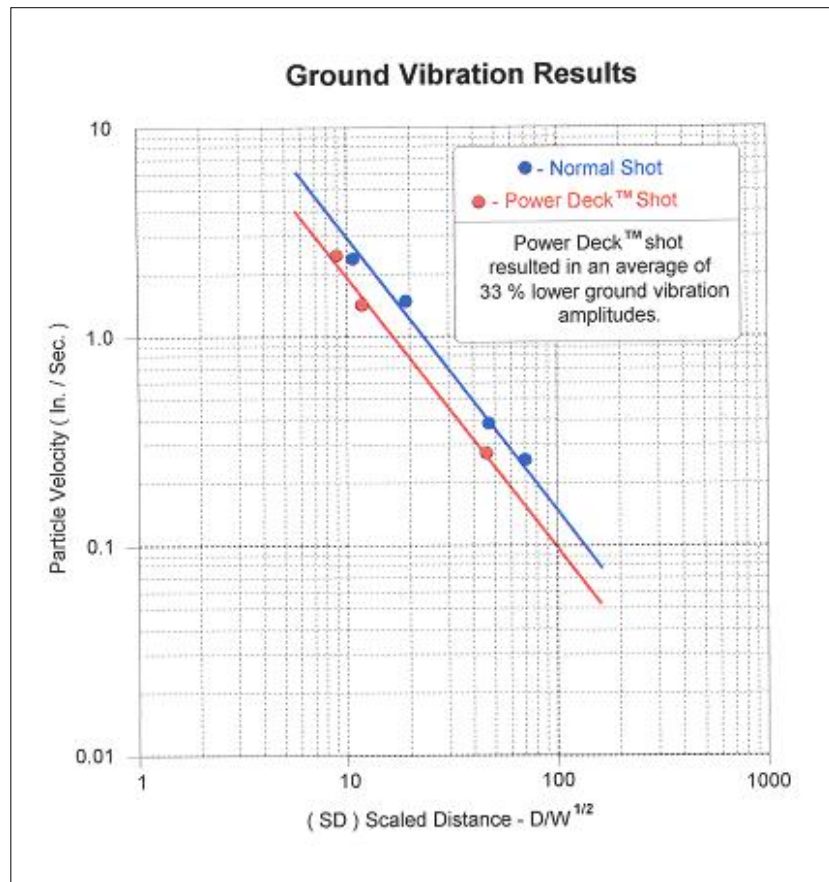
○ **Resultados de las Vibraciones del Terreno**

Los Resultados de las Vibraciones del Terreno comparando los disparos Normal y con cámara de aire son ilustradas en la Figura 3-10 como un dibujo de puntos de valores de velocidad de partícula versus distancia escalar. La distancia escalar es definida en este caso como la

distancia dividida por la raíz cuadrada de la máxima cantidad de explosivos por retardo. Este esquema es una muy buena manera de normalizar la data para propósitos de comparación, desde que la distancia entre los disparos de prueba y la ubicación de los sismógrafos, así como el máximo peso de los explosivos varían ligeramente. Las ubicaciones de los sismógrafos respecto de los disparos varían entre 200 (61 m) y 2,000 pies (610 m) en arreglos lineales.

La amplitud de las vibraciones fue reducida en un promedio de 33% para todas las ubicaciones, para distancias dadas y un peso máximo de explosivos por retardo para el disparo con cámaras de aire. Un 33% de reducción en las amplitudes es bastante significativo en vista de las características de atenuación debido a la distancia. También el disparo con cámaras de aire no activo el sismógrafo el cual estaba muy lejos del disparo, aproximadamente a 2,000 pies, mientras que el disparo Normal si lo activo.

Figura 3-10. Velocidad de partícula versus distancia escalar para dos disparos completos.

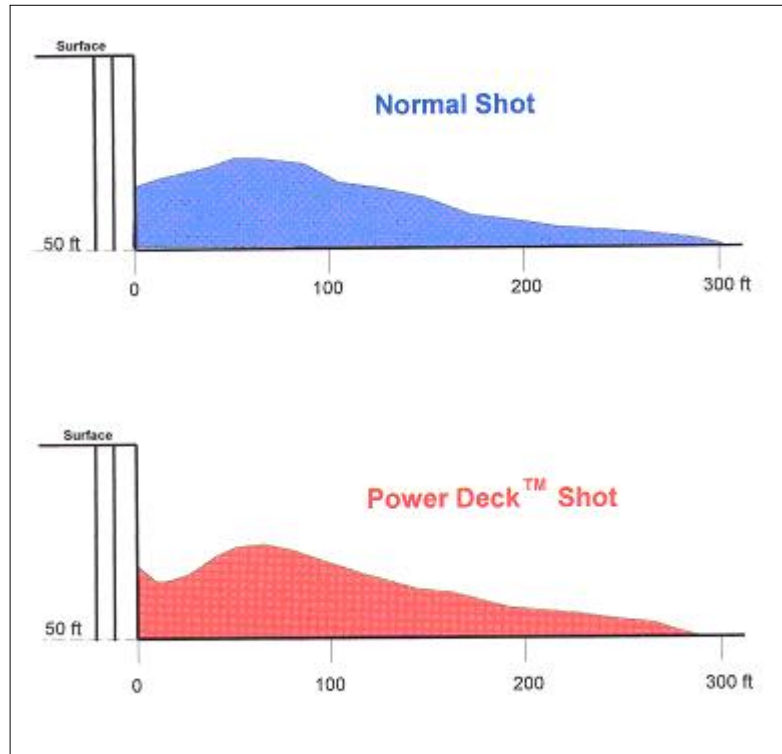


○ Desplazamiento de la Pila de Material

La forma de la pila y las distancias después del movimiento fueron medidas para disparos normales y disparos con cámaras de aire. La comparación de los resultados se muestra en la Figura 3-11. El disparo normal desplazó la pila de material una distancia mayor a los 300 pies (91 m), y el disparo con cámaras de aire desplazó la pila una distancia mayor a los 280 pies (85 m). Básicamente, no existen diferencias significativas en el desplazamiento de la pila entre los disparos normal y

con cámaras de aire aunque el disparo con cámaras de aire uso 16% menos explosivo por taladro.

Figura 3-11. Forma de la pila para ambos disparos completos.



El centro de gravedad para cada pila de material fue básicamente el mismo a aproximadamente 80 pies (24 m). Sin embargo el perfil de la pila de material vario ligeramente, la máxima altura de cada pila de material fue básicamente la misma, aunque el disparo con cámaras de aire produjo un poco más de energía dirigida contra la pared del tajo.

○ Nivel del Piso de la Cantera

Tanto el disparo normal como el disparo con cámaras de aire obtuvieron pisos planos con diferencias no significativas. Pero, lo que si

fue muy significativa es que el disparo con cámaras de aire no uso sobre perforación en la perforación (por ejemplo, 0.90 a 1.20 metros menos de perforación por taladro) y 16% menos explosivo en cada taladro.

En suma, el disparo con cámaras de aire no altero la superficie del siguiente banco.

- **De las pruebas a escala industrial**

En las seis (6) pruebas (Pruebas 2, 4, 5, 6, 13 y 14 del Apéndice F) que se realizaron en una operación minera de oro de la gran minería se han instalaron 434 accesorios plásticos, rompiéndose alrededor de 316,000 t de material.

Todas las pruebas fueron realizadas bajo la supervisión y orientación técnica de parte del autor y en cercana colaboración con la supervisión de la mina.

- **Situación inicial: Voladura tradicional.**

	Banco	Malla B x E (m x m)	Factor de Carga (Kg/t)	Sobre Perfor. (m)	Observaciones
Situación Inicial Sin cámara	3992-334	5.2 x 6	0.447	1,5	Hubo presencia de agua, por lo tanto el diseño de carga de los taladros, consideraba el uso de HA64

- **Evaluación teórica: Se disminuye explosivo y se instala cámara de aire el fondo.**

	Banco	Malla B x E (m x m)	Factor de Carga (Kg/t)	Sobre Perfor. (m)	Observaciones
Prueba con Cámara aire	3992-334	5.2 x 6	0.350	1,5	Se cargaron todos los taladros con ANFO, en reemplazo del HA64, que se usaba normalmente por la presencia de H ₂ O, ya que al usar la cámara, se evito el uso del HA64. Se creó 1 m de cámara de aire + 0.3m de detritus sobre el accesorio

- **Resultados en ahorros de explosivo y perforación.**

	Factor de Carga			
	Generado x Ahorro de Explosivos		Generado x Ahorro Explosivo y Perforación	
	Reduciendo ANFO	Reduciendo HA 64	Reduciendo ANFO	Reduciendo HA 64
Sin cámara	0.264	0.447	0.264	0.447
Con cámara de aire	0.207	0.350	0.163	0.276
Porcentaje Reducción	22%	22%	38%	38%

- **Evaluación de resultados inmediatos**

En la secuencia de imágenes que se muestra a continuación, se puede apreciar el resultado de la fragmentación, la misma que estuvo dentro de los estándares normales de fragmentación para el carguío.



En resumen los resultados fueron los siguientes:

Prueba 2, fragmentación dentro de lo normal, el nivel del piso se obtuvo sin inconvenientes.

Prueba 4, fue minada sin ningún inconveniente, se obtuvieron los niveles de piso deseado.

Prueba 5, fue minada sin novedad; se alcanzo el nivel del piso sin inconvenientes, en la presente investigación se hace un análisis del resultado de esta voladura.

Prueba 6, 13 y 14 también fueron minadas, sin que los niveles de piso presentaran elevaciones respecto de lo esperado.

○ **Evaluación de cotas de piso.**

En la Figura 3-12, se muestra el reporte diario de cotas de piso, como se observa en la línea resaltada correspondiente al proyecto donde se realizo la prueba con cámaras de aire, se indica que el nivel de piso debe de ser rellenado en 0.80 m, lo cual es un claro indicativo que la voladura tensional funciono sin ningún problema y más bien excedió los resultados esperados.

Figura 3-12. Registro de cotas de piso

Mine Operations						
Daily Grade Report, Zona Este						
Date: 25-02-05						
TAJO						
Pala	Pit/Location	Design Grade	Actual Grade	Difference (Design-Actual)	HPGPS	Difference (Actual-HPGPS)
1	YW	399 2.00	399 2.00	0.00	R 1.80m.	
2	YW	399 2.00	399 2.00	0.00	R 0.80m.	
3						
4	YS	385 2.00	385 2.00	0.00		
5						
6						
Cargador						
1						
4						
6						
7						
8						
9	YS	385 2.00	385 2.00	0.00		
10						
11						
12						
13						
14	YS	385 2.00	385 2.00	0.00	0.00	
15	Cráter	393 2.00	393 3.50	-1.50		
16						
17	YW	386 2.00	386 2.00	0.00		

○ **Evaluación de Productividad de Palas**

La productividad de la Pala 2, que es el equipo que mino el proyecto 3992-334, no muestra disminución durante el periodo de tiempo que la Pala paso por el área de la prueba, como se puede ver en la Figura 3-13.

Figura 3-13. Productividad de palas

ESTADÍSTICAS DE TAJO													
Productividad de Cargadores por Hora - EQPS													
24-feb-05 B a las 08:00 Con Guardia B													
Cargador	Total	21:00:00	22:00:00	23:00:00	0:00:00	1:00:00	2:00:00	3:00:00	4:00:00	5:00:00	6:00:00	7:00:00	8:00:00
LD014	1,400	0	0	0	1,552	0	0	1,190	1,021	895	1,331	1,452	1,769
LD015	1,766	1,715	1,709	1,917	1,878	1,817	1,732	1,553	1,518	1,605	2,111	1,803	1,771
LD016	2,302	2,732	2,089	2,127	2,307	0	0	0	0	0	0	0	0
LD017	1,885	2,295	1,671	1,642	1,751	2,067	1,412	1,535	1,916	1,877	1,988	2,557	1,925
SH001	4,796	5,109	4,832	4,893	4,823	4,503	4,320	4,818	6,953	5,153	4,350	4,896	4,170
SH002	4,607	4,218	4,892	4,913	5,261	4,389	0	4,823	4,408	5,089	4,678	4,052	4,151
SH004	2,932	1,045	2,389	2,944	2,842	2,875	2,712	3,062	3,227	3,187	4,450	3,790	2,884

CAPITULO IV

ANALISIS DE LOS BENEFICIOS ECONOMICOS

4.1 BENEFICIOS QUE SE OBTIENEN DIRECTAMENTE

La evaluación económica producto de las pruebas a escala industrial nos arroja que la utilización de las cámaras de aire puede traer grandes beneficios a las operaciones que logren implementar con éxito su aplicación.

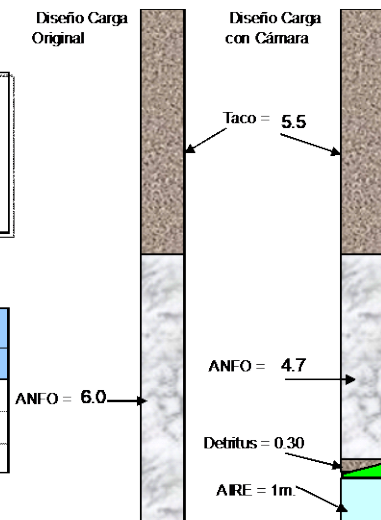
En nuestro caso de estudio se está simulando los ahorros cuando se utiliza ANFO como explosivo primario, sin embargo se experimentarían mayores beneficios aun cuando se utilicen explosivos más caros, tales como las mezclas de HEAVY ANFO. Siempre dependiendo del nivel de precios actual para cada explosivo, los ahorros cuando por ejemplo se tenga que reemplazar alguna mezcla puede ser tanto como el 100% del ahorro generado cuando solo se reemplaza el ANFO.

El análisis económico que se detalla a continuación, puede llegar hasta niveles de 30 dólares por taladro, esto nos confirma los extraordinarios beneficios que se lograron con la aplicación sistemática y planificada de las cámaras de aire.

Fecha 24-feb-05	Tipo Explosivo usado ANFO
Banco YA 3992	Costo Explosivo US\$/t 450.43
Voladura 334	Densidad Lineal Kg-exp/m 32.03
Tonelaje Roto 35,647	Costo Perforación US\$/m 4.00
N° Taladros 49	Costo accesorio US\$/pz 6.30

	Profundidades Utilizadas en los Cálculos			
	Prof. Estaca (m)	Taco (m)	Aire (m)	Explos.(m)
Sin cámara	11.50	5.50	0.00	6.00
Con cámara	11.50	5.50	1.30	4.70
Con cámara (1)	10.50	5.50	1.30	3.70

(1) Reduciendo 1m la Sobre Perforación



EVALUACION ECONOMICA

	Explosivo				Perforación			
	Kg	US\$	US\$/t	US\$/Tal.	m	US\$	US\$/t	US\$/Tal.
Sin cámara	9,417	4,242	0.119	86.6	564	2,254	0.063	46.0
Con cámara	5,807	2,616	0.073	53.4	515	2,058	0.058	42.0
Ahorro	3,610	1,626	0.046	33.2	49	196	0.005	4.0

	TAPONEX				Costos Totales Disparo US\$	Costos Totales Unitarios	
	Piezas	US\$	US\$/t	US\$/Tal.		US\$/t	US\$/Tal.
Sin cámara	0	0	0.000	0.00	6,496	0.182	132.6
Con cámara	49	309	0.009	6.30	4,982	0.140	101.7
Ahorro	-49	-309	-0.009	-6.30	1,513	0.042	30.9

Incluye Ahorro Reducción Sobre Perforación

Análisis de Ahorros con distintos tipo de Explosivos, sin reducir Sobre Perforación

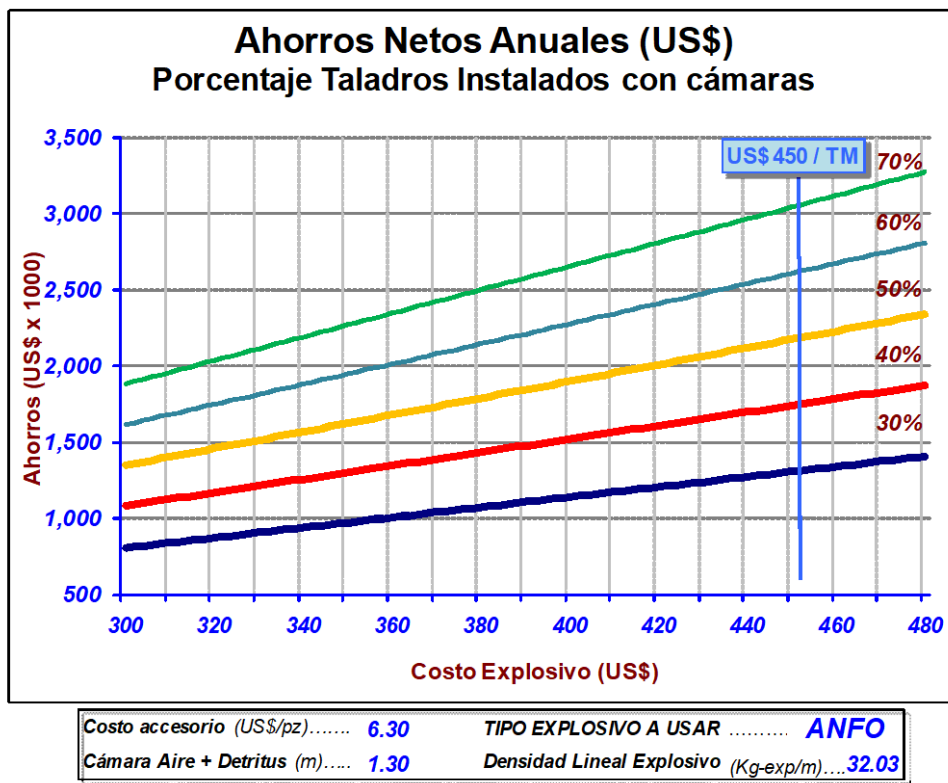
Tipo Explosivo Utilizado	Costo Explosivo (US\$/t)	Densidad Lineal Explosivo (Kg-exp/m)	Cámara Aire + Detritus (m)	Ahorro Bruto en Costo Explosivos (US\$/Tal)	Costo accesorio (US\$/pz)	Ahorro Neto en Costo Explosivos (US\$/Tal)	Ahorro Neto ANUAL (2) en Costo Explosivos (US\$)
Anfo	450.43	32.03	1.30	18.76	6.30	12.46	1,315,420
HA 45	414.23	52.57	1.30	28.31	6.30	22.01	2,323,931
HA 45 sensib.	440.82	52.57	1.30	30.12	6.30	23.82	2,515,781
HA 64	402.17	54.21	1.30	28.34	6.30	22.04	2,327,567
HA 73	394.13	54.21	1.30	27.77	6.30	21.47	2,267,716
HA 73 sensib.	435.48	54.21	1.30	30.69	6.30	24.39	2,575,476

(2) El Ahorro Anual se ha calculado considerando 40% de los taladros como ser factibles de colocar cámaras.

4.2 ESCALAMIENTO ECONÓMICO DE LOS RESULTADOS

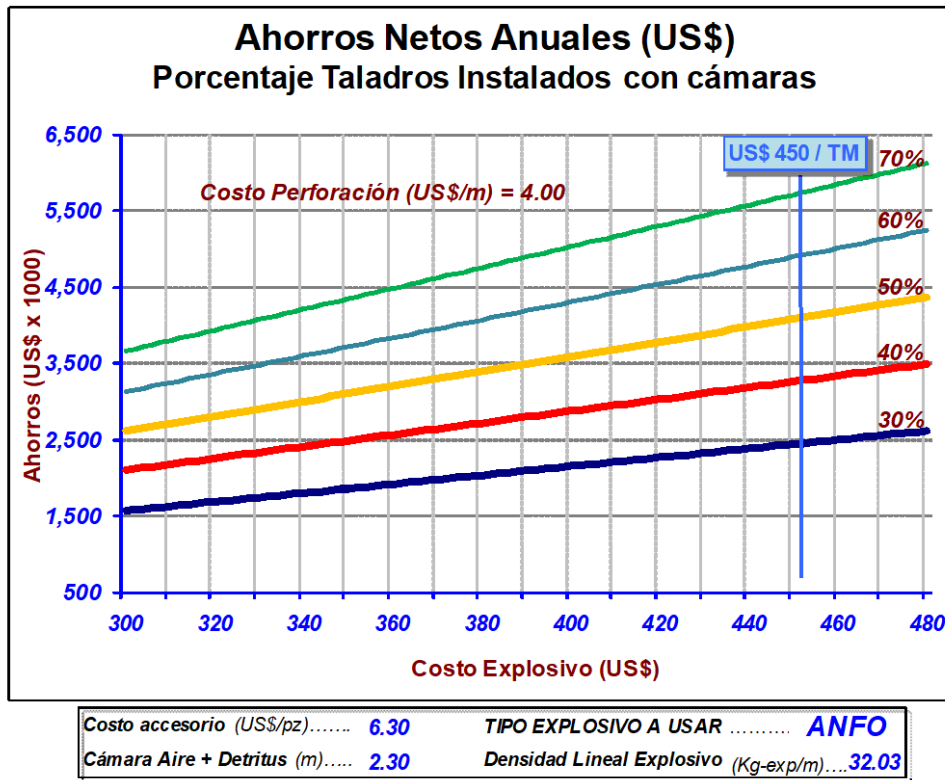
La Figura 4-1 muestra los Ahorros Netos que se obtendrían según la cantidad de taladros que se instalen usando cámaras de aire en la operación minera de oro de la gran minería, estos cálculos han sido realizados con los niveles precios correspondientes al año 2005, en la actualidad los precios aun permanecen un poco por encima de estos niveles.

Figura 4-1. Proyección de ahorros netos en un año



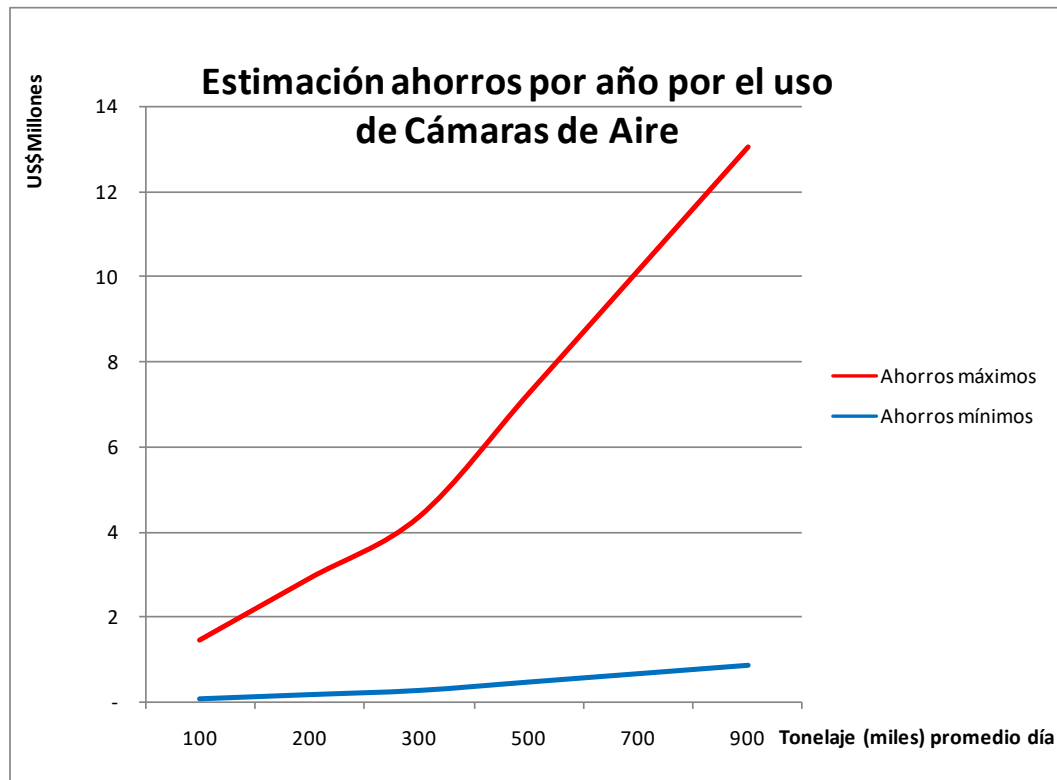
La Figura 4-2 nos muestra las mismas variables, solo se ha variado un (01) metro más de ahorro tanto en explosivos como por la implementación futura de la reducción de la sobre perforación.

Figura 4.2 Proyección de ahorros incluyendo ahora un metro de perforación



Así mismo, del Apéndice H observamos que los ahorros unitarios por tonelada rota están en el rango de US\$ 0.0028 a US\$ 0.0375, si extrapolamos estos valores a los volúmenes de material que se mueven diariamente en promedio en las operaciones mineras a cielo abierto que hay en Perú, encontraremos que los ahorros pueden fluctuar entre los 100 mil a 900 dólares por año como mínimo y hasta el rango que va desde los 1,3 millones a los 12 millones de dólares año como máximo, en estos casos dependiendo de los precios de los explosivos, el precio propio del accesorio utilizado y el volumen de material que mueva la mina (Ver Figura 4-3).

Figura 4-3. Rango de ahorros proyectados con los resultados de las pruebas realizadas a escala industrial.



CONCLUSIONES

1. Extraídas de las pruebas pilotos desarrolladas por BAI (Chiappetta 2004).
 - No se encontraron diferencias significativas con las pruebas de caracterización en taladros específicos en términos de fragmentación, desplazamiento de la pila de material, y rotura de los pisos o superficie del siguiente banco. Pero los dos taladros tanto el que tenía un sola cámara de aire como el que tenía doble cámara de aire, alcanzaron los mismos resultados sin sobre perforación en el taladro y con 17 a 25% menos consumo de explosivos, respectivamente. Esto implica que ambos taladros con cámaras de aire cargados con menos explosivos y sin sobre perforación fueron considerablemente más eficientes que una columna con más explosivos y con sobre perforación.
 - En referencia a los disparos a escala total tanto Normal como con cámara de aire, el disparo con cámaras de aire resultó con 33% menos vibraciones en todas las ubicaciones monitoreadas entre 200 a 2,000 pies de distancia.

Esta reducción permite a la operación minera mantener un margen de seguridad de alta aceptación o permite grandes cantidades de explosivo por retardo mientras se mantiene el mismo nivel de vibración. En otras partes del mundo, las vibraciones fueron exitosamente reducidas entre un 10% a un 75%.

- En referencia a la fragmentación, el disparo con cámara de aire obtuvo entre 21 al 25% de mejoras para las mallas entre P20 a P80 de porcentaje acumulado de pase de material. Esto puede resultar en ahorros sustantivos en los costos, menos desgaste y roturas en el revestimiento de las trituradoras e incremento del material procesado. No se encontraron diferencias significativas entre los dos disparos a escala total respecto de los fragmentos mayores a 24 pulgadas, debido a que ellos fueron influenciados por el sistema principal de fracturas estructurales en el macizo rocoso.
- En referencia al piso de la cantera donde se realizó la prueba, no se encontraron diferencias significativas entre los disparos Normal y con cámara de aire. Ambos disparos obtuvieron pisos planos equivalentes. Tanto la forma como el máximo desplazamiento de la pila de material para ambos disparos fueron esencialmente los mismos. El hecho de que el disparo con cámara de aire usó 16% menos explosivos en total y sin sobre perforación en el taladro (3 a 4 pies menos por taladro) indica claramente que el disparo con cámara de aire fue considerablemente más eficiente que el disparo Normal.

- Para condiciones específicas de resistencia de roca, explosivo y diámetro de taladro, la presión total en el fondo de un taladro con cámaras de aire puede ser controlada con el sistema Tapón plástico o bolsa auto inflable para variar de 2 a 7 veces mayor que la presión creada por una columna completamente cargada de explosivos; pero solo cuando la apropiada masa del tapón y la longitud de la cámara de aire son correctamente calculadas. La Energía Cinética entregada en el fondo de un taladro para las mismas condiciones puede ser variada aproximadamente entre 50 a 100 veces más. Esto permite que el nuevo sistema de voladura pueda ser usado en formaciones de roca desde muy suaves hasta muy duras.

2. Obtenidas de las pruebas a escala industrial (Febrero 2005).

- Las tres primeras pruebas resultaron satisfactorias respecto del nivel de piso logrado, ya que no existen reportes de pisos elevados o cambios en los resultados habituales de las voladuras, ni el rendimiento promedio de las palas, tal como se constato con el disparo 3992-334.
- De las seis pruebas realizadas se han minado 59% aproximadamente de las 315,374 TM rotas usando el accesorio plástico. Sin ningún inconveniente hasta el momento.
- Se consigue un ahorro, por concepto de menor consumo de explosivos, de US\$ 22,04 /Tal ó US\$ 0,03 / TM, cuando se reduce la carga de HANFO dentro del taladro, este ahorro se aplica para el caso de los taladros que tienen agua y en los cuales se solía cargar con HA64.

- En la actualidad la empresa minera está sustituyendo el uso de HANFOs por solo ANFO, considerando este escenario, el ahorro sería de US\$ 12.46/Tal ó US\$ 0,017/TM.
- Considerando que se reduce en un metro la sobre perforación y se coloca el accesorio plástico a un metro del fondo, y siempre cargando con ANFO, los ahorros son ahora considerables: US\$ 30.88 /Tal ó US\$ 0.043/TM, para este cálculo se ha asumido un costo de perforación de US\$ 4.00/m.
- El tipo de roca en que se realizó la prueba es aproximadamente el 40 % de la mina, si en este mismo porcentaje se usa cámaras de aire, el ahorro anual sería de aproximadamente US\$ 1'300,000 / año, cuando solo se reduce un metro ANFO.
- En el caso que se redujera un metro de sobre perforación, el ahorro en explosivos (un metro más) y perforación ascendería a US\$ 3'250,000 /año.
- Cabe señalar que en caso que se reduzcan otros tipos de explosivos (HEAVY ANFOS), los ahorros serán aún mayores.
- Así mismo, conforme se aumente el porcentaje de taladros a cargar instalando las cámaras de aire, los ahorros se harán cada vez mayores.
- En el proyecto (malla) que se detalla en el análisis, los taladros estaban en promedio muy cerca de la profundidad requerida por el corte, la pala logra el piso, cota promedio 3992.00 - 0.80m.

- El factor de carga se reduce en 22%, solo cuando reducimos un metro en el consumo de explosivos, cuando agregamos reducción de la sobre perforación la disminución del factor de carga alcanza el 38%.

RECOMENDACIONES

1. Es importante continuar evaluando el uso de cámaras de aire en otros tipos de roca, y cada vez que se decida implementar su utilización en una mina diferente, para así finalmente decidir donde será factible de usar habitualmente.
2. Es de suma importancia tener cuidado con la correcta postura del accesorio plástico, ya que de ello depende que la cámara de aire funcione.
3. Es de máxima atención, el cuidar que los taladros sean medidos correctamente, de modo de tener datos fidedignos para evaluar los ahorros que generara el uso de cámaras de aire con el accesorio plástico.
4. Cuando exista presencia de detritus húmedo o con barro, el cual será usado como peso para que descienda el accesorio plástico, es pertinente cuidar que éste material que se agregara al accesorio plástico esté lo más seco posible, de manera de evitar que el accesorio se voltee al llegar al límite de la cuerda.

5. En todos los casos en que instalemos el accesorio plástico, es necesario cumplir con el procedimiento de instalación, sobre todo en el paso que considera agregar solo un tercio de la capacidad del accesorio plástico con detritus, así como el paso subsiguiente el cual indica que el material que se debe de agregar al accesorio plástico ya en su posición final dentro del taladro, deberá de ser agregado en forma lenta, evitando que caigan piedras pesadas, tierra húmeda o cualquier material que pueda voltear el accesorio plástico ya en su posición final.
6. Las dos observaciones anteriores es imperativo cumplirlas adecuadamente, de manera de asegurar la correcta formación del conjunto Pistón de compresión = accesorio plástico + Detritus, el cual nos proporciona la masa necesaria para que todo el dispositivo funcione en la compresión del aire dentro de la cámara.
7. En vista de los buenos resultados obtenidos la empresa minera emprendió una campaña de uso intensivo de cámaras de aire, aun cuando implementaron el cambio de diámetro de perforación a 10 5/8"; hoy además de utilizar el accesorio del tipo tapón plástico, también utiliza el de tipo bolsas auto inflables, y de esta manera cubre casi todas las demandas operativas y no desaprovecha el beneficio que otorga el aplicar las cámaras de aire.

GLOSARIO

DECK DE EXPLOSIVO: Longitud de carga de explosivo dentro de un taladro que está separada de otra carga dentro del mismo taladro, mediante material inerte (detritus, cartón, madera, plásticos) o por una cámara de aire o de agua.

FLY ROCK: Por su denominación en inglés, nombre que se le dan a las rocas proyectadas por una voladura; su ocurrencia se debe principalmente a una sobre carga de explosivos en un taladro o a un tapado inadecuado de la columna explosiva, o una combinación de ambos.

PISTÓN DE COMPRESIÓN: Conjunto conformado por el accesorio que crea la cámara de aire mas una cantidad de detritus proveniente de la perforación.

VOLADURA TENSIONAL: Nombre mediante el cual se da por llamar al método en el cual utilizamos las cámaras de aire más el pistón de compresión, para crear nuevas fuerzas de tensión que incrementan el proceso de fragmentación en una voladura de rocas.

BIBLIOGRAFIA

ARAYA, E.

- 2008 “*Cámaras de Aire en Minería Subterránea*”
International Technologies
VIII Jornadas de Tronadura – ASIEX, 20-21 Nov.
Pucón - Chile

BUSSEY, J., y BORG, D.G.

- 1988 “*Presplitting with the new air deck technique*”
Proceeding of the 14th Conference on Explosives and Blasting Technique.
Society of Explosives Engineers Annual Meeting, Jan. 31-Feb. 5,
Anaheim, California, pp. 197-217.

CHIAPPETTA, R.F. y MEMMELE, M.E.

- 1987 “*Analytical high-speed photography to evaluate air-decks, stemming retention and gas confinement in presplitting, reclamation and gross motion studies*”
Proceeding of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Society for Experimental Mechanics
Bethel, CT, USA, pp. 257-301.
- 2004 “*New Blasting Technique to Eliminate Subgrade Drilling, Improve Fragmentation, Reduce Explosive Consumption and Lower Ground Vibrations*”
Proceedings of the 30th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique
New Orleans, Louisiana
ISEE

CLEETON, J.

- 1997 “*Air-deck techniques, Improvements in costs and efficiency linked with the use of gas bags*”
Institute of Quarrying
Doncaster College, UK

CORREA, C.

2000 *“Utilización de cámaras de aire para la reducción de pasaduras en Escondida”*
Jornadas de Tronadura - ASIEX

FOURNEY, W.L., BARKER, D.B. y HOLLOWAY, D.C.

1981 Model studies of explosive well stimulation techniques
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and
Geomechanics Abstracts,18
pp. 113-127

JHANWAR, J. C. y JETHWA, J. L.

1999 *The use of air decks in production blasting in an open pit coal mine*
Geotechnical and Geological Engineering 18:
Kluwer Academic Publishers. Netherlands, pp. 269-287, 2000

KNOX

1893 *German Patent Specification*
No. 67,793

KONYA, C. J. y ALBARRAN E.

1998 *Diseño de Voladuras*
1ra. Edición, pp 30

LIU, L. y KATSABANIS, P.D.

1996 *Numerical Modelling of the effects of air decking/decoupling in production and controlled blasting.*
Proceedings of the Fifth International Symposium on Rock Fragmentation
by Blasting, Montreal, Canada, Mohanty,
B, Balkema, A.A. (eds), Rotterdam, pp. 319-330.

MELNIKOV, N. V. y MARCHENKO L. N. ed.

1971 *“Effective methods of applications of explosion energy in mining and construction”*
12th Symposium Dynamic Rock Mechanics (New York: AIME).
pp. 359-378.

MOXON, N.T., MEAD, D. y RICHARDSON, S.B. ed.

1991 *Reducing blasting costs using air decks. The do's and don'ts.*
Third high-Tech Seminar - Blasting Technology, Instrumentation and
Explosives Applications, San Diego, California. Section 4

PERSSON, PER-ANDERS, HOLMBERG, R. y LEE, J.

1994 *Rock Blasting and Explosives Engineering*
CRC Press LLC. Chapter 4. Chapter 11, pp 305-315

PETERSON, KEVIN y KING, MARLYN

2002 *Benefits of Power Decks in Blasting*

Proceedings of the Twenty-Eighth Annual Conference on Explosives and
Blasting Technique

Las Vegas, Nevada

ISEE

ROWLANDS M.D.

1988 “*Separating explosive charges with air gaps to improve fragmentation
whilst reducing explosive usage*”

Proceeding of The Second Surface Mining, Drilling and Blasting Research
Seminar

Dysart, Australia, pp. 85-93.

APENDICE A

Resultados de fragmentación, rendimiento de pala y nivel final del piso, de pruebas en Escondida

Tabla de datos N° 1

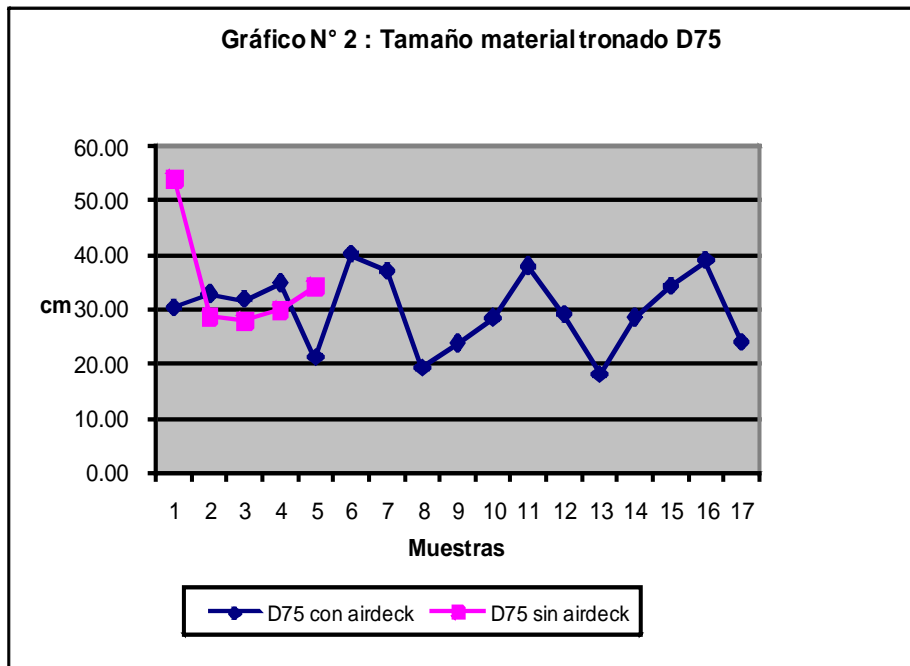
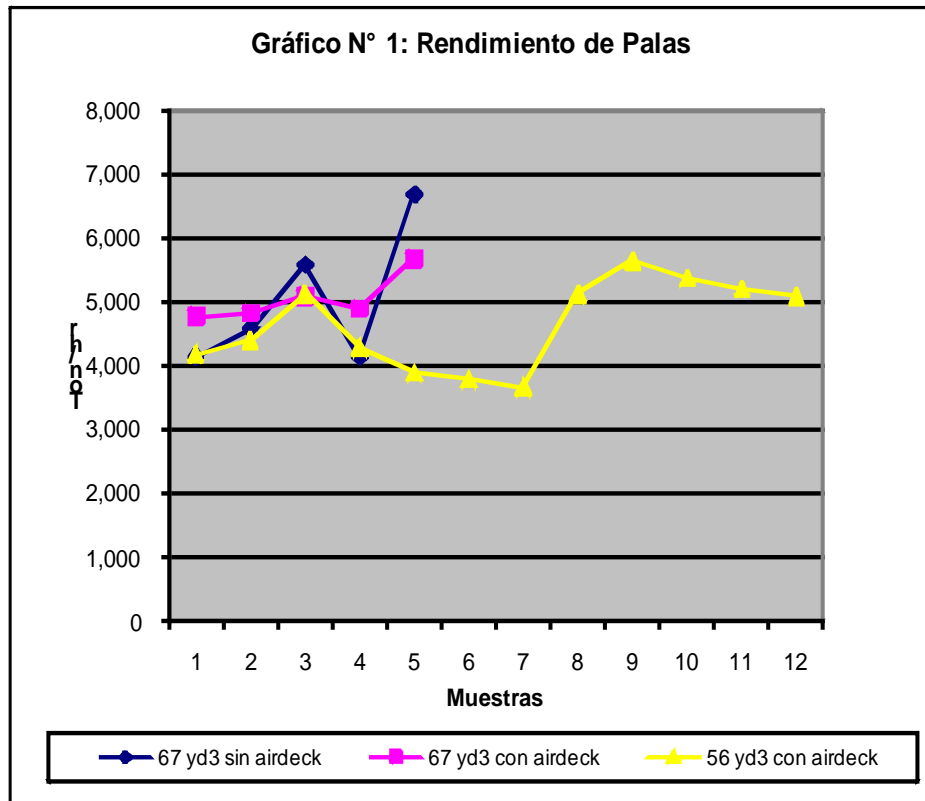
BANCO	TONELAJE	FC (GR/TON)	N° POZOS	PROFUNDIDAD (M)	BLENDEX-930 (KG)	ANFO (KG)	TACO (M)	D75 (CM)	REND. PALA TON/HR	DESNIVEL PISO (M)
3025	324.580	160	77	17,0	350	200	7,0	28,68	4.592	+0,7
3025	161.225	181	54	17,0	350	200	6,0	27,83	5.599	+0,5

Tabla de datos N° 2

BANCO	TONELAJE	FC (GR/TON)	N° POZOS	PROFUNDIDAD (M)	BLENDEX-930 (KG)	TACO (M)	D75 (CM)	REND. PALA TON/HR	DESNIVEL PISO (M)
3025	276.972	110	79	14,0	390	6,0	30,32	4.776	0,0
3025	118.421	109	36	13,5	360	6,0	39,09	4.195	-0,8
3025	234.423	102	65	13,5	360	6,0	32,68	4.834	+0,7
3025	273.370	101	77	14,5	420	6,0	19,15	5.139	+0,7
3025	149.838	95	37	15,4	450	6,0	23,65	4.300	-0,4
3025	122.385	115	37	14,5	420	6,0	21,01	5.694	-0,5
3010	228.792	115	73	14,0	390	6,0	28,94	3.674	-0,2
3010	225.157	111	58	16,0	510	6,0	18,02	5.131	+0,9
3010	68.893	90	18	15,0	450	6,0	28,38	5.662	+1,0
3010	103.627	103	30	14,5	420	6,0	34,26	5.387	-0,7

APENDICE B

Análisis resultados de uso cámaras de aire en Mina Escondida - Chile



APENDICE C

Modelo de hoja levantamiento información (anverso)



Hoja Datos Campo - TAPONEX

INFORMACION DE LA COMPAÑIA			
NOMBRE COMPAÑIA			
NOMBRE CONTACTO			
DIRECCION			
CIUDAD		ESTADO/PROVINCIA	
PAIS		CODIGO POSTAL	
TELEFONO OFICINA	CELULAR	FAX	
Correo Electrónico	OTRO		
OBJECTIVOS DE LA MINA			
Priorizar del más importante (1) al menos importante (6)			
Reducir consumo de explosivos			
Eliminar la sobre perforación			
Dejar la superficie del banco inferior siguiente intacta			
Reducir las vibraciones			
Reducir los flyrock, golpes de aire o gases tóxicos del tope del disparo			
Mejorar la fragmentación			
INFORMACIÓN DE LA MINA			
Tipo de operación (cantera, tajo abierto, construcción, subterránea etc.)			
Tipo de Roca(s) – Material minado			
Velocidad de la onda de Choque (Sónica) - P-wave			
Densidad Roca (g/cc)			
Si esta disponible – Esfuerzo compresión			
Esfuerzo de corte (cizalla)			
Esfuerzo de tensión			
Modulo de Young			
Indice de Poisson			
Predominante estructura geológica (Horizontal, Inclinada, Vertical)			
Predominante frecuencia de diaclasamiento (No. de diaclasas /metro)			
¿Actualmente se esta usando el precorte?			
¿Si los taladros están húmedos, cuanta agua tienen?			
¿Los taladros húmedos son desaguados antes de ser cargados?			
¿Porcentaje de taladros que necesitan ser re-perforados en un disparo?			
VOLADURA, PERFORACION & INFORMACIÓN DEL TAJO / CANTERA			
¿Usted hace su propia perforación, o la realiza un contratista?			
¿Usted hace su propia voladura, o la realiza un contratista?			
Diámetro de los taladros			
Altura Banco			
Pared final – Vertical o inclinada?			
Burden			
Espaciamiento			
Columna explosivos completa (Si, No)			
Cantidad & Tipo taco superior			

APENDICE C

Modelo de hoja levantamiento información (reverso)

2

Sobre perforación	
Decks Explosivos – Incluir esquema del carguío de los taladros	
Tipo de material de los decks de tacos (intermedios, si existen)	
Tamaño del material de los decks de tacos	
Factor de Carga (gr/TM)	
Retardos entre Taladros	
Retardo entre filas	
Retardo en cada taladro	
Retardo entre decks de explosivos	
Número de taladros/disparo (mínimo & máximo)	
Número promedio de filas	
Número promedio de taladros/fila	
Voladura hacia al menos una cara libre o hacia el buffer de la pila de material roto?	
Esta utilizando algún tipo de tapón de taco ahora?	
Si es si, que tipo de tapón de taco	
Tipo de Explosivo	
Densidad del Explosivo y VOD	
Explosivo a granel o encartuchado	
Explosivos encartuchados, cuál es el diámetro, longitud & peso?	
Explosivos encartuchados, agentes de voladura o altos explosivos?	
Explosivos a granel, bombeados desde el fondo del taladro o vaciados desde el tope?	
Explosivo sensibilizado (i.e., gas, químico, microesferas, metales)	
Si es sensibilizado con microesferas, cuál es su resistencia psi?	
Forma del Primer , tipo y peso.	
Sistema de Iniciación (i.e., eléctrico, no-eléctrico, electrónico?)	
Línea descendente y resistencia, cordón detonante	
COMENTARIOS ADICIONALES	

APENDICE D

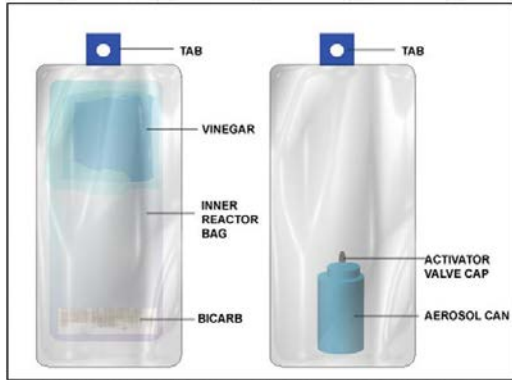
Hoja tipo de especificaciones básica de diseño de carga

PRODUCTION HOLES			
2-NP-4493-10			
Use Crush for stemming / Para el taco utilizar piedra chancada			
BE 49R (seco) DRY HOLE			
<i>Drill Hole Diameter</i>	12.25	<i>Tonnes/Hole</i>	1937 t
<i>Drill Hole Diameter</i>	0.311 m	<i>Stemming Length</i>	5.5 m
<i>Insitu Density</i>	2.8 kg/cu.m	<i>Powder Column Length</i>	7.5 m
<i>Bench Height</i>	11 m	<i>Meters Anfo</i>	7.5 m
<i>Burden</i>	7.4 m	<i>Meter Heavy Anfo</i>	m
<i>Spacing Factor</i>	1.155	<i>kgs Anfo</i>	451 kg
<i>Spacing</i>	8.5 m	<i>kgs Heavy Anfo</i>	0.00 kg
<i>Subgrade</i>	2.0 m	<i>kgs of Exp/tonne</i>	0.233 kg/t
<i>RWS HA 60/40</i>	0.84	<i>Anfo Equivalent P.F.</i>	0.233 kg/t
<i>kgs Anfo per m</i>	60.10	<i>Desired Powder Factor</i>	0.20 kg/t
<i>kgs H.Anfo per m</i>	100.43		
5.5m Stemming			
7.5m ANFO			
CON MANGA (WET HOLE)			
<i>Drill Hole Diameter</i>	12.25	<i>Tonnes/Hole</i>	1937 t
<i>Drill Hole Diameter</i>	0.311 m	<i>Stemming Length</i>	6.0 m
<i>Insitu Density</i>	2.8 kg/cu.m	<i>Powder Column Length</i>	7.0 m
<i>Bench Height</i>	11 m	<i>Meters Anfo</i>	7 m
<i>Burden</i>	7.4 m	<i>Meter Heavy Anfo</i>	0 m
<i>Spacing Factor</i>	1.155	<i>kgs Anfo</i>	421 kg
<i>Spacing</i>	8.5 m	<i>kgs Heavy Anfo</i>	0.00 kg
<i>Subgrade</i>	2.0 m	<i>kgs of Exp/tonne</i>	0.217 kg/t
<i>RWS HA 60/40</i>	0.84	<i>Anfo Equivalent P.F.</i>	0.217 kg/t
<i>kgs Anfo per m</i>	60.10	<i>Desired Powder Factor</i>	0.20 kg/t
<i>kgs H.Anfo per m</i>	100.43		
5.5m Stemming			
7m ANFO			
0.5m AGUA			
CREST HOLES			
<i>Drill Hole Diameter</i>	12.25	<i>Tonnes/Hole</i>	1937 t
<i>Drill Hole Diameter</i>	0.311 m	<i>Stemming Length</i>	7.0 m
<i>Insitu Density</i>	2.8 kg/cu.m	<i>Powder Column Length</i>	8.0 m
<i>Bench Height</i>	11 m	<i>Meters Anfo</i>	8 m
<i>Burden</i>	7.4 m	<i>Meter Heavy Anfo</i>	0 m
<i>Spacing Factor</i>	1.155	<i>kgs Anfo</i>	481 kg
<i>Spacing</i>	8.5 m	<i>kgs Heavy Anfo</i>	0.00 kg
<i>Subgrade</i>	4.0 m	<i>kgs of Exp/tonne</i>	0.248 kg/t
<i>RWS HA 60/40</i>	0.84	<i>Anfo Equivalent P.F.</i>	0.248 kg/t
<i>kgs Anfo per m</i>	60.10	<i>Desired Powder Factor</i>	0.20 kg/t
<i>kgs H.Anfo per m</i>	100.43		
7m Stemming			
8m ANFO			

APENDICE E

Ejemplos de tipos de tapones para crear cámaras de aire

Tapones tipo: bolsa auto inflable



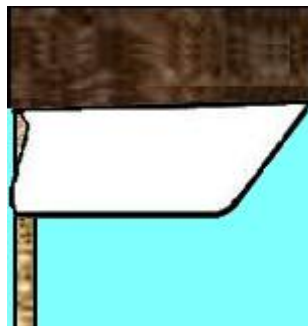
Tapón tipo: bolsa auto inflable



Tapón tipo: plástico



Tapones tipo: plástico



Tapón tipo: globos inflables



APENDICE F

Procedimiento para instalar accesorio del tipo tapón plástico con cuerda

Consideraciones

- Para taladros con agua, reemplazar el detritus por piedra chancada dentro del accesorio, para que el agua no saque el material fino de su interior, o poner una piedra colgando desde el extremo de la cuerda.
- El largo útil de la cuerda es de 2 metros más larga, que la longitud total de la perforación.
- La longitud de la cámara de aire debe ser entre 0,80 a 1,2 m.
- Siempre sobre este accesorio debe ponerse una cantidad de detritus, para producir un conjunto denominado pistón, que se desplaza con gran velocidad una vez detonado el explosivo.
- No es recomendable usar este accesorio en los taladros de la cresta del banco, porque no se aprecia el burden, cuando existen derrames de bancos superiores.
- En los taladros de la primera fila, cerca del material ya disparado, es difícil instalar el accesorio, porque el taladro esta deformado por la sobre rotura de la voladura anterior.

Alcances

Mostrar las etapas de instalación correcta del accesorio plástico en el fondo del taladro.



Etapas para la instalación del accesorio

1. Medir cada taladro y comparar con longitud teórica o de proyecto para comprobar la sobre perforación real. A ésta longitud, disminuir un metro, para formar la cámara de aire. (Figura 1)

Figura 1 ↵



2. Asegurarse de que la cuerda, tenga el largo requerido por el diseño y esté bien atada al accesorio y a la varilla de madera. (ver figuras 2a y 2b)



Figura 2a ↵



Figura 2b ↵

3. Ubicar la varilla de madera atravesada a un costado del taladro y dejar hacia un costado el accesorio con su cuerda.



Figura 3 ↗

4. Llenar el accesorio con detritus hasta aproximadamente $\frac{1}{3}$ de su capacidad volumétrica para facilitar su descenso. Si el taladro está estrecho en el brocal poner mayor cantidad de detritus.



Figura 4 ↗

5. Tomar el accesorio desde el extremo de la pared opuesta a la ubicación de la cuerda, centrando el accesorio en el taladro, de tal manera que el costado del accesorio donde está ubicado el anclaje de la cuerda este mirando hacia el fondo de la perforación.



Figura 5 ↗

6. Dejar caer el accesorio en forma rápida, hasta el lugar predeterminado por el largo de la cuerda. Verificar tensión de la cuerda.



Figura 6 ↗

7. Una vez instalado el accesorio a lo largo del taladro, se agrega 0,2 a 0,4 mts de detritus sobre el accesorio para formar una pequeña cámara de tierra que permita separar el accesorio del explosivo.



Figura 7 ↗

8. Las siguientes etapas de carguío del taladro siguen el procedimiento tradicional.



Figura 8 ↗

APENDICE G

Procedimiento para instalar accesorio del tipo tapón plástico con vástago

1. Ubicación de los componentes del Sistema en campo, en la Figura 1 se aprecia el accesorio plástico, el vástago de madera con la unión plástica (clavo) y la corona de soporte del vástago de madera.

Figura 1 



2. Colocación de la corona plástica en el orificio opuesto donde está ya instalado el clavo plástico en el vástago de madera. Este componente se coloca para que el vástago de madera no se entierre en el detritus que ha sido agregado en el fondo de los taladros que han sido puestos a nivel, para respetar las profundidades que pide el Diseño de Voladura de la mina. Ver Figura 2 y detalle en Figura 3.





Figura 2 



Figura 3 

3. Ensamble del vástago de madera con el accesorio plástico mediante la unión plástica (clavo), como se puede apreciar en la Figura 4 y en el detalle Figura 5.



Figura 4 



Figura 5 

4. Luego de ensamblado todo el sistema se agrega una pequeña cantidad de detritus de la perforación al accesorio plástico, esta cantidad no debe de exceder $1/3$ de la capacidad del tapón, ver Figura 6. Es muy importante el adicionar esta pequeña cantidad de detritus, ya que este peso que se agrega al dispositivo, sirve como anclaje que sumado al vástago de



Figura 6 

madera permiten que todo el conjunto baje rápidamente hacia el fondo del taladro y sobre todo asegura que todo el sistema que conforma el accesorio plástico quede en la posición en la cual su especial diseño produce el efecto de la Cámara de Aire en el fondo del taladro.

5. Seguidamente se procede a instalar el accesorio plástico en el taladro, para ello el Operador colocara el extremo inferior del vástago de madera en el centro de la superficie circular que forma la cavidad del taladro, observando la posición que se demuestra en la Figura 7; no es necesario que el operador se incline para insertar el vástago dentro del taladro, basta centrar el extremo libre del vástago; todo el conjunto se sujetara de un par de dedos y seguidamente se dejara caer por su propio peso, sin realizar ninguna operación adicional de lanzar el conjunto, tal como se ve en la Figura 8.



Figura 7 



 **Figura 8**

6. Para mantener la calidad en la instalación del accesorio plástico, se debe de medir periódicamente la nueva profundidad que queda en el taladro una vez colocado el dispositivo, como se puede observar en la Figura 9. Esto se debe de hacer para controlar que el dispositivo queda efectivamente a un metro de distancia encima del fondo original del taladro.
7. Luego de dejar caer el accesorio plástico al fondo del taladro y verificar la nueva profundidad del taladro, se agrega de una a dos (01 a 02) lampadas de detritus encima del accesorio plástico que ya está en el fondo del taladro, ver Figura 10.



Figura 9 

Esta operación se realiza con el fin de: Primero, aislar el accesorio plástico del explosivo que se agregara a continuación y, SEGUNDO y en extremo importante, el de crear el efecto pistón, esta masa de detritus es muy importante porque es la que en conjunto con el accesorio plástico, más el vástago de madera y más la Cámara de Aire debajo de ellos, forman lo que denominamos Voladura tensional, y éste pistón es el que al fin y al cabo comprimirá al aire que está en dicha Cámara de Aire.



Figura 10 

APENDICE H

Cuadro resumen de pruebas realizadas con el accesorio tapón plástico

REGISTRO PRUEBAS TAPON PLASTICO														
Pruebas	Fecha carguío	Diámetro Perforac. (pulg)	Malla		Altura de Banco (m)	Total Taladros x Disparo	Sobre perforación normal (m)	Densidad Roca Insitu gr/cc	Tipo Material	Tipo Roca	Toneladas Rotas x Disparo t	Toneladas Rotas x Taladro t	Número Total de Taponex Instalados	Sobre perforación reducida
			B (m)	E (m)										
1	18/02/05	12 1/4	7.00	8.50	15	153	2	2.8	Mineral	Medium	382,347	2,499.00	21	2
2	19/02/05	9	5.20	6.00	10	61	1.5	2.33	Mineral		44,377	727.50	50	1.5
3	20/02/05	12 1/4	7.00	8.50	15	190	2	2.8	Mineral	Medium	474,810	2,499.00	13	2
4	22/02/05	9	5.20	6.00	10	200	1.5	2.33	Mineral		145,500	727.50	80	1.5
5	23/02/05	9	5.20	6.00	10	300	1.5	2.33	Desmonte		218,249	727.50	49	0.5
6	28/02/05	9	5.20	6.00	10	300	1.5	2.33	Des / Min		218,249	727.50	75	1.5
7	04/03/05	12 1/4	9.00	10.50	15	104	2	2.8	Desmonte	Hard	412,776	3,969.00	51	2
8	14/03/05	12 1/4	9.00	10.50	15	100	2	2.8	Desmonte	Medium	396,900	3,969.00	13	2
9	15/03/05	12 1/4	9.00	10.50	15	100	2	2.8	Desmonte	Hard	396,900	3,969.00	49	2
10	30/03/05	12 1/4	9.00	10.50	15	251	2	2.8	Desmonte	Hard	996,219	3,969.00	30	2
11	01/04/05	12 1/4	7.00	8.50	15	284	2	2.8	Mineral	Soft	709,716	2,499.00	62	1.5
12	09/04/05	12 1/4	6.50	7.50	15	360	2	2.8	Mineral	Medium	736,555	2,045.99	90	2
13	26/04/05	9	5.20	6.00	10	200	1.5	2.33	Desmonte		145,500	727.50	60	1.5
14	26/04/05	9	5.20	6.00	10	400	1.5	2.33	Mineral		290,999	727.50	120	1.5
15	10/05/05	12 1/4	6.50	7.51	15	244	2	2.8	Mineral	Medium	499,960	2,049.02	174	2
16	29/09/05	9	5.50	6.35	10	600	1.5	2.33	Des / Min		488,317	813.86	250	1.5
17	27/02/06	11	10.50	12.12	15	69	1.5	2.674	Mineral		352,330	5,106.23	38	1.5
18	28/02/06	11	10.50	12.12	15	84	1.5	2.674	Mineral		428,924	5,106.23	54	1.5
19	02/03/06	11	10.50	12.12	15	88	1.5	2.674	Mineral		449,349	5,106.23	28	1.5
20	03/03/06	11	10.50	12.12	15	22	1.5	2.674	Mineral		112,337	5,106.23	22	1.5
21	06/03/06	11	10.50	12.12	15	64	1.5	2.674	Mineral		326,799	5,106.23	45	1.5
22	07/03/06	11	10.50	12.12	15	45	1.5	2.674	Mineral		229,780	5,106.23	45	1.5
23	27/07/06	9 7/8	7.50	8.66	10	69	1.5	2.674	Desmonte	Volcánico	119,840	1,736.81	38	1.5
24	27/07/06	12 1/4	6.50	7.50	10	69	1.5	2.674	Desmonte	Volcánico	89,947	1,303.58	38	1.5
25	02/08/06	12 1/4	6.50	7.50	10	656	1.5	2.270			725,790	1,106.39	46	1.5
26	17/10/06	12 1/4	6.50	7.50	10	423	1.5	2.27			468,102	1,106.63	57	1.5
27	18/01/07	12 1/4	6.50	7.50	10	309	1.5	2.27			341,947	1,106.63	108	1.5
TOTALES						5,745					10,202,520	1,775.90	1,706	

APENDICE H

Cuadro resumen de costos y ahorros de las pruebas realizadas con el accesorio tapón plástico

Pruebas	COSTOS proyectados					AHORROS proyectados							
	Costo Unitario Accesorio plástico (US\$)	Costo Total x uso accesorio (US\$)	Costo Unitario perforación US\$/m	Costo total x Perforación (US\$)	Costo de Voladura				con el uso de Camaras de aire			Material Roto con camaras de aire t	
					Tipo de Explosivo	Densidad Carga Kg/m	Reducción Consumo Kgr Explosivos	Costo (US\$)	Total US\$	por Taladro US\$/ tal	por ton rota US\$/t		
1	9.10	191.10	5.21	-	Anfo	59.34	1,620.08	680.48	489	23.30	0.0093	52,479	
2	6.30	315.00	4.00	-	Anfo	32.03	1,921.94	807.27	492	9.85	0.0135	36,375	
3	9.10	118.30	5.21	-	Anfo	59.34	1,002.91	421.25	303	23.30	0.0093	32,487	
4	6.30	504.00	4.00	-	Anfo	32.03	3,075.10	1,291.62	788	9.85	0.0135	58,200	
5	6.30	308.70	4.00	196.00	Anfo	32.03	3,453.08	1,450.39	1,338	27.30	0.0375	35,647	
6	6.30	472.50	4.00	-	Anfo	32.03	2,882.90	1,210.90	738	9.85	0.0135	54,562	
7	9.10	464.10	5.21	-	Anfo	59.34	3,934.49	1,652.59	1,188	23.30	0.0059	202,419	
8	9.10	118.30	5.21	-	HA 64	100.43	1,697.23	723.04	605	46.52	0.0117	51,597	
9	9.10	445.90	5.21	-	HA 64	100.43	6,397.25	2,725.30	2,279	46.52	0.0117	194,481	
10	9.10	273.00	5.21	-	HA 45 sens.	97.38	3,798.00	1,711.23	1,438	47.94	0.0121	119,070	
11	9.10	564.20	5.21	161.51	Anfo	59.34	6,622.76	2,781.74	2,379	38.37	0.0154	154,938	
12	9.10	819.00	5.21	-	Anfo	59.34	6,943.21	2,916.34	2,097	23.30	0.0114	184,139	
13	6.30	378.00	4.00	-	Anfo	32.03	2,306.32	968.72	591	9.85	0.0135	43,650	
14	6.30	756.00	4.00	-	Anfo	32.03	4,612.65	1,937.44	1,181	9.85	0.0135	87,300	
15	9.10	1,583.40	5.21	-	Anfo	59.34	13,423.55	5,638.25	4,055	23.30	0.0114	356,529	
16	6.30	1,575.00	4.00	-	Anfo	32.03	10,410.48	4,372.69	2,798	11.19	0.0138	203,465	
17	7.00	266.00	4.00	-	Anfo	38.56	1,905.04	800.17	534	14.06	0.0028	194,037	
18	7.00	378.00	4.00	-	Anfo	38.56	2,707.16	1,137.08	759	14.06	0.0028	275,737	
19	7.00	196.00	4.00	-	Anfo	38.56	1,403.71	589.60	394	14.06	0.0028	142,975	
20	7.00	154.00	4.00	-	Anfo	38.56	1,102.92	463.26	309	14.06	0.0028	112,337	
21	7.00	315.00	4.00	-	Anfo	38.56	2,255.97	947.57	633	14.06	0.0028	229,780	
22	7.00	315.00	4.00	-	Anfo	38.56	2,255.97	947.57	633	14.06	0.0028	229,780	
23	6.30	239.40	4.00	-	Anfo	38.56	1,758.50	738.62	499	13.14	0.0076	65,999	
24	5.25	199.50	4.00	-	Anfo	59.34	2,931.58	1,231.34	1,032	27.15	0.0208	49,536	
25	5.25	241.50	4.00	-	HA 37	79.89	4,777.17	2,020.83	1,779	38.68	0.0350	50,894	
26	5.25	299.25	4.00	-	HA 37	79.89	5,919.54	2,504.08	2,205	38.68	0.0350	63,078	
27	5.25	567.00	4.00	-	HA 37	79.89	11,215.96	4,744.56	4,178	38.68	0.0350	119,516	
TOTALES	12,057.15		358				112,335.45	47,413.90	35,714	20.93	0.014	3,401,006	
33%													

APENDICE I

Resultados obtenidos en avances (túneles)

Se realizaron las mediciones en 3 niveles diferentes para considerar distintas condiciones geológicas.

El Avance obtenido se muestran en la Figura A y los datos se muestran en la Tabla A.

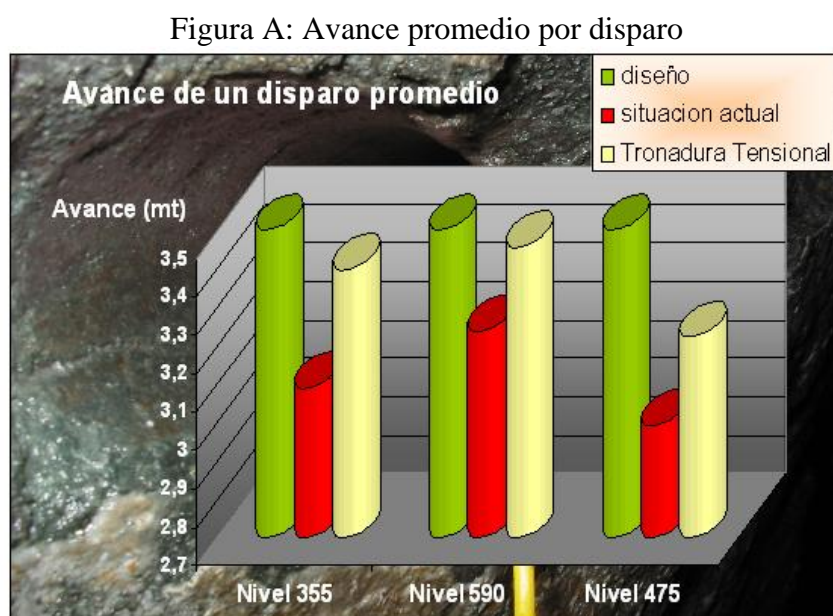


Tabla A: Avance promedio por disparo

Avance m	Niveles			TOTAL	
	355	590	475	Avance	Productividad
Diseño	3.50	3.50	3.50	3.50	0.92
Situación actual	3.10	3.20	3.00	3.10	0.82
Voladura Tensional	3.40	3.45	3.20	3.40	0.90

Variaciones en el factor de carga son mostradas en la Figura B y Figura C muestra la productividad del avance.

Figura B. Factor de Carga en Avance (grs. / ton)

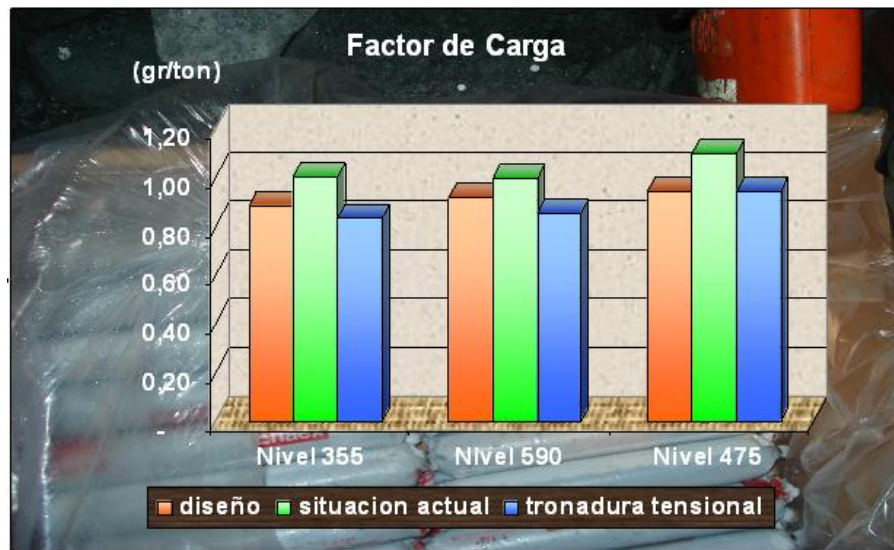
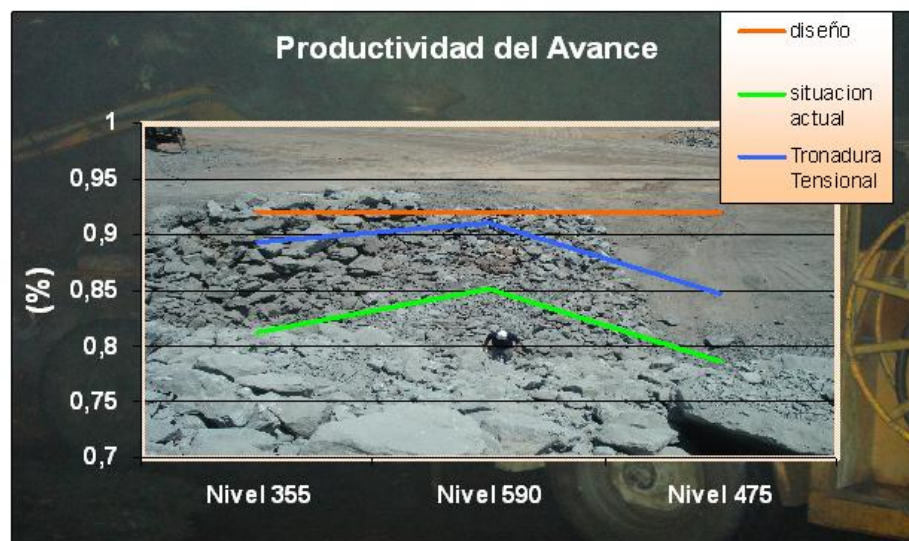


Figura C. Productividad en Avance

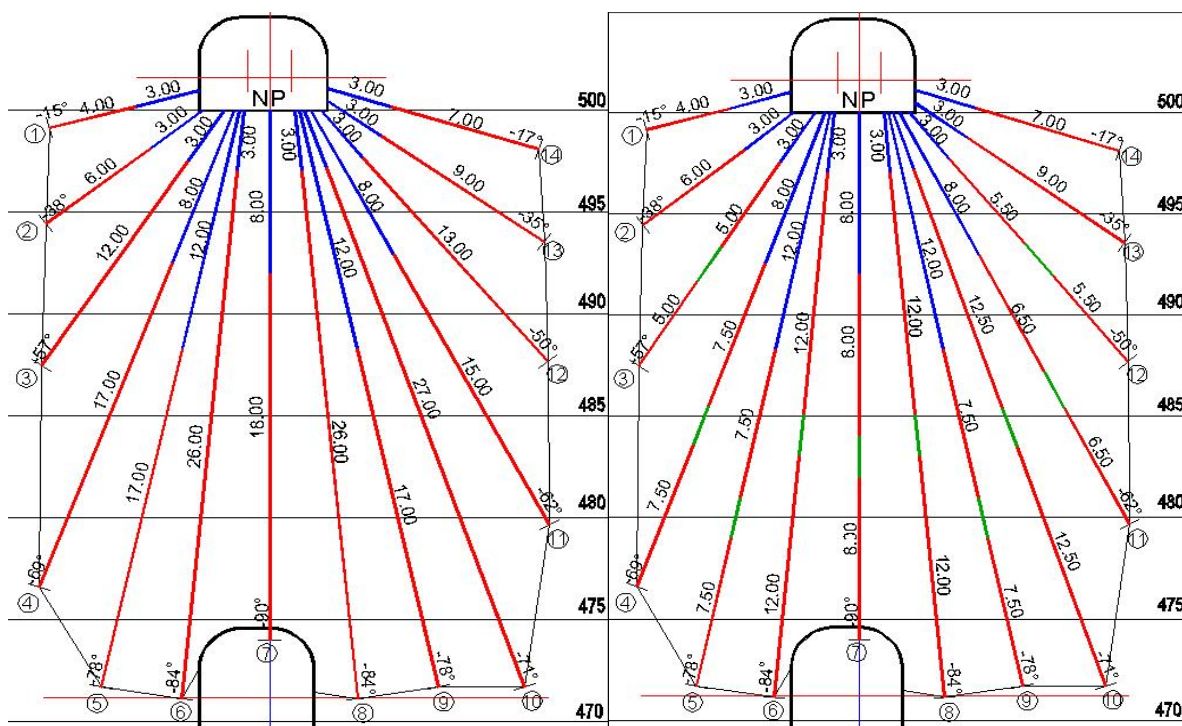


APENDICE J

Resultados obtenidos en producción

El diseño de perforación y voladura del caserón A, se puede apreciar en la Figura D.

Figura D. Perfil derecho Voladura tradicional, izquierdo con cámara de aire intermedia



Los resultados obtenidos se aprecian en Tabla B:

Tabla B: Resultados en Producción

DESVIACIONES DE PARAMETROS					
PARAMETRO		Factor de Carga		Perforación Específica	
Unidad	ton	gr / ton	%	ton / m	%
DISEÑO	43.649	291,21	1,00	20,61	1,00
REAL	43.649	246,22	0,85	24,62	0,84
TRONADURA TENSIONAL	27.391	242,54	0,83	21,15	0,97

El Análisis de fragmentación se realizó con el software split Desktop y los resultados se muestran en la siguientes Tablas.

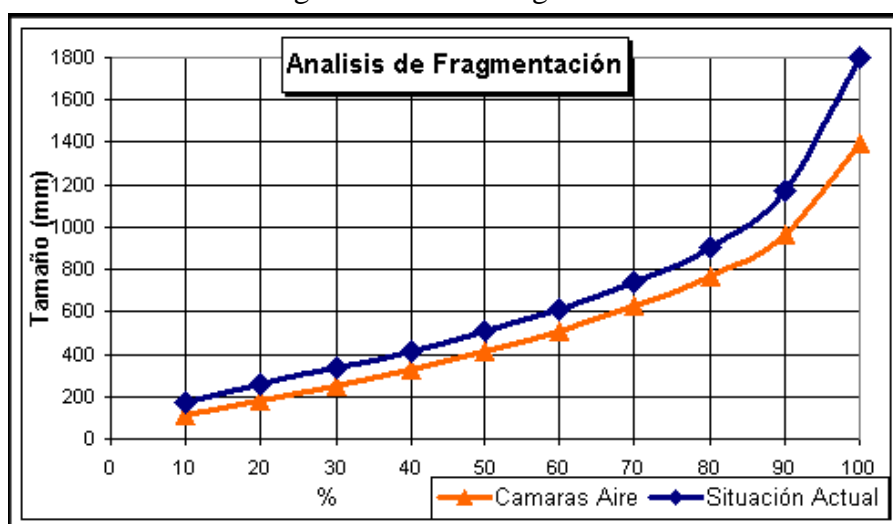
Tabla C: Porcentaje de material pasante a la Chancadora

Porcentaje correspondiente a 800 mm		
	Situación actual	Cámaras Aire
%	mm	mm
73,6	800	
81,6		800

Tabla D: Análisis de Granulometría Voladura con sistema tradicional y con cámara de aire

% pasante	Situación Actual (mm)	Cámaras de Aire (mm)
10	174,4	112,6
20	255,5	177,2
30	333,9	246,0
40	416,6	323,1
50	507,1	410,9
60	611,0	511,8
70	738,2	628,2
80	908,0	767,7
90	1172,5	966,8
100	1801,4	1397,2

Figura E: Curvas de granulometrías



Ahorros conseguidos:

- El material apto para entregar a la chancadora aumento en 8%.
- El Factor de carga se redujo en 17 %.
- Se redujo a cero el uso de emulsión encartuchada, en pozos con agua (altura máxima de agua 2 m).

Para el caso del Caserón B: El diseño tradicional de perforación y voladura se aprecia en el perfil transversal del caserón de la Figura F.

Figura F: Perfil transversal diseño tradicional

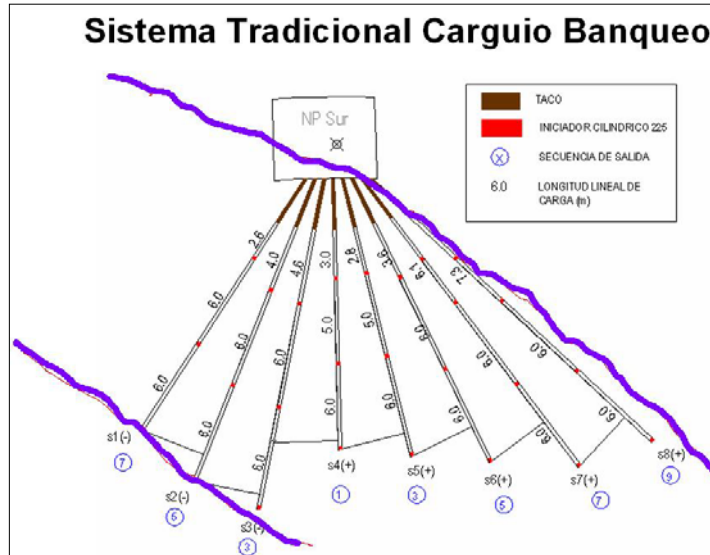
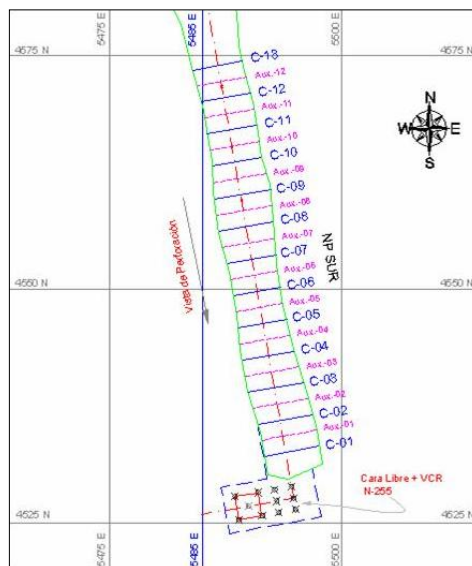
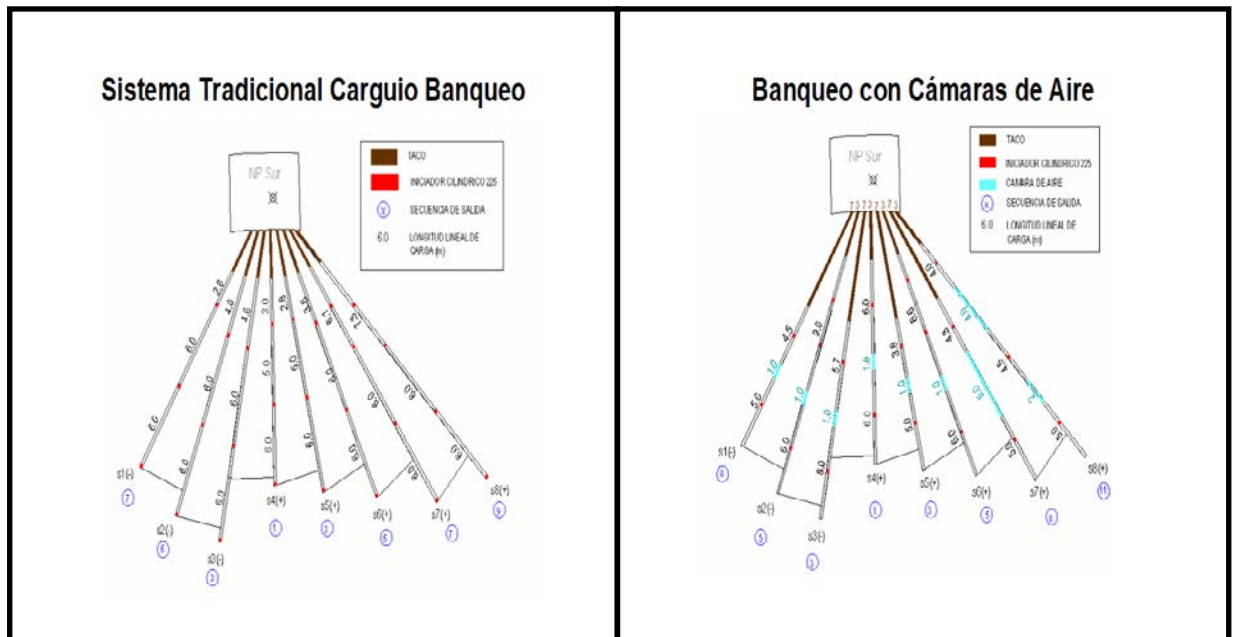


Figura G: Planta con ubicación de cara libre, zanja y 13 corridas



El sistema de voladura tradicional y pruebas se muestran en la Figura H.

Figura H. Diseño tradicional y Pruebas con cámara de aire



El objetivo de las cámaras de aire en los 2 taladros más cercanos al techo, es para crear una voladura amortiguada (líneas buffer) La perforación ya estaba realizada al comenzar el trabajo.

Figura I. Cámara Intermedia produce superposición de ondas

