



4

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MEDICIÓN Y CONTROL DE VIBRACIONES EN EL TAJO II DE MICARE



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA
P R E S E N T A
DAVID REYES PÉREZ
DIRIGIDA POR: ING. MAURICIO MAZARI HIRIART
MÉXICO, D.F. 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-1469

SR. DAVID REYES PEREZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Mauricio Mazari Hiriart y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero de Minas y Metalurgista:

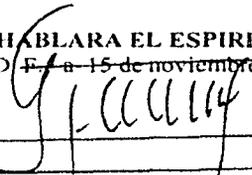
MEDICION Y CONTROL DE VIBRACIONES EN EL TAJO II DE MICARE

- I RESUMEN**
- II GENERALIDADES**
- III GEOLOGIA**
- IV PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**
- V DISEÑO DE PRUEBAS**
- VI ANALISIS DE RESULTADOS**
- VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a 15 de noviembre de 2001
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg

PP

A mis angelitos que son lo máximo que Dios me dio, el fruto divino de la bendición que unió a dos almas y a una vocación de ser vos mis hijos (Joshua y Elenita) de este inmenso amor.

En el camino que tracen podrán saborear las mieles del triunfo que van alcanzar y junto a sus padres Laura y David orgullosos les dirán:
¡ Joshua y Elena ! son nuestros hijos, son.... un modelo ideal.

A mi Laurita no le doy las gracias por que este trabajo es tanto de ella como mío y sería como darme las gracias a mi mismo; bien sabes que nunca lo hubiera logrado de no haberte conocido, bien pues a mi musa creadora que tengo como esposa y que me inspira hacer cosas grandes día con día; Laurita con todo mi corazón nunca lo hubiera logrado sin ti mi amor.

Son demasiadas palabras que quisiera yo expresar, todas llevan a lo mismo; con el fin de agradecer, a mis padres (Antonio y Alberta), mis hermanos (Fer, Miguel y Rico) los amigos (no los mencionó por temor a dejar alguien fuera de esta lista).

Todos ellos que un día me dieron sin recibir nada a cambio; hoy que tengo ya la dicha de ser "casi" un profesional, quisiera que compartieran la alegría que hay en mí, el esfuerzo, la constancia, la meta que ya alcance; nunca la hubiera logrado de no haberme apoyado en ti.

Gracias, Papi, Mami, Hermanos lo hice, si lo hice, saben que? lo hice pensando en ti!!!.

Es trabajoso estudiar,
pero es bonito aprender;
y se puede compensar
la pena de trabajar
con el gusto de saber.

Con paciencia hay que aprender,
para poder enseñar
más paciencia hay que tener;
sólo así se logrará
que uno pueda comprender.

Se admira a un profesor
cuando se sabe expresar
y te enseña con cariño;
por que más que un maestro
siempre tendrás a un amigo.

Con admiración y respecto para los profesores de esta facultad en
especial a los que ejercen en la división de ciencias de la tierra y en
particular a mi asesor.

ÍNDICE

I. RESUMEN	1
II. GENERALIDADES	4
2.1 Localización y vías de acceso	4
2.2 Clima y vegetación	4
2.3 El carbón	6
2.3.1 Clasificación del carbón	7
2.3.2 El carbón en México	9
III. GEOLOGÍA	10
3.1 Estratigrafía	10
3.2 Geología estructural	11
3.2.1 Zona del carbón	11
3.3 Geología económica	13
IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
4.1 Actividades realizadas	14
4.2 Objetivos	15
4.3 Acciones a realizar	15
4.3.1 Estudios y trabajos a desarrollar	15
4.3.2 Precortes	16
4.3.3 Sobrequebre	16
4.3.4 Vibraciones	17
4.4 Fragmentación	17
V. DISEÑO DE PRUEBAS	19
5.1 Relaciones fundamentales para el diseño de una voladura	19

5.1.1	Relación espaciamento-bordo	19
5.1.2	Relación carga-distancia	23
5.1.3	Velocidad de propagación vs velocidad de partícula	24
5.1.4	Distancia escalada	25
5.1.5	Fundamentos teóricos para la cámara de aire	26
5.2	Tipos de explosivos	27
5.2.1	Explosivos ideales	27
5.2.2	Explosivos no ideales	27
5.2.3	Propiedades físicas de selección de los explosivos	27
5.2.4	Características de detonación de los explosivos	28
5.2.5	Características de los explosivos no ideales	29
5.2.6	Sistemas de iniciación de los explosivos	31
5.2.7	Desempeño óptimo de los explosivos	31
5.3	Normas empíricas y parámetros de diseño	32
5.3.1	Normas empíricas	32
5.4	Bolsas de gas	40
5.5	Humos amarillos en las voladuras	41
5.5.1	Posición adecuada del iniciador dentro de la columna explosiva	41
5.5.2	Zona de iniciación	42
5.5.3	Frente de onda de choque	43
5.6	Explosivos gasificados	43
5.6.1	Anfo pesado gasificado	45
5.6.2	Sensibilización	47
5.6.3	Ventajas en el uso de gas como sensibilizador	49
5.7	La importancia del aluminio en los explosivos	50
5.8	Barrenos inclinados vs barrenos verticales	51
5.8.1	Propósito de voladuras secuenciales	53

5.9 Consideraciones de diseño para la realización de una Voladura	53
5.9.1 Consideraciones de diseño para retardar una voladura	54
5.9.2 Consideraciones para un efectivo control de paredes	56
5.10 Experiencias en precorte en el cast blast	56
5.10.1 Línea de perforaciones	58
5.10.2 Voladura de recorte o de cojín	58
5.10.3 Voladura de precorte	59
5.10.4 Técnicas de cargas de precorte	60
5.11 Cámara de aire	61
5.11.1 Ejemplo de aplicación de la cámara de aire	61
5.11.2 Resultados obtenidos de la cámara de aire	62
5.11.3 Variación presión-explosión por aumento de cámara de aire	63
5.12 Análisis de materiales para utilizarlos como taco	63
5.12.1 Material de suelo (paleorrelleno)	63
5.12.2 Gravilla integral	64
5.12.3 Tapones cónicos	64
5.12.4 ¿Cómo trabajan los tapones cónicos?	64
5.13 Voladuras de cast blast	66
5.13.1 Anterior diseño de cargado de cast blast hecho por otra compañía	66
5.14 Voladura convencional	69
5.14.1 Esquema de distribución de cargas en un barreno del banco de corte de caja	70
5.15 Diseño de cargado de Cast Blast realizado por Orica	73
5.16 Bolsas de gas como sellador de agua	76

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
6.1 Experiencias que se tuvo en el precorte para el Cast Blast	77
6.1.1 Resultados obtenidos utilizando cámaras de aire en el precorte	77
6.2 Desarrollo de pruebas para evaluar eficiencia de los tacos	78
6.2.1 Análisis granulométrico	78
6.3 Cantidad de explosivo utilizado en un barreno de Cast Blast por la compañía Orica	79
6.4 Rendimiento de los equipos de cargado	83
6.5 Medición de la velocidad de detonación	83
6.6 Medición de vibraciones	88
6.6.1 Niveles de velocidad de partícula registrados	88
6.6.2 Análisis de vibraciones	91
6.7 Inspecciones visuales de las voladuras realizadas con Diferentes tipos de taco	91
6.8 Incremento en el costo por uso del tapón cónico	91
6.8.1 Costo global de la voladura para el período abril - diciembre del 2000	92
6.9 Análisis del nuevo diseño de cast blast	92
6.10 Diseño del amarre de las voladuras	93
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
7.1 Conclusiones	96
7.1.1 Conclusión acerca del tapón cónico	97
7.2 Recomendaciones	98
 Bibliografía	 99

I. RESUMEN

Las voladuras y el uso de explosivo para remover material y extraer minerales, no es una de las principales actividades de la minería, sino que es la base de la misma.

En Minera Carbonífera Río Escondido (MICARE) se consumen grandes cantidades de material explosivo, esto es porque para extraer el carbón, se tiene que remover una gran cantidad de material estéril, que está constituido de material sedimentario (caliche arcilloso, conglomerado, areniscas, etc.); el espesor de estas capas de material es variable, pero está en un rango de 40 a 55 metros de profundidad con respecto a la superficie del terreno.

La remoción de este material se hace en dos etapas, es decir en dos bancos. Primero se lleva a cabo un corte de caja, avanzando en un solo sentido, en el caso de tajo II de sur a norte, el espesor de este corte es de 200 metros. El Corte de Caja¹ se lleva en dos bancos, el prebanco (banco I) tiene una altura de banco que varía de 25 a 30 metros y después de este se deja otro banco (banco II) que tiene una altura de 15 a 25 metros; esta altura de banco está limitada por el yacimiento de carbón, al remover el material de estos dos bancos nos queda al descubierto el manto de carbón el cual tiene un espesor de 0.9 a 2.5 metros. Al realizarse la barrenación en el banco II y "Cast Blast"², se deja una capa de material de 1 a 3 metros para proteger al carbón del explosivo, que posteriormente será removido.

El estudio realizado en el Tajo II apunta a mejorar la fragmentación en las **areniscas** uno de los tipos de roca que mayores dificultades ha presentado a la operación.

¹ Corte de Caja.- Es la excavación inicial realizada para crear la primera zanja, normalmente requiere que el material se deposite fuera de la excavación.

² Cast Blast.- Es el tipo de voladura que se realiza con el propósito de desplazar el material estéril, con la fuerza del explosivo, hacia el lugar de depósito final. Normalmente requiere de altos factores de carga.

Dentro del programa de optimización de la voladura en areniscas, se ha estado desarrollando un mejoramiento en la calidad de taco con la finalidad de evitar el "escopeteo"³ y aumentar la eficiencia de los explosivos.

Para esto se manejaron distintos materiales para usar como taco: en 1998 se utilizó el material de suelo (Paleorrelleno), posteriormente durante el año 1999 se comenzó la utilización de "gravilla integral"⁴ y durante este año se ha implementado la utilización de "tapones cónicos"⁵.

La primera mejora se obtuvo con la utilización de material de gravilla, que dió buenos resultados en fragmentación en comparación con los tacos de material de detritus utilizados hasta esa fecha, pero aumentó el tiempo operacional en el tapado de los barrenos; se hicieron pruebas con los tapones cónicos y se mejoraron aún más los resultados en cuanto a la fragmentación y se disminuyó considerablemente el tiempo de tapado de barrenos.

Actualmente los Tapones Cónicos, han facilitado la operación de voladura y debido a su óptimo comportamiento han mejorado sustancialmente la fragmentación.

Un factor que se debe cuidar es la vibración que se produce con estas voladuras, pues se tiene una zona habitada muy cercana al tajo, también existe una torre de microondas, la pileta que suministra agua a la planta lavadora de carbón, las 6 chimeneas de las 2 plantas de Comisión Federal de Electricidad, la mina V y las vías de Ferrocarriles Nacionales de México.

Para esto es necesario recordar que no se debe sobrepasar del máximo factor de carga que se tiene para dicha zona y que es de 380 g/m³.

Es necesario señalar que se debe trabajar con eficiencia para lograr el mejor resultado tanto en la voladura como en el beneficio financiero que se planea obtener.

³ Escopeteo.- Cuando un barreno no esta debidamente confinado por el tipo de taco que tiene, se produce por lo general que la energía creada por el explosivo se escape por el cuello del barreno, arrojando el material de taco que puede generar el daño en personas o equipos.

⁴ Gravilla integral.- Material de taco redondeado de tamaño menor a 3 centímetros (1.25 pulgadas).

⁵ Tapón cónico.- Dispositivo en forma de cono que se utiliza para tapar un barreno.

Se trata de obtener el contrato con MICARE del "Servicio de Roca Tumbada", para ésto sólo se contará con un año a partir del mes de noviembre de 1998, en ese tiempo se deberá demostrar que el servicio dado por la empresa (Orica) es mejor que el servicio que actualmente recibe por parte de otra empresa.

Por lo tanto no se trata de cargar por cargar barrenos, sino de realizar un trabajo con calidad, al mismo tiempo dejar satisfecho al cliente (MICARE) con los resultados que se obtengan y con esto ganar el contrato que se está persiguiendo.

Se propone cambiar la forma de cargar los barrenos de este sitio y se ha diseñado que la carga se realice con diferentes retardos por barreno, con esto se espera tener una vibración mínima y estar dentro del factor de carga establecido.

II. GENERALIDADES

2.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El área se localiza en el kilómetro 32 de la carretera Federal número 57 al sureste de la Ciudad de Piedras Negras, en el municipio de Nava, Coahuila. Las coordenadas locales UTM son:

X 510,638.1540

Y 3'145,141.7140

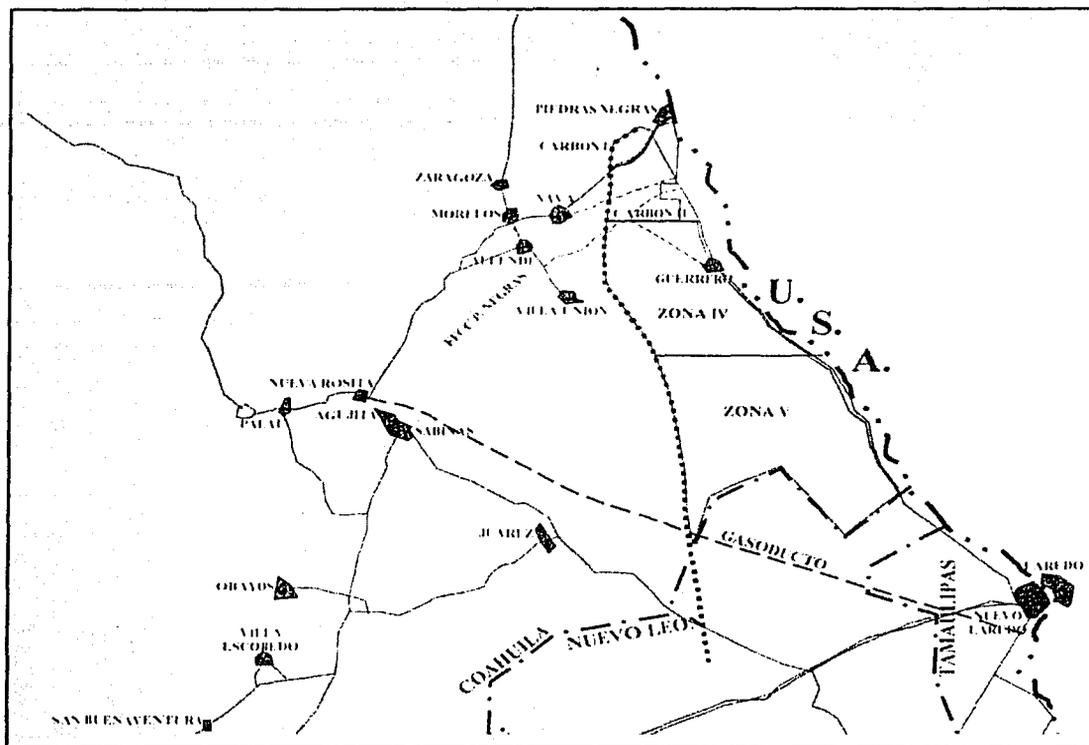
La elevación sobre el nivel medio del mar a la cual se encuentra el área es de 305 metros, la topografía del terreno es suave con pequeñas elevaciones.

Piedras Negras es una ciudad fronteriza, la cual se comunica por medio de los puentes internacionales 1 y 2 (este último inaugurado en septiembre de 1999) con la ciudad de Eagle Pass, Texas. Al noroeste Piedras Negras tiene comunicación con la ciudad fronteriza de Acuña, Coahuila y al sureste con la ciudad fronteriza de Nuevo Laredo, Tamaulipas. Ver figura 1.

2.2 CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima en la región es extremoso, semidesértico, con lluvias cuando se presentan huracanes en la parte norte del golfo de México, en primavera-verano las temperaturas máximas de 48° C y en el invierno llegan a descender hasta los -6° C, con vientos que llegan a alcanzar velocidades de hasta 40 km/h.

La vegetación está compuesta por arbustos y árboles pequeños en su gran mayoría, aunque existen también árboles robustos como el nogal, el cedro, etcétera; en la región de los cinco manantiales (Morelos, Zaragoza, Nava, Allende y Villa Unión) donde por la gran cantidad de agua se observa con mayor frecuencia vegetación y árboles grandes en la parte norte de la ciudad de Piedras Negras; la vegetación va disminuyendo hacia el sur (Nueva Rosita, Sabinas, Barroterán, etcétera) la vegetación disminuye llegando a ser desértica. La fauna que con más frecuencia se observa en esta área está compuesta por: conejos, liebres, coyotes, gato montés, correcaminos, zorrillos, tlacuaches, ardillas, serpientes de cascabel, tortugas terrestres, tortugas de río, tejones,



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE ACCESO	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 1 S/ESCALA

armadillos, jabalís, venados, codornices, faisanes, lechuzas, búhos, cuervos, hurracas, zopilotes, aguilillas, etc.

2.3 EL CARBÓN

El carbón es una roca sedimentaria, combustible fósil, formada por restos vegetales que han sufrido un sepultamiento, con posteriores cambios físicos y químicos a lo largo del tiempo.

El carbón está compuesto principalmente por carbono, además de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y sustancias minerales que constituyen la ceniza. Su coloración es primordialmente negra, aunque en lignitos puede variar a café; su peso específico está entre 1.1 y 1.8 g/cm³.

Los restos vegetales se fueron acumulando en cuerpos de agua de circulación restringida (planicies deltaicas y pantanos) que por un proceso bioquímico se convirtieron en turba. Por acción microbiana y presión, la turba se transformó en lignito y este en carbón bituminoso por presión, calor y tiempo. La antracita es el último eslabón de esta metamorfosis, al formarse del carbón bituminoso debido al efecto de presiones y temperaturas aún más altas.

Conforme aumenta el rango de maduración, el contenido de carbono es mayor lo que incrementa su poder calorífico. El carbón de menor rango se conoce como lignito, con gran cantidad de humedad y bajo poder calorífico (<4,000 Kcal/kg.) El carbón sub-bituminoso posee hasta 5,000 Kcal/kg, su contenido de humedad es menor y se puede usar como carbón térmico para la generación de electricidad. El carbón que más se emplea para este propósito en el mundo es el bituminoso, que puede tener hasta 7,000 Kcal/kg de poder calorífico.

Algunas variedades del carbón bituminoso poseen la propiedad de formar coque al destilarse, por lo que se emplea en la industria siderúrgica y por ello reciben el nombre de "carbones coquizables" o "carbones metalúrgicos". Los que no se pueden usar para formar coque se pueden aprovechar para la generación de

electricidad, y se les conoce como "carbones no coquizables" o "carbones térmicos".

El rango más alto de carbón es la antracita, también llamado "carbón duro", con más de 7,000 Kcal/kg. Debido a su mayor antigüedad, la antracita es el más puro de los carbones, pero también el más escaso. Ver figura 2.

2.3.1 Clasificación del carbón

Generalmente para fines de clasificación del carbón mineral, se emplean los parámetros establecidos por la ASTM, los cuales se basan en la relación entre el carbón fijo (CF) y materia volátil (MV), así como el factor de expansión (FSI)

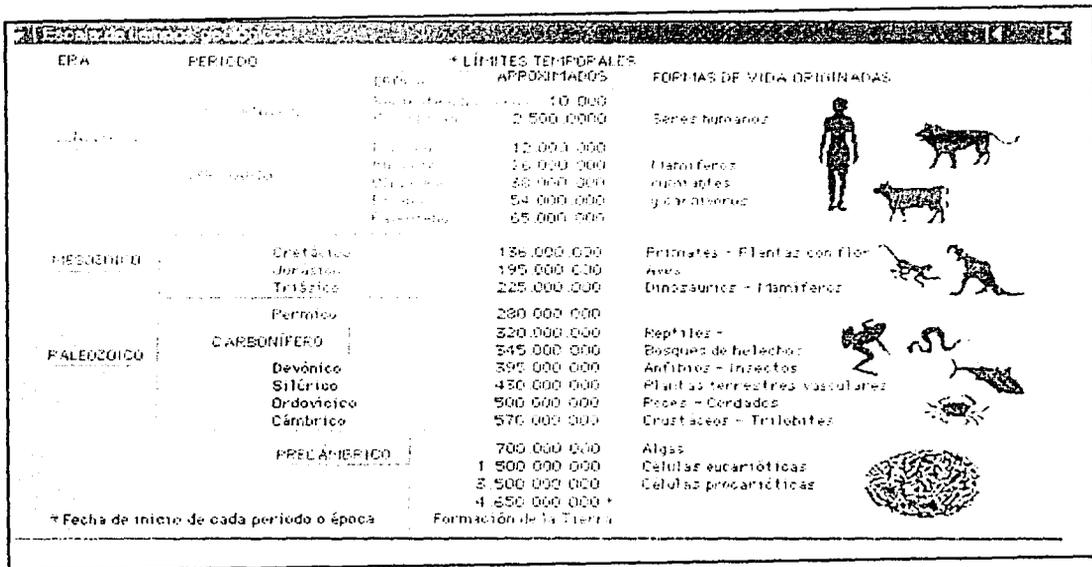
En base seca para los carbones de rango alto se utiliza (CF), (MV) y libre de cenizas.

En base húmeda en poder calorífico en Kcal/kg y libre de cenizas para carbones de bajo rango.

De acuerdo con la relación anterior, existen las siguientes clases de carbón mineral. Ver tabla 1.

CLASE	CARBÓN FIJO %	MATERIAL VOLÁTIL %
ANTRACITA	86-100	0-14
META-ANTRACITA	98-100	0-2
SEMI-ANTRACITA	86-92	4-8
BITUMINOSO	69-86	14-31
BAJO EN MATERIA VOLÁTIL	78-96	14-22
MEDIO EN MATERIA VOLÁTIL	69-78	22-31
ALTO EN MATERIA VOLÁTIL	MENOR DE 69	MAYOR DE 31
LIGNITO	50-59	41-50

TABLA 1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

PERÍODO CARBONÍFERO

TESIS PROFESIONAL

DAVID REYES PÉREZ

FIG. 2 S/ESCALA

2.3.2 El carbón en México

El carbón en México ha sido usado desde tiempos muy antiguos para producción de calor o bien para la iluminación.

El primer descubrimiento de carbón en México fue muy probablemente en el área de San Felipe el Hondo en la región de Sabinas, Coahuila, en el año de 1850, pero fue en el año de 1886 cuando el Ing. Jacobo Kuchler presentó la primera descripción fisiográfica de esa área.

Antes del movimiento revolucionario de 1910, el carbón fue utilizado principalmente por las locomotoras, en la época posrevolucionaria durante el período de 1910 y 1930 el carbón fue utilizado en el desarrollo de la industria siderúrgica y minero-metalúrgica en la planta fundidora de Altos Hornos de México.

Actualmente el carbón mineral en México representa un importante factor en la generación de energía eléctrica en la región de Nava, Coahuila y también para la industria siderúrgica transformado en coque en Monclova, Coahuila.

En la actualidad el Grupo Acerero del Norte produce a nivel nacional a través de Minera Carbonífera Río Escondido, S.A. de C.V., el 100% del carbón térmico y por medio de Minerales de Monclova, S.A. de C.V., el 75% del carbón bituminoso, respectivamente, que se produce en México.

III. GEOLOGÍA

3.1 ESTRATIGRAFÍA

El Tajo II está situado en el flanco poniente de la cuenca Fuentes-Río Escondido en una zona adyacente a las minas 2, 4 y 5 de MICARE entre las ciudades de Piedras Negras y Nava del Estado de Coahuila.

Las formaciones presentes en el área pertenecen a facies de un sistema deltaico desarrollado a finales del Cretácico Superior estando cubiertas en forma discordante por una formación del Terciario. A continuación se describen estas unidades.

Formación San Miguel: Conformada por areniscas duras y compactas subyacen a la Formación Olmos.

Formación Olmos: Sobreyace concordantemente a la anterior y está constituida por secuencias de lutitas, limolitas y areniscas semicompactas. Esta formación incluye a los mantos de carbón que están en explotación.

Formación Sabinas-Reynosa: Consiste en una base de conglomerado con clastos de caliza del tamaño de la grava y gravilla empacados en una matriz areno-limosa, cementado en partes, por lo general suelto. Su espesor es variable de 2.5 a 8.0 metros. Este conglomerado contiene al acuífero más importante y presente en toda la cuenca. Cubriendo al conglomerado, se encuentran aproximadamente 34.0 metros de caliche (nombre local para identificar a rocas calcáreas continentales). Este caliche a su vez se subdivide en las siguientes unidades litológicas, descritas de abajo hacia arriba:

Caliche limo-arenoso semicompacto, su espesor promedio es de 7.5 metros, variando de 5.0 a 9.0 metros.

Caliche arcilloso semicompacto, su espesor es de 14 metros, variando de 13.0 a 15.0 metros.

Caliche compacto con conductos de disolución, su espesor promedio es de 11.5 metros, variando de 11.0 a 12.0 metros, que en algunas áreas se presenta.

Esta formación sobreyace en discordancia angular y erosional a las anteriores por lo que en la intersección con los mantos de carbón define al límite poniente del yacimiento. Ver figura 3.

3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las formaciones Olmos y San Miguel forman parte del flanco poniente de la cuenca carbonífera manteniendo un rumbo Norte-Sur buzando suavemente al Oriente. Localmente se ha detectado la presencia de sistemas de fallas con rumbos preferenciales al NE y saltos que varían de 1 a 5 metros.

La estructura principal consiste en una falla de gran magnitud (30 a 40 metros de salto) que segmenta al yacimiento en dos grandes bloques desplazándolo en el sentido vertical y en apariencia horizontalmente. Esta falla constituye también la separación entre las minas 2 y 5.

3.2.1 Zona del carbón

Hacia la base de la Formación Olmos se localizan siete mantos de carbón, por sus características de espesor y contenido de cenizas, cinco de ellos son considerados de interés económico y se describen a continuación.

Manto 1 y 2. No se consideran de interés económico por no contar con el espesor mínimo de carbón, que es de 25 centímetros cuando se encuentre separado de los demás.

Manto 3. Presenta un espesor de 40 centímetros y alto contenido de cenizas. Se localiza en la base de la zona de carbón y solo en la porción Norte del tajo; siempre se mantiene separado del resto de los mantos.

Manto 4. Estrato de carbón sucio que presenta espesores de 50 centímetros se sitúa debajo del manto 5 al cual se mantiene unido. Este manto no lo encontramos en la mitad Sur del Depósito.

ERA	ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD EN MILLONES DE AÑOS	NORTE DE LA SERRANIA DEL BURRO	SIERRA DEL CARMEN	SUB-CUENCA FUENTES RIO ESCONDIDO	SUB-CUENCA COLOMBIA SAN IGNACIO
FANEROZOICO	CENOZOICO	IERRICARIO	PALIOGENO	2	ALUVION		ALUVION	ALUVION
				5	FORMACION SABINAS REYNOSA		FORMACION SABINAS REYNOSA	LA ALDI
				25				
FANEROZOICO	MESOZOICO	CREPACCICO	SUPERIOR	66	FORMACION ESCONDIDO		FORMACION ESCONDIDO	
				69	FORMACION ESCONDIDO		FORMACION ESCONDIDO	
					FORMACION SAN MIGUEL	FORMACION AGUILA	FORMACION SAN MIGUEL	
					FORMACION URSON	FORMACION FERDINANDA	FORMACION URSON	
				83	FORMACION AUSTIN	FORMACION AUSTIN	FORMACION AUSTIN	
				90				
					FORMACION TAGLE	FORMACION TAGLE	FORMACION TAGLE	
				95				
					FORMACION BUDA	FORMACION BUDA	FORMACION BUDA	
				100				
FANEROZOICO	MESOZOICO	CREPACCICO	INFERIOR		FORMACION DEL RIO	FORMACION DEL RIO	FORMACION DEL RIO	
				100	FORMACION GEORGETOWN	COMPLEJO GEORGETOWN DEL BURRO	FORMACION GEORGETOWN	

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
LÍMITE DE FORMACIONES	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 3 S/ESCALA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Manto 5. Manto de carbón limpio que presenta espesores de 10 a 50 centímetros que siempre se mantiene unido a los mantos 4 (donde este existe) y 6. Se encuentra presente en todo el yacimiento.

Manto 6. Sobreyace al interior separado por una arcilla refractaria de 4 centímetros y consiste en el manto más limpio de los presentes. Mantiene un espesor de 40 a 80 centímetros y se encuentra en toda la zona.

Manto 7. Se sitúa en la cima de la Zona de Carbón Económicamente Explotable y consiste en un manto de carbón limpio de 50 a 80 centímetros de espesor contiene un horizonte conocido como "tonstein"⁶ y el cual es su característica distintiva. Hacia los límites Norte y Sur, así como en la porción Central del Yacimiento se separa del resto de los mantos por la presencia de un horizonte de lutitas carbonosas de irregular comportamiento.

3.3 GEOLOGÍA ECONÓMICA

De acuerdo con las condiciones geológicas y con los parámetros establecidos, se consideraron como límites del yacimiento, los siguientes elementos:

- Hacia el Poniente la traza definida por el contacto erosional carbón-conglomerado.
- Hacia el Oriente, Norte y Sur la curva de isovalor de la relación de descapote 25 metros cúbicos de estéril por una tonelada de carbón.

Con estas consideraciones se estimaron reservas por 54.2 millones de toneladas de carbón.

⁶ El tonstein es una capa de material de color gris claro y muy quebradiza, también conocido en este lugar como el "tostado" por su aspecto físico.

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1 ACTIVIDADES REALIZADAS

En el área de Tajo II de voladuras de MICARE en conjunto con Orica, México, S.A., (proveedor del servicio de voladuras) se desarrollaron trabajos de: granulometría, control de vibraciones, sobrequebre y costo global.

Para la apertura del Tajo II, se desarrolló la planeación de perforación y voladura, de tal manera que no interfiera con el funcionamiento normal de la Mina Subterránea V y manteniendo el control de los daños por voladuras en las instalaciones del Tajo II que se estaba construyendo, además se tiene un punto crítico en esta área por tener una zona habitada a 500 metros del Tajo II la cual se conoce como "Ranchito".

La metodología de estudio que se planteó realizar fue a través de mediciones y del análisis cuantitativo de los parámetros de perforación y voladura, apoyada con equipos de terreno de alta tecnología, tales como: PowerLine⁷, PowerSieve⁷, Cámara Digital de Alta Velocidad, Sabrex 4.20⁸ y Shot Plus⁸. Lo anterior se considerará para definir los parámetros óptimos para el Tajo II, además todos los datos relacionados con los rendimientos de los equipos de operación, las horas efectivas de trabajo y estado de los mismos, se obtienen del sistema de control de operaciones Dispatch⁹ que se encuentra instalado en todos los equipos.

⁷ Software y hardware desarrollado por Sudáfrica Mines Service Inc. para el desarrollo de modelos topográficos.

⁸ Software desarrollado por Orica, Australia, S.A. para el desarrollo del diseño y control de vibraciones en las voladuras.

⁹ Sistema operacional computarizado que se instaló en los equipos para el mejor aprovechamiento de los mismos.

4.2 OBJETIVOS

- Se tiene que mejorar el confinamiento del explosivo, buscando aumentar su eficiencia.
- Reducir el factor de carga en voladuras de "Cast Blast" y el sobrequebre.
- Reducir "escopeteo" que pueda generar daño a personas y equipos; producto de una mala voladura.
- Se debe mejorar la fragmentación, principalmente a nivel del taco.
- Minimizar la vibración por voladura.
- Maximizar el rendimiento de los explosivos
- Evaluar técnica y financieramente si era rentable contratar el servicio técnico de permanencia a tiempo completo, para el servicio de tumba para descapote.
- Minimizar el costo por metro cúbico removido.

4.3 ACCIONES A REALIZAR

4.3.1 Estudios y trabajos a desarrollar

El desafío era mejorar y optimizar la extracción del manto de carbón, disminuir la generación de daño a las paredes del Tajo II y aumentar su ritmo de extracción, así es que se decidió a trabajar en las siguientes ramas:

- a) Control de daño en las paredes del Tajo II.
- b) Granulometría del material adecuada para el cargado de equipos.
- c) Mínima vibración en áreas críticas.
- d) Utilización de mezclas ricas en Anfo en barrenos con agua.

Con los planteamientos anteriores, MICARE decidió la contratación temporal de asistencia técnica para Tajo II, otorgada por el proveedor del servicio de voladura Orica México S.A. el contrato es temporal pues existe una compañía de explosivos que ya da servicio a MICARE.

Para este trabajo se emplean camiones tipo Bulk (para explosivo a granel) de 30 toneladas de capacidad aproximadamente, el chasis está hecho en México y todo lo demás fue ensamblado en Alberta, Canadá; cuenta con distintos depósitos para material como: Un tanque con capacidad de 10 toneladas para almacenar emulsión, dos compartimientos para nitrato de amonio de 6 toneladas cada uno, cuenta con un tanque para diesel con capacidad de 1,500 litros, contiene un tanque para "gassing" (nitrito de sodio en solución) para gasificar mezclas ricas en emulsión, también contiene un tanque de agua para lavar la manguera con que se inyecta el explosivo gasificado, con capacidad de 1,000 litros; estos equipos son conducidos y operados por personal capacitado por que son de alta tecnología, ya que se opera por medio de una computadora que administra la cantidad exacta de materia prima que se requiere para cada tipo de mezcla; en la pantalla de la computadora del camión se puede observar la presión a la cual se está inyectando la mezcla y si el flujo de materia prima es el adecuado para el tipo de mezcla que se vaya a emplear.

Una brigada de trabajo esta formada por: Un supervisor, un operador A, un operador B, un polvorinero y en ocasiones por un topógrafo.

4.3.2 Precortes

- El objetivo del precorte es reducir el sobrequebre (daño) y controlar la pendiente de la pared final (banco) al límite de excavación final planificado.
- Es importante dejar la roca en buenas condiciones para evitar fallas y deslizamientos.

4.3.3 Sobrequebre

- Los valores de voladuras para el Tajo II, se enmarcan dentro de los rangos proyectados para el diseño de bancos por Ingeniería Mina, en general los

quiebres promedios son menores a 3.0 metros en las distintas litologías del tajo, para voladuras de producción. Aún así se busca la manera de bajar este sobrequiebre para dejar bancos más estables.

4.3.4 Vibraciones

- Existen dos factores principales que afectan el nivel de vibración de una detonación de una carga explosiva. Estos son: la distancia y el tamaño de la carga. El sentido común nos indica que es más seguro estar lejos de una voladura que cerca de ella. Este sentido también nos indica que una carga grande de explosivo será más peligrosa que una carga pequeña.
- Con la campaña de monitoreo realizada, se determinó un modelo de vibraciones para las estructuras que están más cercanas a las zonas de la voladura, usando para este caso el modelo de Devine; este patrón fue establecido por MICARE y el cual se deberá respetar. La ecuación (1) si se utilizan unidades del sistema métrico y la ecuación (2) para el sistema ingles.

$$V = 914.4 \left(\frac{d}{\sqrt{w}} \right)^{-1.69} \dots\dots(1) \quad V = 300.43 \left(\frac{d}{\sqrt{w}} \right)^{-1.69} \dots\dots\dots(2)$$

donde:

- V = Velocidad esperada de la partícula en milímetros/s (in/s)
- d = Distancia de la voladura al sensor medida en metros (cientos de pies)
- w = Carga máxima de explosivo por retardo en kilogramos (lbs)

4.4 FRAGMENTACIÓN

La voladura es una de las operaciones más importantes dentro del ciclo de operación de la mina y tiene que cumplir con los siguientes objetivos: entregar una buena fragmentación de la roca, un abudamiento adecuado para los

equipos de cargado y un mínimo daño al entorno; es decir mantener estables los taludes de la mina y no afectar instalaciones cercanas.

La operación minera hoy en día enfrenta grandes desafíos financieros, que impulsan la necesidad de aumentar los ritmos de producción con operaciones unitarias a mayor escala, capaces de una gran producción instantánea de mineral mediante la implantación de bancos de mayor altura (en la medida que sea factible) y con ángulos de taludes mayores.

El área de diseño y voladura, se ha planteado un importante desafío en el Tajo II respecto al proceso de voladura, con el fin de obtener diseños capaces de lograr mejores resultados en el proceso post- voladura.

En este trabajo, se analizan las acciones realizadas por el área de perforación y voladura, los cuales fueron: análisis del sobrequebre en el Tajo II, monitoreo de vibraciones en "Ranchito", fragmentación, vibraciones y análisis de costo global para Tajo II.

V. DISEÑO DE PRUEBAS

5.1 RELACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNA VOLADURA

Todos los datos que se van recabando en el campo como pueden ser las características propias del barreno es decir; si está húmedo o seco, si el bordo es el adecuado o esta débil, la longitud de barrenación, el tipo de roca, etc.; son datos usados para el diseño preeliminar de una plantilla de voladura, pero deben ser mejoradas, a través de los resultados de la retroalimentación de campo. Las plantillas pueden ser ajustadas u optimizadas por la combinación de las características del macizo rocoso-explosivo-geometría.

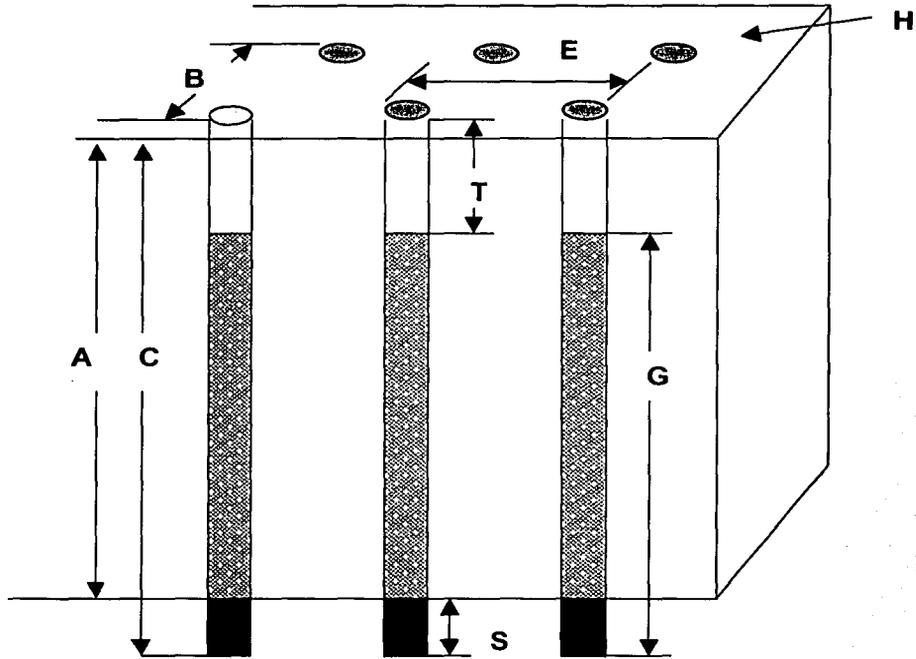
En la figura 4 se muestra la terminología que se empleará para definir estas relaciones.

5.1.1 Relación espaciamento-bordo

La primera relación fundamental de diseño es $B = K_E * E$ (1), constante que relaciona el Espaciamento con el Bordo. Los valores son determinados utilizando el concepto de distribución de energía. Para una plantilla cuadrada la mejor distribución de energía es $K_E = 1$. Para una plantilla triangular la mejor "energía cubierta"¹⁰ es $K_E = 1.15$, Aunque el porcentaje de energía cubierta no es sustancialmente diferente para $K_E = 1 - 1.5$. Una plantilla triangular rinde una mejor uniformidad de distribución de energía que una plantilla cuadrada. Cada barreno de diámetro D puede ser definido para quebrar su propia área individual (A_r) como la detallada en la línea segmentada en el diagrama 1, así $A_r = B * E$

¹⁰ La energía cubierta es la distribución uniforme de energía sobre el macizo rocoso, donde puede remover hasta un cierto límite de material.

B – Bordo
E – Espaciamiento
C – Longitud de Barreno
S – Sobre perforación
A – Altura de Banco
T – Taco
G – Columna de Explosivo
H – Banco



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
RELACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UNA VOLADURA	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 4 S/ESCALA

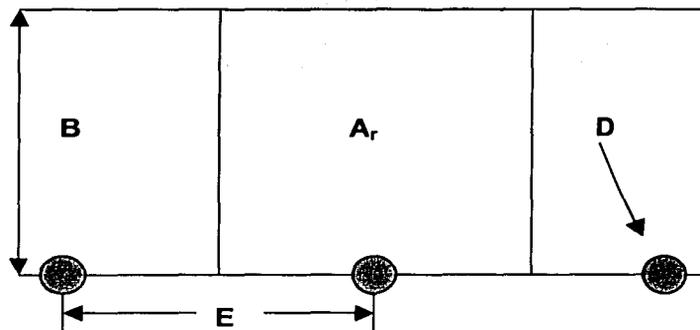


DIAGRAMA 1

El volumen requerido para quebrar por barreno por unidad de longitud es:

$$V_r = B * E * 1$$

Una cierta cantidad de energía explosiva por unidad de volumen (E_v) debe ser aplicada para fragmentar satisfactoriamente la roca. La energía total requerida (E_r) es: $E_r = V_r * E_v = B * E * E_v$ (2)

Combinando las ecuaciones (1) y (2), la energía requerida se convierte:

$$E_r = K_E * B^2 * E_v$$

Así la energía de fragmentación requerida es proporcional al cuadrado del bordo. $E_r \propto B^2$(3)

La cantidad de energía de explosivo disponible (E_d) es determinada por el volumen de explosivo V_e presente en la longitud unitaria de un barreno cargado.

$$V_e = \pi/4 * D_e^2$$
.....(4)

Donde D_e es el diámetro del explosivo, multiplicado por la potencia explosiva relativa en volumen expresada como energía por unidad de volumen (E_e).

$$E_d = \pi/4 * D_e^2 * E_e$$
.....(5)

Cuando empleamos explosivos encartuchados en voladuras perimetrales, la carga de diámetro (D_e) puede ser menor que el diámetro D de un barreno. Sin embargo, en voladuras de producción se emplean los explosivos a granel donde el $D_e = D$. Esta última suposición es la que será considerada en este trabajo.

Así la energía disponible es proporcional al cuadrado del diámetro.

$E_d \propto D^2$ Estableciendo una igualdad entre la energía disponible y la requerida encontramos que el bordo es proporcional al diámetro del barreno. $B \propto D$, introduciendo una constante de proporcionalidad K_B la relación queda: La segunda de las relaciones fundamentales de diseño. $B = K_B * D$(6)

Donde K_B es la constante que relaciona el bordo con el diámetro, del barreno, que incorpora ambos factores, energía del explosivo y densidad de la roca. Esta relación sugiere un incremento lineal del bordo con el diámetro del barreno, asumiendo el empleo del mismo explosivo. Esta constante ha sido examinada detalladamente^a, y se ha encontrado que $K_B = 25$ cuando se utiliza ANFO (densidad 0.8 g/cc y potencia relativa en peso $PW_{ANFO} = 1$) en roca de densidad promedio ($d_{roca} = 2.65$ g/cc); cuando el explosivo y la densidad de la roca cambian, se puede usar la siguiente ecuación.

$$K_B = 25 \sqrt{\left(\frac{\rho}{0.8} * \frac{PW_{ANFO}}{1}\right)} \dots\dots\dots(7)$$

Donde ρ y ρ_{ANFO} , son la densidad y la potencia relativa en peso del nuevo explosivo.

La tercera de las relaciones fundamentales de diseño es:

$$J = K_J * B \dots\dots\dots(8)$$

Donde K_J es la constante que relaciona el bordo con la subarrenación. El valor más común es $K_J = 0.3$ especialmente para terrenos blandos. En terrenos de roca más competente este valor debe ser incrementado sobre el que se ha indicado. Sin embargo, es probablemente mejor usar un explosivo más enérgico en vez de incrementar la subarrenación. Los resultados de una excesiva subarrenación son:

1. Un mayor gasto en perforación y voladura
2. Un incremento en las vibraciones
3. Un daño no deseado al próximo banco

^a "Blasting principles for open pit mining", William Hustrulid

La cuarta de las relaciones fundamentales de diseño es:

$$T = K_T * B \dots \dots \dots (9)$$

Donde K_T es la constante que relaciona el bordo con la longitud del taco. El valor mínimo recomendado es $K_T = 0.7$. Algunos especialistas sugieren el uso de un $K_T = 1$. Localizar la carga muy cercana al collar del barreno puede resultar en sobrequebre, roca en vuelo y una liberación temprana de los gases del explosivo con resultados pobres en fragmentación. Por otro lado, el incremento de la longitud del taco puede reducir la concentración de energía en la región del collar, lugar donde podemos encontrar grandes rocas.

5.1.2 Relación carga-distancia

Investigaciones extensas han llevado a determinar la relación matemática entre el nivel de vibración, tamaño de la carga y la distancia. El boletín del departamento de Minas de EEUUA (escrito por Nichols, Jonson y Duvall en 1971) expresa esta relación, que es:

$$V = H * \left(\frac{D}{W^a} \right)^b$$

Donde:

V = Velocidad esperada de partícula (in/s)

W = Carga máxima de explosivo por retardo (lbs)

D = Distancia de la voladura al sensor medida en cientos de pies

(Ejemplo. Para una distancia de 500 pies, D = 5)

H = Intersección de la velocidad de partícula

a = Exponente del peso de la carga

b = Exponente del factor de pendiente

Esta relación se conoce como la Ley de Propagación ya que muestra como cambia la velocidad de partícula con la distancia y el peso de la carga de explosivos.

Si se utilizan unidades del sistema ingles, la ecuación de la Agencia de Minas de los EE.UU.A. se expresa cómo sigue:

$$PV = 450.02 \left(\frac{d}{\sqrt{w}} \right)^{-1.295}$$

donde:

PV = Velocidad de la partícula en pulgadas / segundo

d = Distancia en pies

W = Peso de la carga por retardo en libras

El Manual para el uso de explosivos Dupont (E.I. Dupont de Nemours & Co., 1977) tiene la siguiente fórmula para el sistema métrico:

$$PV = 1,143 \left(\frac{d}{\sqrt{w}} \right)^{-1.6}$$

donde:

PV = Velocidad de la partícula en milímetros / segundo

d = Distancia en metros

W = Peso de la carga por retardo en kilogramos

5.1.3 Velocidad de propagación vs velocidad de partícula

La velocidad de propagación es más conocida. Es la velocidad a la cual viaja una onda sísmica a través de la tierra desde la voladura al sensor y más allá. El rango general de valores es de 300 a 7,000m/s. El valor es aproximadamente constante para un área dada.

La velocidad de partícula es bastante diferente. Una partícula de roca vibra en una orbita elíptica alrededor de su punto de reposo. Un ejemplo simple del movimiento de la partícula y su velocidad, es el movimiento de un pescador en

un bote. Una lancha rápida que pasa genera una ola la cual pasa por debajo del pescador, causando que su bote oscile hacia arriba y hacia abajo. Este es el movimiento de la partícula. La rapidez a la cual oscila es la velocidad de la partícula. La velocidad de partícula se mide en milímetros por segundo (mm/s) y es el parámetro que mide el sismógrafo.

Las voladuras retardadas trabajan o reducen la vibración del terreno por que la onda sísmica generada por un retardo ya ha viajado una distancia considerable, debido a su velocidad de propagación, antes de que detone el siguiente retardo. La segunda onda sísmica viaja a la misma velocidad de propagación que la primera y, por lo tanto, nunca puede alcanzarla. De esta manera las ondas sísmicas o vibraciones se separan.

5.1.4 Distancia escalada

La distancia escalada es un desarrollo posterior a la Ley de Propagación de la Agencia de Minas de los EEUUA y es una manera práctica y sencilla para controlar la vibración. La distancia escalada se define por la siguiente relación para el sistema métrico decimal como :

$$D_s = \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) \text{ kg/m}^{1/2}$$

D_s = Distancia escalada

D = Distancia de la voladura a la estructura en metros

W = Peso máximo de la carga por retardo en kilogramos

La distancia escalada es similar a la distancia normal en que: entre más alto sea el valor, es más segura. Los valores altos ($D_s > 22.7$) indican condiciones de vibración seguras con poca probabilidad de daño, mientras que los valores bajos ($D_s < 11$) indican un peligro mayor con altas probabilidades de daño. La Agencia de Minas de EEUUA propuso una distancia escalada de 22.7 como límite seguro para las vibraciones por voladura. Este es un límite conservador, pero muchas agencias reguladoras están usando una distancia escalada de 27.5 para mayor seguridad.

5.1.5 Fundamentos teóricos para la cámara de aire

La detonación completa del explosivo dentro de un barreno confinado es muy rápida. Por ejemplo, un explosivo con una Velocidad de Onda de Detonación (VOD¹¹) promedio de 5,000 m/s demorará 2 milésimas de segundo (2ms) en quemarse. En ese período de tiempo los gases generados en la detonación comienzan a deformar la pared del barreno y la mayor parte de él aún permanece en la columna explosiva a una alta presión.

Si en alguna parte del barreno existe una cámara de aire, los gases generados en la detonación ocuparán completamente la cámara y la presión de estos descenderá hasta alcanzar el equilibrio. Si existe una condición de buen confinamiento de taco, en ese momento los gases comenzarán a actuar en la pared del barreno, produciendo la generación y apertura de nuevas grietas y los demás efectos propios de la detonación de una carga confinada de explosivo.

Entonces, la presión con la cual finalmente el explosivo comenzará a actuar en la roca será aquella que alcanzó en el equilibrio. Utilizando algunos conceptos descritos por el autor William Hustrulid en su texto "Principios de voladura en mina a tajo abierto", se puede calcular el efecto descrito.

El autor explica que para condiciones isotermales la ecuación que describe el comportamiento de los gases es: $PV^\gamma = \text{Cte.}$

($\gamma = 1$, ecuación gases ideales)

P : Presión gases (kbar)

V : Volumen de los gases (m^3)

γ : Igual a 2.035 para una presión mayor a 4.5 kbar.

La presión inicial de los gases se considera aproximadamente de la mitad de la presión de detonación de los explosivos.

¹¹ Es la velocidad a la que la reacción de detonación se extiende a través de una columna de explosivo, ya sea en el cartucho o en el barreno.

5.2 TIPOS DE EXPLOSIVOS

5.2.1 Explosivos ideales: Son los que tienen las mismas características a pesar de su diámetro, independientemente de la condición o bajo el ambiente en que se encuentren. Estas características incluyen velocidad, presión de detonación y Resistencia al agua. Ejemplos: TNT¹², Pentrita¹³, Cordón detonante.

5.2.2 Explosivos no ideales: Las características de estos cambian según el ambiente en que se encuentren, las características dependen también del diámetro, temperatura, grado de confinamiento, etc. Ejemplos: ANFO, Emulsiones, Hidrogeles.

5.2.3 Propiedades físicas de selección de los explosivos

- Densidad: Es el peso del explosivo por unidad de volumen expresado en gramos /centímetro cúbico (g/cc. ANFO a granel 0.80 – 0.87).
- Explosivos con una densidad menor de 1 flotarían en el agua.
- Productos con alta densidad son más susceptibles de sufrir detonación. (Detonación de bajo orden causada por pérdida de sensibilidad debido a las altas presiones que el explosivo pueda estar soportando)
- Densidad de carga: Es el número de libras por pie o metro de barreno.
- Sensibilidad o receptividad a la iniciación de un explosivo por un detonador o un booster: La sensibilidad varía con la temperatura, el diámetro, la presión ambiental y la composición del explosivo. Altos explosivos necesitan de detonadores # 8 o más para ser iniciados. Los Agentes de voladuras requieren ser iniciados por una carga iniciada con un detonador # 8.

¹² Es un explosivo basado en nitroglicerina

¹³ Es un sólido cristalino que se funde a una temperatura de 140° C. Es difícil de encender y es capaz de iniciar cualquier explosivo sensible a los detonadores (fulminantes) .

- **Resistencia al agua:** Es la capacidad que tiene un explosivo para soportar la exposición a medios húmedos, y aún conservar sus propiedades. Cuando se detecta humo café-anaranjado después de una voladura, indica que hubo una detonación ineficiente.
- **Estabilidad química:** Es la cualidad que tiene un material explosivo para permanecer químicamente inalterado cuando es almacenado bajo condiciones específicas. Los factores que pueden alterar dicha estabilidad química son entre otros: Temperatura, humedad, empaçado, materiales de fabricación y contaminación.
- **Resistencia a la pre-compresión.**
- **Características de los gases:** Cuando un explosivo detona, este puede producir gases tóxicos y no tóxicos, esto incluye gases no tóxicos como: CO₂ y H₂O, y gases tóxicos como: NO, NO₂, CO.

5.2.4 Características de detonación de los explosivos

- **Velocidad de detonación(VOD):** La rapidez con la que una onda de detonación viaja a través de un explosivo. Se expresa en pies /segundo o en metros / segundo. La VOD puede cambiar dependiendo del tamaño de las partículas del explosivo, diámetro, densidad del explosivo y grado de confinamiento para explosivos no ideales. Ejemplo: ANFO = 8,000 pies / segundo – 5,500 pies / segundo. El componente principal de la energía de choque es la velocidad de detonación. La energía de choque es la responsable de la rotura de las rocas. La VOD debe alcanzar o exceder la velocidad sónica del macizo rocoso.
- **Presión de detonación (Pd):** Se expresa en kilobars (kbar). Esta presión se origina en la zona de reacción del explosivo, Pd es igual a $(2.325 * 10^{-7}) * \text{densidad del explosivo} * \text{VOD}^2$.
- **Energía Efectiva del Explosivo:** Es la energía total liberada por los explosivos antes de que ocurra la liberación de gases. Se conoce como la energía de detonación.

- Poder explosivo o rapidez de trabajo realizado: Esto depende del poder explosivo de los productos y de su AWS. Cuando dos explosivos tienen la misma VOD, pero uno de los dos tiene mayor AWS, el resultado será aun más poderoso.
- Fortaleza absoluta por peso (AWS): Es la energía de calentamiento máxima teórica basada en los ingredientes que componen el explosivo.
ANFO = 890 cal/gm.
- Fortaleza absoluta a granel (ABS): Energía por Unidad de Volumen. Cal/cc, es igual al AWS de un explosivo multiplicado por su densidad.
ABS del ANFO = 890 * 0.85 = 756 cal/cc
- Fortaleza relativa por peso (RWS): Es la fortaleza relativa de un explosivo comparada con la del ANFO.
RWS = AWS/ANFO AWS
- Fortaleza relativa a granel (RBS): Es la energía por unidad de volumen en cal / cc.
RBS = ABS/ANFO ABS
- Presión del barreno: Es la presión creada en las paredes del barreno producto de la expansión de los gases. Es aproximadamente igual al 50% de la presión de la detonación. El volumen de gases y su rapidez de producción, son los factores que controlan o determinan el levantamiento de la roca y su desplazamiento.

5.2.5 Características de los explosivos no ideales

- ANFO.- Es una mezcla de Nitrato de Amonio (94.3%) y combustible diesel (5.7%). El ANFO tiene una alta fortaleza por peso, baja fortaleza a granel, baja velocidad, baja sensibilidad, alta producción de gases y no es resistente al agua. Densidad típica 0.85.

- **EMULSIONES.-** Consiste de oxidantes disueltos en agua y rodeados por un combustible diesel, este tipo de productos tienen una alta resistencia al agua, tienen una alta VOD y una alta fortaleza a granel. Densidad típica entre 1.1 – 1.35.
- **HIDROGELES.-** Consiste de oxidantes, combustibles y un agente de vínculo, se le atribuyen a este tipo de explosivos las mismas capacidades que a las emulsiones, sin embargo, su fabricación es más costosa.
- **DINAMITA.-** Es un producto basado en la Nitroglicerina. Tiene una alta resistencia al agua, alta velocidad y alta densidad. Es más sensible a la iniciación que otros productos explosivos. Puede causar algunos problemas de salud cuando se está utilizando o se inhalan sus vapores.
- **ANFOS PESADOS.-** Es una mezcla de ANFO con emulsiones o hidrogeles, para darle con esto una mayor resistencia al contacto con el agua.
- **INICIADORES O "PRIMERS".-** Son productos sensibles a la iniciación por otros explosivos. Su VOD debe ser mayor que la de los explosivos a ser iniciados, y tienen una presión de detonación de por lo menos 100 kbars.
- **EXPLOSIVOS BINARIOS.-** Son productos que se vuelven un alto explosivo una vez que sus dos componentes son mezclados en el campo. Los componentes por separado no son explosivos, por lo tanto no necesitan ser transportados o almacenados como explosivos. Velocidad 4,876.8 – 6,400.8 m/s (16,000 – 21,000 ft/s) 90 – 120 kbars.
- **EXPLOSIVOS BASADOS EN PROPELENTES.-** Usando propelentes en combinación con emulsiones o hidrogeles se crean explosivos con alta energía, alta densidad y alta VOD. Su uso es excelente como cargas de fondo o en áreas donde la resistencia a pre-compresión se pueda presentar. Densidad 1.35 – 1.5, Velocidad 5,181.6 – 6,705.6 m/s (17,000 – 22,000 ft/s).

5.2.6 Sistemas de iniciación de los explosivos

- **Eléctricos:** Utilizan energía eléctrica para energizar e iniciar los detonadores.
- **No-Eléctricos:** No utilizan la energía eléctrica para iniciar los detonadores ejemplos:

Cápsulas y Mechas.- Las mechas son hechas de material textil que contienen una cantidad determinada de pólvora negra, la cual se quema a una rapidez determinada.

Cordón Detonante.- Son productos hechos de material textil que contienen un núcleo explosivo. Usualmente PETN, se utilizan en minería comercial y en aplicaciones de construcción.

Tubos de choque o "Shocktube".- Son tubos flexibles que en su interior contienen como núcleo una pequeña cantidad de material explosivo. Los Shocktube no explotan, utilizan la carga que hay en su interior como señal de transmisión.

Sistemas Combinados.- Cordón detonante y Sistemas de "Schocktube" se usan conjuntamente.

5.2.7 Desempeño óptimo de los explosivos

- **Distribución de Energía.-** La energía del explosivo debe ser distribuida en el macizo rocoso para garantizar tanto una fragmentación uniforme, como el uso de la energía del explosivo.
- **Energía de Confinamiento.-** La energía del explosivo debe estar confinada lo suficiente inmediatamente la explosión ocurra, para que se establezcan en el macizo rocoso las fracturas y el desplazamiento.
- **Nivel de Energía.-** El nivel de energía debe ser lo suficientemente alto como para superar la fortaleza de la estructura rocosa, y por ende permitir el movimiento.

Si se presenta una distribución de energía pobre, un sobreconfinamiento del explosivo, insuficiente energía o una combinación de estos factores, se pueden presentar altas vibraciones, pobre fragmentación o la falta de desplazamiento del macizo.

5.3 NORMAS EMPÍRICAS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

Bordo: Es la distancia entre el barreno y la cara libre más cercana o la cara libre planeada.

5.3.1 Normas empíricas:

1.- Relación del bordo al diámetro de carga: De 2 a 3 veces el diámetro de carga en pulgadas, da por resultado el bordo en pies.

Una carga de diámetro de 12.25" tendrá un bordo entre 24.5 y 37.5 pies.

2.- Relación del bordo al diámetro de carga:

$$(25-35) \text{ diámetro de carga} / 12 = \text{bordo (pies)}$$

$$\text{Métrico: } (20-40) * \text{diámetro de carga(m)} = \text{bordo}$$

3.- Relación entre densidad de roca, densidad de explosivo y diámetro de carga:

$$\left[\left(\frac{\text{densidad de explosivo} \times 2}{\text{densidad de roca}} \right) + 1.8 \right] \times \text{diámetro de carga} = \text{bordo}$$

Métrico:

$$\left[\left(\frac{\text{densidad de explosivo} \times 2}{\text{densidad de roca}} \right) + 32 \right] \times \text{diámetro de carga} = \text{bordo}$$

Esta fórmula se utiliza para diseño inicial únicamente, en esta fórmula no se tiene en cuenta: Altura de banco, Energía de explosivos, Velocidad, Tipo de roca, Geología estructural.

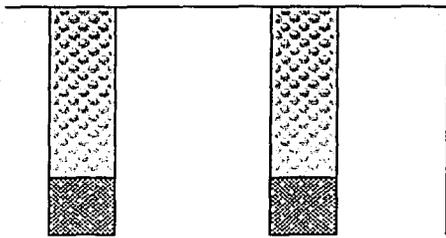
Factor de rigidez: Este factor es igual a la altura de banco dividida entre el bordo. Si el factor es menor de 2, entonces el macizo rocoso será demasiado sólido y duro para ser fracturado y por ende movido.

Ejemplo: Altura de banco: 25 metros (82 pies)

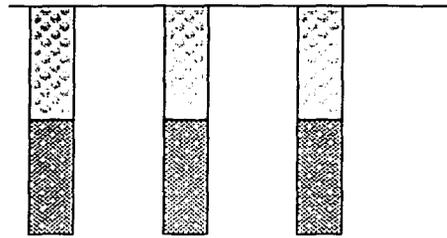
Bordo: 14 metros (46 pies)

Factor: $25 / 14 = 1.78$ (moderado a pobre)

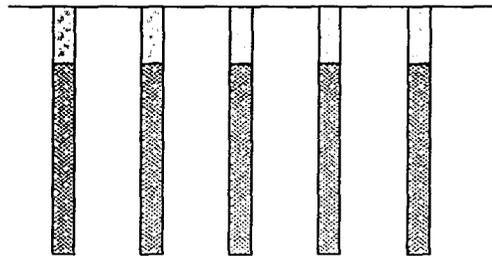
Al ser el factor $1.78 < 2$ se deben utilizar diámetros de carga más pequeños y mallas de perforación más apretadas (más densas) según el libro Effective Blast Design and Optimization en el capítulo 5 del grupo TerraDinamica donde también argumentan que bajos factores de rigidez requieren una energía más alta y más elevados factores para asegurar una fragmentación uniforme y el movimiento del macizo rocoso. En la figura número 5 se puede observar la distribución de energía para diferentes tipos de mallas, donde se aprecia que la mejor distribución de energía se obtiene de una malla de perforación apretada y diámetros de perforación más pequeños.



Factor 1, Pobre distribución de energía



Factor 2, Buena distribución de energía



Factor 3, Mejor distribución de energía

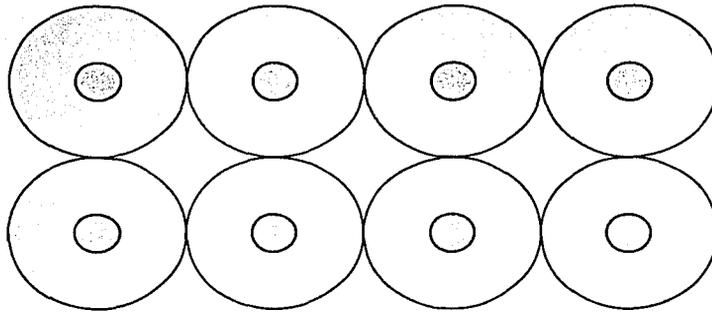
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 5 S/ESCALA

Espaciamiento: Es la distancia entre barrenos, el espaciado es perpendicular al borde.

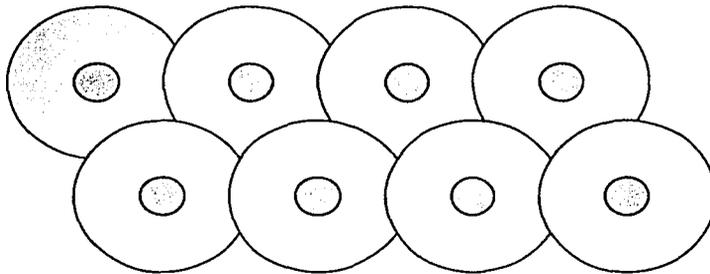
- El espaciado oscila entre 1 y 1.8 veces el borde
- Las mallas de perforación Tres bolillo o "STAGGERED" con un borde multiplicado por 1.15 proporcionan una óptima distribución de energía. Esto genera un triángulo equilátero. Cuando la estratificación de la roca se encuentra paralela a la cara libre puede permitir un espaciado mayor. Las mallas de perforación STAGGERED con bordos y espaciados apropiados y colocados en triángulos equiláteros generan:
 - Mejor fragmentación
 - Adecuado apilamiento de material
 - Se reducen vibraciones
 - Se reducen efectos negativos hacia atrás de la zona volada (pateo¹⁴).

Las siguientes mejoras se presentan debido a que la energía de los explosivos esta bien distribuida, con lo cual se evita que se malgaste. Esto se puede apreciar en la figura número 6.

¹⁴ El pateo de una voladura consiste en el agrietamiento hacia atrás de la zona volada y generalmente producirá daños en el talud final de dicha voladura.



Zona de mala fragmentación



Todas las zonas fracturadas

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
MALLA DE PERFORACIÓN STAGGERED O TRES BOLILLO	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 6 S/ESCALA

Todo esto se reduce a: Si observamos con detalle veremos que una malla de tipo tres bolillo o "STAGGERD" es en este caso lo más adecuado pues se tiene una mayor cobertura de terreno que si se perfora con una malla cuadrada.

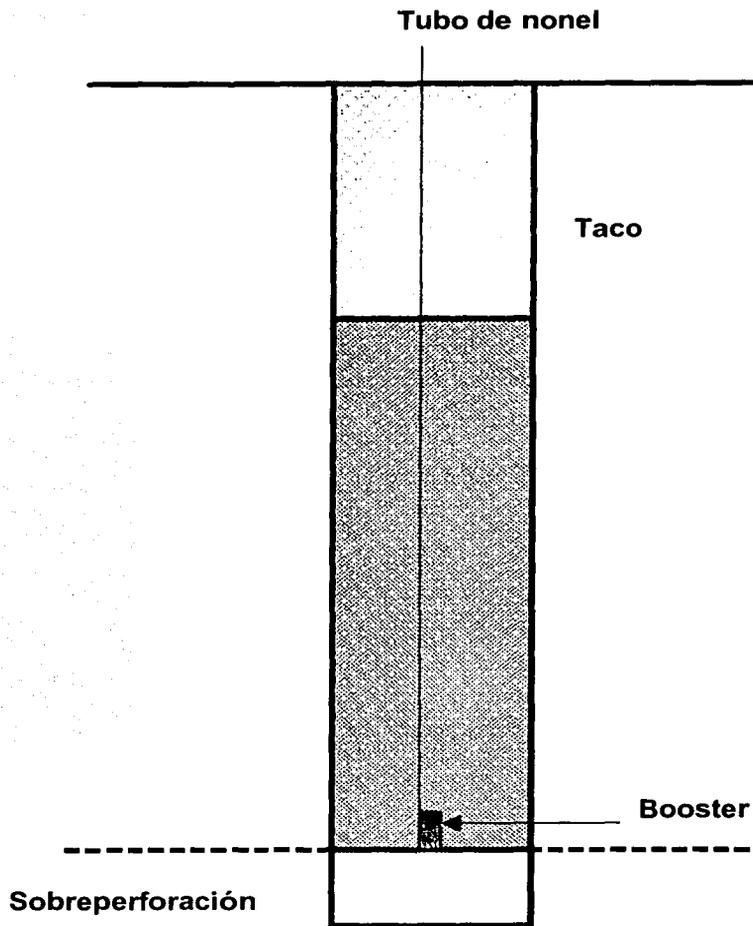
- Sobreperforación: Es la longitud adicional que es perforado un barreno, la cual ayuda a romper la roca a la profundidad deseada. Ver la figura 7.

Es igual a la longitud del bordo multiplicado por 0.3 - 0.5

Si una sobreperforación es equivalente a 0.5 veces el bordo y aún se observa que queda mucha "pata"¹⁵, se debe reducir el factor hacia 0.3

Para mejorar la fragmentación y el control de piso se debe colocar el iniciador (booster o veladora) al final del barreno.

¹⁵ La pata es la masa rocosa que quedó sin sufrir daño aparente en la parte inferior del banco, una vez que se ha realizado la detonación del explosivo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
SOBREPERFORACIÓN PARA EL CONTROL DE PISO	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 7 S/ESCALA

- **Retacado:**

1. Es el material inerte que se coloca en el barreno para confinar los explosivos, de tal manera que se logra el confinamiento de la energía.
2. Relación Diámetro de Carga-Retacado = 20 - 30 veces el diámetro de carga.
3. Proyección de roca y escape prematuro de gases. Si el retacado es menos de 20 veces el diámetro de carga, se puede presentar proyección de roca y escape prematuro de gases.
4. Relación con el Bordo-Retacado = 0.7-1.3 veces la longitud del bordo.
5. En bancos y/o labores con bordo excesivo, el retacado debe estar por lo menos un 0.3048 metros (1 pie) por debajo del nivel de piso.
6. La roca triturada confina mejor la energía de los explosivos que el material de residuo de las perforaciones, debido a que los ángulos de las rocas trituradas actúan como un sistema de sellamiento. $1/10 * \text{diámetro de barreno} = \text{tamaño de retacado}$.
7. Para barrenos húmedos se requiere mayor cantidad de retacado para aumentar el confinamiento que para barrenos secos.

- Factor de confinamiento relativo (RC): Se tiene en cuenta el retacado como factor de confinamiento relativo, debe ser mayor de 1.4
- Distribución vertical de energía: La longitud de la carga dividida entre la altura del banco debe ser mayor a un 80%, lo cual producirá una mayor fragmentación.
- La fila al lado de la cara libre cuando se presentan patas: Se debe recurrir a la disminución de bordo y a la colocación de mayor retacado.
- Taco: Reducción del peso de la carga usando secciones de material inerte en la columna de explosivos; características que deben cumplir los materiales utilizados para taco:

1. El taco debe ser de material inerte, se pueden utilizar los residuos de las perforaciones, sin embargo se recomienda utilizar material triturado o grava.
2. Para barrenos secos la mínima longitud de los tacos debe ser igual a 6 veces el diámetro de carga.
3. Para barrenos húmedos debe ser igual a 12 veces el diámetro de carga.
4. Se usa en voladuras sin una cara libre y cuando la cara libre tiene una roca fragmentada enfrente.
5. Se puede usar el taco para: disminuir la amplitud de las vibraciones del suelo, disminuir el uso de explosivos, mejor distribución de la energía en barrenos profundos, se mejoran los resultados en las tapas de los barrenos, disminuye el pateo.
6. El taco debe ser usado con precaución, de tal manera que no se sobre confine la carga de explosivos.

5.4 BOLSAS DE GAS

Una bolsa de gas esta compuesta en su interior de carbonato de sodio y vinagre debidamente separadas, al ser combinadas por el efecto de un golpe las bolsas de vinagre y carbonato se rompen haciendo que se produzca una reacción y con este efecto se logra que se infle la bolsa que esta hecha de un material resistente a la presión y está forrada de yute, puede soportar hasta 3,000 kilogramos. Estas bolsas son utilizadas para crear la cámara de aire ya que su colocación permite agilizar el proceso del cargado de barrenos.

5.5 HUMOS AMARILLOS EN LAS VOLADURAS

La formación de gases nitrosos en la voladura se puede originar por las materias primas, las malas prácticas operacionales y el terreno. Las materias primas producen gases nitrosos si el nitrato de amonio está húmedo o tiene exceso de finos o presenta una baja porosidad. Por otro lado, este fenómeno puede generarse debido a emulsiones desbalanceadas poco viscosas y cristalizadas.

En cuanto a malas prácticas operacionales, podrían producirse gases nitrosos si la calibración de los camiones-fábrica no corresponde a la mezcla que se está administrando en el barreno, si el explosivo queda en un diámetro crítico típico (al usar mangas), si se produce contaminación del explosivo con el detritus o el material de las paredes del barreno y si se utilizan explosivos que no corresponden en zonas con agua, por que las materias primas que se utilizan son de tipo a granel y éstas producen gases nitrosos si hay desbalance de los Anfos y Anfos Pesados. Finalmente, en el terreno tendremos este tipo de gases si existen zonas con un alto fracturamiento, aguas dinámicas que laven el explosivo o aguas ácidas con productos básicos.

5.5.1 Posición adecuada del iniciador dentro de la columna explosiva

La decisión para ubicar en cierta posición el iniciador dentro de una columna explosiva en voladuras de bancos, debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Lograr el máximo rendimiento del explosivo dentro de la columna.
- Aprovechar al máximo la energía explosiva en el quiebre de la roca.
- Minimizar los riesgos de iniciación en caso de ocurrencia de un barreno quedado.

Estos elementos deben ser considerados para realizar un análisis que logre la mejor ubicación del iniciador dentro de la columna explosiva.

Es sabido que la velocidad de detonación (VOD) se alcanza a una distancia que varía entre 0.2 a 1.5 metros, dependiendo, principalmente, del tipo de explosivo, tipo de iniciador, relación del diámetro del iniciador contra el diámetro del barreno.

En Anfos pesados y emulsiones bombeables, se puede decir que la VOD se alcanza a una distancia comprendida entre 2 a 4 veces el diámetro del barreno. La zona comprendida entre el punto de iniciación y el punto en que se alcanza la VOD se llama "Zona de iniciación"¹⁶ y corresponde a una zona en que el explosivo trabaja con baja eficiencia.

Este antecedente se usa para explicar las razones técnicas que indican la conveniencia de situar el iniciador bajo el nivel de piso.

Al situar el iniciador por sobre el nivel de piso, la "zona de iniciación", actuará en la roca que requiere buena fragmentación. En esta zona la fragmentación generada por acción del explosivo será de menor calidad que en aquellas en que la VOD es mayor.

5.5.2 ZONA DE INICIACIÓN

Al situar el iniciador por sobre el nivel de piso, la "zona de iniciación", actuará en la roca para la que se requiere buena fragmentación. En esta zona la fragmentación generada por la acción del explosivo será de menor calidad que en aquellas en que la VOD es mayor. Por otro lado, un argumento muy usado para ubicar el iniciador "a nivel de" piso es que esto permite un efecto de doble elemento de carga actuando sobre un mismo punto, coincidiendo con el bordo en la "pata". Sin embargo, esta teoría no considera el hecho de que existe una dinámica de transmisión de ondas de choque en la roca. Los efectos que esto provoca se explican más adelante.

Al situar el iniciador bajo el nivel de piso, la zona de baja eficiencia actuará también bajo el nivel de piso, pero esto no es relevante ya que en esta zona no

¹⁶ Es el lugar donde principia la detonación y no se obtiene una fragmentación fina, pues lo que se desea lograr es el nivel de piso sin crear mas daño.

se desea una fragmentación fina, sino que se requiere solamente lograr el nivel de piso sin crear mas daño que el necesario.

5.5.3 Frente de onda de choque

La posición del iniciador determinará la dirección en que se desplazará la mayor parte del frente de onda. Es importante que este se dirija en su mayoría hacia la zona de la roca que se desea fragmentar y además, se refleje en la cara libre. Esto permite aprovechar aún más el mecanismo de quiebre por tensión de la roca, causado por la refracción de las ondas de choque al enfrentarse a un cambio de medio (cara libre). Estas dos razones aconsejan situar el iniciador lo más bajo posible, es decir, inmediatamente por sobre el fondo del barreno. Esto asegura que en la zona por sobre el nivel de piso, el explosivo actuará con un rendimiento óptimo, ya que habrá alcanzado su VOD. Por otro lado, permite que la mayor parte del frente de onda se dirija hacia la zona de la roca que se desea fragmentar. Ver figura 8.

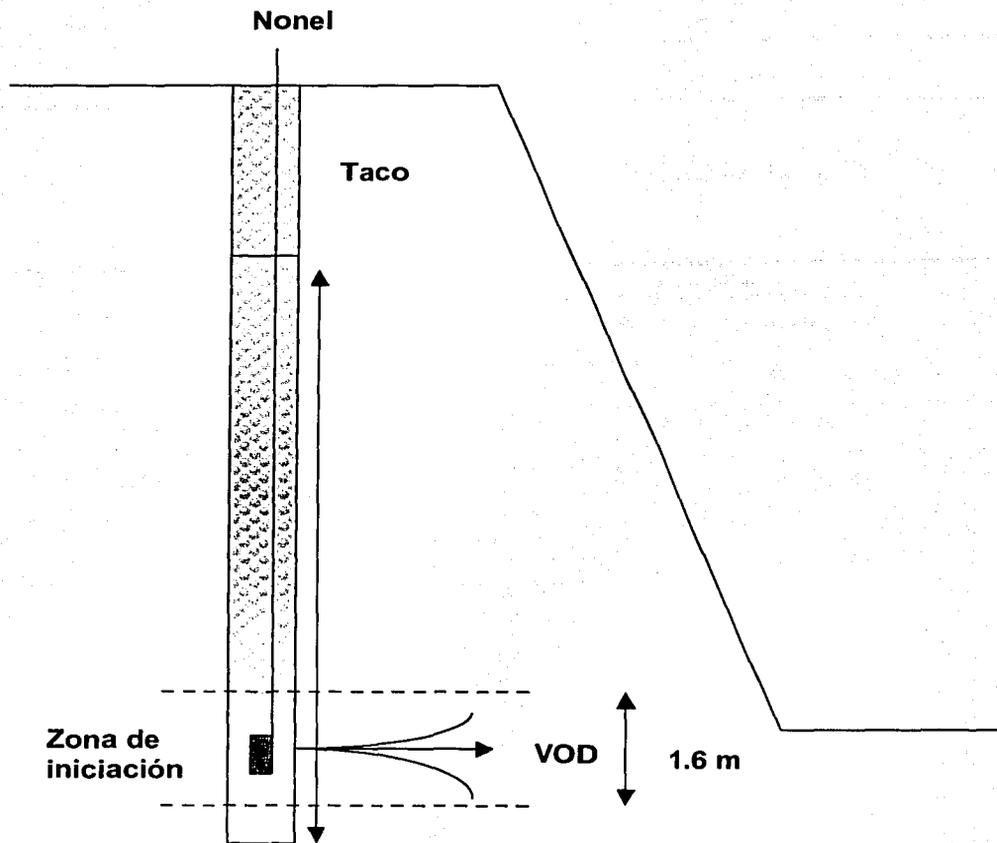
5.6 EXPLOSIVOS GASIFICADOS

Un Anfo pesado es una mezcla de anfo y un porcentaje de emulsión, al tener esta una densidad mayor que un Anfo simple se le determina como Anfo pesado; las mezclas más utilizadas de Anfo pesado se pueden observar en la tabla 2. Las cantidades corresponden para barrenos de 0.31 metros (12 ¼").

TIPO DE MEZCLA	CANTIDAD DE ANFO EN %	CANTIDAD DE EMULSIÓN EN %	SE ADICIONA GASSING	KG. POR METRO LINEAL
20/80	80	20	NO	85
50/50	50	50	NO	100
70/30	30	70	SI	95

TABLA 2

Se utiliza el gas nitrógeno para sensibilizar anfos pesados.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
FRETE DE ONDA DE CHOQUE	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 8 S/ESCALA

En la actualidad los explosivos industriales, usados en la gran minería, no sólo tienen por finalidad arrancar la roca para facilitar su extracción, sino además, en el caso de los minerales, se les exige contribuir en el proceso de trituración. Es decir, generar el mejor grado posible de fragmentación del material tronado. Con esto, se logran mejores productividades, aumentos en las recuperaciones y disminución en los costos globales. Es por eso, que en el caso de las voladuras en mineral, la tendencia es aumentar los consumos de explosivo y, a su vez, usar explosivo de mayor potencia. Por otro lado, dentro de la geometría de los tajos, el mineral, por lo general, se encuentra en el centro de estos y, en la mayoría de los casos, su explotación está acompañada por abundante agua. Esto limita la posibilidad de usar explosivos de alta potencia ya que la presencia de abundante agua obliga al uso de explosivos bombeables, los que por su naturaleza presentan menores propiedades explosivas que otro tipo de explosivos. Una alternativa que permite mejorar la potencia de los explosivos bombeables es la sensibilización a través de agentes químicos-físicos inertes tal como el gas nitrógeno (N_2).

5.6.1 Anfo Pesado gasificado

Una mezcla bombeable de explosivo de 70% de emulsión y 30% de Anfo puede ser sensibilizada con N_2 para mejorar sus propiedades explosivas. En el diagrama 2 se muestra el proceso de gasificación de este explosivo. De una densidad inicial de 1.34 g/cm^3 se puede obtener una densidad final de 0.95 g/cm^3 , al cabo de 25 minutos de reacción.

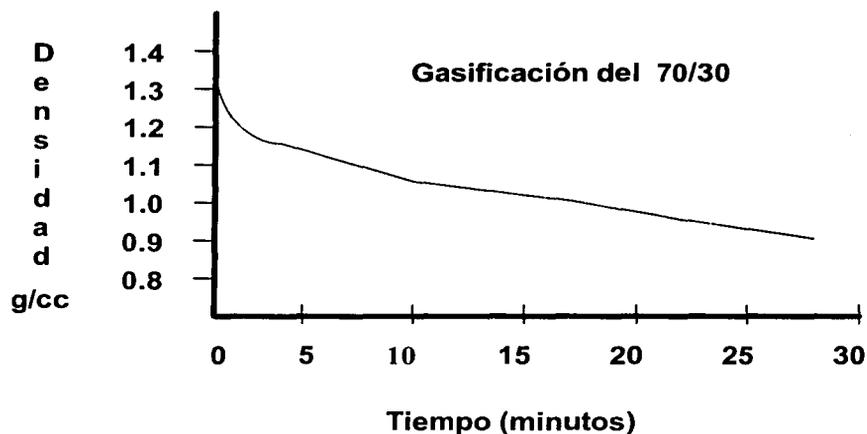


DIAGRAMA 2

Si se carga un barreno de 0.31 metros (12 ¼ pulgadas) de diámetro y de 25 metros de longitud con este explosivo, como resultado del cargado se obtiene una densidad en el fondo del barreno de 1.21 g/cm³ y una densidad en la parte superior, en contacto con el taco, de 1.14 g/cm³. Experiencias efectuadas con este explosivo han permitido aumentar la velocidad de detonación de 4,260 m/s a 5,080 m/s, al ser sensibilizado con N₂.

Datos de entrada

Longitud de barreno:	25 metros
Carga en kilogramos:	1,670
Diámetro:	0.31 metros (12 ¼ pulgadas)
Densidad de Copa (g/cc):	0.95
Densidad sin gas (g/cc):	1.34
Densidad de taco (g/cc):	1.80
Presión atmosférica (kPa):	95.0
Dt:Densidad arriba	
Dm: Densidad media	
Db:Densidad abajo	

Además de aumentar la velocidad de detonación del explosivo se puede observar cómo se presenta un aumento de volumen en el primer caso de barrenos con gas, esto es porque el nitrito de sodio que se utiliza para sensibilizar las mezclas ricas en emulsión, forma pequeñas burbujas de gas; también se puede observar que las tres distintas densidades son más bajas que las de los otros dos casos. Ver figura 9.

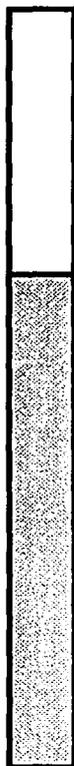
5.6.2 Sensibilización

Un explosivo es sensibilizado con el propósito de que su reacción química sea más rápida y, por lo tanto, aumente su potencia. La sensibilización es producto de la formación de "puntos calientes" o "hot spots", que son creados en el explosivo durante la detonación. Al avanzar la onda de detonación dentro de la columna explosiva, ésta se encuentra con zonas de "vacío" o de muy baja densidad, las que al ser sometidas a fuertes presiones, se comprimen liberando calor. Este calor es aportado a la reacción del explosivo y éste aumenta su velocidad de reacción, lo que se traduce en una mayor velocidad de detonación.

Barreno sin gas

Aire = 8.5

Dm = 1.34



Barrenos con gas

Barreno sin taco

Aire = 5.6

Dt = 0.95

Dm = 1.05

Db = 1.15



Barreno con taco

Taco = 7.0

Dt = 1.14

Dm = 1.17

Db = 1.21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
BARRENOS SENSIBILIZADOS CONTRA BARRENO SIN SENSIBILIZAR	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 9 S/ESCALA

Existen diversas formas de sensibilizar un explosivo, pero la más usual es a través del gas N₂. La incorporación de este gas en el explosivo ocurre de la siguiente forma: se disuelve una sal llamada Nitrito de sodio (NaNO₂) en agua, la que en el momento del cargado es inyectada en el explosivo el que, a su vez, debe contar con un ambiente ácido, se produce una reacción química, de la cual uno de los productos liberados es el gas nitrógeno (N₂).



Se observa en el diagrama 3 como se van formando minúsculas burbujas dentro de la emulsión, en un intervalo de tiempo que va de 0 a 5 y de 5 a 10 minutos, respectivamente.

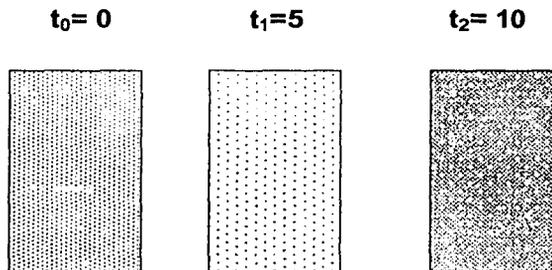


DIAGRAMA 3

5.6.3 Ventajas del uso de gas como sensibilizador

- El gas es inerte, por lo tanto, no altera la reacción química y las propiedades energéticas se mantienen (volumen de gas y calor desarrollado).
- El gas tiene muy baja densidad y es compresible; esto permite regular la densidad en la columna explosiva. En el fondo del barreno se concentra mayor energía que en la columna.
- Al ser inyectado en solución, se logra introducir al explosivo en forma homogénea.

- Menor precio del producto final, ya que la burbuja ocupa un espacio que debería ser llenado con más explosivo.
- Se logra menor densidad sin aumentar la cantidad de solución inyectada, basta con aumentar la concentración de nitrito de sodio.

5.7 LA IMPORTANCIA DEL ALUMINIO EN LOS EXPLOSIVOS

El aluminio se agrega a los explosivos para aumentar su energía. En una detonación produce reacciones exotérmicas, provenientes de la formación de óxidos de aluminio. En la práctica, hasta un 8% de aluminio aumenta considerablemente la energía del explosivo y con porcentajes mayores al 15% el producto comienza a desensibilizarse.

Por otra parte, al aumentar el porcentaje de aluminio, la velocidad de detonación disminuye debido a la presencia de este sólido. En una reacción donde se encuentra aluminio presente se generan los siguientes productos. Ejemplo de Anfo aluminizado:



1 Mol de Al₂O₃ genera 399.1 Kcal/Kg
1 Mol de CO genera 26.4 Kcal/Kg
1 Mol de CO₂ genera 94.1 Kcal/Kg

Es decir el óxido de aluminio genera 4.24 veces más energía que el CO₂ y 15.12 veces más que el CO.

Otro factor importante para los explosivos es la distribución granulométrica del aluminio. Así, en explosivos encartuchados se requiere el uso de aluminio en polvo, donde el 100% debe estar bajo la malla número 200. En productos a granel, para ser usado en diámetros mayores de 10 centímetros (4 pulgadas), se requiere que el 60% del aluminio esté bajo la malla número 50.

5.8 Barrenos inclinados vs barrenos verticales

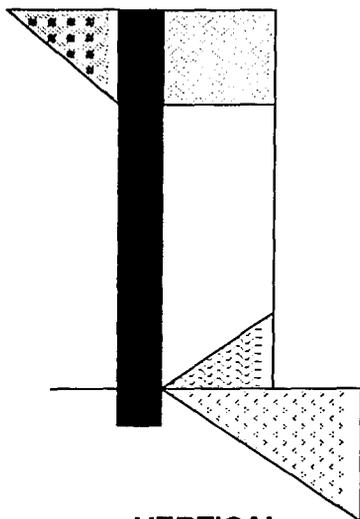
Ventajas de los barrenos inclinados en comparación con los barrenos verticales:

- Conseguir con ellos una mejor distribución de la energía
- Reducir el sobrefracuramiento
- Conseguir un mejor control de piso
- Mejorar la estabilidad del talud
- Incrementar la trayectoria de la roca, ya que se mejora el lanzamiento y se consiguen por lo tanto pilas de material más bajas. Ver figura 10.

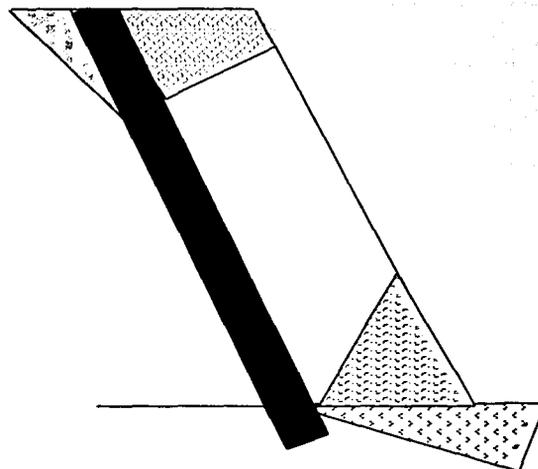
Desventajas de los barrenos inclinados en comparación con los barrenos verticales:

- Requieren una mayor atención cuando se van a posicionar los barrenos
- La orientación de las perforadoras hacia la cara libre se debe mantener
- Reduce la vida útil de las brocas
- Aumenta la desviación de los barrenos
- Aumenta los costos de perforación
- Se requieren operadores de perforadora expertos para este tipo de tareas
- Requieren de bancos más anchos para lograr maniobrar el equipo de perforación
- Se aumenta la dificultad para cargar los barrenos

Es obvio pensar que las ventajas de los barrenos inclinados son las desventajas de los barrenos verticales y viceversa.



VERTICAL



INCLINADO 70°



Piedras Grandes



Uso efectivo del explosivo en el fondo



Sobrerompimiento



Uso inefectivo del explosivo en el fondo

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
BARRENOS INCLINADOS VS BARRENOS VERTICALES	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 10 S/ESCALA

Cuando la estratificación tiende a la horizontal es conveniente que la inclinación de los barrenos permita atravesar los planos de contacto de los estratos para optimizar el funcionamiento de los explosivos. En MICARE se utilizan los barrenos inclinados a 70° por que ha dado mejores resultados que la barrenación vertical y es a 70° como una regla establecida por MICARE, sólo se detonarán barrenos verticales en los límites de tajo y/o cuando la barrenación sea de diámetros de 20 centímetros (7 7/8 ").

5.8.1 Propósito de voladuras secuenciales

- Crear una cara dentro del macizo rocoso, lo cual crea un alivio para la voladura
- Controlar la liberación y disposición de la energía de los explosivos
- Mejorar la fragmentación de la roca
- Controlar el desplazamiento de las rocas y el tipo de la pila de escombros
- Reducir el número de libras de explosivo que detonan al mismo tiempo
- Reducir requerimientos de explosivos
- Controlar las vibraciones y el golpe de aire
- Reducir el fracturamiento extremo y la fractura por pateo.

5.9 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA REALIZACIÓN DE UNA VOLADURA

Para la realización de una voladura es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Vibración: Un barreno por 8 milisegundos es un buen punto de arranque para prever las vibraciones, pero posiblemente no sea esa la respuesta. Una apropiada planeación puede requerir de la experiencia de contratistas o el uso de equipos sofisticados.

2. Fragmentación requerida: Debe ser óptima en roca masiva
Espaciamiento = 6.6 milisegundos/metro, (2 milisegundos/pie)
Bordo = 2–3 veces el tiempo del espaciamiento
3. Desplazamiento de la Pila de Escombros / Perfil: Depende de la línea de menor resistencia, para espaciamientos con retardos cortos de intervalos (<25 ms) incrementa la fragmentación y disminuye el desplazamiento. Para bordos con intervalos largos >13 ms/m, (4 ms/pie) se tiene un mejor desplazamiento con menos fragmentación.
4. Control de Pared: Retardos cortos entre barrenos y/o filas pueden causar Sobrefracturamiento (Esto se presenta como resultado de sobreconfinamiento o de que dos cargas explosivas actúen a la vez)
5. Geología: Estratos débiles, mantos de arcilla, planos de estratificación pobres, o roca altamente fracturada (Depende de las condiciones de cada sitio) = 9.8 ms/m, (3 ms/pie) de bordo, en roca suave > 13 ms/m, (4 ms/pie) de bordo.
6. Condiciones Hidrológicas: El agua que llena los barrenos puede causar el desacoplamiento del explosivo. Se puede presentar también detonación por simpatía. Los explosivos cuyas densidades sean > 1.25 g/cc y que además presenten sensibilización a gases, son susceptibles al desacoplamiento.

5.9.1 Consideraciones de diseño para retardar una voladura

1.- La clave para que una voladura sea bien diseñada y que sea además funcional es **crear alivio** para cada barreno de manera individual.

Esto se consigue por medio de un buen diseño, por ejemplo: una apropiada secuencia de retardos, bordos, espaciamientos, tacos y los explosivos que se utilizan.

2.- Siempre secuenciar las voladuras de tal manera que la cara libre esté disponible para cada barreno.

3.- Un secuenciamiento apropiado de retardos no disfraza o corrige una voladura pobremente diseñada. La temporización de una voladura no hace milagros, la temporización es solamente uno de los mayores componentes de una voladura.

4.- El hecho de que se coloque un retardo por barreno, no es garantía de control de vibraciones, los problemas de vibración requieren la utilización de la última tecnología disponible para asistir el diseño de las voladuras: Sismógrafos, software-control de fase, etcétera.

5.- Utilizar el sistema de iniciación más adecuado que se tenga disponible. Cuando se realice la temporización de los diseños de voladuras tratar de hacerlo lo más simple posible, esto redundará en que no se cometan errores al ponerla en práctica.

Con esta información podremos saber si el modelo de Devine cumple con esta norma de seguridad.

Tomaremos la distancia de 500 m \cong 1,640 pies como la zona crítica para este estudio, aunque en realidad estamos más alejados, tomaremos 300 Kg \cong 660 lbs como carga máxima por retardo y obtendremos:

$$V = 300.43 * \left(\frac{16.4}{\sqrt{660}} \right)^{-1.69} \cong 35.37 \text{ in/s} \cong 89.8 \text{ cm/s}$$

Bajo este modelo, pueden ser comparados con los distintos criterios establecidos, y aún así no sobrepasan los valores críticos determinados por varios autores, como lo es el de Jonson y Duvall donde el valor máximo permitido es de 1.074 m/s (42.3 in/s), en el manual de Dupont el valor máximo que se maneja es de 0.97 m/s (38.18 in/s); por lo que no se están produciendo daños en la roca ni en la infraestructura de las obras cercanas a las voladuras.

5.9.2 Consideraciones para un efectivo control de paredes

1. Controla el sobrefracuramiento y la estabilización de las paredes
2. Se debe crear un plano de fractura a lo largo del perímetro de la excavación o sitio de la voladura
3. Existen tres diferentes métodos, los cuales dependen de: geología, sensibilidad del área y equipo a utilizar:
 - Línea de Perforaciones
 - Voladura de Recorte o Cojín
 - Voladura de Precorte
4. Se deben usar barrenos de alivio entre el plano final de fractura y los barrenos de producción. Esto previene daños en la pared final
5. Las técnicas de control de pared son algunas veces usadas para propósitos de seguridad en paredes temporales
6. Incluso se usan para incrementar la efectividad de las voladuras en caso que la fragmentación pierda efectividad en una sobrefracuración muy larga.

5.10 EXPERIENCIAS EN PRECORTE EN EL CAST BLAST

Si los barrenos del precorte son quemados con barrenos de producción, debería existir un mínimo de 200 milisegundos, entre los barrenos del precorte y los barrenos de producción más cercanos.

El precorte originalmente se realiza entre rangos de barrenos desde los 6 a 16.5 centímetros (2½" a 6½") de diámetros y profundidades de 12 a 18 metros. Ahora, sin embargo, algunas operaciones de precorte son exitosas en barrenos con diámetros de 16.5 a 31 centímetros (6½" a 12¼"), con profundidades de 24 metros o más. El espaciamiento de los barrenos de precorte depende del diámetro del barreno y la geología de la roca. Rocas altamente fracturadas, requerirán espaciamientos más cercanos que una roca masiva. Un buen punto

de partida es usar 0.56 Kg (0.12 lb.) de explosivo por 1 m² (1ft²) de superficie pared de precorte.

Las técnicas de voladura controlada son usadas cuando se desea preservar el esfuerzo natural de las paredes de la roca en túneles, cortes de autopistas, cimentación de construcción y desarrollos de minas. Es importante dejar la roca en buenas condiciones para evitar fallas y deslizamientos de rocas y para prevenir trabajos de mantenimiento excesivo que a largo plazo son costosos.

Hay varias técnicas de voladura usadas para controlar el sobrequebre. Una de las primeras es a través de la línea de perforación, la cual involucra una fila simple de perforación de barrenos (espaciados muy cerca), sin cargar a lo largo del perímetro de la excavación, proporcionando un plano de debilidad dentro del cual la voladura pudiera quebrar.

La técnica de la voladura controlada puede ser clasificada dentro de tres tipos principales: precorte, recorte y voladura amortiguada.

El objetivo del precorte es reducir el sobrequebre (daño) y controlar la pendiente de la pared final (zanjas, bancos, etcétera) al límite de excavación final planificado.

El precorte consiste básicamente en perforar barrenos a lo largo del límite de excavación final, con un espaciamiento y una carga explosiva menor a la utilizada en una voladura de producción, de modo tal, que al detonarlos en forma simultánea, antes de iniciar la voladura principal, se genere un plano de fractura que sirva de filtro para las vibraciones y como medio de evacuación de los gases.

En la voladura amortiguada las cargas deben ser ligeras, bien distribuidas, perfectamente taponadas y se disparan después de que la excavación principal ha sido removida. Al ser disparado el bordo, el taco "amortigua" la fuerza dirigida hacia la pared terminada, reduciendo así al mínimo la fractura y las tensiones en esta.

5.10.1 Línea de perforaciones

- No se usan explosivos en los barrenos perforados
- Se perfora una línea de barrenos en el mismo plano, cada 1-4 diámetros.
- Normalmente se utilizan barrenos de 10 centímetros (4 pulgadas) debido al alto costo de metro perforado
- La línea de perforaciones es un método ampliamente utilizado para control de paredes cuando la roca es dura y masiva
- Roca grieta: Requiere de espaciamientos menos amplios, en este tipo de material, las líneas de perforaciones pueden no ser efectivas
- Barrenos de alivio: Se trata de una línea de barrenos entre la última fila de barrenos de producción y la fila de barrenos perforados.
 1. Bordo: 0.5 – 0.75 veces el bordo de producción
 2. Espaciamiento: 0.75 veces el espaciamiento de producción
 3. Barrenos de Carga: Deben ser cargados con 0.5 veces la carga de barrenos de producción, la carga se debe distribuir utilizando tacos de material inerte o de aire
 4. Proveen buen alivio frontal, ayuda a liberar energía en la línea de barrenos perforados.

5.10.2 Voladura de recorte o de cojín

- Se trata de una línea de barrenos que se disparan después de una voladura.
- Rango de diámetro de barrenos 3.8 – 9 centímetros (1.5 – 3.5 pulgadas)
- Se llenan los barrenos totalmente con taco, los cuales deben contener intervalos de aire dentro de su columna. Lo anterior crea un cojín alrededor de la carga.
- Espaciamiento entre barrenos: El espaciamiento se logra sumándole 1 al diámetro en pulgadas de la broca y multiplicándolo por 0.3048 m/pie. Para obtener el resultado en metros.
- Carga de barrenos: Se debe colocar un cartucho cada 60 cm, incrementando la carga de fondo entre 2 y 3 cartuchos.

- Bordo: 0.75 veces el bordo de producción.
- Los barrenos deben ser detonados simultáneamente a menos que existan problemas con la vibración que se genera, si esto ocurre, detonar los barrenos con la secuencia más rápida que se tenga disponible.
- Las líneas de barrenos de producción más cercana deben tener tacos.
- Las paredes no se protegen utilizando las voladuras de cojín, esto únicamente las limpia.
- Espaciamiento entre barrenos: El espaciamiento se logra sumándole 1 al diámetro en pulgadas de la broca y multiplicándolo por 0.3048 m/pie. Para obtener el resultado en metros.

5.10.3 Voladura de precorte

- Se deja el mismo bordo de producción cuando se usa el mismo diámetro de barrenos.

Bordo de producción x 0.5 Espaciamiento = Espaciamiento de producción x 0.5

- El espaciamiento en voladuras de precorte puede ser igual al diámetro de los barrenos en pulgadas multiplicado por 0.3048 m/pulgada
Espaciamiento = 3 veces el diámetro en pulgadas * 0.3048 m/pulgadas = 0.92 metros
- El precorte trabaja mejor en rocas masivas duras; cuando la roca es suave o altamente fisurada o estratificada, disminuya el espaciamiento.
- Cálculo de la carga explosiva Kg. /m² (lbs/pie²)

Carga / factor de carga = 1.4882 (0.305)

Ejemplo:

Pared de 30 m (98 ft) * 30 m (98 ft) = 900 m² * 1.4882 = 1,339.4 kg/m²
0.305 * (9,604 ft²) = 2,928.04 lbs/pie²

1 barreno por cada metro (3 pies) de espaciamiento = 30/1 = 30 barrenos

98/3 = (33 barrenos)

$1,339.4 \text{ kg/m}^2 / 30 \text{ barrenos} = 44.6 \text{ kg/barreno}$

$2,928.04 \text{ (lbs/pie}^2 \text{)} / 33 \text{ barrenos} = 88.72 \text{ lbs/barreno}$

- Se obtienen mejores resultados cuando la carga es distribuida a lo largo de todo el barreno
- Se debe detonar simultáneamente toda la línea de precorte, a menos que existan problemas con la vibración que se genera; si esto ocurre, detone los barrenos con la secuencia más rápida que tenga disponible
- Los barrenos de precorte se detonan antes de las filas de producción más cercanas
- Es mejor volar el precorte, que perforar y volar líneas de producción, algunas veces los barrenos de producción pueden dañar los de precorte incluso a largas distancias y algunas veces los de precorte pueden dañar los barrenos de producción
- Es conveniente realizar pruebas de precorte en áreas críticas antes de intentarlo sobre paredes finales

5.10.4 Técnicas de cargas de precorte:

1. Intervalos de Aire o "Air decks": Se incorporan espacios vacíos entre la columna de explosivo y el retacado, normalmente se usan bolsas inflables o una especie de tapa para contener el retacado en suspensión.
2. Cargas Suspendidas: Suspender las cargas en los barrenos de precorte en puntos determinantes.
3. Productos encartuchados de baja densidad: Cargar toda la columna.
4. Columnas continuas de explosivos: Utilizar líneas continuas de productos de precorte o de cordón detonante.

5.11 CÁMARA DE AIRE

La cámara de aire, es una técnica de voladura muy utilizada en la actualidad; esta consiste en incorporar una columna de aire dentro de un barreno cargado. Normalmente esta columna de aire separa al explosivo del material de taco. Sus aplicaciones más comunes son en barrenos de filas amortiguadas y en algunos casos, en barrenos de producción con el fin de generar un ahorro de explosivo.

5.11.1 Ejemplo de aplicación de la cámara de aire

Aplicando este concepto y tomando como ejemplo una configuración de cargado para voladuras que se realizó en banco I Corte de Caja, se calcula el efecto de reducción de presión de gases para distintas longitudes de cámara de aire.

Las siguientes tablas resumen el análisis realizado:

Datos utilizados para el cálculo.

Longitud del barreno (m)	30
Taco de aire en metros	8.0
Diámetro m (in)	0.30 (12 ¼)
Densidad del 20/80	1.2
Presión inicial Pd (kBar)	93
Presión de gases = 0.5 Pd	46.5

Tabla 1

Presión final = Volumen del explosivo * P gases

El cálculo se realizó reemplazando el explosivo por aire, manteniendo la longitud del taco constante.

Al aumentar la longitud de la cámara de aire se observa un brusco descenso en la presión de los gases. Por ejemplo, al usar una cámara de aire de 3 metros se produce una reducción de un 20.21% en la presión de los gases que actuarán en la roca.

5.11.2 Resultados obtenidos de la cámara de aire

Taco detritis 8.0 metros				
Taco	Cámara de aire	Volumen explosivo	Presión Final	% Pérdida Presión
8.0	0	1.000	46.5	0.0
9.0	1	0.950	44.17	5.01
10.0	2	0.874	40.64	12.60
11.0	3	0.798	37.10	20.21
12.0	4	0.722	33.57	27.80
13.0	5	0.646	30.03	35.41
14.0	6	0.570	26.50	43.01
15.0	7	0.494	22.97	50.60
16.0	8	0.418	19.43	58.21
17.0	9	0.342	15.90	65.80
18.0	10	0.266	12.36	73.41

Tabla 2

5.11.3 Variación presión-explosión por aumento de cámara de aire

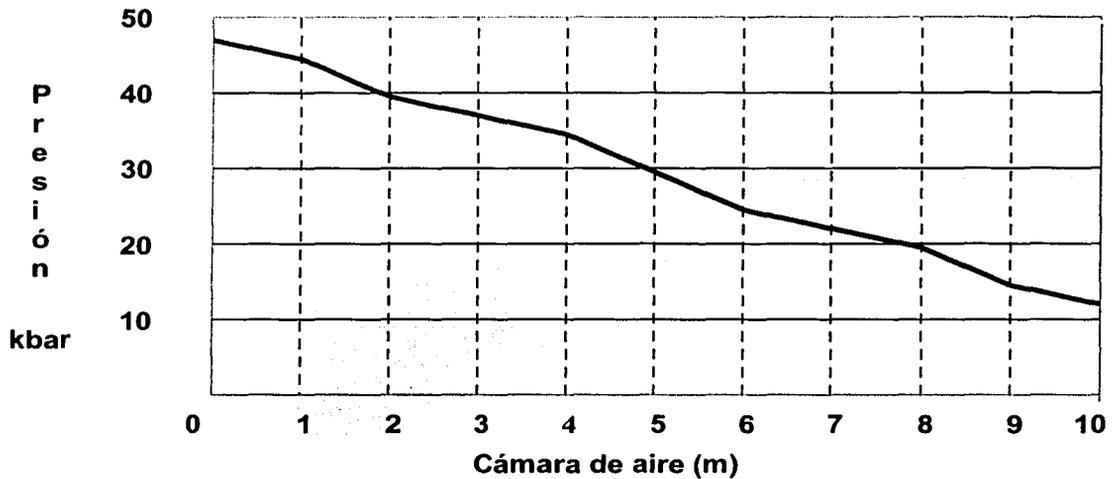


Tabla 3

5.12 ANÁLISIS DE MATERIALES PARA UTILIZARLOS COMO TACO

Se analizan distintos tipos de material de taco, disponibles en MICARE, como alternativas que permitan un mayor confinamiento del explosivo, de manera que se pueda evitar la pérdida de energía y aprovecharla en el fracturamiento de la roca.

5.12.1 Material de Suelo (Paleorrelleno)

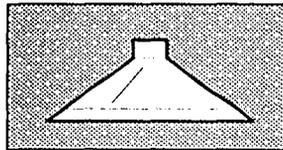
- Contiene excesivo fino y por lo tanto baja resistencia al "escopeteo".
- También contiene gran cantidad de material grueso (rocas) lo que significaba un alto riesgo de corte del tubo de señal "nonel".

5.12.2 Gravilla Integral

Un material redondeado, de tamaño menor a 3 centímetros (1 ¼") y con densidad 1,65 ton/m³, aparece como un taco de muy buena calidad, que durante el tiempo que se usó mejoró considerablemente el control de proyección de taco y la fragmentación. Sin embargo, aumentó el tiempo operacional por tapado de pozos.

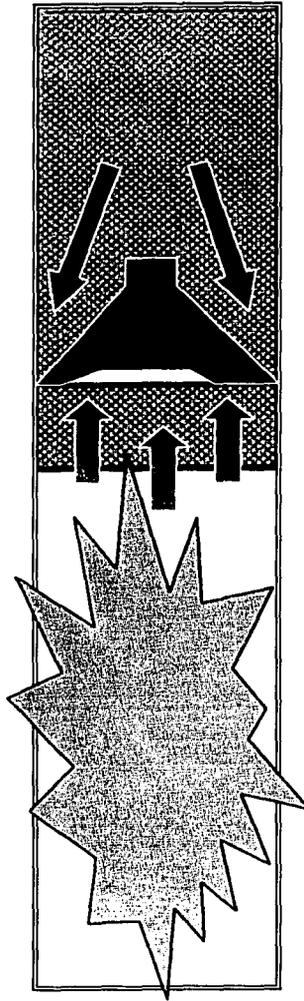
5.12.3 Tapones Cónicos

Dispositivo en forma de cono, fabricado con polietileno de alto impacto con una resistencia a la compresión de 1,054.5 kilogramos por centímetro cuadrado. Este tapón sella el collar del barreno una vez ocurrida la detonación para confinar la energía del explosivo en el típico camino de menor resistencia.



5.12.4 ¿Cómo trabajan los tapones cónicos?

En el instante en que la onda explosiva alcanza el tapón, éste se expande ocupando todo el pozo, el material de taco inferior no puede escapar pues su avance es trabado por el tapón, y el taco superior actúa por reacción aglutinando material de taco, lo que resulta en un nuevo direccionamiento de esfuerzos, agregando fuerzas friccionales a las paredes del pozo. Esto termina por confinar de una mejor forma el explosivo y aumentar el tiempo de trabajo dentro del pozo. Ver figura 11.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESQUEMA DE CÓMO TRABAJA UN TAPÓN CÓNICO DENTRO DE UN BARRENO	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 11 S/ESCALA

5.13 VOLADURAS DE CAST BLAST

Este tipo de voladuras es diferente a las voladuras convencionales ya que en una voladura convencional lo que se requiere es fragmentar el material a un tamaño con el cual se pueda trabajar y en una voladura de Cast Blast además de la fragmentación adecuada se requiere que se desplace la mayor cantidad de material hacia los tiros de estéril para que el trabajo que realice la draga sea el menor y así se obtenga el menor tiempo posible en acarreo de estéril.

El tipo de plantilla que se utiliza y el factor de carga es diferente en una voladura de Cast Blast comparado con una del tipo convencional, para una voladura convencional se tiene una plantilla de 10 * 13 metros y un factor de carga de 0.360 kilogramos por metro cúbico; en una voladura del tipo Cast Blast se tiene una plantilla de 8.6 * 11 metros y una factor de carga de 0.760 kilogramos por metro cúbico. Porque el propósito que tiene una voladura de Cast Blast es la de desplazar el material estéril con la fuerza del explosivo, hacia el lugar de depósito final, que son los tiros de estéril y en una voladura convencional lo que se busca es fragmentar el material a un tamaño en que se pueda manejar con equipo convencional.

5.13.1 Anterior diseño de cargado de Cast Blast hecho por otra compañía.

Antes que Orica prestara sus servicios a MICARE la plantilla en el Cast Blast era de 8.0 x 9.0, se dejaba un taco intermedio de 3.0 metros en el barreno y el factor de carga que se estaba usando era de 0.820 kilogramos por metro cúbico y se dejaba un taco final de 7.0 metros, se colocaba una bolsa de gas para no dejar el taco tan abajo; la cantidad de explosivo utilizado por barreno quedaba de la siguiente manera:

Plantilla: 8.0 x 9.0

Fc: 0.820 Kilogramos por metro cúbico

Altura del barrenos: 38 metros

Diámetro de barrenación: 0.31 metros (12 ¼")

Cantidad de explosivo por barrenos: $8.0 \times 9.0 \times 38 \times 0.82 \cong 2,243.5$ kilogramos.

Considerando que se toman 85 kilogramos de 20/80 por cada metro lineal esto hace que se avance con esta cantidad de explosivo 26.4 metros lineales.

Esto es, sí el barrenos estuviera seco porque de lo contrario el factor de carga tendría que subir o si se quisiera conservar el mismo factor se tendría que dejar el taco final más abajo o se tendría que poner más taco intermedio.

El taco final se coloca con gravilla y siempre le ponen una bolsa de gas a 7.0 metros de profundidad para que se conserve el taco final de 7.0 metros y se coloca un booster de 0.908 kilogramos (2 libras) por carga.

Los barrenos ayudantes se cargaban de manera normal.

El problema que tenía esta compañía con este tipo de cargado era un pateo constante cada vez que se volaba y rocas grandes a la altura del taco intermedio que a veces eran bloques completos.

Por lo que se dieron a prueba 5 voladuras en el Cast Blast a la compañía Orica con las mismas condiciones, es decir, respetando el factor de carga que se tenía y la misma plantilla de barrenación que estaba utilizando la anterior compañía.

En la figura 12 se puede ver el diseño que utilizaba la anterior compañía en el Cast Blast.

Como se puede observar existe un taco real de 8.6 metros más un taco intermedio, para una voladura de Cast Blast, donde lo que se busca es que exista el mayor desplazamiento, a la altura del taco final, quedando la posibilidad de no existir este resultado.

Nonel de 500 ms

**Taco final de
7.0 metros**

**Se tiene 1.6
metros de aire**

**19.4 metros de
segunda carga**

**3.0 metros de
taco intermedio**

**7 metros de
carga de fondo**



38 metros

**2 metros de detritus para
proteger al carbón**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
DISEÑO DEL CARGADO DE UN BARRENO EN EL CAST BLAST HECHO POR LA COMPAÑÍA	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 12 S/ESCALA

5.14 VOLADURA CONVENCIONAL

Es aquella en la que se utilizan bajos factores de carga pues el propósito que tiene es reducir el material a un tamaño manejable para los equipos convencionales (palas, camiones fuera de carretera, cargadores frontales, etc.). Según la fórmula de la distancia escalada que ya observamos en este capítulo podemos conocer la carga máxima por disparar para el siguiente caso.

Tenemos una zona habitada a 500 metros del lugar de la voladura "Ranchito"; según la ecuación de la distancia escalada vista en este capítulo en la página 26, una norma reguladora nos indica que:

$$D_s = \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) = 27.5 \text{ m/kg}^{1/2}$$

Queremos saber la mayor carga que podemos tener por retardo, entonces:

$$W = \left(\frac{500}{27.5} \right)^2 = 330 \text{ Kilogramos por retardo}$$

Se desarrolló un método por el cual una carga grande de explosivo puede ser detonada en una serie de cargas pequeñas, en lugar de una grande. Obviamente, la reducción en el tamaño de la carga se puede obtener con el uso de retardos múltiples.

El factor de carga que se utiliza es de $F_c = 0.360 \text{ Kg/m}^3$, para conocer la cantidad de explosivo que tiene que llevar cada barreno queda de la siguiente forma:

$$F_c = 0.360 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Plantilla} = \text{Bordo} * \text{Espaciamiento} = 10 \text{ metros} * 13 \text{ metros}$$

$$\text{Longitud de barreno} = 30 \text{ metros}$$

$$\text{Cantidad de explosivo por barreno} = F_c * \text{Plantilla} * \text{Longitud de barreno}$$

$$\text{Cant. de explosivo} = 0.360 \text{ Kg/m}^3 * 10 \text{ m} * 13 \text{ m} * 30 \text{ m} = \mathbf{1,404 \text{ kg/barreno}}$$

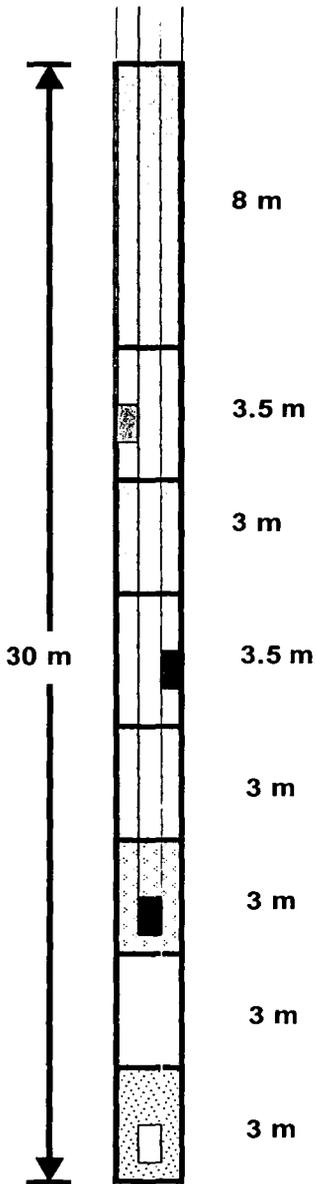
Esta carga no puede ser detonada al mismo tiempo, ya que traería demasiados problemas de vibración, como ya conocemos la carga máxima que se puede detonar por retardo que es de 330 kilogramos, podemos saber cuantos retardos vamos a utilizar: $1,404 \text{ kilogramos} / 330 \text{ kilogramos} = 4.25 \cong 5$; a continuación veremos en la figura 13 la distribución de cargas que propuso Orica y el por que de estas.

5.14.1 Esquema de distribución de cargas en un barreno del banco de Corte de Caja

Una vez seguros que no se están produciendo daños en las estructuras, cercanas a la zona de voladuras, procederemos a distribuir las cargas explosivas dentro de los barrenos de Prebanco Corte de Caja donde el control de la vibración es fundamental por la cercanía con la mina V, utilizaremos tacos de suelo que separen los retardos.

Con el 70/30 se avanza un metro lineal por cada 95 Kg, para avanzar un metro lineal; en 50/50 se agregan 100 Kg y en el 20/80 se utilizan tan solo 85 Kg es por eso que en 20/80 se avanza 3.5 metros por cada 300 kilogramos de explosivo, para barrenos uniformes es decir que no presenten huecos o cavidades; así se reducen a 4 cargas por barreno, es decir solo se necesitan 1,200 kilogramos por barreno, con lo que estamos por debajo del factor real de carga que se debiera utilizar en este lugar.

Por cada carga se utilizará un número de nonel diferente, con diferencia de 25 milisegundos entre carga y carga; así se tiene en el fondo del barreno un retardo de 125 milisegundos, el siguiente retardo es de 150 milisegundos, en la tercera carga se tiene un retardo de 175 milisegundos y en la última de estas cargas se colocará el retardo de 200 milisegundos. Así se asegura el control de vibración.



-  **20/80 Para bnos. secos**
-  **50/50 Para bnos. húmedos**
-  **70/30 Para bnos. con agua**
-  **Taco de detritus**
-  **Taco de gravilla**
-  **Nonel de 200 ms**
-  **Nonel de 175 ms**
-  **Nonel de 150 ms**
-  **Nonel de 125 ms**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN UN BARRENO DEL BANCO CORTE DE CAJA	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 13 S/ESCALA

Anteriormente no se cargaba de esta forma y se tenían demasiadas reclamaciones por parte de: la mina V, de la zona habitada y de CFE. La compañía que estaba trabajando antes aquí tenía el contrato de venta de producto (se le pagaba por consumo de explosivo), MICARE sólo les pagaba el explosivo y no los accesorios como son: conectores, noneles, "lead line"¹⁷, boosters, y otros materiales que se utilizan para realizar una voladura y para ellos era mejor cargarle la mano de explosivo que ponerle tacos intermedios a los barrenos. Al entrar Orica se observan los cambios, se comienza con disminuir la cantidad de explosivo por retardo, se realizaron las pruebas con dos cargas pero aún se tenían problemas con la vibración, se hacen pruebas con 3 cargas pero no se alcanzan los resultados deseados; finalmente, se llega a disparar con cuatro cargas por barreno y se obtienen resultados aceptables (aquí todavía se ponían 350 Kg/retardo) con el tiempo y haciendo algunos ajustes se ha logrado bajar la carga por retardo que es de 300 Kg/retardo, que es lo máximo que se puede detonar por retardo; con esto se asegura de estar dentro de los parámetros que establecen las normas del departamento de minas de los EEUUA y en México se rige por la que edita el Manual para el uso de explosivos de Dupont.

Para Orica es importante bajar el consumo de explosivo por barreno en esta área ya que el contrato que se tiene es por metro cúbico volado y no el de venta de explosivo; cabe señalar que los resultados obtenidos tienen satisfecho al cliente MICARE pues la granulometría del material que recibe está dentro de los estándares que ellos marcan; así no se tienen problemas para el manejo del material, lo anterior en el área de Corte de Caja. Para el Cast Blast se planteó trabajar bajo otro parámetro, ya que se tienen diferentes condiciones; no hay zonas habitadas ni el riesgo de tener la mina V tan cerca de las voladuras.

¹⁷ El lead line es un tubo de plástico laminado de diámetro pequeño, revestido con una capa muy delgada de material reactivo; el cual tiene en un extremo un fulminante de período de retardo de 0 ms y que será enganchado en el (los) nonel (es) que se iniciara (n) primero.

5.15 DISEÑO DE CARGADO DE CAST BLAST REALIZADO POR ORICA

Cuando a la anterior compañía se le propuso cargar voladuras de Cast Blast se tuvo que adaptar a estas condiciones, pues el plan de cargado lo establecía la mina, además se debía respetar el factor de carga de 0.820 Kilogramos por metro cúbico, las primeras voladuras tuvieron un mejor resultado y esto fue debido a que el taco intermedio se intercalaba, es decir se depositaba en la primera línea una carga de fondo de 5 metros de explosivo, en la segunda una carga de fondo de 8 metros, en la tercera se depositaba 11 metros de carga de fondo y si había una cuarta línea se cargaba igual que la primera; esto hizo que existiera siempre detrás de un taco intermedio una carga de explosivo que pudiera fragmentar lo que se dejaba sin cargar, los barrenos ayudantes se dejaban con un taco de 12.0 metros y se les colocaba una bolsa de gas a los 8.0 metros, el explosivo que no se depositaba en los barrenos ayudantes se colocaba en barrenos de producción y se eliminaba el taco de aire final, con esto se logró una mejor fragmentación a la altura del taco final.

Con el tiempo la mina permitió modificar un poco el plan de cargado con la condición de que no se puede sobrepasar el factor de carga, se hicieron pruebas con un tapón cónico el cual nos permitiría bajar un poco el taco final sin descuidar la fragmentación y el beneficio del Cast Blast, el explosivo que se está ahorrando en el taco final se comenzó a depositar en vez del taco intermedio y así la columna de explosivo se hacía cada vez más grande mientras que el taco intermedio se hacía más corto, finalmente con los buenos resultados que se obtuvieron tanto con el tapón cónico así como con la columna casi corrida de explosivo se le planteó a la mina abrir la plantilla de barrenación para poder colocar una carga corrida de explosivo y para poder bajar el factor de carga que se tiene en este tipo de voladuras, pues no hay que olvidar que en el Cast Blast, MICARE paga por cantidad de explosivo utilizado y no por metro cúbico volado. Con esta propuesta MICARE accedió y se permitió realizar otras 5 voladuras de Cast Blast de prueba.

El cargado del barreno es con una columna continua de explosivo no importando que sea un barreno, húmedo, seco o con agua, se coloca un booster en la parte inferior del barreno y otro a mediación ambos noneles son del mismo número así como en todos los demás barrenos de producción que se vayan a cargar; se colocan dos booster en cada barreno de dos libras cada uno; por 2 diferentes motivos, los cuales son:

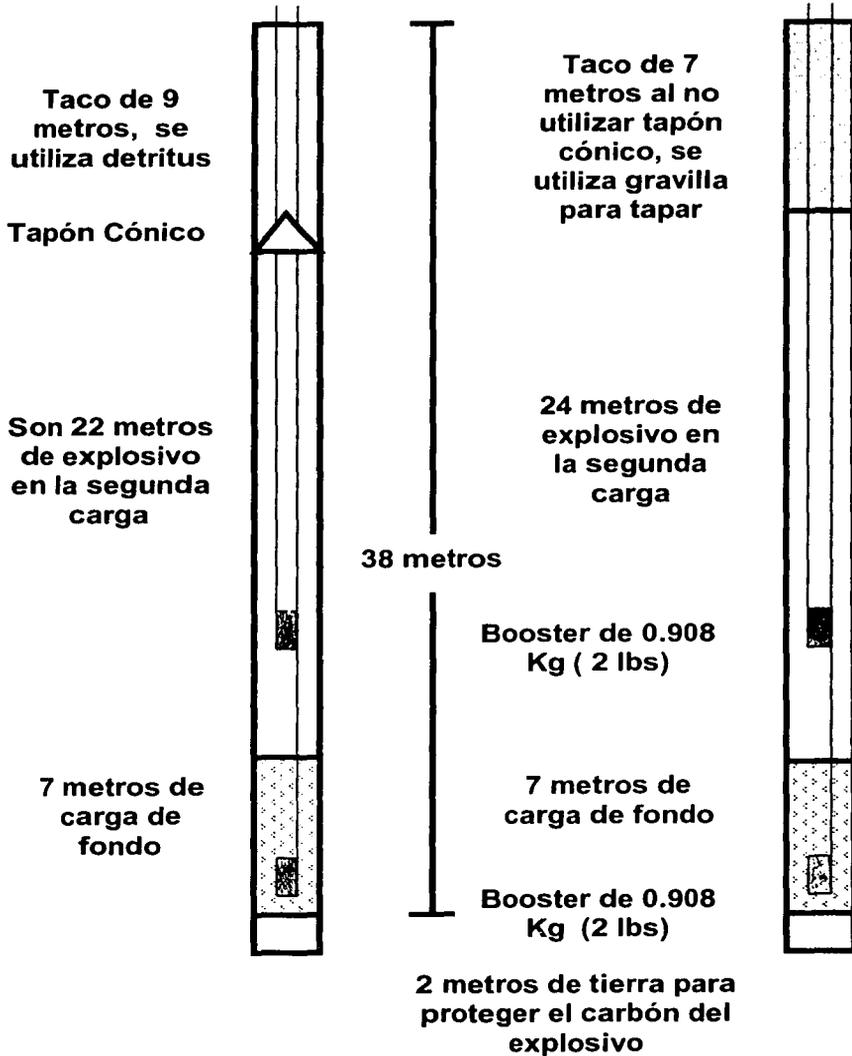
- Por seguridad (muchas veces el booster no hace contacto con el material explosivo y podría quedarse sin detonar; esto no sucede con frecuencia pero se observa mas en barrenos húmedos y con agua que en barrenos secos, los dos primeros tienen por lo regular soquete y/o lodo).
- Para darle una mayor velocidad de detonación (tiene más poder el explosivo al quemarse en dos diferentes puntos al mismo tiempo).

Lo que se persigue en una voladura de Cast Blast es que el explosivo trabaje lo mejor que se pueda y siempre se trata de usar mezclas que sean ricas en anfo para que produzcan más gases, si el barreno tuviera agua y esta se pudiera secar o sellar mediante una bolsa de gas esto sería lo ideal, siempre que se pueda se utilizarán mezclas como 50/50, 20/80 e incluso anfo.

Si en lugar de dejar el taco a 7 metros se dejara a 9 metros y se le pusiera un tapón cónico se estaría ahorrando 2 metros de explosivo por barreno; se hizo esta propuesta a la mina y quedo abierta pues cuando exista la posibilidad de tapar los barrenos con gravilla se hará de esta manera y cuando no se pueda se utilizarán los tapones cónicos, se realizó un estudio completo de tapones cónicos contra gravilla y el resultado se observará más adelante, para fines de mayor comprensión se muestran en la figura 14 las dos formas de cargado en un barreno de producción de Cast Blast utilizados por Orica.

Noneles de 600 ms

Noneles de 600 ms



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
DISEÑOS DE CARGADO DE BARRENOS EN EL CAST BLAST POR LA COMPAÑÍA ORICA	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 14 S/ESCALA

5.16 BOLSAS DE GAS COMO SELLADOR DE AGUA

Siempre que exista agua y se pueda controlar con este tipo de bolsas se utilizarán, a menos que la cantidad de agua sea demasiada, se utilizará una columna corrida de 70/30 con lo que sé esta exponiendo a que la cantidad de gases no sea la misma que si se utilizara otro tipo de mezcla; el material quedará bien fragmentado pero el desplazamiento no será tan grande como si se hubieran utilizado mezclas ricas en Anfo, con esta información se puede saber de antemano qué esperar en una voladura de Cast Blast.

También se utilizan en los barrenos del precorte al ser colocada unos metros abajo del nivel de cresta del barreno para crear la cámara de aire.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 EXPERIENCIA QUE SE TUVO EN EL PRECORTE PARA EL CAST BLAST:

- Rocas de alta cohesión: Pueden causar malos acabados a las paredes, no existe hasta hoy nada que pueda acabar con ese problema
- Roca maciza: Puede ser evaluada fácilmente, reducir el espaciamiento si no se obtiene un corte uniforme entre barrenos; si el corte obtenido afecta la estabilidad de la pared, aumentar el espaciamiento.

En MICARE se utilizó la técnica del precorte ya que se obtuvieron mejores resultados que con los otros 2 métodos (voladura controlada y voladura de recorte) para el control de las paredes; así mismo se aseguró que no existía sobre rompimiento, pues se creó un plano para evitar dañar las paredes y en raras ocasiones se presentó pateo y/o fuga de energía. Sólo en el Cast Blast se utilizó este método pues no se cuenta con el tiempo suficiente para hacer "barrenos de costura"¹⁸ para otras áreas; sólo se realizó aquí para dejar una pared limpia y consistente (sin riesgo a caer) ya que será el banco por donde pasará la Draga.

6.1.1 Resultados obtenidos utilizando cámaras de aire en el precorte

De acuerdo al modelo que explica el funcionamiento de las cámaras de aire, se puede decir que:

- Incluir la cámara de aire en barrenos de contorno es una buena técnica de amortiguación, ya que el trabajo efectuado por los gases se distribuye a lo largo de toda la columna a una menor presión. Si una columna explosiva contiene 50% de explosivo y 50% de aire, la presión final sobre la roca se reducirá en un 75%.

¹⁸ Barrenos de costura es la línea de barrenación que se hace para realizar una voladura de precorte.

- En barrenos de producción es posible usar cámara de aire, pero sólo si ésta es de menor longitud y si el tipo de roca es favorable (baja dureza y fracturada). En estos casos y de acuerdo a experiencias, no es recomendable reemplazar más de un 10% de la columna explosiva por aire.

6.2 DESARROLLO DE PRUEBAS PARA EVALUAR EFICIENCIA DE LOS TACOS

Para evaluar la mejor alternativa de taco se utilizó suelo, gravilla y tapones cónicos, en distintos períodos entre Enero del 99 hasta Marzo del 2000.

- Análisis granulométrico
- Rendimiento de equipos
- Mediciones de VOD (Velocidad de Onda de Detonación) en el pozo.
- Medición de Vibraciones
- Inspecciones visuales

6.2.1 Análisis granulométrico

En la tabla 4 se muestra el P80 (80% pasante) y los tamaños máximos (100% pasante) de la fragmentación a los distintos casos de voladuras analizadas.

Porcentaje de Pasante para voladuras con taco de Suelo, Gravilla y Tapón Cónico.

% Pasante	Taco Suelo (m)	Taco Gravilla (m)	Tapón Cónico (m)
P80	0.82	0.50	0.24
P100	1.58	0.90	0.60

Tabla 4

Las curvas de distribución granulométrica para los 3 casos indicados con anterioridad se muestran en las **Figuras 15, 16 y 17.**

6.3 CANTIDAD DE EXPLOSIVO UTILIZADO EN UN BARRENO DE CAST BLAST POR LA COMPAÑÍA ORICA:

El carbón se corta a una altura promedio de ± 40 metros

Fc: 760 gramos / metro cúbico

Plantilla: 8.6 * 11 metros

Longitud de barreno: 38 metros

Diámetro de barrenación: 12 ¼"

Cantidad de explosivo por barreno: $38 \times 8.6 \times 11 \times 0.760 \cong 2,732$ kilogramos

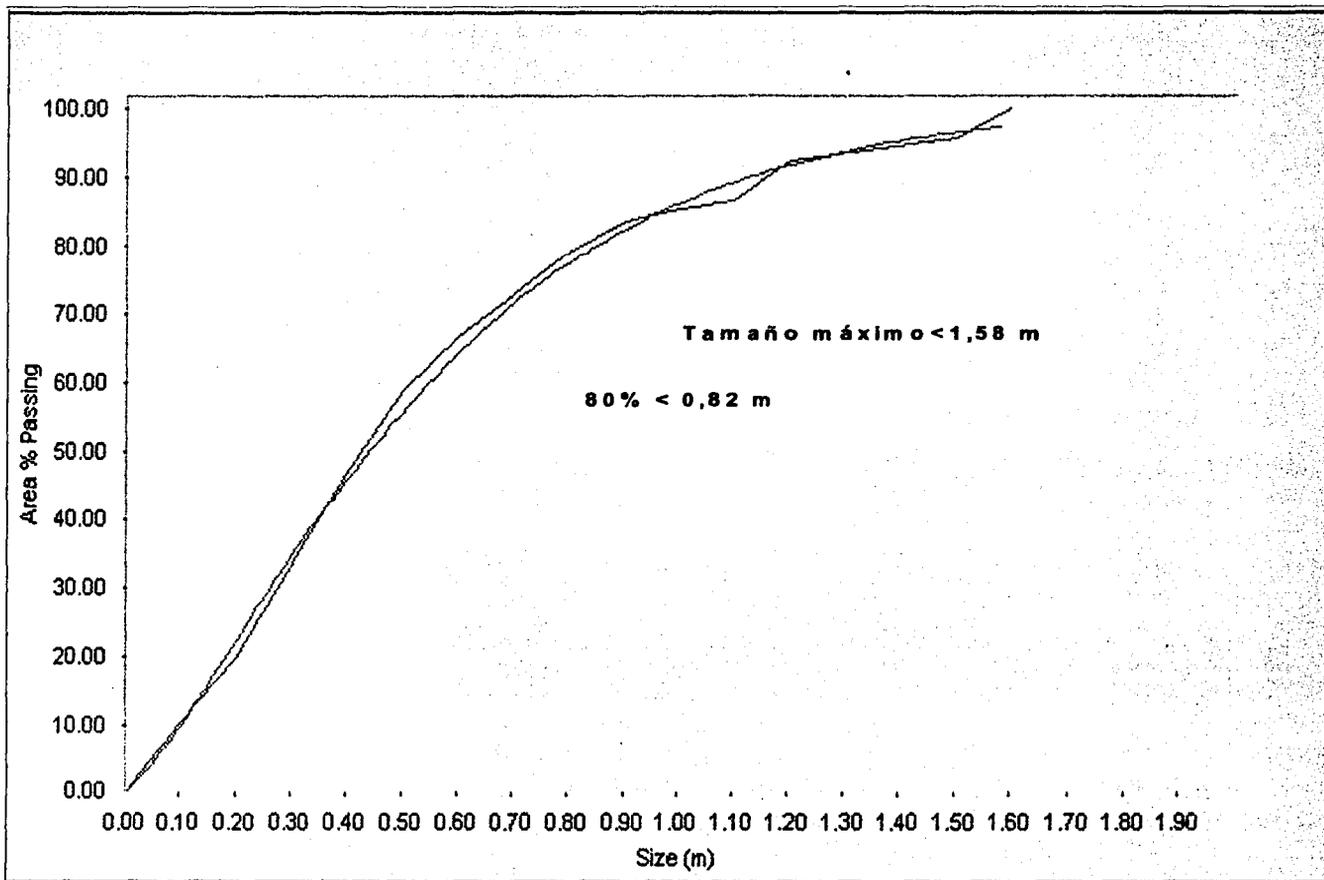
Si se utilizan 700 Kg después de 50/50 para la carga de fondo y este avanza 1 metro por cada 100 Kg, ya sólo nos restan 2,032 Kg, para un barreno que ahora mide 31 metros; si se utiliza 20/80 para la carga restante y considerando que en un barreno de 12 ¼" se necesitan 85 Kg de 20/80 por cada metro lineal de explosivo esto nos hace avanzar ± 24 metros con la cantidad de explosivo restante; para un barreno que medía después de la carga de fondo 31 metros y ahora, después de agregar 24 metros de 20/80 el taco que queda es de 7 metros, este barreno será tapado con gravilla.

Aún se puede bajar el factor de carga a ± 0.712 Kilogramos por metro cúbico si se utilizaran los tapones cónicos; pues son 170 kilogramos menos al utilizar el tapón: $2,732 - 170 = 2,562$ kilogramos

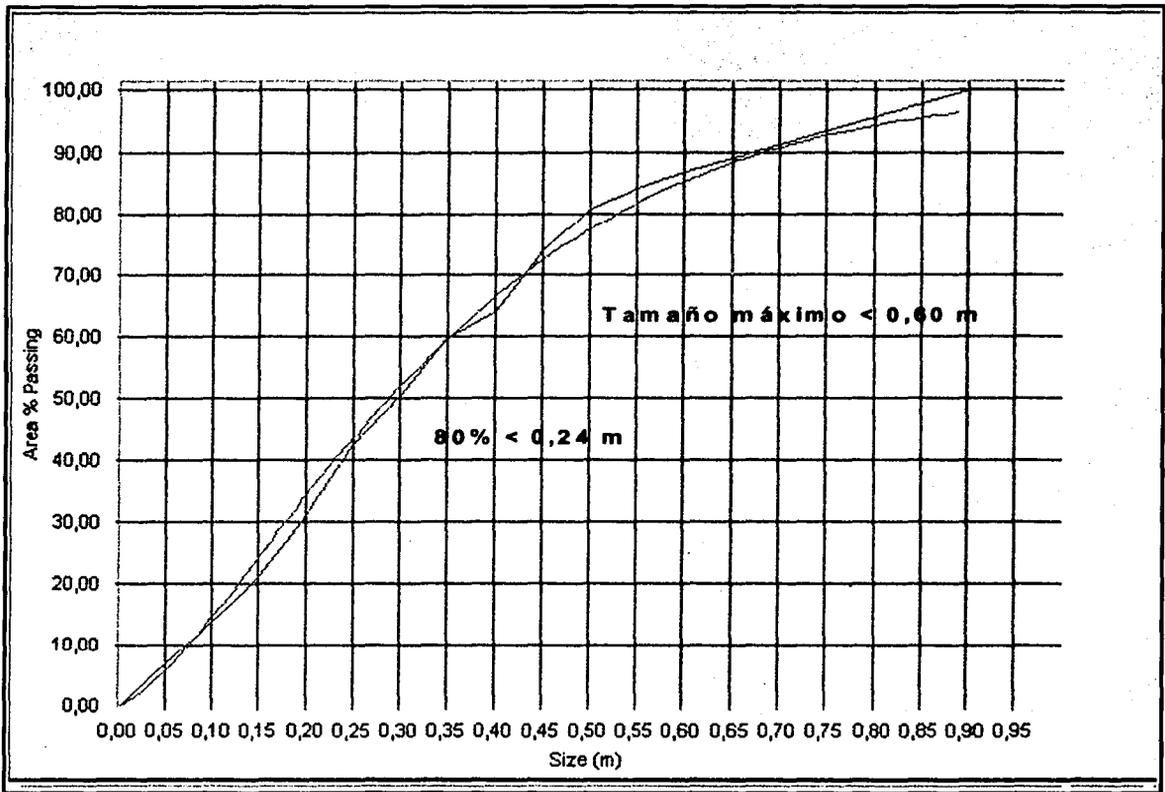
$Fc = 2,562 \text{ kilogramos} / 3,594.8 \text{ m}^3 = 0.712$

Aquí sólo se muestran las diferentes opciones que tiene la mina para el cargado de los barrenos, pero depende en gran medida de cómo se encuentren estos, es decir la cantidad de humedad o agua que tengan así como la geometría que presenten y qué tan fallado esté el terreno.

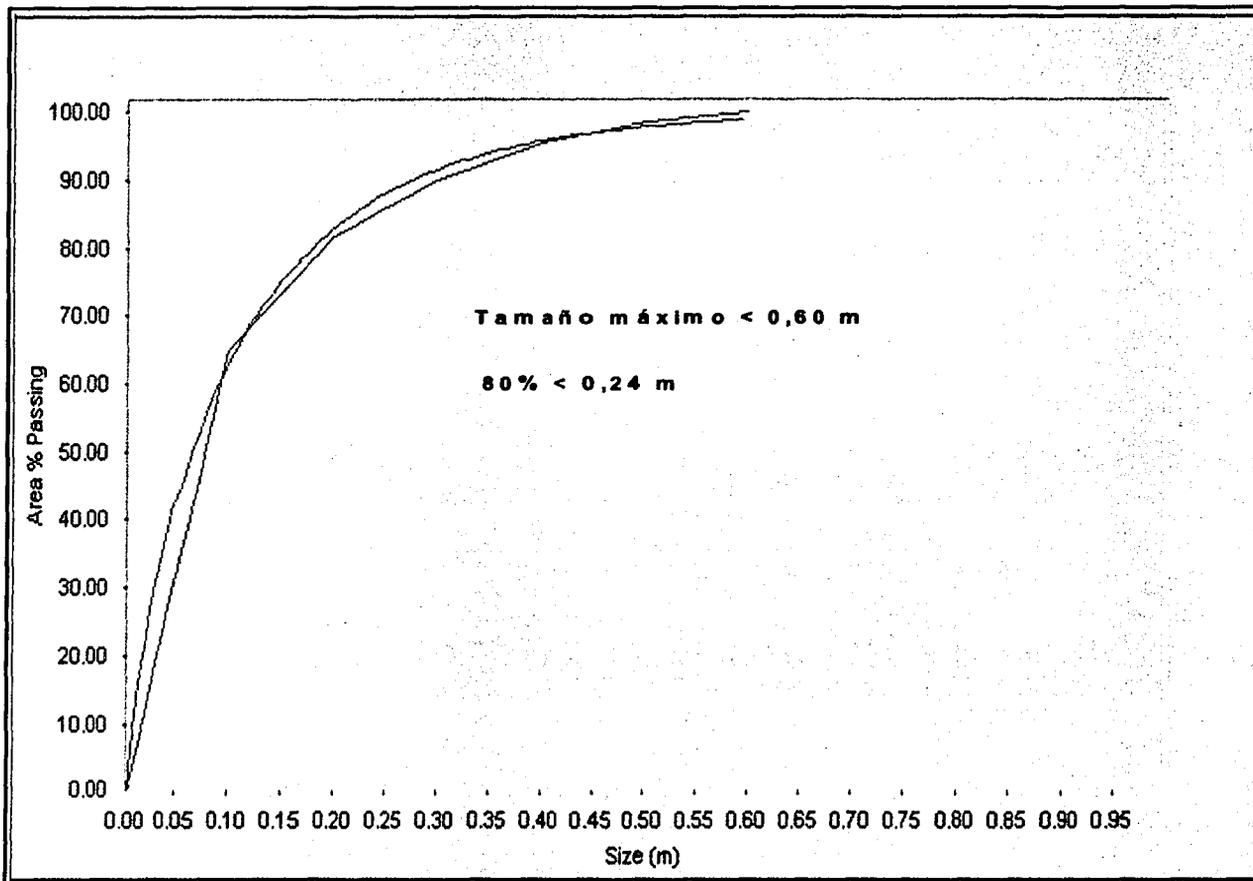
**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE VOLADURAS CON TACO DE SUELO	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 15 S/ESCALA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE VOLADURAS CON TACO DE GRAVILLA	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 16 S/ESCALA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE VOLADURAS CON TAPONES CÓNICOS	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 17 S/ESCALA

6.4 RENDIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE CARGADO

Para el análisis del rendimiento de cargado se consideró el **Índice de Excavabilidad** de las Palas, porque para poder barrenar Cast Blast primero hay que volar en el banco I y entre más rápido sea el avance en este banco por consiguiente más rápido será el avance en el Cast Blast.

En las **Figuras 18 y 19**, se muestran las gráficas de los **Índices de Excavabilidad** de las Palas en arenisca durante el período de enero de 1999 hasta marzo del 2000.

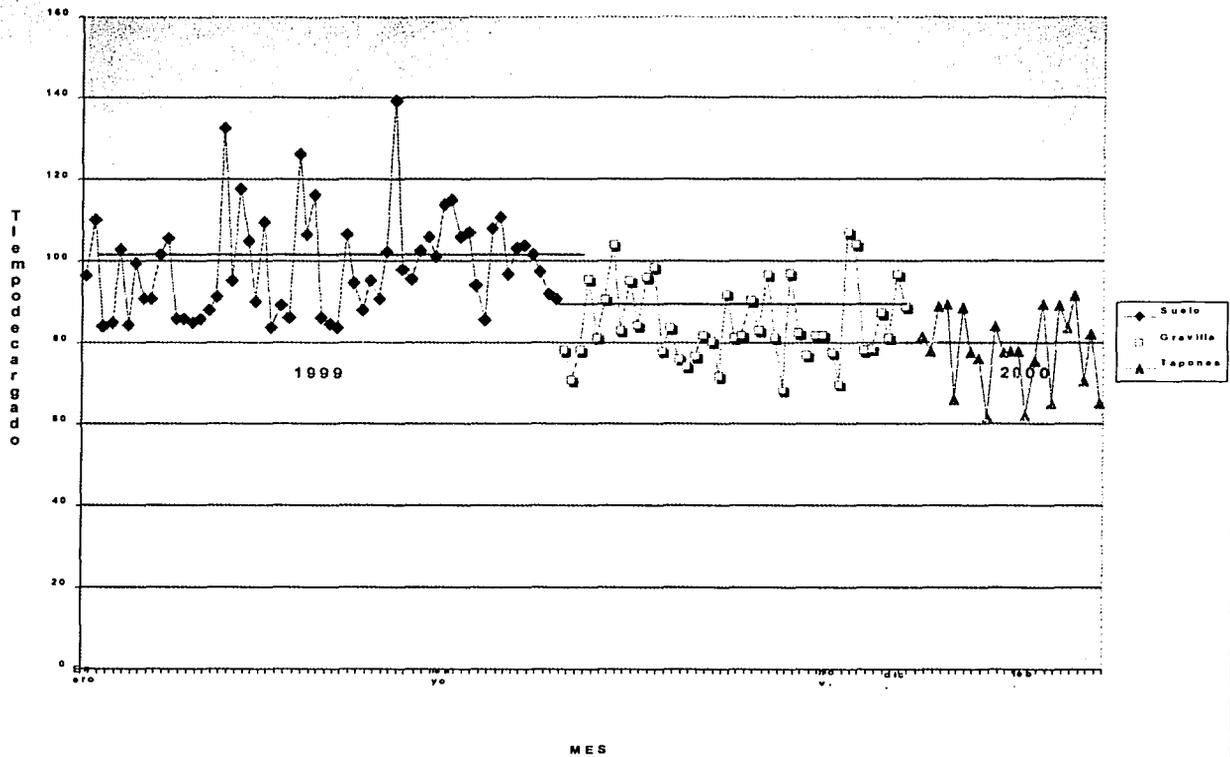
Estos resultados nos indican, que la utilización de Tapones Cónicos genera una reducción en el tiempo de cargado por camión de 8.3% con respecto al de Taco de Gravilla y de 21.3% en comparación con el uso del Taco de Suelo.

6.5 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN

El análisis de la velocidad de detonación nos indica un mejor trabajo del explosivo a nivel del taco para barrenos con Tapones Cónicos.

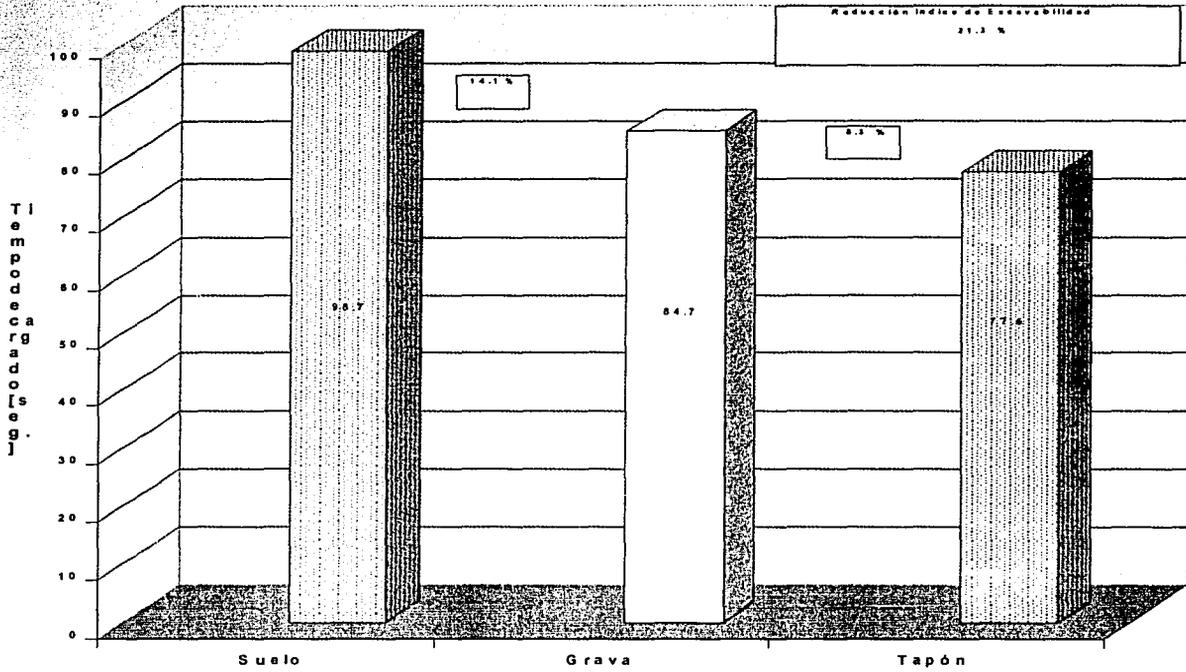
En las **Figuras 20 y 21**, se puede ver como en los barrenos con tacos de suelo la Presión de Detonación decae rápidamente a la altura del taco. En cambio, en los barrenos cargados con **Tapones Cónicos**, la presión de detonación experimenta un repunte cuando se llega a la altura del tapón, lo que se traduce en un mayor tiempo de trabajo dentro del pozo, es decir, un mayor aprovechamiento del explosivo.

RENDIMIENTO DE
PALAS



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
GRAFICA GENERAL DEL ÍNDICE DE EXCAVABILIDAD EN PALAS PARA DISTINTOS TIPOS DE TACO	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 18 S/ESCALA

RENDIMIENTO DE PALAS
INDICE DE EXCAVABILIDAD



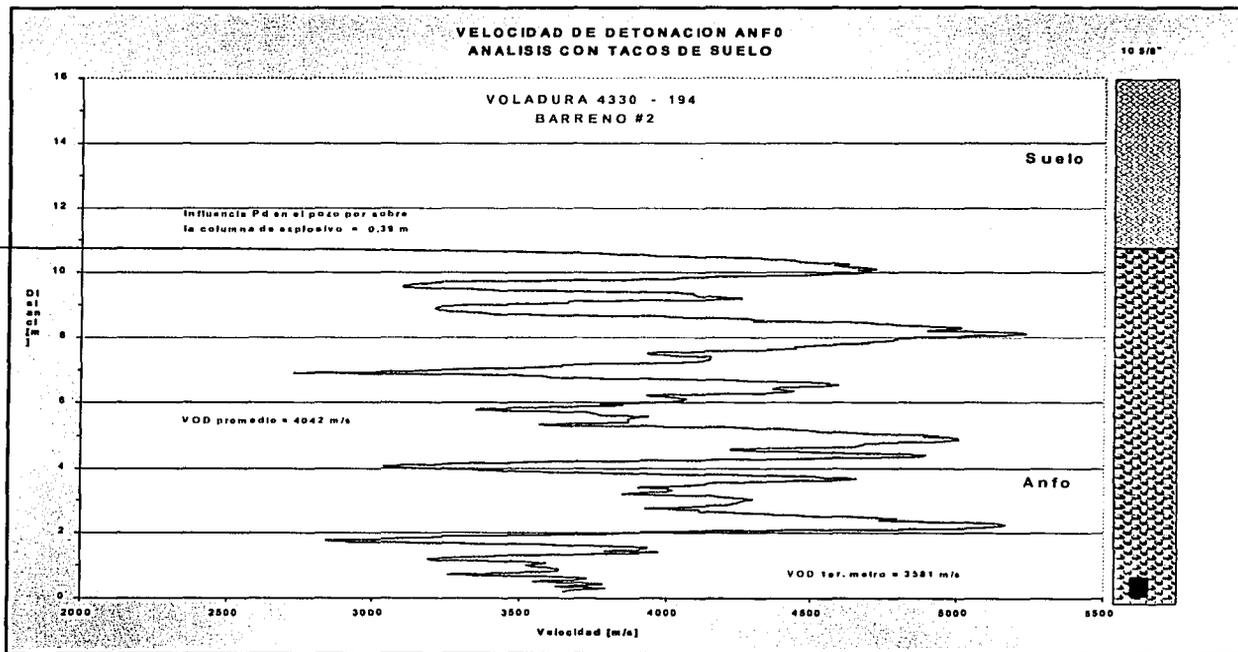
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

TIEMPOS PROMEDIO DE CARGADO EN
ARENISCA PARA DISTINTOS TIPOS DE TACO

TESIS PROFESIONAL

DAVID REYES PÉREZ

FIG. 19 S/ESCALA



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

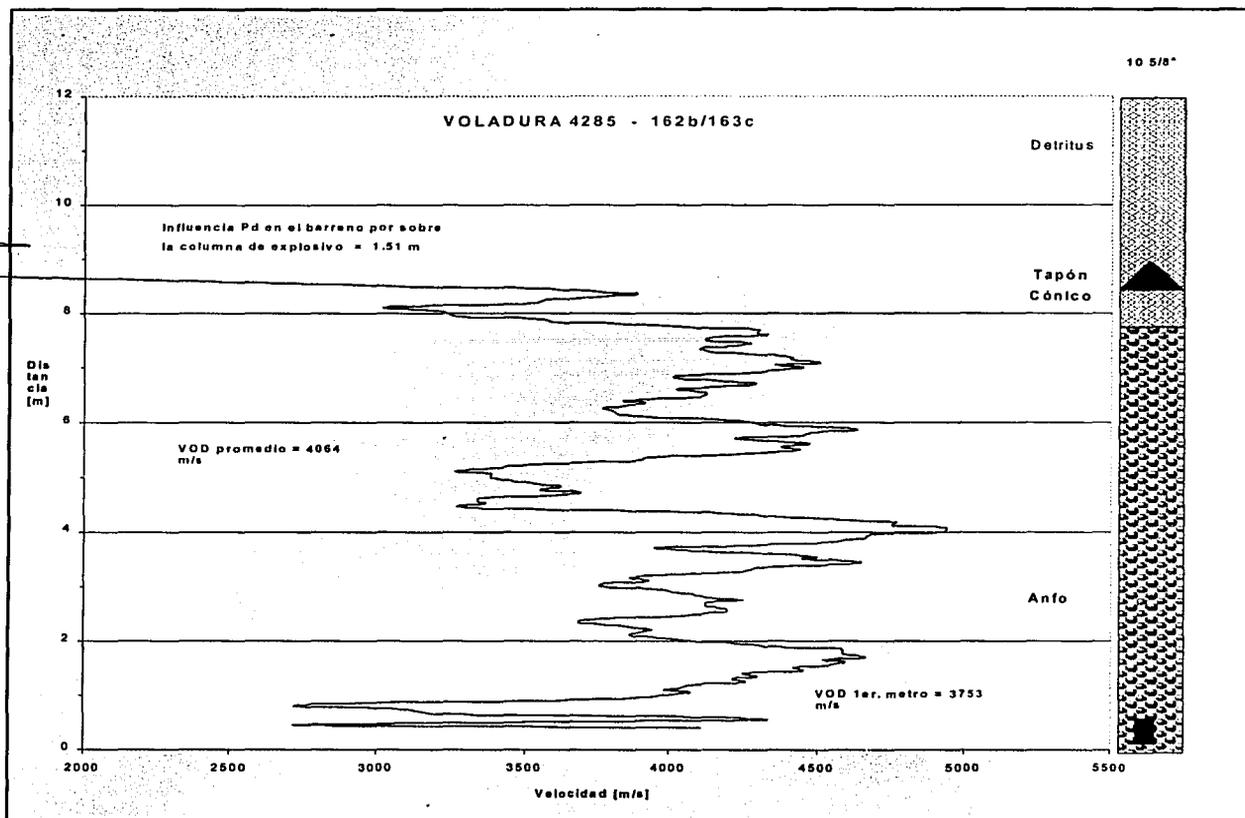
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO DE V.O.D. EN
BARRENOS CARGADOS CON ANFO Y TACOS
DE SUELO**

TESIS PROFESIONAL

DAVID REYES PÉREZ

FIG. 20 S/ESCALA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO DE V.O.D. EN
BARRENOS CARGADOS CON ANFO Y CON
TAPONES CÓNICOS**

TESIS PROFESIONAL

DAVID REYES PÉREZ

FIG. 21 S/ESCALA

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

6.6 MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Por la preocupación que se tiene en la mina en cuanto a vibraciones se refiere pero no sin descuidar la fragmentación de la roca por cuidar la vibración, uno de los objetivos que se tienen es mejorar la fragmentación en arenisca y evitar un daño excesivo a las estructuras que se tienen alrededor de la zona de voladuras ya que existe un mayor confinamiento de explosivo en cuanto al Banco I se refiere, en la tabla número 5 se muestra el monitoreo que se realizó para la medición de los niveles de velocidad de la partícula en dos diferentes estaciones, se colocó primero un sismógrafo en el interior de la mina V mientras que el segundo sismógrafo se situó en el patio de CFE.; para cada tipo de taco se muestreo en 50 voladuras, los resultados fueron los siguientes:

6.6.1 Niveles de velocidad de partícula registrados.

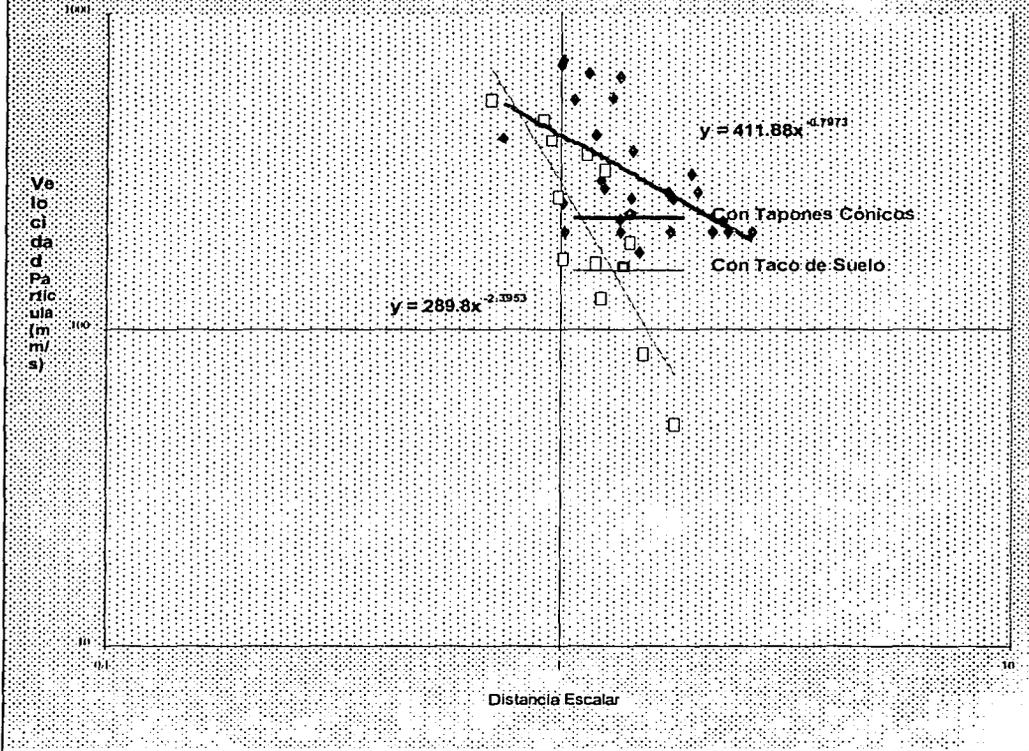
Voladura	Sismógrafo 1 [mm/s]	Sismógrafo 2 [mm/s]	Tipo de Taco
315 - 265	562.3	534.4	Suelo
225 - 175	607.9	539.3	Tapones Cónicos

Tabla 5

En la **Figura 22** se puede ver representado el modelo de comportamiento para los casos de las voladuras con tacos de suelo y con Tapones Cónicos.

Se registra un mayor nivel de vibraciones en las voladuras con Tapones Cónicos (7% mayor), con respecto a las voladuras con Taco de Suelo. Sin embargo, según el Criterio de Daño de Devine, los niveles de vibraciones para ambas voladuras se enmarcarían dentro del mismo rango de daño, ver **Figura 23**.

**MODELO DE VELOCIDAD DE PARTICULA
ARENISCA**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
MODELO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA PARA LA ARENISCA CON TACO DE SUELO Y CON TAPONES CÓNICOS	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 22 S/ESCALA

TIPO ROCA	Velocidad de partícula Crítica mm/sf	Tipo de Taco	Velocidad de partícula Máxima registrada en mm/sf	Daño
arenisca Superior	456	Material de Suelo	Sismógrafo 1 = 562.3	Apertura de nuevas grietas en el sector
			Sismógrafo 2 = 534.4	Apertura de nuevas grietas en el sector
		Tapón Cónico	Sismógrafo 1 = 607.9	Apertura de nuevas grietas en el sector
			Sismógrafo 2 = 539.3	Apertura de nuevas grietas en el sector

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

NIVEL DE VIBRACIONES Y RANGO DE DAÑO
MONITOREADAS EN ARENISCA

TESIS PROFESIONAL

DAVID REYES PÉREZ

FIG. 23 S/ESCALA

6.6.2 Análisis de vibraciones

Las mediciones realizadas son para determinar los niveles máximos de vibraciones producidos por las voladuras, para no sobrepasar las restricciones entregadas por la empresa que está a cargo del proyecto expansión del Tajo II y además como una forma de cuantificar el daño que se podría producir en el macizo rocoso. Observando las diferentes graficas presentadas en este estudio se puede apreciar que no se sobrepasa ninguna de la restricciones impuestas por MICARE y además se ha logrado aumentar la fragmentación en el Tajo II. El daño que sufre el macizo rocoso con las voladuras no es de gran importancia desde que se han puesto en uso las voladuras de precorte.

6.7 INSPECCIONES VISUALES DE LAS VOLADURAS REALIZADAS CON DIFERENTES TIPOS DE TACO

Taco de Suelo; pobre fragmentación, escopeteo y presencia de rocas grandes.

Taco de Gravilla; Mejora fragmentación, sin embargo presencia de rocas grandes a nivel del taco.

Taco con Tapón Cónico; Fragmentación excelente, la presencia de rocas grandes se limita a la cara libre.

6.8 INCREMENTO EN EL COSTO POR USO DEL TAPÓN CÓNICO

Los excelentes resultados en fragmentación obtenida en las voladuras de Cast Blast donde se encuentran las areniscas, nos permitió estudiar una alternativa para ampliar la malla, de manera que no afectara la granulometría y también permitió una reducción en los costos de Perforación y Voladura. Ver tabla número 6.

6.8.1 Costo Global de la Voladura para el período Abril – Diciembre del 2000:

REDUCCIÓN TOTAL DE GASTOS POR AMPLIACIÓN DE LA MALLA

REDUCCIÓN DE GASTOS EN VOLADURA	US\$ 523,741.00
REDUCCIÓN DE GASTOS EN PERFORACIÓN	US\$ 182,120.00
GASTO ANUAL TAPONES CÓNICOS	US\$ 315.000.00
REDUCCIÓN DE GASTO DE PERFORACIÓN Y VOLADURAS EN EL AÑO 2000	US\$ 390,861.00

TABLA 6

6.9 ANÁLISIS DEL NUEVO DISEÑO DE CAST BLAST

Se propone este nuevo diseño en el cargado para el Cast Blast pues se cuenta con la siguiente información: el barreno en el Cast Blast corta el agua a una profundidad de ± 30 metros y la arenisca está siendo cortada entre los 15 y 18 metros de profundidad y tiene un espesor de ± 5 metros, con esto se ha decidido colocar una carga de fondo que sea resistente al agua en este caso se proponen 7 metros de 70/30 y sellar el barreno a los 28 metros de profundidad con una bolsa de gas; pues como ya observamos no es recomendable reemplazar más de un 10% de la columna explosiva por aire, además se dejará una brigada completa con un camión para que una vez terminado el barreno se proceda a cargarlo inmediatamente y se encuentre el barreno húmedo y no con agua, pues la caída de agua está desde los 30 metros; por otro lado la arenisca que es la roca más dura podrá ser cargada con la segunda carga de explosivo que es más rica en ANFO y así estará cubierta en su totalidad, se colocará 20/80 en la

segunda carga y se pondrá un tapón cónico por lo que dejaremos un taco de 9 metros pues ha estado trabajando bien a la altura del taco final.

Con este nuevo diseño se pretende utilizar con más seguridad un explosivo rico en ANFO para la segunda carga y así lograr una mejor fragmentación en la arenisca al mismo tiempo que se baja el factor de carga al colocar ese taco intermedio de aire de 3 metros, ésto se observa en la figura número 24.

$$Fc = (700 \text{ kilogramos} + (19 \text{ metros} * 85 \text{ kilogramos})) / 3,594.8 \text{ m}^3$$

$$Fc = 2,315 \text{ kilogramos} / 3,594.8 \text{ m}^3 = 0.643 \text{ kilogramos} / \text{m}^3$$

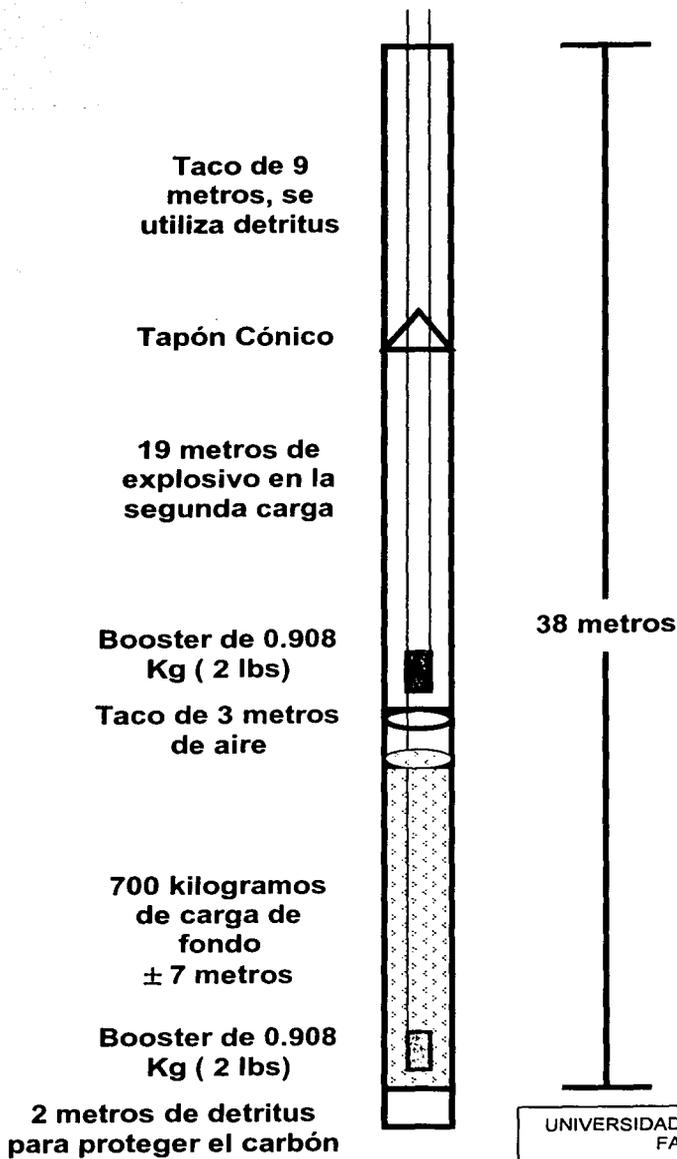
6.10 DISEÑO DEL AMARRE DE LAS VOLADURAS

El amarre se diseña, cuidando la cara libre de la voladura y poniendo especial atención a que no vayan a detonar dos o más cargas con un retardo menor a 8 milisegundos. Esto porque se debe de cuidar la vibración generada por la detonación de las cargas.

Se pone especial interés a las voladuras de Cast Blast y prebanco "Ranchito" por todas las problemáticas que ya conocemos.

Para el diseño del amarre de las voladuras se cuenta con un software, el cual se llama shot plus, dentro de este software, se pueden apreciar los barrenos que se van a disparar pues el equipo técnico y topográfico ya tiene el levantamiento de la zona que se va a disparar; así pues una vez que se tiene la plantilla de barrenación levantada y conociendo el tipo de retardo que tiene cada barreno, se procede a dar los datos de la inclinación de los barrenos y el tipo de conector que se piensa utilizar, el programa toma en cuenta todas estas consideraciones y luego se procede a diseñar el plan de amarre, después de colocar cada conector a su respectivo barreno y dándole una salida el software nos indica la forma en que se inicia cada carga, mostrándolo en cámara lenta; de esta manera es fácil detectar qué cargas se juntan y hacer los ajustes necesarios para que no detonen al mismo tiempo, así se pueden eliminar estos detalles antes de conectar la voladura ha realizarse.

Noneles de 600 ms



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
DISEÑO EXPERIMENTAL QUE SE UTILIZARÁ EN EL CAST BLAST PARA EL AÑO 2001	
TESIS PROFESIONAL	DAVID REYES PÉREZ
	FIG. 24 S/ESCALA

Este programa es de mucha utilidad cuando se tienen que efectuar voladuras de gran tamaño, cuando existen problemas de vibración cerca de la zona de voladura o cuando se tienen problemas por caídos o el bordo del talud a disparar está débil; en voladuras de menor escala el plan de amarre lo diseña el supervisor a cargo, cuidando que la voladura tenga cara libre, que el bordo de talud sea aceptable y que no se encuentre cerca de la zona a volar maquinaria que pueda ser dañada (perforadoras, palas, tractores, moto niveladoras, yucles, torna pipas, etcétera).

Es obligación del supervisor verificar que no quede algún barreno sin conectar, ya que nos traería graves consecuencias como: una mala voladura por el corte de esta, el peligro de que se trocen los noneles y queden barrenos sin detonar aun después de realizar la voladura, una mala fragmentación, etc.; esto se observa casi de inmediato y poco después puede haber caídos por dejar la zona volada débil o incluso dejar el terreno demasiado fracturado que ni la misma perforadora pudiese entrar; se tiene como regla que un barreno no debe detonar con una diferencia menor de 8 milisegundos con respecto a otro, ya que nos traería problemas de vibración.

Además para que un barreno de la segunda línea a disparar pueda salir, será necesario que ya hayan detonado al menos los dos barrenos que se encuentran frente a este; así se asegura que exista menos riesgo de una alta vibración.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Contar con asistencia técnica permanente ha significado desarrollar y cuantificar los resultados de los estudios en el menor tiempo posible.
- Tener este tipo de servicio y compararlo con servicios independientes, ha significado para el área de perforación y voladuras un ahorro de alrededor de **US\$ 500,000.00** al año.
- El control de vibraciones se tiene casi en su totalidad y se basa en los parámetros establecidos por normas tanto mexicanas como norteamericanas; se está por debajo de ellas y con esto se asegura que no existan riesgos por voladuras en cuanto a vibraciones se refiere.
- El daño en las paredes de los taludes ya no se presenta desde que se aplica la técnica de precorte en el área de Cast Blast.
- La granulometría del material que se obtiene después de realizar una voladura queda dentro de los parámetros establecidos por la mina.
- El “escopeteo” y el “pateo” no se observan desde que se utilizan los tapones cónicos y las bolsas de gas.
- Se logró bajar el factor de carga en un 22.5% en el Cast Blast sin tener que sacrificar la granulometría establecida y el beneficio de la voladura.

7.1.1 CONCLUSIÓN ACERCA DEL TAPÓN CÓNICO

- Se ha logrado un mejoramiento por sobre el 50 % de la granulometría y se aprecia un incremento de 21,3 % en el Índice de excavabilidad de las palas en arenisca.
- El análisis de la Velocidad de detonación nos indica un mejor trabajo del explosivo, a nivel del taco, cuando se utilizan los tapones cónicos.
- Los niveles de vibraciones registrados para las voladuras con Tapones Cónicos son un 7% más altas que las voladuras con taco de suelo; sin embargo, se enmarcan dentro del mismo rango de daño.
- En las inspecciones en terreno se aprecia una excelente fragmentación, y sólo se observó algún terrón en el sector de la cara libre.
- En resumen: Aumenta el rendimiento de los equipos de cargado, se reduce el nivel de proyección del taco y se elimina la perforación secundaria para barrenos auxiliares. **Se recomienda implementar el uso del Tapón Cónico** en voladuras en arenisca.
- La implementación de los Tapones Cónicos, posibilita **ampliar** las mallas en arenisca de 7.0 x 9.0 a un nuevo diseño de 8.6 x 11.0 en el Cast Blast.
- El estudio permitiría reducir el costo para el año 2001;
- Perforación de barrenos auxiliares: US \$ 81,000.00
- Reducción de gastos en Perforación y Voladura: US \$ 390,861.00 /año.
- Reducción general de gastos: US \$ 471.861.00 /año.
- Los tapones cónicos solo se utilizarán en el Cast Blast y sólo en casos especiales en el banco I pues el costo que tienen así lo amerita.
- Un punto importante y que nos interesa es el precio del explosivo por metro lineal, pues mientras menos explosivo se ocupe mayor será el ahorro en dólares que se tendrá. Aquí se puede observar en esta tabla 6 el precio que se tiene por metro lineal de explosivo para barrenos de 0.31 metros (12 ¼").

Tipo de explosivo	Kilogramos por metro lineal	Precio del explosivo por kilogramo	Precio del explosivo por metro lineal
ANFO	65	US\$ 0.24	US\$ 15.60
20/80	85	US\$ 0.243	US\$ 20.64
50/50	100	US\$ 0.256	US\$ 25.60
70/30	95	US\$ 0.298	US\$ 28.31

TABLA 6

- A la reducción general de gastos habría que sumarle el precio del explosivo por barrenos que no se cargaron, por que no se hicieron; además de la reducción del factor de carga que se tuvo en el Cast Blast porque se utilizaron bolsas de gas.

7.2 Recomendaciones

- Seguir cuantificando los niveles de vibración en el campo por efecto de las voladuras del Tajo II, para prevenir daños en las estructuras.
- Con el modelo vibracional que se determinó se puede tener control de las vibraciones a generar con las voladuras.
- Para la estimación del daño al macizo rocoso, se usará el análisis de velocidad crítica; sin embargo, este análisis debe ser validado midiendo el daño real causado al macizo rocoso después de la voladura.

BIBLIOGRAFÍA

**CANCEC, ARTURO; ARELLANO, MARCO; FUENTES, ROLANDO;
GALLARDO, NASSLO; ALARCÓN; MIGUEL**
Boletines Técnicos Trimestrales Números 3,4 y 5
Orica Chile S.A., 2000

ICI EXPLOSIVOS
Diseño de voladuras
México, 1995

MICARE
Geología de la Región Carbonífera del Norte
1998

NICHOL, JONSON Y DUVALL
Boletín del departamento de minas de los EEUUA
Parámetros, técnicas y diseños para la medición de vibraciones
EEUUA 1999

MICARE
Desarrollo del plan de minado
Documento interno, 1997

ORICA
Diseños de voladuras para el control de vibraciones
Documento interno, México 1998

ORICA

Manual para el uso de explosivos

Documento interno, México 1998

TERRA DINAMICA L.L.C

Effective blast design and optimization

EEUU 1997

HUSTRULID, WILLIAM

Blasting principles for open pit mining

EEUU 1999