

DISEÑO DE VOLADURAS EN TAJOS

- PARAMETROS UTILIZADOS EN EL DISEÑO -

VARIABLES FISICAS CONTROLABLES.

El diseño de una voladura debe comprender todos los conceptos fundamentales de una voladura ideal. Las variables que intervienen en una voladura y sobre las cuales podemos tener control son:

- 1.- Diámetro del barreno.
- 2.- Profundidad del barreno.
- 3.- Sub-barrenación
- 4.- Tamaño del taco.
- 5.- Material del taco.
- 6.- Espaciamiento entre barrenos.
- 7.- Número de barrenos por voladura.
- 8.- Dirección del movimiento de la roca.
- 9.- Tacos intermedios.

Además, de estas dimensiones físicas, también podemos controlar el tiempo de la voladura; para ésto el encargado de la voladura puede :

- 1.- Seleccionar retardos para lograr una voladura geométrica.
- 2.- Seleccionar el sistema de iniciación para lograr secuencias apropiadas de la salida de los barrenos.
- 3.- Planear el patrón de voladura cuidando la variabilidad de detonación de los fulminantes o iniciadores.
- 4.- Diseñar un patrón que controle las vibraciones.
- 5.- Diseñar los tiempos adecuados para lograr la máxima fragmentación, mínimo golpe de aire, reducir la roca en vuelo y tener control sobre la pared trasera.

Por último para tener los mejores resultados debe considerar que el proveedor de explosivos ofrezca: Un sistema de iniciación seguro y confiable y un explosivo adecuado a las condiciones ambientales que solucione problemas de agua, libere energía y además, de decidir si se compra envasado o a granel.

VARIABLES NO CONTROLABLES.

Las variables sobre las cuales podemos tener poco o ningún control son:

- 1.- Geología local.
- 2.- Características de la roca.
- 3.- Disposiciones legales y sus reglamentos.
- 4.- Cercanías de las estructuras a proteger.

Se requiere que el supervisor de voladuras modifique el diseño estándar convenientemente forzando la obra para superar la postura de éstas limitaciones y sacar provecho de ellas.

Las variables y parámetros utilizados en el diseño de voladuras son demostrados en la Fig. 1 con los símbolos correspondientes que se manejarán en las ecuaciones para su determinación.

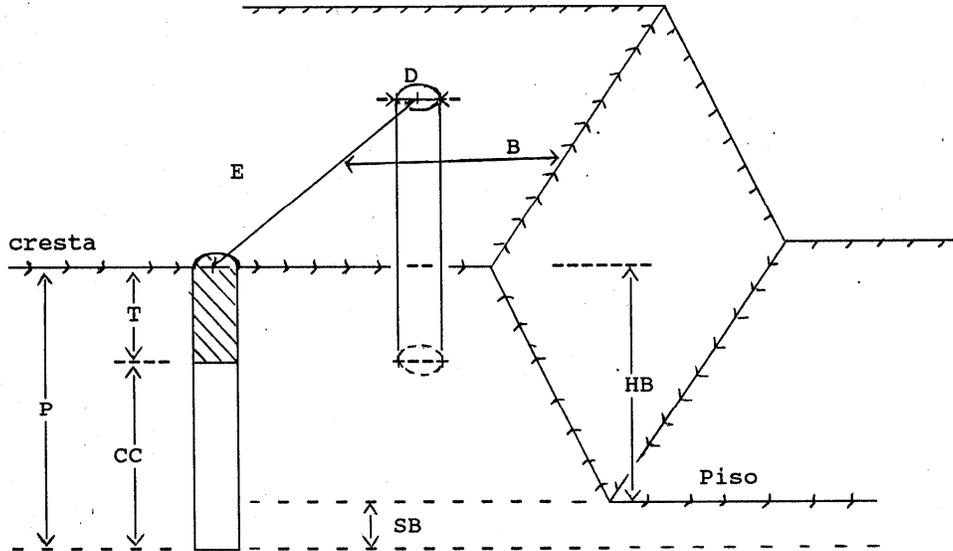


Fig. 1, SECCION ESQUEMATICA DE UN BANCO, DEMOSTRANDO LAS VARIABLES DE DISEÑO. (sin escala).

D = Diámetro del barreno (Plg,mm).
 B = Bordo (Ft,Mt).
 T = Taco (Ft,Mt).
 CC= Carga de Columna explosiva (Ft,Mt).
 P = Profundidad del barreno (Ft,Mt).
 SB= Sub-barrenación (Ft,Mt).
 E = Espaciamiento entre barrenos (Ft,Mt).

Otras variables utilizadas en el diseño.

De = Diámetro del explosivo (Plg,mm).
 Ge = Densidad del explosivo (Gr/Cm3).
 Gr = Densidad de la roca (Ton/Mt3).
 Sti= Potencia relativa del explosivo.
 Dc = Densidad de carga en el barreno (Lb/Ft,Kg/Mt).
 ti = tiempo de salida de los barrenos (Ms).

PRINCIPIOS SOBRE DISEÑO DE VOLADURAS.

Un patrón de voladura se construye mediante el diseño adecuado de los barrenos en la plantilla de barrenación y una salida adecuada de cada uno de ellos hacia la cara libre.

La selección del espaciamiento entre los barrenos de una misma línea depende del tiempo de iniciación de los barrenos adyacentes y de la relación de rigidez (HB/B). Si los barrenos son iniciados instantáneamente los espaciamientos deberán ser más grandes que si éstos fuerán iniciados en forma secuencial.

El espaciamiento de los barrenos deberá ser diseñado para superar los problemas de rigidez del bordo. Además, cuando los bancos son cortos comparados con el bordo, éstos factores deberán ser evaluados, ya que la relación de rigidez debe ser considerada en el diseño; éstos factores además de ser evaluados, determinan la función del explosivo entre barrenos adyacentes, sean iniciados instantánea o secuencialmente.

Para determinar si los bancos son clasificados como cortos o altos deben ser ligados a una dimensión física, para lo cual la relación de rigidez (HB/B) es calculada; si $1 < HB/B < 4$, los bancos son considerados cortos y la altura de banco es considerada en el diseño. Entonces, las siguientes cuatro condiciones deberán ser analizadas por separado en el diseño para determinar el espaciamiento.

- 1).- Bancos cortos con iniciación instantánea.
- 2).- Bancos largos con iniciación instantánea.
- 3).- Bancos cortos con iniciación retardada.
- 4).- Bancos largos con iniciación retardada.

Una tolerancia razonable, en el espaciamiento de los barrenos es considerada normal, si está entre más o menos 05% del valor calculado. La Fig. 2, muestra la relación E/B contra el factor de rigidez para barrenos iniciados instantánea y secuencialmente.

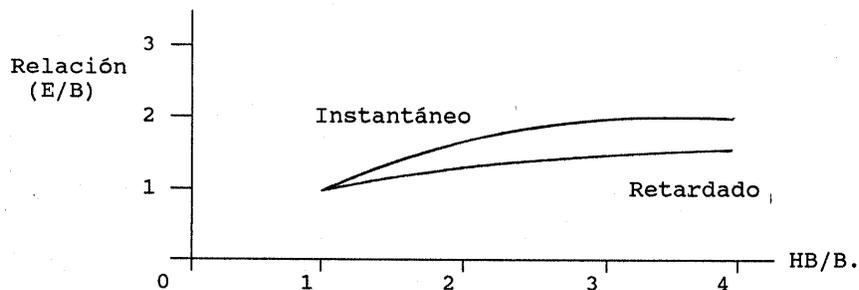


Fig. 2, RELACION E/B DE EXPLOSIVO CONTRA EL FACTOR DE RIGIDEZ.

- CALCULO DE PLANTILLAS DE BARRENACION -

DETERMINACION DEL BORDO.

La dimensión más crítica para el diseño de una voladura es el bordo. Se define como la distancia más corta de un barreno a la cara libre en el momento de la detonación de la carga explosiva de ese barreno.

Si el bordo es muy corto, la roca será lanzada a distancias considerables, el golpe de aire será alto y la fragmentación podría ser excesivamente fina. Un bordo muy grande trae como consecuencia rompimiento trasero; además, de dañar la pared, provoca roca en vuelo, presenta craterización vertical y altos niveles de golpe de aire como se indica en la Fig. 3.

Bordos excesivos causan problemas de sobreconfinamiento del barreno y producen altos niveles de vibración causando además, problemas de fragmentación y problemas de pata en el barreno; errores en la selección del tamaño del bordo son los menos deseados, ya que todos los otros parámetros de diseño están directamente relacionados con la dimensión del bordo y pueden ser más flexibles.

En el diseño de voladuras, la determinación del bordo y el tipo de explosivo a utilizar siempre ha sido una importante necesidad, especialmente en el inicio de operaciones nuevas que implican siempre la realización de una serie de voladuras de prueba con el fin de determinar las dimensiones óptimas para cada tipo de roca o mineral presentes en la explotación del yacimiento. Como las condiciones del terreno cambian frecuentemente durante la explotación, es recomendable la realización de un ajuste en el diseño de las voladuras.

Generalmente, las voladuras iniciales se diseñan en base a los criterios existentes, los cuales son productos de diversas investigaciones de laboratorio y campo que se manejan a manera de ecuaciones o formulas empíricas de fácil determinación, siempre que se disponga de los parámetros necesarios tales como las características de la roca y de los explosivos a utilizar.

Es también factible lograr un acercamiento notable a la optimización de la relación bordo-espaciamiento utilizando un modelo matemático para computadora (Software), en el cual intervienen los parámetros principales de la roca, la energía liberada por los explosivos y los factores de la geometría del disparo, los cuales son comparados en función del tiempo del movimiento de la roca y los elementos del costo, a fin de obtener los efectos óptimos (cuantificados por valores numéricos) dentro de las limitaciones naturales de variación estructural de la roca en el área intermedia de la voladura.

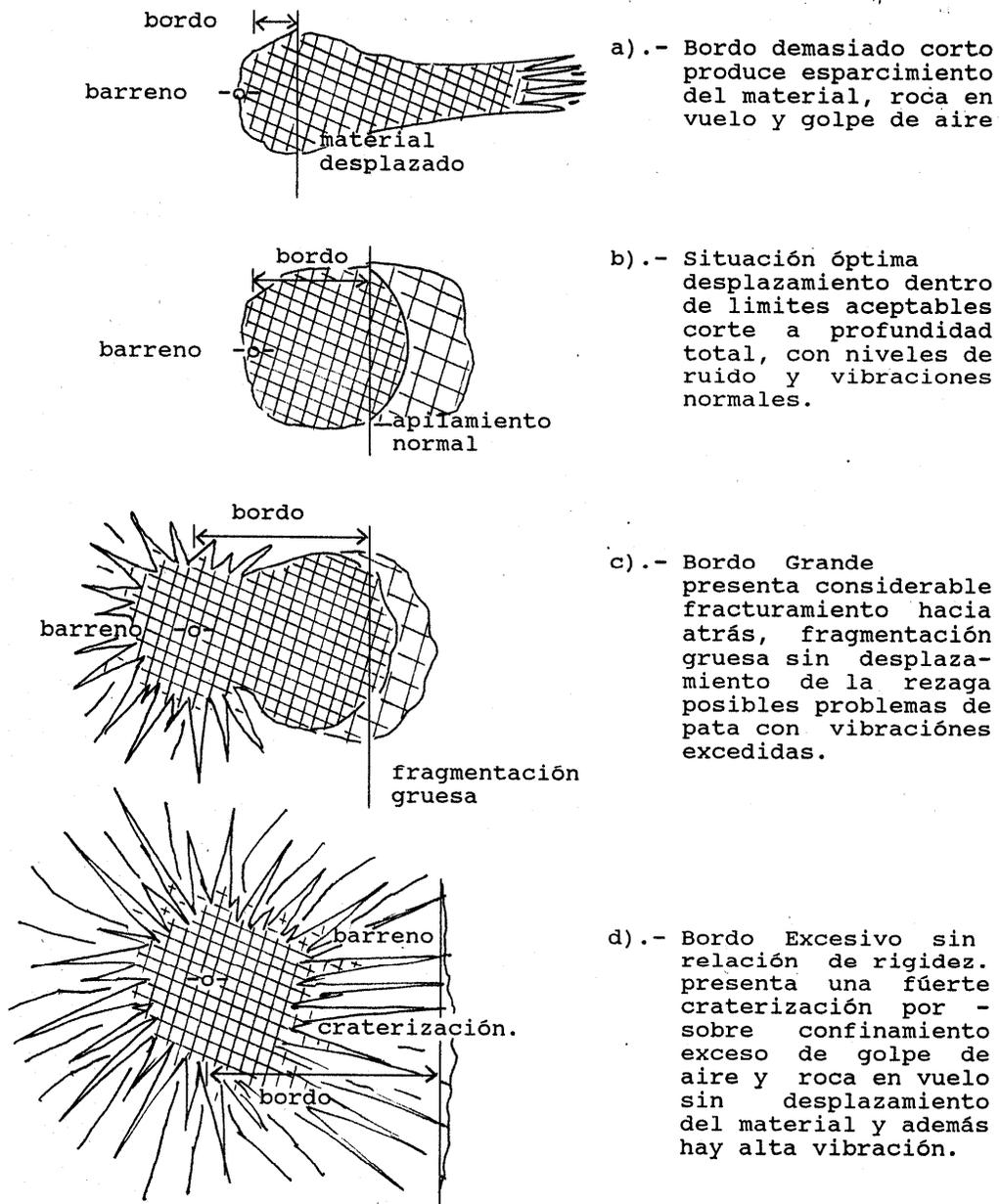


Fig. 3, INFLUENCIA DEL TAMAÑO DEL BORDO EN LA VOLADURA.

Muchas ecuaciones han sido propuestas a través de la historia por varios investigadores para determinar las variables relevantes en las voladuras, Konya basado en la densidad del explosivo y de la roca propone la siguiente ecuación para determinar el bordo.

$$B = (2 * Ge/Gr + 1.5) * De.$$

Porque existe una relación matemática entre la densidad de la roca y la fuerza de la misma y también entre la densidad del explosivo y su energía liberada. Sin embargo, algunos explosivos como las emulsiones exceptúan esta generalidad en cuanto a la relación, por lo que ésta ecuación no es una buena aproximación.

Para éste tipo de explosivo podemos utilizar la ecuación:

$$B = 0.67 * De (Stv/Gr) ^{0.33}$$

En esta ecuación en vez de utilizar la densidad del explosivo, se usa la energía relativa en volumen; que para el año, base de comparación es igual a 100.

FACTORES DE CORRECCION PARA EL BORDO.

Una vez calculado el bordo podemos ajustarlo según las condiciones específicas de la voladura. En algunas voladuras de líneas múltiples cuando el tiempo de salida de los barrenos no es correcto, es más difícil quebrar la roca de las últimas líneas porque las líneas anteriores ofrecen resistencia y agregan confinamiento a las líneas traseras; para ajustar el bordo por éste factor (Kr) del número de líneas utilizemos la siguiente tabla:

TABLA 1, CORRECCION POR NUMERO DE LINEAS.	Kr
1 ó 2 Líneas de barrenos	1.00
3 o Más líneas	0.90

Para las condiciones geológicas de cada voladura, también existe un factor de corrección para incorporarse al tamaño del bordo, cuando las características del esfuerzo de la roca son cambiadas de modo que la depositación y las estructuras son consideradas en el diseño.

La manera en que los estratos están sumergidos en la masa rocosa, tiene una influencia en la cantidad de explosivo usado o tiene influencia en el diseño del bordo de la plantilla de barrenación. Para aproximar el bordo al promedio de las condiciones de depositación y estructuras de la roca, incorporaremos dos constantes de corrección.

TABLA 2, CORRECCION POR DEPOSITACION DE LA ROCA

	Kd
Estratificación dentro de la profundidad del corte	1.18
Estratificación dentro de la cara del corte	0.95
Otros casos de depositación.	1.00

La corrección por la naturaleza de las estructuras geológicas se aproxima de la siguiente manera:

TABLA 3, CORRECCION POR ESTRUCTURAS GEOLOGICAS

	Ks
Roca altamente fracturada con estratos unidos por una cementación débil	1.30
Rocas con capas bien unidas y cementadas	1.10
Depósito masivo	0.95

Todos estos factores tienen una influencia multiplicativa en el tamaño del bordo, cuando se considera en el diseño la naturaleza del depósito y el tamaño de la voladura, por lo que el bordo correcto será:

$$Bc = B * Kr * Kd * Ks$$

LONGITUD DEL TACO.

La dimensión del taco se refiere a la distancia que se encuentra en la parte superior del barreno que se llena con material inerte para confinar los gases de la explosión, con el propósito de aprovechar al máximo la energía liberada por el explosivo. Un barreno debe estar adecuadamente confinado para controlar el golpe de aire y la roca en vuelo, la ecuación matemática para calcular el taco es la siguiente:

$$T = 0.45 * De (Stv / Gr)^{0.33}$$

Relacionando esta ecuación con el bordo tenemos $T = 0.7 * B$ asumiendo que el bordo ha sido calculado en función del explosivo, diámetro del barreno y la naturaleza de la roca.

El material comunmente usado en el taco es el resultante de la barrenación. Sin embargo, si éste material es muy fino el tamaño del taco deberá incrementarse y lo más recomendable es usar roca triturada de un tamaño adecuado, en una buena voladura la zona del taco se levantará libremente y caerá sobre la roca quebrada después de que el bordo há sido movido completamente. El tipo de material seleccionado para usarse en el taco de los barrenos es importante, ya que material muy fino no se mantendrá durante la voladura y material muy grueso será lanzado del barreno, en general el tamaño adecuado es de aproximadamente el 5% del diámetro del barreno y de preferencia material quebrado con caras angulares para lograr una adecuada unión del mismo.

SUB-BARRENACION.

La sub-barrenación es el término que define la profundidad a la cual el barreno se dará por debajo del nivel del piso deseado, para asegurar que el rompimiento de la pata del barreno ocurra a éste nivel.

En gran parte la cantidad de sub-barrenación es influenciada por el tipo de roca, estructuras presentes y dirección del ángulo de barrenación. Normalmente los barrenos no se rompen en toda su profundidad y por esto existe la sub-barrenación, sin embargo, si en la pata del banco existe una capa de lodo, la sub-barrenación no es necesaria, en cambio probablemente se necesite dejar el barreno por encima del nivel de piso a la altura de ésta capa.

Una práctica normal y recomendable es incrementar los barrenos un poco más allá de la profundidad proyectada, de esta manera podemos ajustar los barrenos a la profundidad deseada, con los recortes de la barrenación. Por otro lado, si el barreno queda corto, es más complicado volver a meter el equipo de barrenación para terminar el barreno (destapar), si no cuidamos el ajuste en la sub-barrenación más carga explosiva será utilizada en el barreno que puede dañar al banco inferior, así como generar los problemas potenciales de las voladuras.

En la mayoría de los casos la sub-barrenación se calcula como máximo en formaciones duras de la siguiente manera:

$$SB = 0.3 * B$$

La idea es mantener y llevar el piso de la excavación desde el principio, los errores en la sub-barrenación son costosos al tener que hacer voladuras secundarias para romper la pata del banco con las complicaciones y riesgos que esto ocasiona al cargar explosivos en material pre-fracturado.

DIAMETRO DEL BARRENO Y ALTURA DE BANCO.

Para seleccionar el tamaño del diámetro de barreno existen dos puntos a considerar:

1.- El efecto del tamaño del barreno en la fragmentación del material, golpe de aire, roca en vuelo y vibración.

2.- Costos de la barrenación.

Los efectos de diseño en la fragmentación, golpe de aire, vibración y roca en vuelo deberán ser evaluados, generalmente con diámetros grandes de barrenación es más posible tener estos problemas potenciales que estan relacionados con lo que llamamos factor de rigidez.

Para factores de rigidez (HB/B) mayor o igual a cuatro nos dará los mejores resultados posibles y valores menores que tres decrementarán estos resultados. El número establecido de la relación de rigidez para los cálculos, no necesariamente será el tamaño óptimo de diámetro del barreno; deberá usarse el tamaño máximo de diámetro que minimice los problemas potenciales descritos anteriormente.

Una regla de dedo usada para aproximar la altura de banco con el factor de rigidez para una relación igual a dos (HB/B=2), es denominada "Regla de cinco" que se expresa: La mínima altura de banco en pies, es aproximada al multiplicar el diámetro de la carga en pulgadas por cinco.

ESPACIAMIENTO.

Seguido del bordo, la más importante dimensión es el parámetro del espaciamiento de los barrenos, la manera en la cual la zona de roca entre los barrenos es quebrada depende no solamente de la iniciación particular (sistema de tiempo usado) sino también de la dimensión del espaciamiento. Si los barrenos en una línea son iniciados instantáneamente los espaciamientos deberán apartarse más, que si fueran iniciados de manera retardada.

El espaciamiento nunca deberá ser menor que el bordo, porque si los barrenos se encuentran muy cerca uno del otro, ocurrirán varios efectos no deseados; los rompimientos radiales de los barrenos se encadenerán prematuramente creando una zona de corte en la pared entre los barrenos, que genera planos de fractura por donde los gases serán disipados a la atmósfera, causando golpe de aire y roca en vuelo que reduce la energía de trabajo del explosivo, así los barrenos estarán sobreconfinados debido a la falta de energía suficiente para romper el bordo. Esto causará que la vibración del suelo se incremente y la fragmentación sea mala o gruesa, por el contrario si los barrenos estan muy espaciados, la fragmentacion será pobre y las paredes rugosas.

El factor de rigidez es relativamente importantes cuando los bancos son cortos, bancos grandes significan relaciones HB/B>4 y éste factor no influye considerablemente en las voladuras. Entonces la selección del espaciamiento de los barrenos depende del tiempo de iniciación de los barrenos adyacentes y del factor de rigidez, la tabla 4, muestra las ecuaciones que son utilizadas para calcular el espaciamiento en base al criterio anterior:

TIPO DE VOLADURA	RELACION DE RIGIDEZ	
	HB/B<4	HB/B>=4
Voladura instantánea	$E = (HB+2*B)/3$	$E = 2 * B$
Voladura retardada	$E = (HB+7*B)/8$	$E = 1.4 * B$

TABLA 4, CALCULO DEL ESPACIAMIENTO ENTRE BARRENOS.

TIEMPO DE RETARDO PARA BORDO Y ESPACIAMIENTO.

El procedimiento para calcular el tiempo de retardo en la iniciación secuencial del espaciamento entre barrenos de una misma línea propuesto por Konya es relativamente simple. La Tabla 5 suministra las constantes de tiempo para diferentes tipos de roca y ésta información puede ser usada en la siguiente ecuación, $t_h = TH * E$ donde t_h es el tiempo de retardo (ms) entre barrenos de una misma línea. Cuando la roca es altamente fracturada la constante de retardo (TH) puede ser incrementada hasta un 50% para acomodar las condiciones de la Geología.

Tabla 5, TIEMPOS DE RETARDO ENTRE BARRENOS.

TIPO DE ROCA	CONSTANTE TH (ms/ft)
Areniscas, Suelos consolidados, Carbón	----- 1.8 a 2.1
Calizas, Rocas de Sal y Esquistos	----- 1.5 a 1.8.
Calizas compactas, Marmol, Granitos,	
Basaltos, Rocas de Cuarzo y Gabros	----- 1.2 a 1.5
Diabasa, Gneis compactos, Micas y	
Magnetitas	----- 0.9 a 1.2

TIEMPOS DE RETARDO ENTRE LINEAS DE BARRENOS.

Muchos de los problemas potenciales que resultan de las voladuras, así como la mala fragmentación, patas y la disposición del material, están directamente relacionados con el tiempo de iniciación y más significativamente con el tiempo entre las líneas de barrenos. La Fig. 4, demuestra estos efectos en una voladura de líneas múltiples.

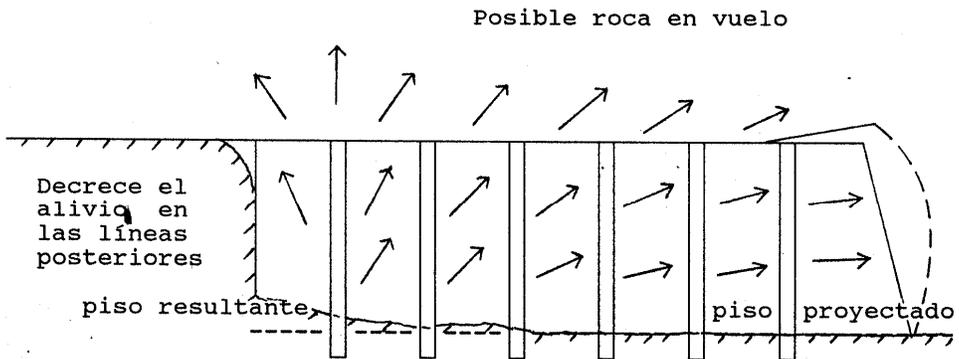
El tiempo de iniciación entre líneas de barrenos debe considerar el criterio para la selección de un tiempo adecuado, considerando además, las siguientes guías:

- 1.- Tiempos cortos causan apilamiento alto cerca de la siguiente cara de banco.
- 2.- Tiempos cortos causan pateo, además pueden crear más violencia en el disparo y vibración del suelo.
- 3.- Tiempos largos decrementan la vibración, disminuyen el pateo y esparcen el material.

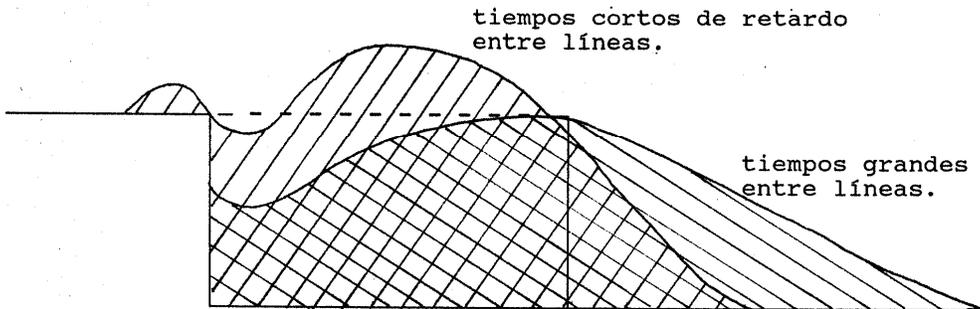
Para determinar el tiempo entre líneas en voladuras de producción, la guía general se da en la Tabla 6 y ésta información la usamos en la ecuación, $t_r = TR * B$ donde t_r es el tiempo de retardo (Ms) entre líneas de barrenos. Cuando el control de la pared es crítico en disparos de líneas múltiples, (6 o más líneas de barrenos) el retardo entre líneas puede incrementarse de 10 a 14 Ms /Ft de bordo.

Tabla 6, TIEMPO DE RETARDO ENTRE LINEAS.

CONSTANTE TR (Ms/Ft)	RESULTADO.
2	Violencia,excesivo golpe de aire, pateo, etc
2 a 3	Apilamiento moderado cerca de la cara, Golpe de aire, pateo en límites altos.
3 a 4	Apilamiento promedio, control en el golpe de aire, pateo y vibraciones.
4 a 6	Rezaga esparcida con mínimo pateo.
6 a 14	Voladura proyectada.



a).- Efecto del insuficiente alivio en el borde.



b).- Forma y disposición de la rezaga.

Fig. 4, INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RETARDO ENTRE LINEAS DE BARRENOS (Sección Longitudinal sin escala).

FACTOR Y DENSIDAD DE CARGA.

La densidad de carga es la cantidad de explosivo que puede ser cargado en un barreno por unidad de longitud, se describe más usualmente en terminos de Lbs/Ft o Kgs/Mt de barreno y depende básicamente de la densidad del producto para un diámetro de barreno determinado.

La densidad de carga se puede determinar en cualquiera de los dos sistemas de unidades, mediante las siguientes ecuaciones:

$$Dc = Ge * (De)^2 / 1273 \quad \text{en unidades métricas.}$$

$$Dc = 0.3402 * Ge * (De)^2 \quad \text{para el sistema inglés.}$$

El factor de carga se define como la cantidad de explosivo usado para fragmentar una tonelada o un metro cúbico de roca y es expresado en Grs/Ton o en Kg/m³.

Este podría ser un número constante para un mismo tipo de roca en la excavación, si la cantidad de carga usada por barreno es controlada por el área de influencia del mismo, para lo cual, se necesita tener definido antes del cargado de la voladura la dirección de salida de la misma.

Si todos los barrenos son cargados con la misma cantidad de explosivo y éstos tienen que fragmentar distintos volúmenes de roca; dependiendo de la orientación de las caras internas del disparo, podrían ocurrir efectos no deseados como: roca en vuelo, golpe de aire, etc... ya que algunos barrenos dependiendo de las condiciones del disparo, podrían tener un factor de carga excesivo.

Cuando se usan las densidades de los productos explosivos para calcular las cargas en los barrenos, estas cargas son solo una buena aproximación, debido a que existen variaciones en el tamaño de los barrenos ya sea por brocas o acero de barrenación gastados, por estratos de roca suave con presencia de agua, por excesivo fracturamiento de la misma roca y por el grado de confinamiento o compactación de los explosivos en los barrenos, entre otros.

DETERMINACION DEL NUMERO DE CEBOS.

El número de cebos o primer's que se colocan en un barreno depende de muchos factores que el usuario debe valorar e identificar, haciendo un análisis de las condiciones de las voladuras. No existe un método de cebado que pueda definirse como un procedimiento universalmente aceptado.

Es una práctica común por algunos supervisores de voladuras el hecho de colocar dos cebos dentro de los barrenos, sin tomar en cuenta la longitud de los mismos. Esta práctica se hace para tener un cebado seguro y efectivo, a prueba de falla por posibles cortes; ya sea desde el cargado mismo del material del taco al depositarse en el barreno, por la presencia de agua en el fondo y/o por el desplazamiento de la roca de otro barreno cercano.

Analizando las condiciones de campo de las voladuras y asumiendo que la velocidad de las rupturas radiales (V_r) producidas por la expansión de los gases, es aproximadamente de una quinta parte de la velocidad de detonación de la onda explosiva ($V_r = 0.2 * V_d$), podemos decir que el tiempo que tarda la ruptura en llegar a la cara libre (t_1), puede ser calculado mediante la ecuación: $t_1 = B / V_r$. Entonces, se requiere detonar completamente la carga de columna, antes de que cualquier ruptura alcance la cara libre del banco, por lo que el tiempo que tarda en detonar la carga (t_2), si suponemos que el cebo se encuentra en el nivel del piso, se calcula mediante la siguiente ecuación: $t_2 = (CC - SB) / V_d$.

Si la carga de columna tiene una longitud tal que permite que las rupturas alcancen la cara, antes de que ésta detone completamente, es decir, si $t_2 > t_1$ entonces, se justifica el uso de dos o más cebos; que al estar colocados de manera distribuida en la carga de columna y al detonar a un mismo tiempo, nos aseguran la detonación total de la columna antes de que las rupturas alcancen la cara libre del banco.

La técnica de los dos cebos podrá o no funcionar, debido a que en los casos en que el rango de variabilidad de los fulminantes, sea mayor que el tiempo que tarda en detonar la carga explosiva de cebo a cebo, probablemente el segundo cebo sea activado por la misma carga, sirviendo solo de reforzador o booster para dar más presión a la onda de detonación, esto refuerza la onda de choque dentro de la columna de explosivo asegurando su detonación.

FRAGMENTACION.

La rezaga producto de la voladura, presenta generalmente los mayores problemas, incluso si la pata y el corte de la nueva cara del banco son satisfactorios, una voladura se considera deficiente si la rezaga no presenta la adecuada fragmentación, forma y localización.

Dos principios deben ser correctamente aplicados para controlar la fragmentación y el apilamiento del material:

1.- La adecuada cantidad de energía deberá ser aplicada estratégicamente dentro de la masa rocosa (factor de carga).

2.- La energía debe ser liberada en el momento preciso.

La localización de las cargas de explosivo deberá seguir una configuración geométrica denominada "patrón de voladura" el diseñador de la voladura deberá planear los diferentes barrenos tomando en cuenta el momento en que cada uno actuará para que pueda realizar el trabajo que se le asigna en el disparo y no un trabajo diferente debido a que otros barrenos no detonan en el momento adecuado. La liberación de la energía en un tiempo equivocado, puede cambiar drásticamente los resultados finales de la voladura.

Existen ecuaciones que suponiendo un buen diseño y control de la voladura predicen el tamaño promedio de la granulometría de la roca volada. También, se encuentran en el mercado de los explosivos paquetes computacionales que en la actualidad, simulan y evalúan voladuras con distintas relaciones de bordo-espaciamiento para tener alternativas con un pronóstico de la fragmentación, indicando de manera gráfica (print out), los diferentes porcentajes de cribado, tanto en peso como en volumen de los tamaños de las rocas producidos en las voladuras.

Debido, a que se desea una fragmentación uniforme en voladuras de producción de mineral, que elimine el exceso de material de sobre tamaño, los pronósticos de fragmentación tendrán una mejor distribución a medida que:

- | | |
|-----------------------------------------------|-----------|
| - El bordo entre diámetro de barreno | disminuya |
| - La exactitud de la barrenación | augmente |
| - La relación de rigidez | augmente |
| - La relación de espaciamiento sobre el bordo | augmente |
| - Se utilice una plantilla en tresbolillo. | |

Del tamaño de la fragmentación y del grado de desplazamiento del material que tengan las voladuras, depende la eficiencia del ciclo productivo y la productividad de la quebradora primaria.

ANALISIS DE PLANTILLAS DE BARRENACION -

AREA DE INFLUENCIA DE LOS BARRENOS.

Un patrón de voladura esta formado mediante el diseño apropiado de los barrenos y la colocación en configuración geométrica entre cada uno de ellos y la cara libre del banco.

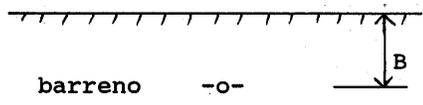
En disposición para maximizar la fragmentación y minimizar los efectos de los problemas potenciales asociados a las voladuras, debemos analizar en el diseño cada uno de los barrenos para ver si responderán adecuadamente al trabajo que se les asigna en el patrón de la voladura.

Normalmente los perforistas llaman a la distancia entre líneas paralelas a la cara libre, bordo y espaciamiento a la distancia entre barrenos a lo largo de la línea. El supervisor de voladuras siempre considera la distancia del barreno a la cara libre como bordo, ésta puede ser la diferencia en voladuras de líneas multiples; la razón de esta diferencia es que el alivio o bordo se define como la distancia mínima del barreno a la cara interna dinámica creada por los barrenos al ir detonando secuencialmente.

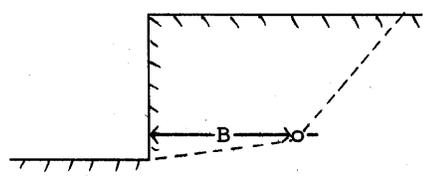
La manera en que los barrenos son retardados en la voladura, puede cambiar la orientación de salida de los barrenos adyacentes; entonces, para una cara interna creada, la forma de cortes o áreas de influencia del barrenos también cambian al ir detonando los barrenos.

Si el patrón de voladura es diseñado adecuadamente, tendremos una secuencia de cortes repetitivos muy similares resultantes por barreno detonado. La forma de los cortes diferentes que se pueden crear por la detonación de los barrenos depende de la relación de salida entre el barreno y la cara interna resultante. La Fig. 5, demuestra los diferentes cortes o áreas de influencia de los barrenos que resultan de la orientación de las caras libres en el momento del disparo.

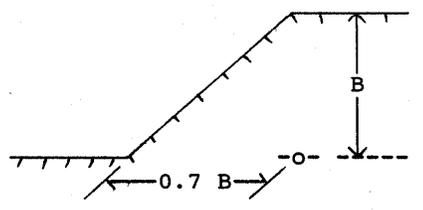
Analizando los cortes de ésta figura, podemos observar que si la misma cantidad de explosivo es utilizada para cada barreno, de cualquier modo distintos volúmenes de roca serán quebrados, dependiendo de la orientación de las caras libres; éste ejemplo demuestra porque el factor de carga puede cambiar para el mismo tipo de roca dentro de la misma explotación del yacimiento mineral o cantera.



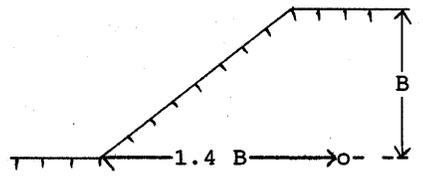
a.- influencia del corte cuando una cara libre vertical se presenta. El ángulo de corte depende de la distancia al B



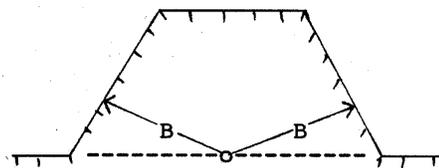
b.- ilustra dos caras libres en angulo recto. La influencia de quebrado es distinta a la anterior y depende de la ubicación del barreno.



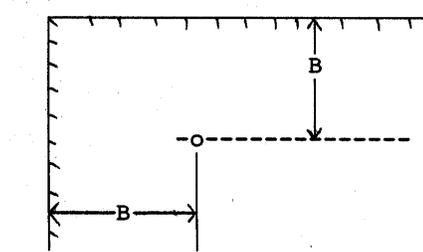
c.- corte en esquina con área diferente de quebrado por la orientación de las caras.



d.- corte similar al anterior con distinta localización del barreno. El área puede ser el doble dependiendo de la localización de éste.



e.- demuestra una influencia más grande que cualquier otro corte, muy típica en cortes internos.



f.- Barreno en una esquina con dos caras libres totales La influencia de quebrado es equivalente a dos áreas (a).

Fig. 5, AREAS DE INFLUENCIA DE LOS BARRENOS (vista en planta).

INFLUENCIA DE LA CALIDAD DE LA BARRENACION.

El objetivo de la barrenación, es proveer una cavidad en la roca para depositar los explosivos; el grado de eficiencia con que ésta se realiza, es de vital importancia para el funcionamiento de los mismos. Las voladuras son altamente influenciadas por la calidad de la barrenación y determinan la productividad del ciclo de producción de la mina, influenciado esencialmente por el tamaño de la fragmentación y por el grado de desplazamiento de la rezaga.

El departamento de ingeniería de mina provee con una configuración geométrica las plantillas de barrenación para las voladuras en los bancos, marcando con estacas el lugar exacto para cada barreno, así como la numeración y la profundidad necesaria de los mismos; incluyendo en ésta el tamaño de la sub-barrenación proyectado desde el nivel del piso superior, con el propósito de cumplir con el objetivo real de la simetría y calidad de la barrenación.

Al barrenar las series de barrenos con el alineamiento e inclinación en el lugar exacto en que se proyectan, con su propia profundidad, para tener las cargas de explosivos bien distribuidas en el interior de la masa rocosa, se logran mejores resultados de las voladuras, debido a que el área de influencia de los barrenos se mantiene sin cambio para cada uno.

La ejecución exacta de un plan de voladuras envuelve la exactitud de la calidad de la barrenación; los errores en el alineamiento en bordos y espaciamientos de los barrenos, cambian la distribución de la energía del explosivo dentro de la roca y causan desplazamientos anormales de la rezaga, roca en vuelo, vibración y otros problemas asociados a las voladuras. En el inicio de un nuevo banco, normalmente se presentan problemas para ademar los barrenos en el lugar donde se encuentran marcados y se tiene que cambiar de lugar, éste tipo de error ocasional no ocurre en toda la plantilla de barrenación y es aceptable por las condiciones operativas.

Una consideración importante en la calidad de la barrenación es la verticalidad de los barrenos, errores en la inclinación de los mismos, trae una desviación en el fondo, tanto que la cantidad de sub-barrenación puede ser deficiente para quebrar el piso del banco, debido a la cantidad de carga explosiva insuficiente en el fondo o a la falta de longitud en los barrenos y si además, agregamos los factores incontrolables como las consideraciones geológicas y la presencia de agua que afectan la profundidad de la barrenación y la eficiencia de los explosivos, entonces resultan patas entre los barrenos de las voladuras, por otro lado, una sub-barrenación excesiva no solamente es costosa sino que puede traer efectos adversos tales como altos niveles de vibración, fracturamientos en el banco inferior, un mayor consumo de explosivos, etc... que se traducen a problemas de calidad y costos de las voladuras.

PLANTILLAS PARA VOLADURAS DE PRODUCCION.

El concepto básico de voladura de producción es aquella en que se disparan una o más líneas de barrenos, generalmente hacia una cara libre existente, se tiene control sobre el movimiento del material hacia el apilamiento, dentro de los límites del contorno natural y de la geología de la formación. Además, debido al alivio que se tiene, se aprovecha el tamaño del barreno aumentando el bordo y espaciamiento al máximo para producir material fragmentado de un tamaño adecuado.

Existen algunos tipos de plantillas de barrenación para voladuras de producción en tajos y en canteras y las más frecuentemente usadas son la plantilla rectangular y plantilla en tresbolillo.

PLANTILLA RECTANGULAR.

La plantilla de barrenación rectangular se muestra en la Fig. 6, tiene el bordo menor que el espaciamiento y los barrenos de cada fila están alineados directamente detrás de los barrenos de la línea de enfrente.

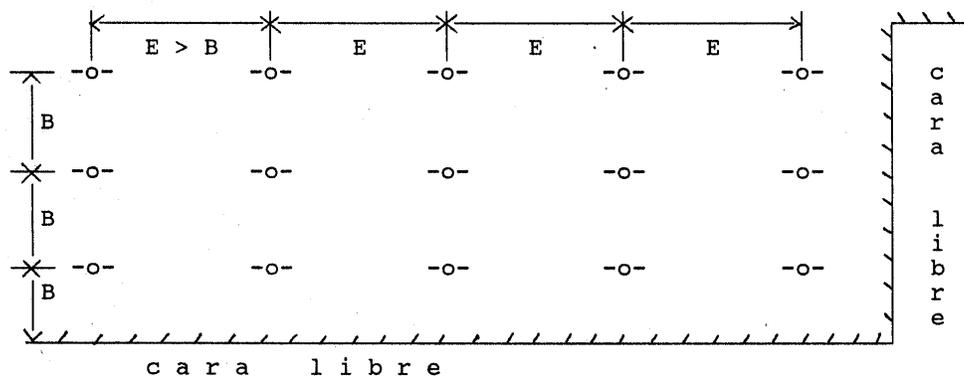


Fig. 6, PLANTILLA RECTANGULAR $B < E$ (vista en planta).

COMENTARIOS:

- Es aplicable en todas las formaciones de roca.
- Es práctica y fácil de barrenar.
- Se proyecta para barrenarse cuando se planea una configuración de un corte en "V" o en diagonal.
- En ausencia de estructuras geológicas da mejores resultados en términos de geometría de barrenación y presenta mayores desplazamientos horizontales de roca.

PLANTILLA EN TRESBOLILLO.

La plantilla en tresbolillo puede tener el bordo igual al espaciamiento. Sin embargo, es más usual con el bordo menor y los barrenos para configurarla están en líneas alternadas a la mitad de la línea de enfrente, como se muestra en la Fig. 7.

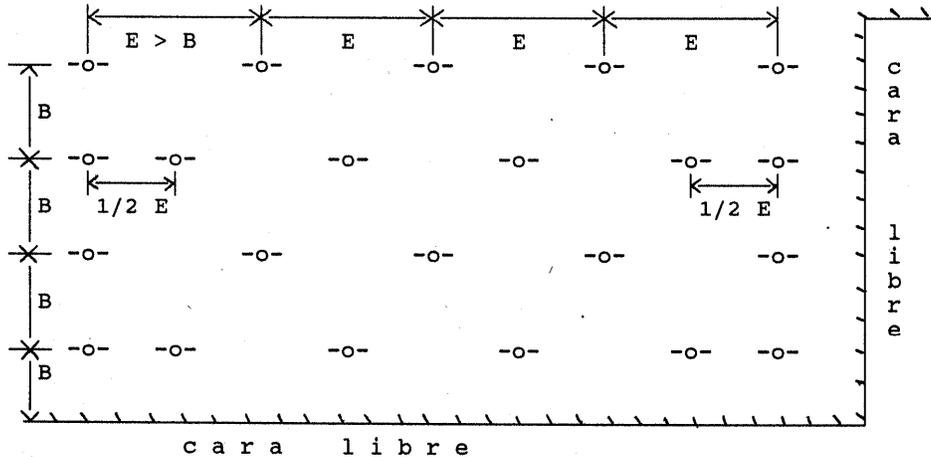


Fig. 7, PLANTILLA EN TRESBOLILLO $B < E$ (vista en planta).

COMENTARIOS:

-Aplicable en formaciones duras de roca para lograr una fragmentación más uniforme del material.

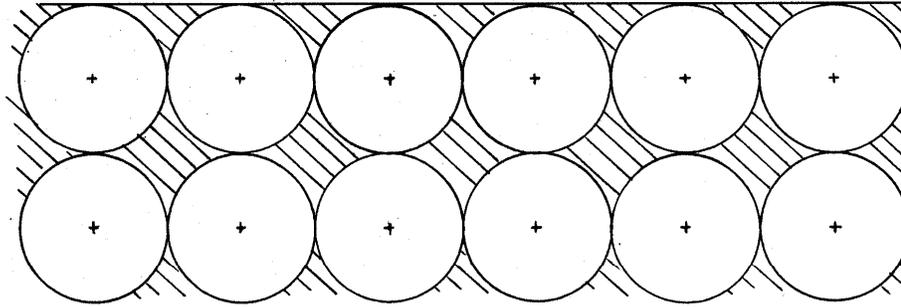
-Requiere generalmente de barrenos extras en líneas alternas para lograr cortes uniformes de la voladura y es menos operativa para barrenarse.

-Se proyecta cuando se planea una salida por línea al frente, en voladuras de líneas múltiples.

-Se emplea además, cuando hay un margen de daño por pateo en la cara de los barrenos del frente, cuando la primera línea es importante con respecto del movimiento del bordo de la pata creado por voladuras anteriores.

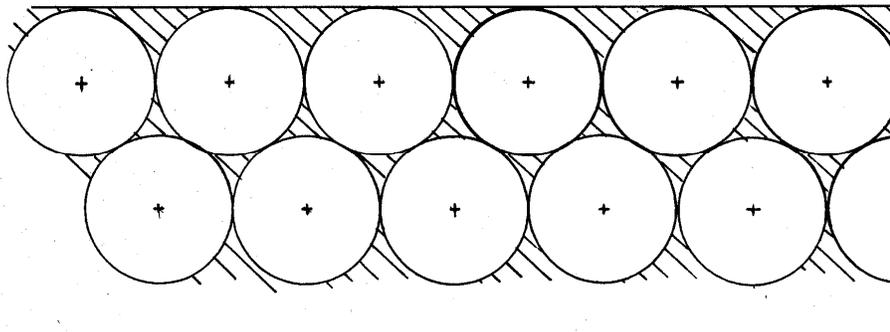
COMPARACION ENTRE PLANTILLAS DE BARRENACION.

c a r a l i b r e



a).- Plantilla rectangular.

c a r a l i b r e



b).- Plantilla en tresbolillo.

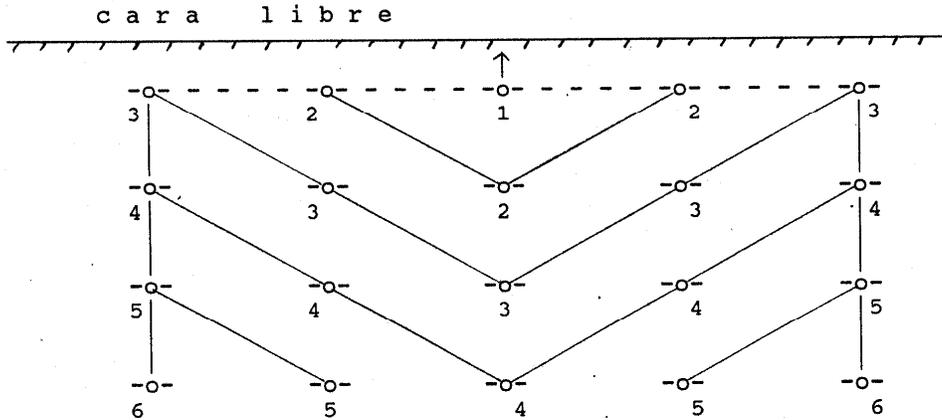
Fig. 8, PLANTILLAS PARA VOLADURAS DE PRODUCCION.

- El croquis de la Fig. 8, muestra con áreas sombreadas, las áreas de menor influencia de los explosivos en los barrenos.

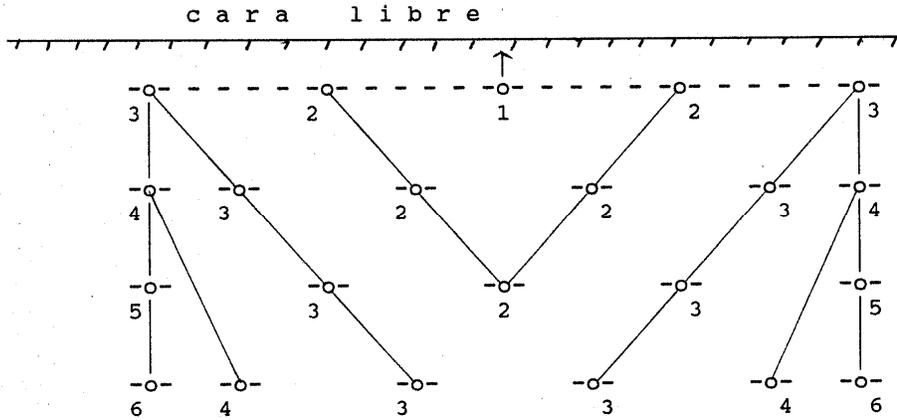
- De manera general, dependiendo del tipo de roca, del sistema de retardo y de la configuración o amarre que se use, una es mejor que la otra en casos particulares.

ANALISIS DE LA CONFIGURACION EN "V".

La salida configurada en "V" Fig. 9, puede aplicarse en la mayoría de las formaciones de roca y ser adaptada fácilmente a la plantilla de barrenación rectangular, también, puede adaptarse con una plantilla en tresbolillo; aunque no es tan práctica para el cargado en el campo. Es utilizada para apilar el material quebrado hacía el centro, con condiciones estructurales adversas cuando la fragmentación del material es importante.



a).- Con una plantilla rectangular.



b).- Con una plantilla en tresbolillo.

Fig. 9, CONFIGURACION EN "V" MOSTRANDO LA SECUENCIA DE LA SALIDA DE LOS BARRENOS.

Cuando se utiliza una plantilla de barrenación rectangular para una configuración o salida en "V", el ángulo del movimiento del material con respecto a la cara libre variará relativamente en relación de las dimensiones del bordo y del espaciamiento.

Este ángulo de movimiento del material en una plantilla de éste tipo se determina por $\tan(a) = B/E$ donde: a = ángulo de movimiento. Además, para determinar el bordo y el espaciamiento efectivos en relación con éste movimiento de la cara tenemos: $Be = E * \text{sen}(a)$ y $Ee = B / \text{sen}(a)$ donde Be y Ee son el bordo y el espaciamiento efectivo respectivamente.

En la mayoría de las formaciones el ángulo de movimiento del material no deberá ser menor de 15 grados con respecto a la cara libre. Además, al usar plantillas rectangulares para configuraciones en "V" un buen juicio debe aplicarse para evitar tener el bordo y el espaciamiento efectivos fuera de relación.

Dependiendo de la formación y del número de barrenos por línea, el movimiento hacia el frente estará controlado dentro de límites razonables y la rezaga se deposita en un apilamiento normal a la cara libre.

En un corte en "V" los barrenos de las esquinas traseras están más altamente confinados que los otros barrenos de la voladura, estos pueden soplarse causando altos niveles de vibración y ruido. Si el barreno adyacente y el del frente a estos barrenos de las esquinas no se inician y detonan en el tiempo adecuado no tendrán otro alivio o salida más que la superficie y por lo tanto se soplarán a la atmósfera.

Es muy común aplicar para estos barrenos la regla "saltando un periodo" que se expresa: para evitar barrenos sopladados en la última línea o en las esquinas del corte, se duplica el tiempo de retardo para estos barrenos; esto proporciona un tiempo adicional, para que la roca de los barrenos del frente pueda moverse e incrementar el alivio.

Esta regla de dedo, da resultados en ciertas aplicaciones, pero si los retardos son inapropiados, incrementar el retardo en las esquinas o en la última línea podría ser insuficiente para mantener la acción propia del rompimiento. Así la mejor alternativa es trazar el patrón de una manera diferente.

La Fig. 10, muestra un corte en "V" en cajón retardado usando una plantilla rectangular, ningún barreno es iniciado a un mismo tiempo junto con sus adyacentes, el ángulo del movimiento del material con respecto a la cara libre resultante, es normal y el espaciamiento efectivo es prácticamente el doble. Este cambio reduce el fracturamiento de la próxima cara.

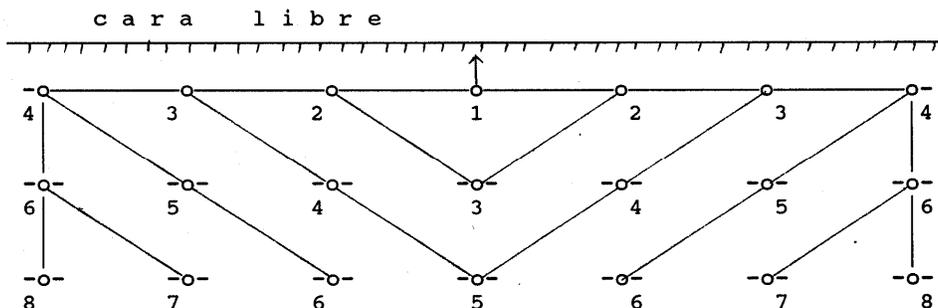


Fig. 10, CORTE EN CAJON CON RETARDO PROGRESIVO.

La Fig. 11, muestra un tradicional corte en "V" usando una plantilla rectangular para volar un área trapezoidal; ésta plantilla no utiliza los barrenos de las esquinas, no forzando la roca a quebrarse en un ángulo de 90 grados en el corte de las esquinas, por lo que produce mejores paredes y disminuye la violencia del disparo.

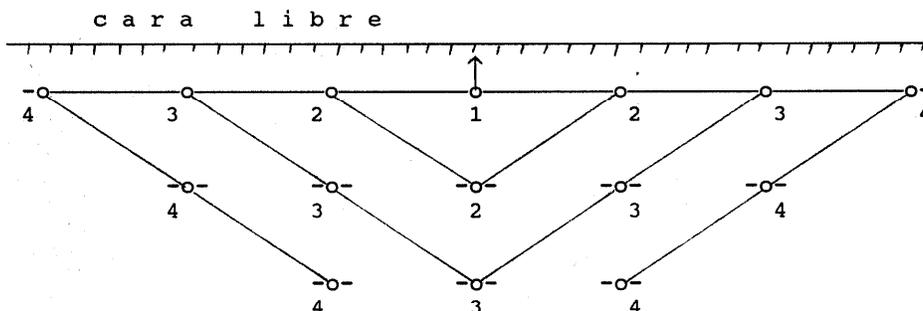


Fig. 11, CORTE EN "V" CON ESQUINA EN ANGULO, DEMOSTRANDO LA INICIACION PROGRESIVA DE LOS RETARDOS.

Si una configuración en "V" corta un área trapezoidal como la representada en la figura anterior, tendremos después que usar un corte en diagonal o en echelón semejante al de la Fig. 12 para el siguiente corte del banco, la última línea de barrenos corta con un ángulo mayor de 90 grados en la esquina, causando poco daño en la pared y disminuyendo la posibilidad de barrenos sopladados. La dirección del movimiento de la roca de las líneas internas será como se muestra en el diagrama en una forma perpendicular al trazo del amarre de los barrenos, muy similar a lo que ocurre en un extremo de una configuración en "V".

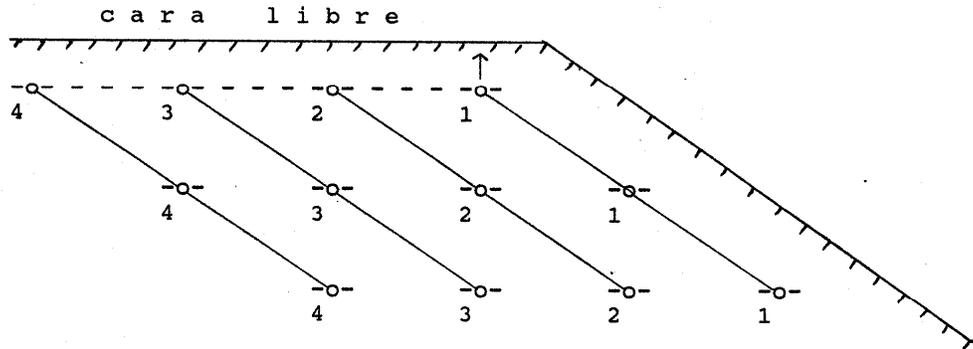


Fig. 12, CORTE EN DIAGONAL O EN ECHELON.

Si la dirección del movimiento y desplazamiento se requiere a 45 grados de la cara en la esquina, es necesario cambiar la plantilla de barrenación como se ilustra en la Fig. 13 para acomodar el cambio de dirección del movimiento del material, barrenar con líneas a lo largo de la cara con una plantilla en tresbolillo es lo más recomendable.

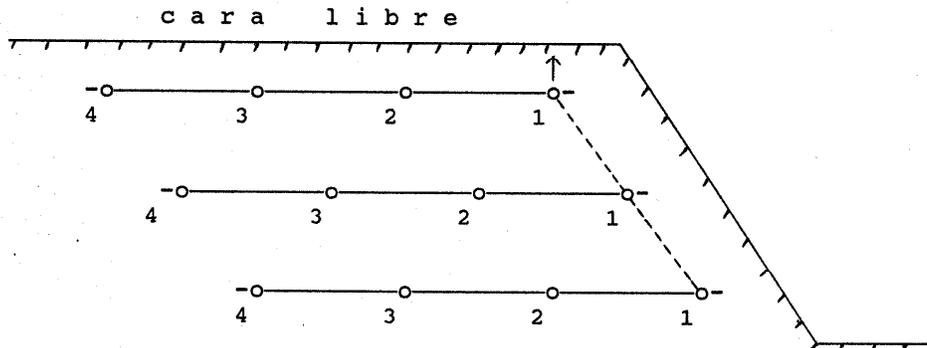


Fig. 13, CORTE EN TRESBOLILLO EN ANGULO A LA ESQUINA.

Si comparamos el bordo real de cada barreno en las Figs. 12 y 13, no tendremos mayor diferencia. Además, el espaciamento a lo largo de las líneas de las caras internas, en barrenos secuenciales se conserva prácticamente igual. Ambas plantillas son iniciadas de la misma manera y depositan el material en distinta localización, así para tener un cambio de dirección del movimiento de la roca y mantener cada barreno con el bordo real y su relación del tiempo de salida, un cambio en la plantilla será necesario. Puede haber un cambio en la dirección del movimiento variando solamente el tiempo, sin cambiar de plantilla de barrenación, como se muestra en la Fig. 14, cada barreno quebra el mismo volumen de roca de la misma manera. Entonces, el bordo y espaciamento en el disparo son cambiados y asumiendo que la cantidad de explosivos para quebrar la roca no será cambiada, los resultados de fragmentación no serán similares; aunque haya cambio en la dirección del movimiento del material, porque tanto la cantidad de explosivo usada como la relación geométrica entre los barrenos, incluyendo el tiempo de salida, controlan el rompimiento de la roca.

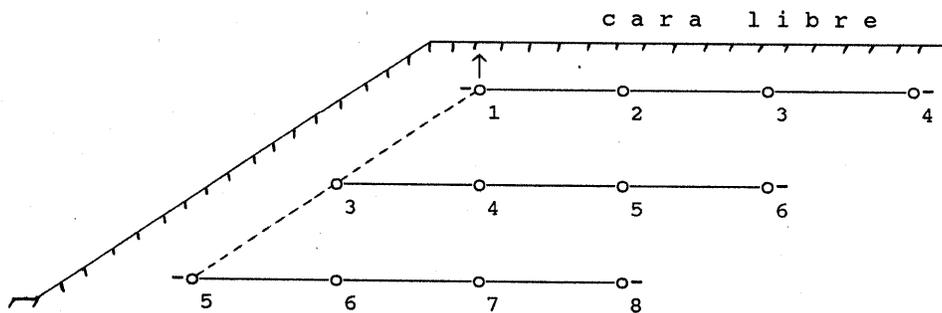


Fig. 14, CORTE EN ESQUINA CON RETARDO PROGRESIVO.

En bancos cortos o rígidos ($HB/B \ll 2$), una plantilla de barrenación en tresbolillo, con el bordo igual al espaciamento (plantilla en triángulo equilátero), es mejor que una plantilla de barrenación rectangular. Analizando los bancos cortos, cuando la altura del banco es aproximadamente igual al bordo y el espaciamento casi igual a la magnitud del bordo, la plantilla de barrenación en triángulo equilátero logra los mejores resultados para la voladura.

La plantilla de barrenación en triángulo equilátero con una secuencia de salida de los barrenos de manera similar a la figura anterior, dará los mejores resultados en bancos cortos, pero la fragmentación no será tan fina como resulta en bancos altos ($HB/B \geq 4$) con la misma plantilla. Además, ésta plantilla compenza algo de los efectos de la rigidez, sufridos en los resultados de la fragmentación.

CALCULO DEL PATRON DE LA VOLADURA DE PRODUCCION PARA MINERAL

La roca de mineral del yacimiento es una arenisca que tiene una densidad de 2.7 tmc. y es influenciada por un sistema principal de fallamiento casi vertical con una dirección NW-SE.

Se requiere producir el mineral con el máximo de finos posible en bancos de 15 mts. con 3 líneas de barrenos de 12.25" de diámetro usando como explosivo Anfo a granel chorreado mecánicamente al mezclarse, con un grado de compactamiento de 0.85 Gr/Cm³ y utilizando los recortes de la barrenación para tapar los mismos.

- 1.- Determine los parámetros: B, T, SB y E, de la plantilla de barrenación.
- 2.- Calcule el FC usado por Ton. y la cantidad de N. de Amonio para una voladura de 21 barrenos.
- 3.- Determine los tiempos de salida entre barrenos y entre líneas para tener un apilamiento normal con el mínimo de pateo.
- 4.- ¿ Cual es el costo, en N\$ por M³ de roca quebrada ?
- 5.- Muestre los croquis del encadenamiento y la salida de los barrenos.

SOLUCION:

1.- PARAMETROS DE LA PLANTILLA DE BARRENACION.

a).- El bordo se calcula en base a la densidad del explosivo

$$B = (2 * Ge / Gr + 1.5) * De$$
$$B = (2 * 0.85 / 2.7 + 1.5) * 12.25$$
$$B = 26.1 \text{ Ft} / 3.281 = 7.95 \text{ mts.}$$

b).- Corrección para el bordo.

El factor por el número de líneas Kr = 0.90 para tres o más líneas de barrenos (según tabla 1, pág. 46).

$$Bc = B * Kr = 7.95 * 0.90 = 7.15 \text{ mts.}$$

Considerando la variación existente en la simetría de la barrenación, el bordo de diseño de marcación se toma de 7.00 mts.

c).- tamaño del taco de los barrenos, en base al bordo.

$$T = 0.7 * Bc$$
$$T = 0.7 * 7.15 = 5.00 \text{ mts.}$$

d).- longitud de la sub-barrenación.

Considerando la roca medianamente dura y por ajustes prácticos.

$$SB = 0.21 * Bc$$
$$SB = 0.21 * 7.15 = 1.50 \text{ mts.}$$

d).- Espaciamiento, en base a la relación de rigidez.

Relación de rigidez: $HB/B = 15 / 7.15 = 2.1 < 4$, por lo que es un banco corto y para una voladura retardada tenemos (de la tabla 4, pág. 49):

$$E = (HB + 7 * Bc) / 8$$
$$E = (15 + 7 * 7.15) / 8 = 8.13 \text{ mts.}$$

Como requerimos producir finos, el espaciamiento para diseño, considerando la simetría de la barrenación será de 8.50 mts.

2.- FACTOR DE CARGA Y CANTIDAD DE N. DE AMONIO PARA LA VOLADURA.

a).- Longitud de la carga de columna.

$$CC = HB + SB - T$$
$$CC = 15 + 1.50 - 5.00 = 11.50 \text{ mts.}$$

b).- Densidad de carga del barreno.

$$Dc = Ge * De^2 / 1273$$
$$Dc = 0.85 * (12.25 * 25.4)^2 / 1273 = 64.6 \text{ kgs/mt.}$$

c).- Carga para un barreno.

$$W = CC * dc$$
$$W = 11.50 * 64.6 = 743 \text{ kgs.}$$

e).- Factor de carga por tonelada.

$$FC = W / (B * E * HB * Gr)$$
$$FC = 743 / (7 * 8.5 * 15 * 2.7) = 743 / 2410 = 308 \text{ grs/ton}$$

f).- Cantidad de carga de Anfo para la voladura.

$$Wt = W * \text{Número de barrenos}$$
$$Wt = 743 * 21 = 15,600 \text{ kgs.}$$

g).- Cantidad de Nitrato de Amonio.

Considerando el ajuste en la profundidad de los barrenos, la carga ajustada para la primera línea y una mezcla normal del anfo, el requerimiento máximo de Nitrato de Amonio será:

$$N.A. = Wt * \% \text{ en Peso de la mezcla}$$
$$N.A. = 15,600 * 94 / 100 = 14,665 \text{ kgs.}$$

3.- SINCRONIZACION DE LOS BARRENOS.

a).- Retardos entre barrenos de una misma línea.

De la tabla 5 pág. 50, tenemos que la constante para Areniscas es (1.8 a 2.1 Ms/Ft), entonces:

$$t_i = TH * E$$

$$t_{mín} = 1.8 * 8.50 * 3.281 = 50.20 \text{ Ms}$$

$$t_{máx} = 2.1 * 8.50 * 3.281 = 58.60 \text{ Ms}$$

b).- Retardo entre líneas de barrenos

Como se requiere un apilamiento normal con el mínimo de pateo, (de la Tabla 6 pág. 51) la constante es 4 Ms /Ft de Bordo.

$$t_r = TR * B$$

$$t_r = 4 * 7.00 * 3.281 = 91.8 \text{ Ms.}$$

Comercialmente se encuentran retardos de 25, 50, 65 y 100 Ms y se debe considerar en éstos la variabilidad del fulminante.

4.- COSTO POR M³ DE ROCA QUEBRADA.

a).- requerimientos de explosivos y accesorios de voladura:

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO, N\$	COSTO
Tovex primer de 3"	21 pzs	4.060	85.260
Nonel de 18 m,- 600 ms	21 pzs	9.200	193.200
Nitrato de Amonio	14,665 kgs	0.640	9,385.600
Diesel	1,144 lts	0.804	919.776
Retardos de superficie	26 pzs	4.800	124.800
Cordón detonante	250 mts	0.512	128.000
Cañuela	5 mts	0.412	2.060
Fulminante No. 6	2 pzs	0.420	0.840
Conector TH	2 pzs	0.240	0.480
Bolsa de Plástico 18 m	5 pzs	40.500	202.500

Costo de explosivos y accesorios: N\$ 11,042.516

b).- requerimientos de barrenación para la voladura:

DESCRIPCION	CANTIDAD
Metros de barrenación	346.50 mts
Productividad de Rotarias	18.00 mt/Hr
Costo de operación	115.20 N\$/Hr

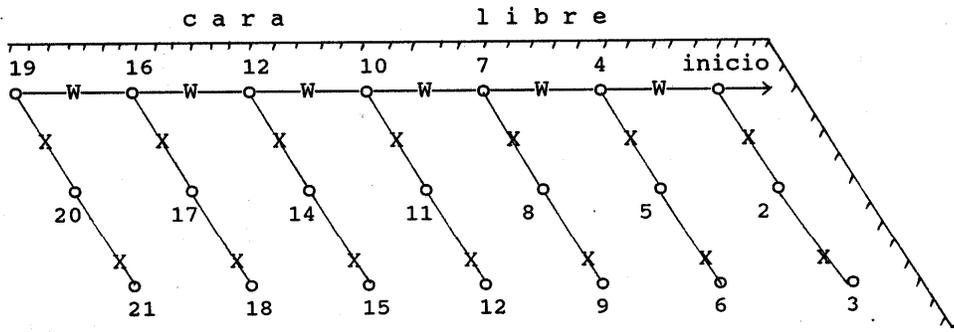
Costo de la barrenación: N\$ 2,217.600

Costo Total de la voladura, Volumen de roca quebrada, M³: N\$ 13,260.116

Costo por M³ de roca quebrada: N\$ 00.707

5.- CROQUIS DE AMARRE Y SALIDA DE LOS BARRENOS.

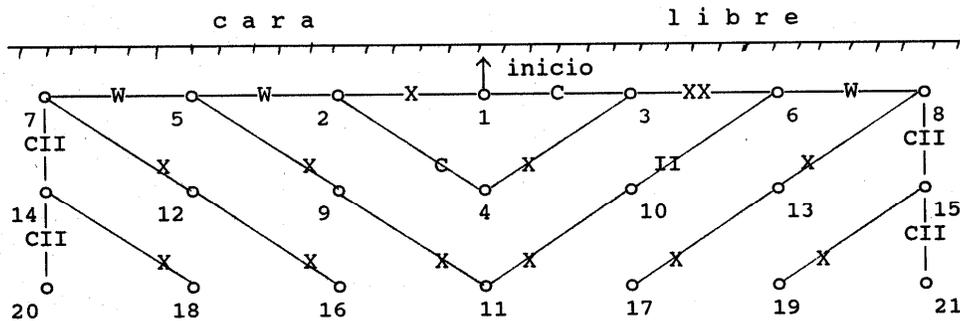
a).- utilizando una plantilla de barrenación en tresbolillo, con una salida en diagonal:



retardos de superficie

- II— 50 ms = 6 pzs.
- X— 65 ms = 14 pzs.
- C— 100 ms = 6 pzs.
- W— 150 ms

b).- utilizando una plantilla de barrenación rectangular, con un corte en "v" al centro del disparo:

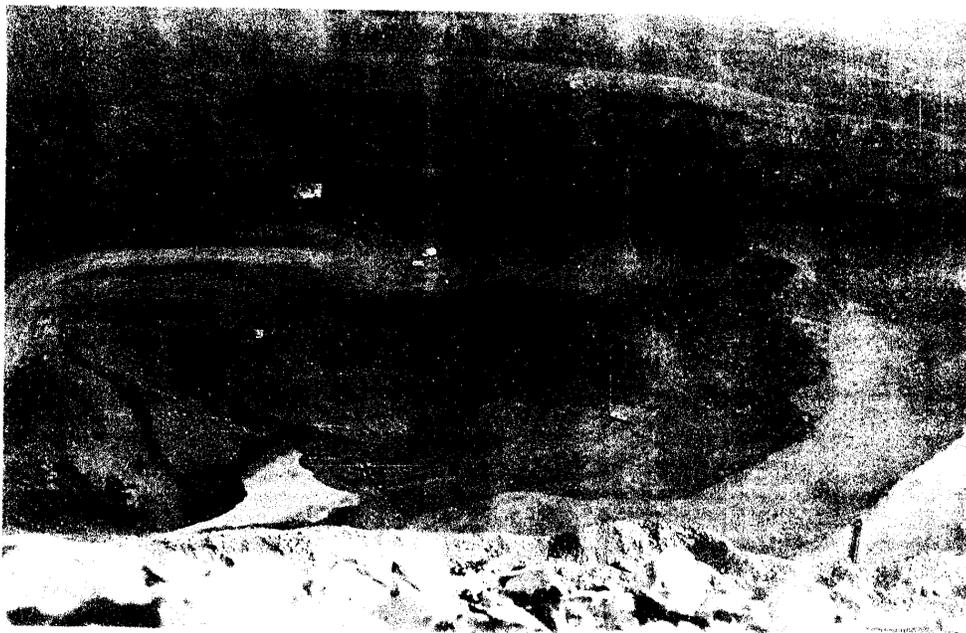


retardos de superficie

- II— 50 ms = 8 pzs.
- X— 65 ms = 13 pzs.
- C— 100 ms = 9 pzs.
- W— 150 ms



Condiciones del disparo e inicio de una voladura de producción de mineral en el banco 2089.



Forma y disposición de la rezaga producto de la voladura.

FOTOGRAFIAS DE UNA VOLADURA EN EL TAJO REAL DE ANGELES.

-PLANTILLAS PARA VOLADURAS DE HUNDIMIENTO-

VOLADURA A PROFUNDIDAD TOTAL.

Las voladuras de hundimiento a profundidad total son llevadas a cabo, cuando se quiere realizar una excavación a un banco inferior partiendo de un piso plano. Esta voladura es elaborada mediante un patrón especial denominado corte en hundimiento o apertura de banco y es distinto a las voladuras de producción debido a que en el momento en que el disparo es iniciado, solo existe una cara libre; ésta cara es la parte superior de la voladura, es decir, la superficie de la roca.

Los primeros barrenos disparados de este patrón funcionan de manera distinta, deberán abrir o crear una segunda cara libre a donde los barrenos subsecuentes deben empujar o moverse; por lo que el tiempo de acción de estos barrenos es crítico; períodos cortos de retardo entre estos barrenos y los siguientes en detonar causarían poco rompimiento y extrema violencia.

El patrón más indicado para esta voladura es una plantilla de barrenación cuadrada, donde la salida se encuentra en el centro del cuadro; es decir, los cuatro barrenos que forman el centro deberán ser iniciados primero y posteriormente con un largo retardo, detonar de cuatro en cuatro barrenos de tal forma que se asegure el área de trabajo deseada para cada barreno, como lo demuestra la fig. 15, en esta plantilla el bordo debe ser igual al espaciamiento.

En el diseño de la voladura a profundidad total debe tomarse en cuenta la dimensión del disparo, ya que los efectos de la gravedad causan problemas con el movimiento de la roca para producir el relieve deseado, para contrarrestar lo anterior existen dos criterios que deben ser considerados:

1).- La profundidad del corte (HB), no deberá ser mayor que la mitad de la dimensión lateral del cuadro, en otras palabras, la altura del banco a cortar, deberá ser menor que la mitad de la distancia obtenida de la suma de los espaciamentos entre los barrenos laterales en el patrón cuadrado.

2).- la relación de rigidez (HB/B) requerida, no deberá ser mayor o igual a cuatro (bancos rígidos).

El funcionamiento en éste tipo de cortes es de la manera siguiente: solamente cuatro barrenos son iniciados por período de retardo, especialmente en el centro del disparo; si mucha roca tiende a desplazarse hacia el centro del corte en un mismo tiempo, se hará montón y no se desplazará verticalmente, si esto ocurre, los barrenos restantes en el patrón se soplarán porque no podrán moverse lateralmente hacia el centro del disparo.

Los barrenos números uno disparados primero (área A), como se ilustra en la figura, están todos tensionados con una tremenda concentración de energía en la zona, el fracturamiento radial y la presurización de los gases los dispararán hacia arriba como en un cráter. Los barrenos número dos y los otros barrenos restantes usan la mitad del explosivo para quebrar el mismo volumen de roca y funcionan de manera distinta porque el fracturamiento y desplazamiento del material es hacia el alivio producido por los barrenos número uno. Los barrenos siguientes en el mismo disparo, tienen todos un alivio vertical para trabajar de manera semejante a los barrenos número dos, Por lo anterior y para controlar la roca en vuelo, el tamaño del taco usado en los barrenos números uno, es comunmente igual al bordo, el resto de los barrenos, deberán tener un taco igual al de las voladuras de producción ($0.7 * B$), para tener buenos resultados de fragmentación en el disparo.

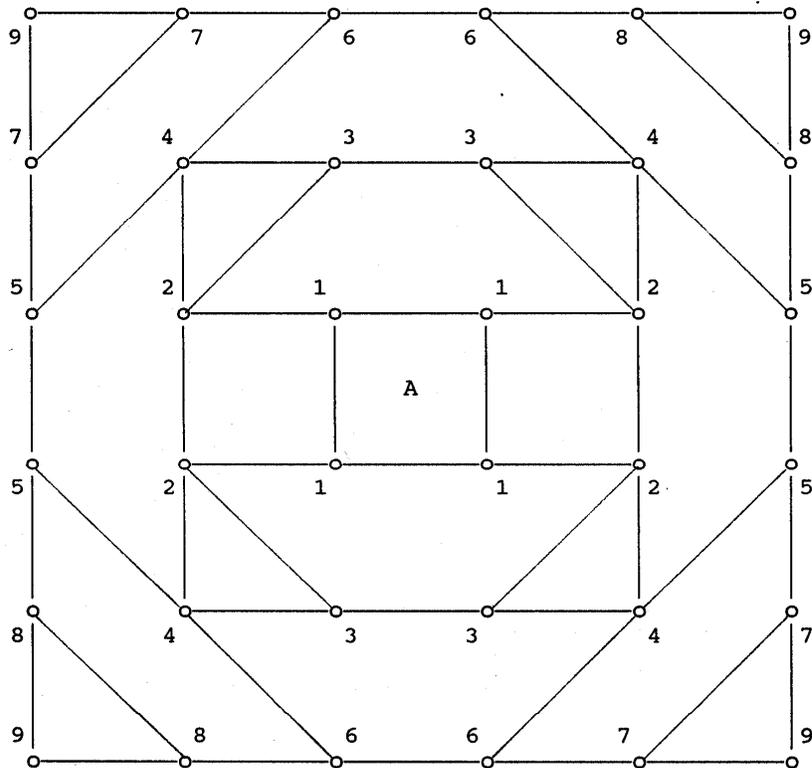


Fig. 15, CORTE EN HUNDIMIENTO A PROFUNDIDAD TOTAL, CON $B = E$ DEMOSTRANDO LA SECUENCIA DE SALIDA DE LOS BARRENOS.

Otro punto a considerar en los barrenos números uno, es que estos deberán romper hasta la profundidad o nivel del piso deseado, para esto se barrenan por debajo del nivel del corte de los otros barrenos y tendrán una sub-barrenación aproximadamente de la mitad del bordo ($SB = 0.5 * B$), dado que si no cortan la pata a toda la profundidad, los demás barrenos tampoco lo harán y se requerirá un corte completo por arriba del nivel deseado en el área de disparo al rezagarse.

La sub-barrenación para los barrenos números dos y los demás barrenos, es dá de manera similar que para los barrenos de una voladura de producción ($SB = 0.3 * B$) en formaciones duras.

De ésta manera, un corte en hundimiento a profundidad total tiene la intención de quebrar y apilar la roca con la mínima craterización y proyección lateral de la rezaga.

En suma, el método para obtener las dimensiones promedio de una voladura de éste tipo, separa los barrenos de inicio (números uno) de todos los otros barrenos, en una plantilla de barrenación cuadrada (con bordo igual al espaciamento) y éste es calculado de igual manera que para una voladura de producción, considerando además en el diseño los dos criterios de analisis citados anteriormente.

La tabla 7 resume las dimensiones generales de la plantilla de barrenación para una voladura de hundimiento de banco a profundidad total.

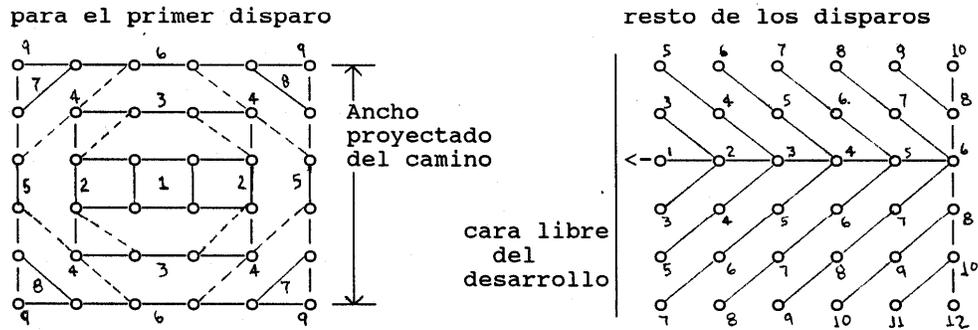
DIMENSION	BARRENOS DE INICIO	OTROS BARRENOS
$E = B$	$T = B$ $SB = 0.5 * B$	$T = 0.8 * B$ $SB = 0.3 * B$
Criterios a considerar:		
1.- $HB < (\text{Sum } E \text{ laterales del cuadro } / 2)$		
2.- $B \geq HB < 4*B$		

TABLA 7, DIMENSIONES PARA UNA PLANTILLA EN HUNDIMIENTO A PROFUNDIDAD TOTAL.

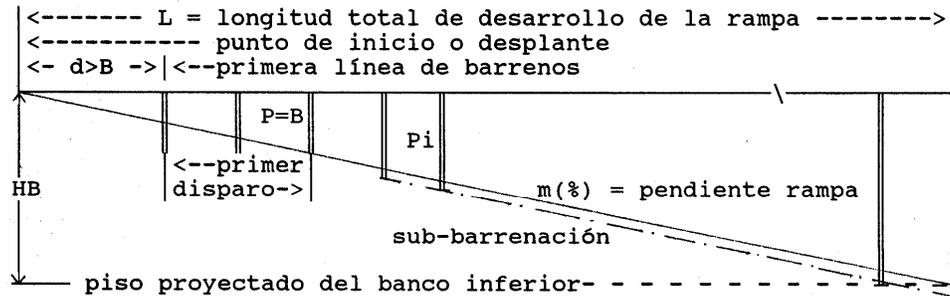
La plantilla a profundidad total há probado ser exitosa y producir resultados sobresalientes en dar una buena fragmentación a la profundidad total del corte, con un mínimo de roca en vuelo y adicionalmente controlar en nivel de vibraciones producido en el suelo.

HUNDIMIENTO POR RAMPEO.

Cuando las condiciones del lugar son severas, una opción disponible para preparar una rampa a un banco inferior partiendo de un piso horizontal, es el denominado hundimiento por rampeo, mejor conocido como voladuras de rampa, en el cual, dependiendo de la altura del banco y de la pendiente (m en %) de la propia rampa es la longitud de desarrollo y el número de disparos que se darán para su preparación. De manera general, lo más recomendable es trazar un perfil de todo el desarrollo, como se muestra en la Fig 16 y utilizar para las voladuras plantillas de barrenación cuadradas ($B = E$); el número de líneas (n) en el disparo puede ser igual al número de barrenos requeridos para lograr el ancho total proyectado de la misma.



a).- vista en planta del tamaño de las voladuras indicando la salida de los barrenos.



donde: P = profundidad de los barrenos.
 P_i = profundidad requerida de la barrenación.
 $P_i = \text{Long. de desarrollo } (L_i) * m(\%) / 100 + SB$

b).- Sección longitudinal demostrando la colocación de la primera línea de barrenos y la profundidad de los mismos.

Fig. 16, TRAZO GENERAL DEL DESARROLLO DE UNA RAMPA (sin/escala).

En el primer disparo, la colocación de la primera línea de barrenos es a una distancia mínima de un bordo a partir del punto de inicio o desplante del desarrollo de la rampa dependiendo de la rippabilidad del material, la profundidad de los barrenos en éste disparo es igual al bordo para tener una relación de rigidez igual a uno ($HB/B=1$) y no existe sub-barrenación, el tamaño del bordo y del taco de los barrenos es calculado de la misma manera que para una voladura de producción y la salida de la voladura cuando el número de líneas es par puede ser semejante al del corte en hundimiento total.

Debido a que la cantidad de explosivo disparada por barreno es mínima comparada con éste, se reduce el nivel de vibraciones y la pata generalmente no se hace necesario cortarla a la profundidad de la barrenación por el inicio de la preparación de la rampa. Cuando el número de líneas en este disparo es impar, la salida de los barrenos puede ser semejante a la mostrada en la Fig. 17, notese que el inicio es al centro del disparo con un solo barreno.

Para la segunda y siguientes voladuras se utilizan plantillas de barrenación semejantes a la del primer disparo. En éste segundo corte, como depende de la pendiente del proyecto la longitud de desarrollo (L_i) de la rampa y por consiguiente la profundidad de la barrenación, puede o no requerir sub-barrenación, ésta se hace necesaria, cuando la profundidad del corte (P_i) a desarrollar en una línea de barrenos es mayor o igual que el bordo.

El tamaño de la sub-barrenación en este tipo de voladuras es generalmente del 20% del bordo dependiendo de la naturaleza del material y la profundidad de los barrenos (P), a partir de ésta situación será igual a la profundidad requerida para el desarrollo de la rampa más la sub-barrenación.

El tamaño del taco normalmente se mantiene constante en todos los disparos cuando la fragmentación es de interés. Además, la salida de los barrenos para la segunda y siguientes voladuras, deberán aprovechar el alivio que se vá presentando en la construcción o preparación de la rampa y es recomendable una configuración en "V" con retardación progresiva (semejante a la Fig. 10, del análisis de plantillas de barrenación), para mantener los niveles de vibraciones producidos al mínimo.

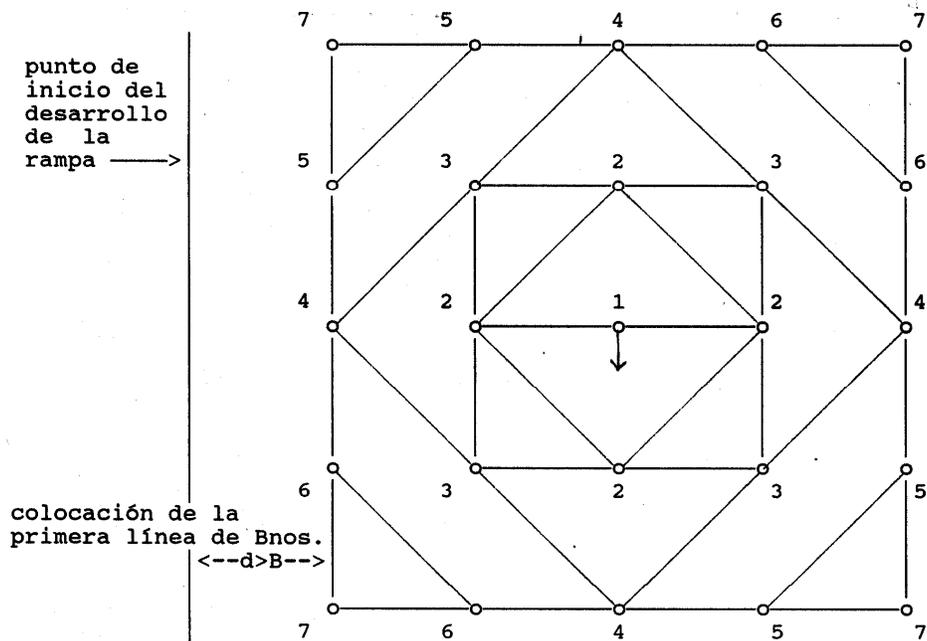


Fig. 17, CONFIGURACION PARA EL PRIMER DISPARO DEL DESARROLLO DE UNA RAMPA Y COLOCACION DE LA PRIMERA LINEA DE BARRENOS, CUANDO EL NUMERO DE LINEAS (n) ES IMPAR, PLANTILLA DE BARRENACION CUADRADA CON B=E (planta).

El hundimiento por rampeo se utiliza cuando se van a desarrollar rampas permanentes y no se va a disponer en un corto plazo del material que quedará sin fragmentar en la construcción de la rampa. También cuando se requiere dar ágilidad al desarrollo de la misma y existen condiciones severas para un corte a profundidad total en la preparación del próximo banco.

Las principales ventajas de un corte por rampeo son:

- Rápido avance en el desarrollo de la barrenación.
- Cuando existe agua, es más posible desaguar los barrenos.
- Fácil de rezagar y se obtienen mejores caminos de acarreo.
- Menor costo por tonelada quebrada comparado con el hundimiento a profundidad total.

CALCULO DE APERTURA DE UN BANCO A PROFUNDIDAD TOTAL

Determine los parámetros de diseño de la plantilla de barrenación, necesaria para abrir los bancos a la profundidad de 15 mts. para la construcción de una rampa provisional de la unión de las etapas de minado en el fondo del tajo, usando anfo como explosivo en barrenos de 11 pulgadas de diámetro, si el ancho operacional del camino de acarreo es de 30 mts. Además, encuentre las dimensiones de la voladura y el costo por M³ de roca quebrada.

SOLUCION:

1.- PARAMETROS DE LA PLANTILLA DE BARRENACION.

a).- El bordo, se calcula de igual manera que para una voladura de producción.

$$B = (2 * G_e / G_r + 1.5) * D_e$$

$$B = (2 * 0.85 / 2.7 + 1.5) * 11$$

$$B = 23.43 / 3.281$$

$$B = 7.15 \text{ mts.}$$

Considerando las variaciones en la simetría de la barrenación, sin tomar en cuenta el factor de corrección por la naturaleza y depositación de las estructuras geológicas, el bordo de diseño podría ser de 7.00 mts.

b).- El espaciamiento requerido en éste tipo de corte, debe ser igual al bordo (tabla 7, pág. 73), para usarse en una plantilla de barrenación cuadrada, entonces:

$$E = B$$

$$E = 7.0 \text{ mts.}$$

c).- Cantidad de carga por barreno.

Para determinar la cantidad de explosivo por barreno, el método separa los barrenos de inicio de los otros barrenos, así:

Parámetro	barrenos de inicio	otros barrenos
Taco (mts).	T = B T = 7.0	T = 0.8 * B T = 0.8 * 7 = 5.60
Sub-barrenación (mts).	SB = 0.5 * B SB = 0.5 * 7 = 3.5	SB = 0.2 * B SB = 0.2 * 7 = 1.40
Profundidad del barreno (mts).	P = HB + SB P = 15 + 3.5 = 18.5	P = 15 + 1.5 = 16.4

continuación...

Parámetro	barrenos de inicio	otros barrenos
Densidad de carga (kg/mt)	$Dc = Ge * (De)^2 / 1273$ $Dc = 0.85 * (11 * 25.4)^2 / 1273$ $Dc = 52.12$	Dc Dc = 52.12
Carga por barreno (kgs).	$W = (P - T) * Dc$ $W = (18.5 - 7) * 52.12$ $W = 600$	W $W = (16.4 - 5.6) * 52.12$ $W = 562$
Factor de Carga (Grs/Ton).	$FC = W / (B * E * HB * Gr)$ $FC = 600 / (7 * 7 * 15 * 2.7)$ $FC = 302$	FC $FC = 562 / 1985$ $FC = 283$

2.- DIMENSIONES DE LA VOLADURA.

a).- Número de barrenos por línea (N).

El primer criterio a considerar en éste tipo de corte, es: la profundidad del corte $HB < 1/2$ de la dimensión lateral del cuadro. Así, la dimensión lateral mínima requerida será:

$$P * 2 = 16.5 * 2 = 33 \text{ mts. y entonces :}$$

$$N = \text{Dimensión lateral / bordo} + \text{uno}$$

$$N = 33 / 7 + 1 = 5.71$$

$$N = 6$$

El segundo criterio en consideración es que la relación de rigidez no debe ser mayor que 4, entonces:

$$HB / B < 4$$

$$15 / 7 = 2.14 < 4$$

b).- Tiempo de retardo entre barrenos.

Se detonan de 4 en 4 barrenos a la vez como se indica en la fig. 15, con un tiempo de retardo entre líneas que nos produzca el mínimo de pateo. Así, (de la tabla 6 pág. 51) tomamos $TR = [4 \text{ a } 6]$ y entonces el tiempo de retardo (Ms) entre barrenos será:

$$ti = TR * B$$

$$tmín = 4 * 7 * 3.281 = 92$$

$$tmáx = 6 * 7 * 3.281 = 138$$

Se utiliza un retardo compuesto de 125 ó 130 Ms para tomar en cuenta la variabilidad de los fulminantes.

3.- COSTO POR M³ DE ROCA QUEBRADA.

a).- requerimientos de explosivos y accesorios de voladura, para los barrenos de inicio:

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO, N\$	COSTO
Tovex primer de 3"	4 pzs	4.060	16.240
Nonel de 18 m,- 600 ms	4 pzs	9.200	36.800
Nitrato de Amonio	2,250 kgs	0.640	1,440.040
Diesel	176 lts	0.804	141.504
Retardos de superficie	8 pzs	4.800	38.400
Cordón detonante	56 mts	0.512	28.672

Costo de explosivos para barrenos de inicio: N\$ 1,701.656

b).- requerimientos de explosivos y accesorios de voladura, para el resto de los barrenos:

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO, N\$	COSTO
Tovex primer de 3"	32 pzs	4.060	129.920
Nonel de 18 m,- 600 ms	32 pzs	9.200	294.400
Nitrato de Amonio	15,000 kgs	0.640	9,600.000
Tovex extra "E"	2,000 kgs	6.040	12,080.000
Diesel	1,100 lts	0.804	884.400
Retardos de superficie	90 pzs	4.800	432.000
Cordón detonante	400 mts	0.512	204.800
Cañuela	5 mts	0.412	2.060
Fulminante No. 6	2 pzs	0.420	0.840
Conector TH	2 pzs	0.240	0.480
Bolsa de Plástico 18 m	9 pzs	40.500	364.500

Costo de explosivos de los otros barrenos: N\$ 23,993.400

c).- requerimientos de barrenación para la voladura:

El tamaño de la voladura es un patrón cuadrado de 6 líneas de barrenación con 6 barrenos cada una, que requiere una profundidad de 18.5 mts. para los barrenos de salida y 16.4 para los otros barrenos por lo que las necesidades de barrenación son:

DESCRIPCION	CANTIDAD
Metros de barrenación	598.80 mts
Productividad de Rotarias	18.00 mt/Hr
Costo de operación	102.40 N\$/Hr

Costo de la barrenación: N\$ 3,406.507

Costo Total de la Voladura, N\$ 29,101.563
 Volumen de roca quebrada, M³ 26,460.000
 Costo por M³ de roca quebrada: N\$ 1.100

PRECORTE (PRESPLITTING).

Muchas técnicas de voladuras han sido desarrolladas para mantener la estabilidad de los taludes, el precorte es un tipo de voladura de contorno utilizado para evitar el sobre rompimiento trasero que involucra una línea sencilla de barrenos perforados sin sub-barrenación a lo largo del límite planeado como talud final de la excavación y requiere de cargas ligeras, detonadas antes que la voladura de producción adyacente se realice.

El propósito del precorte, es el de formar un plano de fractura a través de la línea de barrenos, de tal forma que los rompimientos radiales de la voladura de producción no puedan atravesarlo; de manera secundaria, el plano de fractura puede tener buena apariencia y permitir la utilización de una mayor inclinación en el rebaje con menos mantenimiento a los taludes. El precorte deberá ser usado como una medida de protección para mantener el talud final libre de daño por las voladuras de producción.

Los barrenos en el precorte son generalmente del mismo diámetro, todos son cargados con cargas ligeras e iguales y con espaciamientos entre barrenos muy cortos, dependiendo de las propiedades y condiciones de la roca.

MECANISMOS DE FORMACION DE LA FRACTURA.

Son varias las teorías que explican el mecanismo que da lugar a la formación de la fractura en el precorte. La mayoría de las teorías indican que ésta es cuasada por la interacción y reflexión de las ondas de esfuerzo como se ilustra en la Fig. 18, investigaciones llevadas a cabo por la oficina de mina de los E.U.A. (Bureau of mines U.S.) probaron que la magnitud del esfuerzo resultante es insuficiente para causar la acción del corte, en situaciones reales de voladura. Por un lado para que la formación de la grieta dependa solamente de la onda de esfuerzo, los espaciamientos de los barrenos deberán ser reducidos a una quinta parte de lo que comúnmente se usa en el campo y si los barrenos no son iniciados instantáneamente, la acción del precorte no es posible que resulte, porque la colisión de la onda de esfuerzos no ocurre entre barrenos. Esto es contrario a lo que en realidad ocurre en las voladuras de un precorte retardadas barreno a barreno y que producen buenas condiciones de las paredes.

Estas investigaciones coinciden con las realizadas por Calder y Bawer (1977), que indican que la fractura del precorte se crea por la presión de los gases que se generan dentro de los barrenos, dando lugar a que la roca falle por tensión a todo lo largo de la línea de barrenos, la presión producida por los explosivos actúa relativamente por largos períodos de tiempo (ms), que podría asumirse como una presión estática y la fuerza principal que hay que vencer es la resistencia a la tensión de la

roca a lo largo de la superficie de influencia de la ranura y ésta resistencia es generalmente el 10% de la resistencia a la compresión in-situ de la misma.

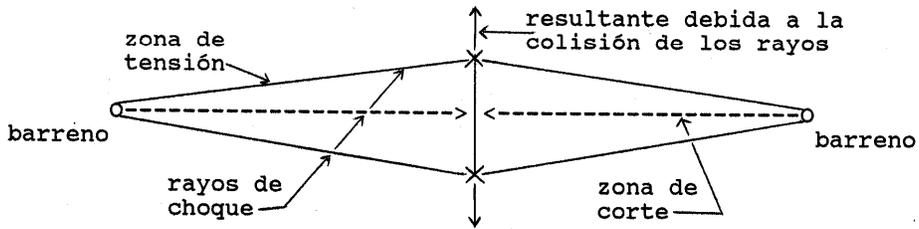


Fig. 18, CONCEPTO ANTIGUO DE LA FORMACION DE LA FRACTURA EN UN PRECORTE.

La presión dentro del barreno y por lo tanto el sobre fracturamiento, se pueden disminuir por medio del desacoplamiento de las cargas explosivas. Se dice que una carga está desacoplada cuando el diámetro de la misma es menor que el diámetro del barreno donde se coloca; una regla de dedo indica que el diámetro de la carga debe ser menor que la mitad del diámetro del barreno.

Al usar cargas desacopladas la presión dentro del barreno cae rápidamente por la expansión de los gases dentro de un volumen mayor, el efecto que ocurre bajo el propio desacoplamiento es que el esfuerzo que producen los diferentes explosivos en la roca es alrededor del 10% del esfuerzo de compresión, necesario en una aplicación de precorte. Un ejemplo del esfuerzo producido en barrenos de 12.25 pulgadas de diámetro es dado en la Fig.19. La razón de desacoplamiento (CR), es definida como el diámetro del barreno dividido entre el diámetro de la carga explosiva.

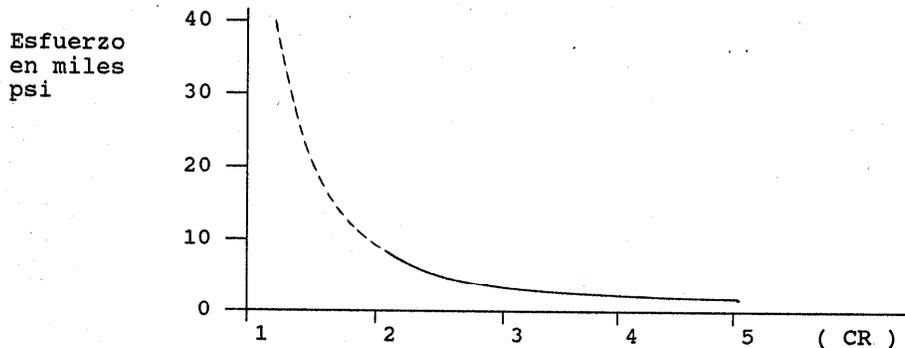


Fig. 19, NIVELES DE ESFUERZO PARA DISPAROS DESACOPLADOS, EN BARRENOS DE 12.25" DE DIAMETRO.

DISEÑO DEL PRECORTE.

Al preparar un plan de voladuras, en el cual el precorte será utilizado en los límites de la excavación, las siguientes ecuaciones podrán ser utilizadas para calcular los parámetros de éste en la roca.

DENSIDAD DE CARGA PARA UN PRECORTE:

Se define como la cantidad de carga utilizada por metro de barreno y es tal que no deberá dañar la pared y al mismo tiempo deberá producir la presión suficiente para que ocurra la formación de la grieta longitudinal y es dada por la ecuación:

$$Dc = (D^2 / 15) * 10^{-3}$$

donde Dc = carga de explosivo en kg/mt.
y D = diámetro del barreno en mm.

Además, una carga concentrada equivalente a 2 ó 3 veces Dc, deberá ser colocada en el fondo del barreno y los barrenos podrán ser iniciados instantánea o secuencialmente entre ellos con tiempos de retardación no mayores a 25 milisegundos.

ESPACIAMIENTO DE BARRENOS:

Si ésta cantidad de carga es usada, el espaciamiento entre los barrenos a lo largo de la línea de precorte puede ser:

$$E = 10 * D$$

donde E = espaciamiento en mm.

La constante 10 es un valor muy conservador y puede incrementarse hasta 16 para formaciones muy duras.

LONGITUD DEL TACO:

Un disparo de precorte es un término medio para causar que la fractura ocurra en la superficie del terreno, si ésto ocurre, no se requiere ninguna cantidad de taco en el barreno. Además los recortes de la barrenación pueden ser usados como taco de manera segura, el cual será proyectado a la atmósfera y su única función es confinar momentáneamente los gases y bajar algo del nivel de ruido. Normalmente los barrenos son taqueados en el brocal con una longitud que depende del diámetro del barreno y que puede ser :

$$T = [8 \text{ a } 12] * D$$

CORREDOR AMORTIGUADO (TRIM BLASTING).

Es una técnica de voladura de contorno utilizada para cortar limpiamente la pared final, consiste de una franja o corredor paralelo al límite de la excavación. El tamaño de ésta franja involucra una línea de precorte para dar una buena apariencia a la pared final diseñada de manera similar que para una voladura de precorte e iniciada antes que cualquier barreno de producción detone, una segunda línea de barrenos denominada de amortiguamiento, la cual también no llevará sub-barrenación y una tercera línea de barrenos de producción, la que podrá o no llevar la sub-barrenación, dependiendo de la ubicación en el diseño del banco que se está minando y de las condiciones geológicas y operativas del lugar.

La localización de la línea amortiguada y sus dimensiones de diseño dependen de la diferencia entre la distancia medida del rezagado o distancia detrás de la cual la pala puede rezagar en las voladuras de producción y de la distancia de la zona dañada por la última línea de éstas voladuras de producción. Si ésta diferencia es negativa, es necesaria la línea de amortiguamiento.

El diseño de la línea de barrenos de producción es idéntico al utilizado para una voladura del mismo nombre y su única variante podría ser que la sub-barrenación no se haga necesaria en algunas partes. La optimización de los parámetros empleados en éste tipo de voladuras de contorno son a prueba y error, para lo cual se hace necesario tener las voladuras de producción bien ajustadas y una guía para usarse en la primera voladura de prueba se presenta a continuación:

LINEA DE PRODUCCION.

Parámetros similares utilizados en voladuras de producción con o sin sub-barrenación, con la carga de explosivos ajustada a las dimensiones de cada barreno hacia la cara libre; generalmente la cantidad de carga es normal (W).

LINEA DE AMORTIGUAMIENTO.

Se ubica a una distancia normal de un bordo atrás de la línea de producción y a una distancia de 0.6 éste a partir de la línea de precorte. El espaciamiento de los barrenos deberá ser igual a un bordo y la carga máxima será de $0.6 * W$ de la línea de barrenos de producción.

LINEA DE PRECORTE.

Las dimensiones y densidad de carga por metro de barrenos son similares a los utilizados en un disparo de precorte. El espaciamiento de los barrenos se podrá incrementar hasta 16 veces el diámetro de los mismos.

La Fig. 20 muestra un patrón típico de una voladura amortiguada, indicando además, la secuencia de disparo. La salida de los barrenos deberá ser semejante a un corte en diagonal o en echelón y el precorte se deberá iniciar con un tiempo mínimo de 200 Ms, antes que el primer barreno de la voladura de producción detone; esto es particularmente importante cuando se tiene retardación en el precorte; el último barreno de esta línea, deberá detonar mínimo con esa diferencia de tiempo antes del primer barreno de producción.

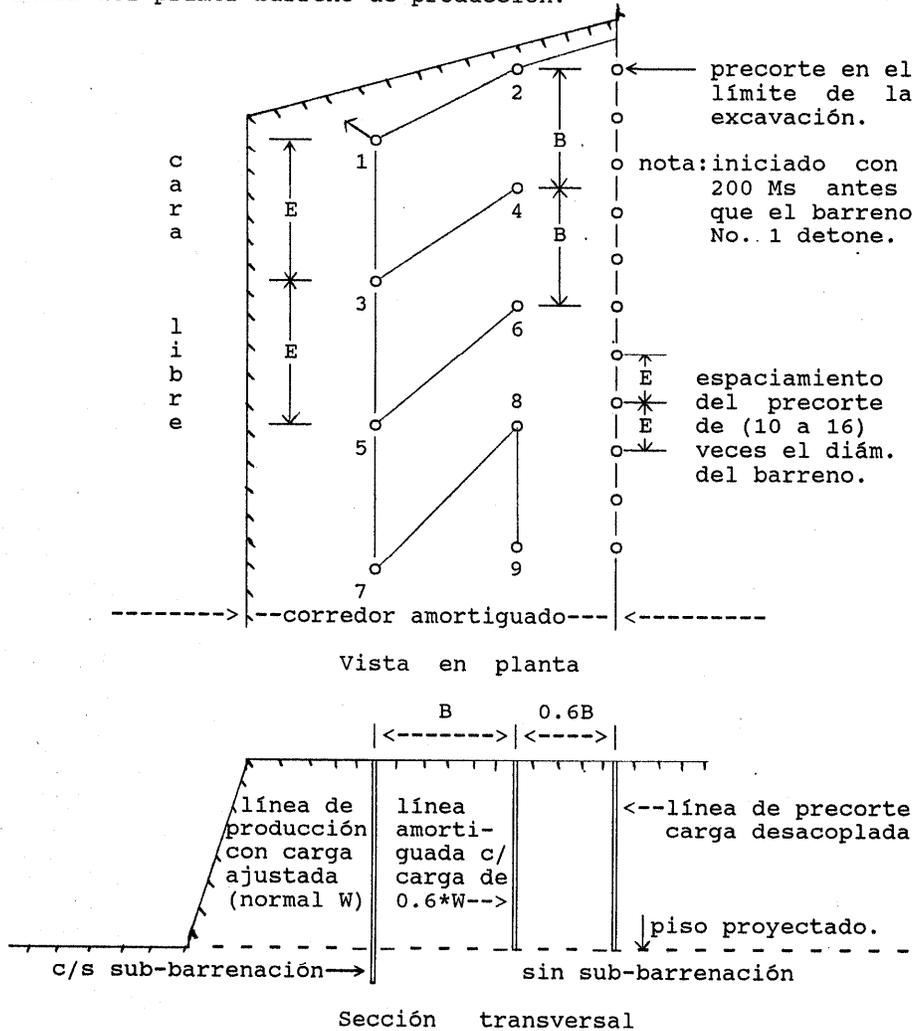


Fig.20, PATRON TIPICO DE CORREDOR AMORTIGUADO (sin escala).

La profundidad de la sub-barrenación en la línea de producción usada normalmente es de 0.2 veces el bordo de la misma y ésta no se hace necesaria en los bancos cuando el diseño del tajo requiere dejar una berma de seguridad entre ellos (generalmente cada 2 ó 3 bancos), para proporcionar un piso firme en esta berma y una crésta del banco inferior más estable. Esta situación se ilustra en la Fig. 21, que muestra la ubicación del corredor amortiguado respecto a la voladura de producción.

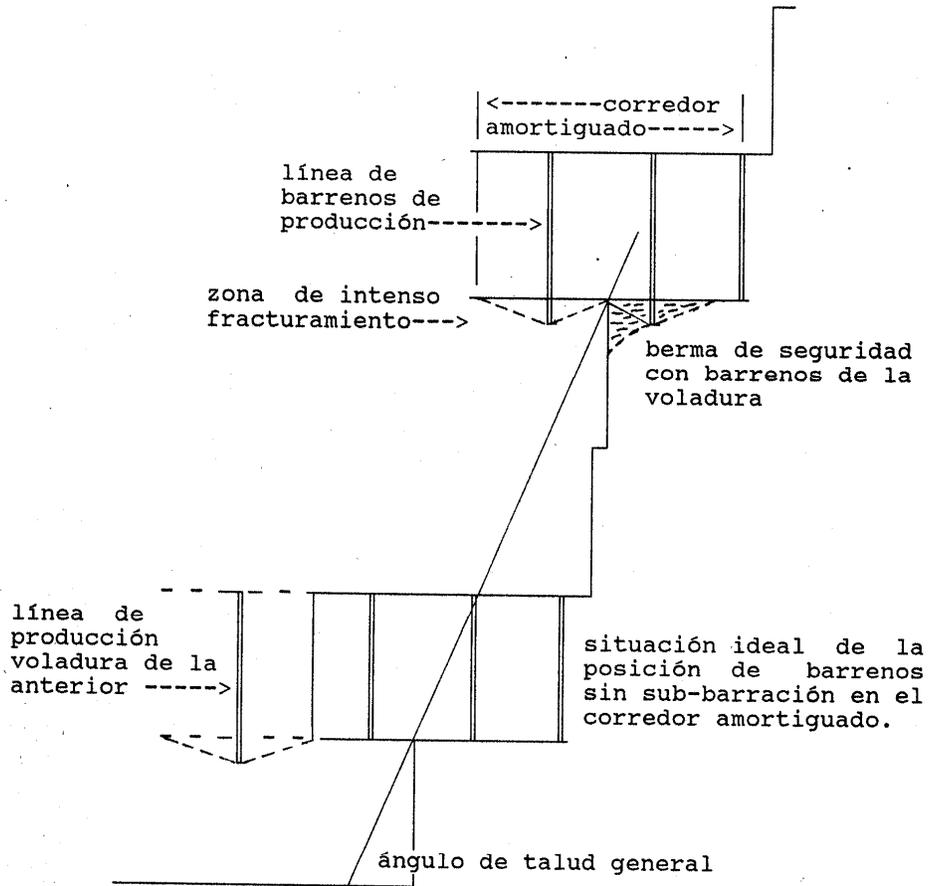


Fig. 21, TRAZADO ESQUEMATICO DE LOS BARRENOS DE LAS VOLADURAS AMORTIGUADAS EN LOS LIMITES DE LAS PAREDES FINALES DE UN TAJO (sección s/escala).

CALCULO PARA LAS VOLADURAS DE CONTORNO EN TEPETATE.

El plan de voladuras amortiguadas para tepetate implementado en la pared sur del tajo, a partir del banco 2176, se diseña con barrenos de 11 pulgadas de diámetro usando para la línea de precorte tovox 700 de 2" y anfo para las líneas de barrenos amortiguados y de producción. Determine los parámetros de diseño de la voladura de contorno, el ancho del corredor amortiguado y el costo por M³ de roca quebrada, considerando la densidad para las Limolitas de 2.5 tmc.

SOLUCION:

1.- PARAMETROS DE LA LINEA DE PRODUCCION:

a).- El bordo es calculado de igual manera que para una voladura de producción.

$$B = (2 * G_e / G_r + 1.5) * D_e$$
$$B = (2 * 0.85 / 2.5 + 1.5) * 11$$
$$B = 23.96 / 3.281 = 7.30 \text{ mts.}$$

La roca de tepetate presenta estratos bien unidos, por lo que el factor de corrección para el bordo se aplica por éste concepto (de la tabla 3 pág. 51) tenemos $K_s = 1.10$ entonces:

$$B_c = K_s * B_o$$
$$B_c = 1.10 * 7.30 = 8.00 \text{ mts.}$$

b).- El espaciamiento en una voladura retardada, es:

$$E = (H_B + 7 * B) / 8$$
$$E = (15 + 7 * 8) / 8 = 8.875 \text{ mts.}$$

Haciendo un ajuste operativo para la marcación de la barrenación y considerando una fragmentación para el material estéril manejable, se toma $E = 9.0$ mts.

c).- Carga de columna del barreno.

$$\text{La sub-barrenación es } S_B = 0.2 * B = 0.2 * 8 = 1.6 \text{ mts.}$$

Esta sub-barrenación no se hace necesaria cada 3 bancos, por el diseño de la berma de seguridad.

$$\text{El tamaño del taco es } T = 0.7 * B = 0.7 * 8 = 5.6 \text{ mts.}$$

entonces:

$$W = (H_B + S_B - T) * D_c$$
$$W = (15 + 1.6 - 5.6) * 52.12 = 570 \text{ kgs.}$$

Como se presenta cara libre en estas voladuras, la carga generalmente se ajusta al bordo de la primera línea de barrenos.

2.- PARAMETROS DE LA LINEA AMORTIGUADA:

a).- La ubicación de ésta línea es a una distancia normal de un bordo (B = 8.0 mts), atrás de la línea de producción y a una distancia de $0.6 * B = 4.8$ mts. al frente del precorte.

b).- Espaciamiento, se determina igual a un bordo, entonces:

$$E = B$$
$$E = 8.0 \text{ mts.}$$

c).- Carga por barreno, La máxima carga para la línea amortiguada es: $0.6 * W$ de la línea de producción, así:

$$W \text{ de la L. amortiguada} = 0.6 * W_p$$
$$W \text{ de la L. amortiguada} = 0.6 * 570 = 342 \text{ kgs. de anfo.}$$

d).- Factor de carga:

$$FC = W / (B * E * HB * Dr)$$
$$FC = 342 / (8 * 8 * 15 * 2.6) = 138 \text{ grs/ton.}$$

3.- PARAMETROS DE LA LINEA DE PRECORTE:

a).- Densidad de carga requerida por metro de barreno.

$$Dc = (D^2 / 15) * 10^{-3}$$
$$Dc = [(11 * 25.4)^2 / 15] * 10^{-3} = 5.2 \text{ Kg/mt.}$$

La carga será desacoplada y distribuida en el barreno.

b).- La carga en el fondo del barreno es de $[2 \text{ a } 3] * Dc$ entonces:

$$CF = 2 * 5.2 / 3.281$$
$$CF = 3.17 \text{ kgs de tovex 700.}$$

c).- Espaciamiento de los barrenos es $E = [10 \text{ a } 16] * D$, teniendo en consideración la posibilidad de auxiliarse en la barrenación con brocas de 12.25 pulgadas de diámetro, el espaciamento se toma al mínimo para éste diámetro:

$$E_{min} = 10 * (12.25 * 2.54) / 100 = 3.10 \text{ mts. que equivale}$$
$$E = 11.1 * (11 * 2.54) / 100 = 3.10 \text{ mts.}$$

d).- Taco, éste se aproxima en el brocal del barreno al valor intermedio de la relación $T = [10 \text{ a } 12] * D$ y se utilizan los recortes de la barrenación para el mismo, así tenemos:

$$T = 11 * (11 * 2.54) / 100$$
$$T = 3.0 \text{ mts.}$$

4.- DIMENSIONES DEL CORREDOR AMORTIGUADO:

El ancho mínimo del corredor amortiguado comprende la dimensión para ubicar las tres líneas de barrenos a partir de la proyección de la última línea de la voladura de producción adyacente, tomando en cuenta las necesidades operacionales del equipo de barrenación y el diseño del tajo, entonces:

$$\begin{aligned} \text{ancho del corredor} &= B + B + (0.6 * B) \\ \text{ancho del corredor} &= 8 + 8 + (0.6 * 8) = 21 \text{ mts.} \end{aligned}$$

3.- COSTO POR M³ DE ROCA QUEBRADA.

a).- requerimientos de explosivos y accesorios, considerando en la voladura de 5 barrenos de producción:

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO, N\$	COSTO
Tovex primer de 3"	5 pzs	4.060	20.300
Nonel de 18 m,- 600 ms	5 pzs	9.200	46.000
Nitrato de Amonio	2,680 kgs	0.640	1,715.200
Diesel	210 lts	0.804	168.840
Retardos de superficie	8 pzs	4.800	38.400
Cordón detonante	40 mts	0.512	20.480

Costo de Explosivos para barrenos de producción: N\$ 2,009.220

b).- requerimientos de explosivos y accesorios de voladura, para los 6 barrenos amortiguados:

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO, N\$	COSTO
Tovex primer de 3"	6 pzs	4.060	24.360
Nonel de 18 m,- 600 ms	6 pzs	9.200	55.200
Nitrato de Amonio	1,930 kgs	0.640	1,235.200
Diesel	150 lts	0.804	120.600
Retardos de superficie	6 pzs	4.800	28.800
Cordón detonante	80 mts	0.512	40.960
Bolsa de Plástico 18 m	3 pzs	40.500	121.500
juego de cañuela	1 pza	3.380	3.380

Costo de Explosivos de los barrenos amortiguados: N\$ 1,630.000

c).- requerimientos de explosivos y accesorios, considerando 14 barrenos de precorte en el disparo:

DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO, N\$	COSTO
Tovex 700	900 kgs	5.200	4,680.000
Cordón Reforzado	400 mts	0.620	248.000
Cordón detonante	50 mts	0.512	25.600
Retardos de superficie	2 pzs	4.800	9.600

Costo de Explosivos para barrenos de precorte: N\$ 4,963.200

d).- requerimientos de barrenación para la voladura:

El tamaño de la voladura es un patrón como se muestra en la Fig. 22, con una línea de 5 barrenos de producción la cual incluye sub-barrenación (profundidad de 16.4 mts), una línea de 6 barrenos amortiguados y una línea de 14 barrenos de precorte por lo que las necesidades de barrenación son:

DESCRIPCION	CANTIDAD
Metros de barrenación	382.00 mts
Productividad de Rotarias	24.00 mt/Hr
Costo de operación	102.40 N\$/Hr
Costo de la barrenación:	N\$ 1,629.867
Costo Total de la Voladura,	N\$ 10,232.287
Volumen de roca quebrada, M ³	11,160.000
Costo por M ³ de roca quebrada:	N\$ 0.917

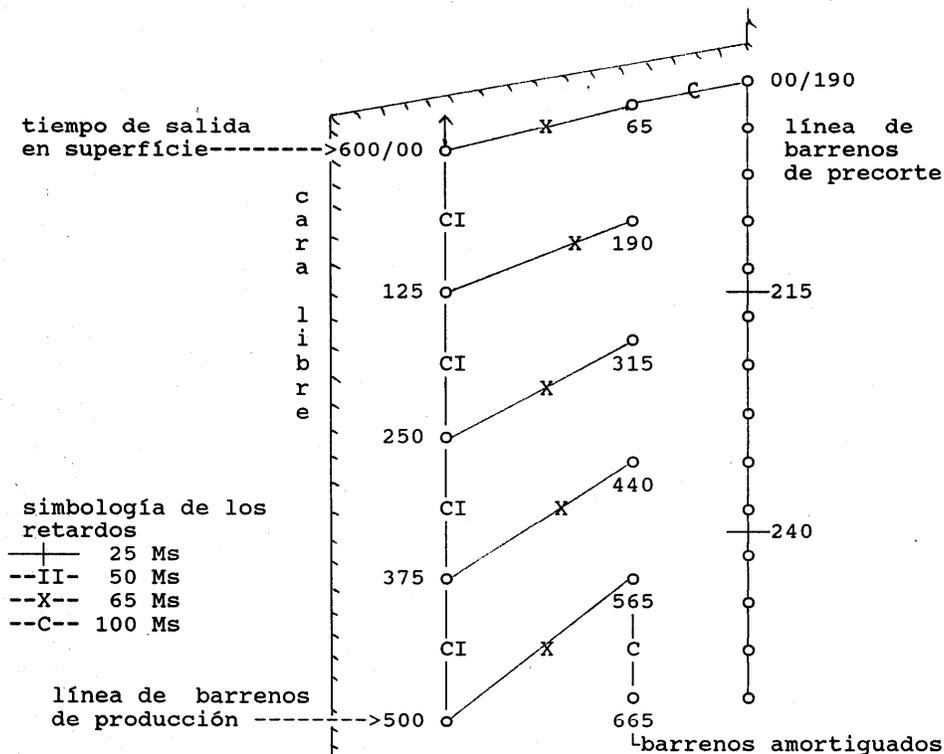
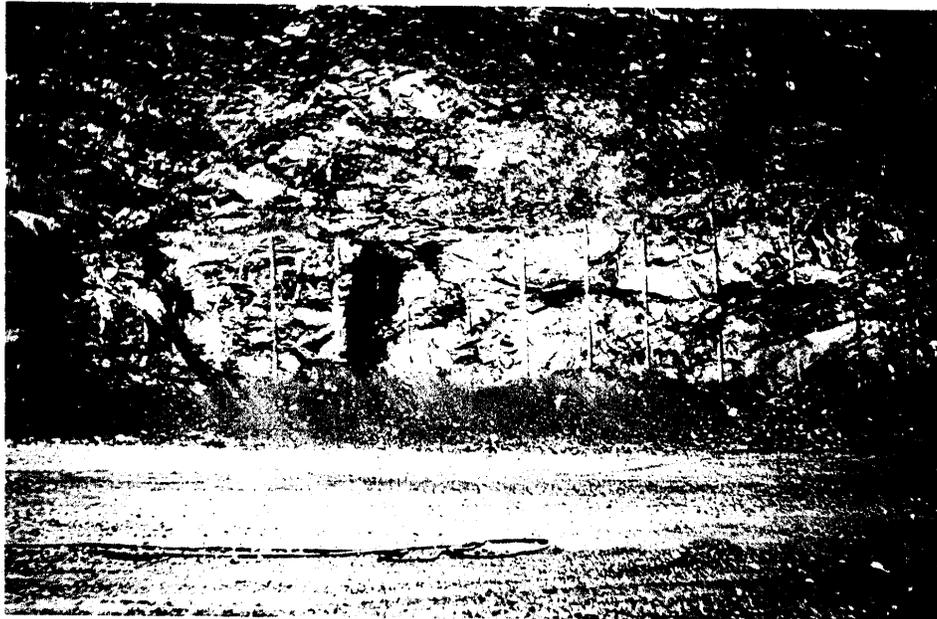


Fig. 22, CROQUIS DE AMARRE DE LA VOL. AMORTIGUADA, INDICANDO TIEMPOS DE SALIDA DE LOS BARRENOS (planta s/escala)



Repliegue de la pared final del banco 2089 SW.



Panoramica de la pared Sur del tajo.

FOTOGRAFIAS MOSTRANDO LOS RESULTADOS DE LAS VOLADURAS AMORTIGUADAS EN EL TAJO, REAL DE ANGELES.

CONTROL DE VIBRACIONES