

3 DISEÑO DE VOLADURAS

El diseño de las voladuras debe abarcar los conceptos fundamentales de un diseño de voladuras ideal (Konya, 1990), los cuales son modificados cuando es necesario para compensar las condiciones geológicas específicas del lugar. Para poder evaluar un plan de voladura, éste debe tomarse por partes y cada variable o dimensión debe ser evaluada. Un plan de voladura debe diseñarse y revisarse detenidamente. Aquí se expone un procedimiento fácil de entender para el análisis de un plan de voladura. Serán examinados los métodos para determinar si las variables de diseño están en rangos normalmente aceptados.

3.1 BORDO.-

La dimensión del bordo se define como la distancia más corta al punto de alivio al momento que un barreno detona. El alivio se considera normalmente como la cara original del banco o bien como una cara interna creada por una hilera de barrenos que han sido disparados previamente con un retardo anterior. La selección del bordo apropiado es una de las decisiones más importantes que hay que hacer en cualquier diseño de voladuras. De todas las dimensiones de un diseño de una voladura, el bordo es la más crítica. Si los bordos son demasiado pequeños, la roca es lanzada a una distancia considerable de la cara. Los niveles de golpe de aire son altos y la fragmentación puede resultar demasiado fina. Por el otro lado, si los bordos son muy grandes, dará como resultado el rompimiento trasero y el bronqueo de la cara final. Los bordos excesivos también pueden ocasionar que los barrenos se escopeteen lanzando piedra a distancias considerables, los niveles de golpe de aire son altos y la formación de cráteres ocurren cuando los barrenos sólo tienen el alivio hacia arriba. Los bordos excesivos causan un exceso de confinamiento en los barrenos, lo que da como resultado niveles de vibración significativamente más altos por kilogramo de explosivo utilizado. La fragmentación de la roca puede ser extremadamente gruesa y con frecuencia se tiene problemas en la parte baja o pata del banco. Otras variables de diseño son más flexibles y no producirán diferencias tan drásticas en los resultados como la misma proporción de error en la dimensión del bordo.

Si se ha seleccionado un bordo y se ha utilizado con éxito con un diámetro de barreno determinado y quiere calcular el bordo para un diámetro diferente, ya sea mayor o menor, se puede hacer de manera fácil siempre y cuando lo único que se cambie es el diámetro del barreno y el tipo de roca y explosivo se mantengan igual. Para hacer esto, se puede utilizar la siguiente relación:

Ec.1

$$B_2 = B_1 \frac{De_2}{De_1}$$

Donde:

B_1 = Bordo utilizado exitosamente en voladuras previas

De_1 = Diámetro del explosivo para B_1

B_2 = Nuevo bordo

De_2 = Diámetro nuevo del explosivo para B_2

3.1.1 AJUSTES PARA EL TIPO DE ROCA Y EXPLOSIVO

Cuando uno se mueve hacia una nueva área de trabajo donde no ha tenido experiencia previa, sólo tendrá las características generales de la roca y el explosivo para trabajar. En estos casos y sobre todo si existen asentamientos humanos cercanos, es esencial que la primera voladura no sea de mala calidad. Para estimar el bordo bajo estas situaciones, la siguiente fórmula empírica resulta de ayuda:

Ec.2

$$B = De ((2SGe / SGr) + 1.5)$$

Donde:

B = Bordo

SGe = Gravedad específica o densidad del explosivo

SGr = Gravedad específica o densidad de la roca

De = Diámetro del barreno.

En la mayoría de los casos, los bordos utilizados en un trabajo, serán razonables si están dentro de $\pm 10\%$ del valor obtenido con la ecuación 1. La densidad de la roca se utiliza en ésta ecuación como una indicación de la resistencia de la matriz de la roca. Existe una relación entre la densidad de la roca y su resistencia; entre más densa sea la roca, se necesita mayor energía para superar su resistencia a la tensión y causar su rompimiento. Existe también una relación con la cantidad de energía necesaria para mover la roca; entre más densa sea, se necesitará mayor energía para mover la roca. Las características de potencia de los explosivos pueden aproximarse utilizando la gravedad específica ya que entre más potente sea un explosivo, será más denso. Si la potencia de los explosivos fuese la misma sobre la base sobre la unidad de peso, entonces la potencia sería proporcional a la densidad. Sin embargo, también existen diferencias en la energía de los explosivos sobre la base de la unidad de peso. Esas diferencias comparadas con las diferencias en la densidad son, normalmente, bastante pequeñas, lo que permite utilizar la ecuación 2 para una aproximación.

Las ecuaciones anteriores propuestas para el cálculo del bordo usaban la densidad de los explosivos como un indicador de la energía. La nueva generación de suspensiones explosivas (emulsiones) de alguna manera tienen diferentes energías aunque tienen casi la misma densidad. Las ecuaciones de bordo propuestas hasta ahora definirán un bordo razonable pero no diferenciarán entre los niveles de energía de algunos explosivos como las emulsiones. De manera de poder aproximar aun más el bordo para una voladura de prueba, se puede utilizar una ecuación que considera la potencia relativa por volumen en lugar de la densidad del explosivo. La potencia relativa por volumen es el nivel de energía a volumen constante y comparado a un explosivo básico. El explosivo básico para comparación es el nitrato de amonio con diesel al cual se le ha asignado un nivel de energía de 100. Para usar la ecuación de energía se deben considerar la potencia relativa por volumen del explosivo. Se ha encontrado que los valores de la potencia relativa por volumen que resultan de los datos de la prueba de la energía de burbuja, normalmente producen resultados razonables. El trabajar con energías relativas puede ser confuso ya que las energías relativas pueden ser calculadas, en lugar de obtenidas de datos de pruebas de

energía de burbuja. El explosivo dentro del ambiente del barreno puede no ser tan eficiente cómo se podría esperar por los datos de la prueba subacuática. La ecuación que utiliza energía relativa es:

$$B = 8 \times 10^{-3} D_e * (\sqrt[3]{Stv / SGr})$$

Ec. 3

Donde:

B = Bordo

De = Diámetro del barreno

Stv = Potencia relativa por volumen

SGr = Gravedad específica de la roca

3.1.2 CORRECCIONES POR EL NÚMERO DE HILERAS

Muchas operaciones de voladuras se llevan a cabo usando una o dos hileras de barrenos. En estos casos, el bordo entre la primera y segunda hilera será igual. En otras voladuras sin embargo, se utilizan tres o más hileras. Cuando el tiempo de voladura no es correcto, es más difícil romper las últimas hileras de barrenos en voladuras de hileras múltiples, ya que las hileras previas añaden resistencia y confinamiento extra en las hileras traseras. Esto ocurre también con frecuencia en voladuras con apilamientos anteriores. Las voladuras con apilamientos anteriores son aquellas que se disparan antes de que el material de la voladura previa se removiido. Para ajustar los bordos de la tercera, cuarta e hileras subsecuentes, se puede utilizar el factor de corrección Kr como se indica en la tabla 1, el bordo para la voladura de prueba será el calculado originalmente multiplicado por Kr.

HILERAS	Kr
Una o dos hileras	1.0
Tercera hilera y subsecuentes o voladuras con apilamientos anteriores	0.9

3.2 DISTANCIA DEL TACO

La distancia del taco se refiere a la porción superior del barreno que normalmente se rellena con material inerte para confinar los gases de la explosión. Para que una carga de alto explosivo funcione adecuadamente y libere el máximo de energía, la carga debe encontrarse confinada dentro del barreno. El confinamiento adecuado también es necesario para controlar la sobrepresión de aire y la roca en vuelo. La relación común para la determinación del taco es:

$$T = 0.7 \times B$$

Ec. 4

Donde:

T = taco

B = bordo

En la mayoría de los casos, una distancia de taco de 0.7 B es adecuada para evitar que salga material prematuramente del barreno. Debe recordarse que la distancia del taco es proporcional al bordo y, por lo tanto, al diámetro del barreno, a la densidad del explosivo y a la densidad de la roca ya que todos estos son necesarios para determinar el bordo. La distancia del taco es también función de estas variables. Si la voladura tiene un diseño pobre una distancia del taco de 0.7B puede no ser adecuada para evitar que el material se escopetee. De hecho, bajo condiciones de un diseño deficiente, el doblar, triplicar o cuadruplicar la distancia del taco, no asegura que los barrenos funcionen correctamente, por lo tanto, la distancia del taco promedio discutida anteriormente solamente es válida si la voladura es funcional. El material más común utilizado para taco son las astillas de barrenación ya que, se localizan convenientemente en la boca de los barrenos, sin embargo, las astillas muy finas comúnmente llamadas polvo, son un material muy pobre para el taco. Si se utilizan astillas de barrenación que contengan demasiado polvo, se tendrá que utilizar aproximadamente un 30% o 0.3B más (taco = bordo) que si se utiliza piedra triturada como material de taco. En casos donde la roca sólida se localiza cerca de la superficie del banco, con frecuencia se sube la columna principal de explosivo lo más posible, para poder romper esta roca masiva. Sin embargo, no quieren arriesgar la posibilidad de que los barrenos se escopeteen, haya roca en vuelo y sobrepresión de aire.

Si las distancias de los tacos son excesivas, se obtendrá una fracturación muy pobre en la parte superior del banco y la cantidad de rompimiento trasero se incrementará. Cuando una voladura funciona apropiadamente, la zona del taco se levantará suavemente y caerá en la pila de roca después de que el bordo se ha movido hacia fuera. La selección del tamaño del material de taco es importante, si se desea minimizar la profundidad de éste, para poder romper la capa superior de roca. El polvo de barrenación muy fino no se mantendrá dentro del barreno. El material muy grueso tiene la tendencia a dejar huecos de aire cuando se vacía en el barreno y puede ser expulsado como pelotas de golf. El tamaño óptimo del material de taco será aquel que tenga en promedio un diámetro aproximado al 5% del diámetro del barreno. Dicho material debe tener aristas agudas para que funcione adecuadamente. El tamaño se determina de la siguiente manera:

$$S_z = D_h / 20$$

Ec. 5

Donde:

S_z = tamaño de la partícula

D_h = Diámetro del barreno

La grava de río de este tamaño, que tiene cantos rodados, no funcionaría tan bien como la grava triturada. Cuando ocurre la detonación en el barreno, las partículas del taco ubicadas a una distancia corta por encima de la carga, serán comprimidas hasta tener una consistencia de argamasa.

3.3 SUB - BARRENACIÓN

Este término se utiliza comúnmente para definir la profundidad a la cual se perforará el barreno por debajo del nivel de piso propuesto, para asegurar que el rompimiento ocurrirá a nivel. Los barrenos normalmente no rompen la profundidad total. En la mayoría de las

obras de construcción se utiliza la sub-barrenación, a menos que por coincidencia, exista un estrato suave o que una junta de dos estratos se localice al nivel del piso. Si esto ocurre, no se utilizará la sub-barrenación. De hecho, los barrenos pueden rellenarse una distancia equivalente de 6 a 10 diámetros de la carga, para confinar los gases y mantenerlos alejados del estrato suave. Por otro lado si existe un estrato suave a corta distancia por encima del nivel de piso propuesto y por debajo de este existe roca masiva, es común encontrar sub-barrenaciones mas profundas de manera de poder romper el material por debajo del estrato suave, el cálculo para la sub-barrenación es:

Ec 6

$$J = 0.3 \times B$$

Donde:

J = Sub-barrenación

B = Bordo

La sub-barrenación no debe contener astillas de barrenación, lodo o cualquier otro material rocoso. Si las paredes del barreno se derrumban y rellenan el barreno, la sub-barrenación real deberá de ser mas profunda que la sub-barrenación discutida previamente de manera que al tiempo de cargar la cantidad calculada de sub-barrenación, ésta este abierta y aloje a los explosivos. Para poder obtener un fondo plano en una excavación es de sentido común, económicamente hablando, barrenar por debajo del nivel de piso, lo que asegura, a pesar de los errores en la profundidad de barrenación y los derrumbes aleatorios, que todos los fondos de los barrenos se encontraran a la profundidad correcta al tiempo de cargado, si la barrenación se hace un poco mas profunda de lo requerido y algunos de los barrenos son demasiado profundos al tiempo de cargado, se tendrá que rellenar con astillas de barrenación material de taco y así darles la profundidad deseada.

3.4 SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DEL BARRENO

La selección del diámetro adecuado del barreno para cualquier trabajo requiere una evaluación en dos partes. La primera parte considera el efecto del diámetro del barreno en la fragmentación, sobrepresión de aire, roca en vuelo y vibración del terreno. La segunda parte considera la parte económica de la barrenación.

3.4.1 CONSIDERACIONES DE VOLADURA

Las consideraciones de voladura cómo la fragmentación, la sobrepresión de aire, roca en vuelo y la vibración del terreno deben ser evaluadas. En general, entre mas grande sea el diámetro del barreno, mayores serán los problemas con la sobrepresión de aire, roca en vuelo, vibración y la fragmentación. Para adentrarse más en los problemas potenciales que puedan resultar, es necesario considerar la relación de rigidez, que se define cómo: la altura del banco dividida entre la distancia del bordo o L/B. En la siguiente tabla se menciona un resumen en general de los problemas potenciales relacionados con la relación de rigidez.

Relación de rigidez	1	2	3	4
Fragmentación	Pobre	Regular	Buena	Excelente
Sobrepresión de aire	Severa	Regular	Buena	Excelente
Roca en vuelo	Severa	Regular	Buena	Excelente
Vibración del terreno	Severa	Regular	Buena	Excelente
Comentarios	Rompimiento trasero severo y problemas de piso. No se dispare. Vuelva a diseñar	Rediseñe si es posible	Buen control y fragmentación	No hay mayores beneficios con el incremento de la relación de rigidez arriba de 4

Con la ayuda de esta tabla se puede determinar el potencial de los efectos indeseables que han sido discutidos previamente y determinar cuando puede cambiar la barrenación y el cargado sobre la base de estos factores. Mientras más masiva sea la roca en una voladura de producción, los resultados de la tabla anterior serán más probables.

3.4.2 TIEMPO DE INICIACIÓN Y TOLERANCIA DEL INICIADOR

Todos los sistemas de iniciación utilizados hoy en día tienen tolerancia en los tiempos de disparo, lo que significa que los iniciadores no disparan exactamente en el retardo nominal. En general, a menos que se especifique de otra forma por el fabricante, se puede asumir que el periodo nominal de retardo tiene una tolerancia máxima aproximada de $\pm 10\%$. Esto es para indicar que un iniciador eléctrico o no eléctrico con un retardo nominal de 200 MS disparará entre 180 y 200 MS. Si se pretende alcanzar un buen control de pared, baja vibración y poca violencia, el movimiento en secuencia de las hileras de barrenos es indispensable. Cuando se diseña una voladura, debe considerarse seriamente el efecto de la tolerancia en el tiempo de retardo, especialmente en los retardos de hilera a hilera. Aunque no es un acontecimiento común, la tolerancia en el tiempo de disparo ha sido responsable del rompimiento trasero, roca en vuelo, sobrepresión de aire y vibración del terreno excesiva.

3.5 EFECTO DEL RETARDO DE TIEMPO EN LA FRAGMENTACIÓN

La selección del tiempo de iniciación adecuado es tan importante en cada aspecto, cómo la selección de las dimensiones físicas tales cómo bordo y espaciamiento. Dos condiciones generales de tiempo de iniciación serán discutidas. La primera es donde los barrenos dentro de una hilera son disparados instantáneamente o simultáneamente. La iniciación simultánea a lo largo de la hilera requiere de un espaciamiento mayor y por lo tanto, ya que los barrenos se encuentran más alejados, el costo por metro cúbico o por tonelada del material extraído se ve reducido. Las desventajas de tener iniciación simultánea a lo largo de la

hileras, son los problemas que surgirán relacionados con la vibración del terreno debido a que hay muchos barrenos detonando al mismo tiempo. Aunque se producen más metros cúbicos con la iniciación instantánea, la fragmentación será más gruesa que la obtenida con los retardos de tiempo adecuados y espaciamientos más cortos. La iniciación retardada a lo largo de la hilera reduce la vibración del terreno y produce una fragmentación más fina un costo mayor. La tabla 3 proporciona las constantes de tiempo para diferentes tipos de roca.

Retardo de tiempos entre barrenos

Tipo de Roca	Constante T_H (ms/m)
Arenas, Margas, Carbón	6.5
Algunas calizas, Esquistos	5.5
Calizas compactas y mármoles, algunos granitos y basaltos, Cuarzita, algunos gneisses	4.5
Feldespatos porfiricos, gneiss compactos y mica, magnetitas.	3.5

3.5.1 RETARDOS DE BARRENOS A BARRENOS

Ec. 7

$$t_H = T_H \times S$$

Donde:

t_H = Retardo barreno a barreno.

T_H = Constante de retardo barreno a barreno según la tabla anterior.

S = Espaciamiento.

3.5.2 RETARDOS DE HILERA A HILERA.

Los lineamientos para el retardo entre hileras son los siguientes:

- 1.- Los retardos cortos causan pilas de rocas más altas y pegadas a la cara.
- 2.- Los retardos cortos causan más rompimiento trasero.
- 3.- Los retardos cortos causan más violencia, sobre presión de aire y vibración del terreno.
- 4.- Los retardos cortos tienen más potencial para causar roca en vuelo.
- 5.- Los retardos largos reducen los niveles de vibración.
- 6.- Los retardos largos reducen el rompimiento trasero.

Para determinar el retardo que debe utilizarse entre hileras de voladuras en producción. La siguiente tabla proporciona lineamientos generales.

Constante TR(ms/m)	Resultado
6.5	Violencia, sobrepresión de aire excesiva, rompimiento trasero.
8	Pila de material alta cercana a la cara, sobrepresión y rompimiento moderados.
11.5	Altura de la pila promedio, sobrepresión y rompimiento promedio.
16.5	Pila de material dispersa con rompimiento trasero mínimo.

El tiempo de retardo, no debe ser menor a 8.5 m por metro de bordo entre hileras. Los tiempos de retardo normalmente, no deben ser mayores a 16.5 m por metro de bordo entre hileras. Cuando el control de la pared final es crítico en voladuras multilíneas (6 o más hileras), los retardos pueden ampliarse tanto como 40 m por metro de bordo para obtener pilas de material bajas o lanzamiento de descapoté. La siguiente ecuación sirve para encontrar el retardo entre hileras:

$$t_R = T_R \times B$$

Ec. 8

donde:

t_R = Retardo entre hileras.

T_R = Factor de tiempo entre hileras.

B = Bordo.

La selección de un tiempo aproximado en metros se obtiene determinando un factor de tiempo utilizando las tablas de la constante "TR" y "TH" y haciendo una multiplicación. Los valores obtenidos pueden ser difíciles si no es que imposibles de implementar en el campo debido a las limitantes de los dispositivos disponibles. El obtener el tiempo preciso es crítico. Una parte significativa de los problemas, resultado de las voladuras y que causan sobrepresión de aire, roca en vuelo, vibración excesiva y poca fragmentación, están directamente relacionadas con el tiempo de iniciación, las tablas de las constantes TH y TR expresan valores del tiempo de iniciación, que pueden ser utilizados para determinar las características del desempeño del tiempo de iniciación. Sin embargo, el tiempo de iniciación, debe ser considerado debido al potencial que tiene que causar vibración del terreno.

Se propone que las cargas sean disparadas con un retardo de 8ms o más si es que éstas han de considerarse eventos independientes desde el punto de vista de la vibración del terreno. Tanto la vibración como el desempeño del tiempo en la voladura, debe mirarse desde un punto de vista realista.

3.6 EFECTO DEL TIEMPO DE INICIACIÓN EN LOS BARRENOS.

Los responsables en voladuras han reconocido la necesidad de dar secuencia a los barrenos. La necesidad de una secuencia adecuada, es aún más evidente en las obras

subterráneas. Si los barrenos no tienen la secuencia adecuada, se obtiene como resultado problemas en la pata y la voladura no corta a la profundidad deseada. La secuencia de los barrenos se ha utilizado por muchos años, desafortunadamente, existen otras consideraciones de retardo que solo dan secuencia los barrenos. Si una plantilla esta barrenada y cargada adecuadamente, el tiempo de iniciación controla el tamaño de la fragmentación, el apilado del material quebrado, el nivel máximo de vibración, la cantidad de ruido generada, la cantidad de roca en vuelo producida, y el rompimiento trasero y lateral. El tiempo de iniciación es una de las variables de diseño más importante, desafortunadamente es la más frecuentemente ignorada. Un diseño del tiempo de iniciación pobre en combinación con otras insuficiencias del diseño son las responsables de la mayoría de los problemas de voladuras.

3.6.1 TAMAÑO DE LA FRAGMENTACIÓN

El tamaño al que se rompe la roca, en una voladura, depende de la manera en que la energía trabaja tanto entre barrenos como entre hileras. El espaciamiento de los barrenos depende también del tiempo de iniciación, la fragmentación se verá afectada si el espaciamiento y el tiempo de iniciación están mal. En los últimos 30 años, se han efectuado gran cantidad de investigaciones determinando los efectos que el tiempo de iniciación de barreno a barreno tiene en la fragmentación y existen muchas recomendaciones diferentes respecto al tiempo óptimo de iniciación. Es un hecho reconocido, la iniciación dentro de una cierta ventana de tiempo, producirá mejores resultados sin utilizar explosivos adicionales.

3.6.2 APILAMIENTOS O REPARTO DE MATERIAL

El tiempo de iniciación entre hileras de una voladura, controla el apilamiento o reparto del material quebrado. Si los retardos son demasiados cortos de hilera a hilera, la roca será lanzada al aire verticalmente y puede inclusive crear un apilamiento sobre la parte superior del banco. Si se utilizan retardos más largos, el material puede desplazarse, hilera por hilera, permitiendo el movimiento del material fragmentado hacia enfrente.

3.6.3 GOLPE DE AIRE Y ROCA EN VUELO

Tanto la sobrepresión de aire como la roca en vuelo son influenciadas por el tiempo de retardo. Una voladura bien diseñada, puede salir mal con solo cambiar los períodos de retardos dentro de los barrenos. En general, un tiempo de retardo demasiado corto de hilera a hilera, incrementará los problemas de sobrepresión de aire y roca en vuelo. Si el tiempo de retardo de hilera a hilera es demasiado corto, y la hilera previa no ha tenido oportunidad de moverse, existe una resistencia añadida en la segunda hilera. El barreno, de hecho tiene un bordo mucho mayor, no puede trabajar en forma lateral y tiende a soplarse hacia arriba, esta soplada puede ser muy difícil de controlar. Otra fuente de sobrepresión de aire es la conmoción, el sonido subaudible producido por la pared que esta cayendo. Si la velocidad de iniciación a lo largo de la cara del banco es igual a la velocidad del sonido en el aire, las ondas de sonido pueden ser superpuestas causando un golpe de aire mayor, el cual bajo ciertas circunstancias, puede tener efectos direccionales.

3.6.4 VIBRACIÓN MÁXIMA

La vibración del terreno también es controlada por el tiempo de iniciación. El tiempo de iniciación afecta a la vibración en dos formas separadas. Si el retardo en el tiempo de iniciación de hilera a hilera es muy corto, existe una resistencia añadida en los barrenos de la segunda hilera, se obtiene menos fragmentación y un porcentaje mayor de la energía total, se convierte en energía sísmica provocando problemas con la vibración del terreno. Se sabe que un exceso en el confinamiento de los barrenos eleva los niveles de vibración hasta un 500%. El tiempo de iniciación de barreno a barreno, también puede afectar la vibración, ya que si se tiene un incremento en el alivio de cada barreno, la fragmentación aumenta y los efectos sísmicos disminuyen.

3.7 DISEÑO DE PLANTILLAS

3.7.1 CRITERIO PARA EL DISEÑO DE PLANTILLAS DE BARRENACIÓN SEGÚN KONYA

3.7.1.1 PRINCIPIOS DE LAS PLANTILLAS DE VOLADURAS DE PRODUCCIÓN

Una plantilla de voladuras consiste en colocar barrenos diseñados adecuada e individualmente dentro de una relación geométrica entre ellos y la cara libre. El espaciamiento entre los barrenos de una sola hilera depende de dos variables: el tiempo de iniciación de los barrenos adyacentes y la relación de rigidez, L / B .

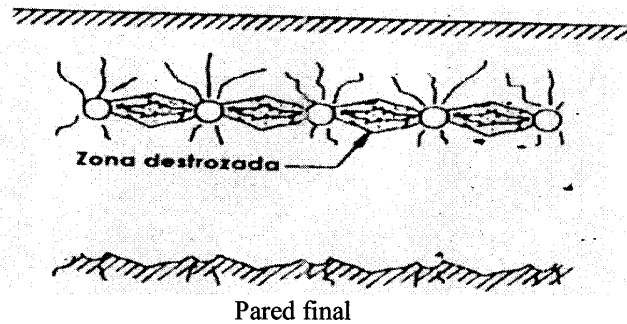
Si los barrenos son iniciados simultáneamente, los espaciamentos deben ser mayores que si los barrenos se disparan con retardos. Si los barrenos están espaciados muy cerca uno del otro y disparan simultáneamente, un número de efectos no deseados ocurrirán. Las grietas de los barrenos muy cercanos se unirán prematuramente causando una zona quebrantada en la pared entre los barrenos. (Fig. 1) . La unión prematura de las grietas formará un plano donde los gases escaparán prematuramente a la atmósfera, provocando sobrepresión de aire y roca en vuelo. El proceso de escape de los gases, reducirá la cantidad de energía disponible y de hecho los barrenos se volverán sobre confinados. La condición de sobre confinamiento causará un aumento en los niveles de vibración del terreno. A pesar del espaciamiento cerrado y de la gran cantidad de energía por unidad de volumen de roca, la fragmentación de la roca del bordo será pobre. A la inversa, es obvio que si los barrenos se encuentran demasiado separados tanto para iniciación retardada o instantánea, La fragmentación será más gruesa y se obtendrán paredes ásperas. (Fig. 2).

El espaciamiento de los barrenos deben ser normalizado para superar los problemas relacionados con la rigidez del banco, por lo tanto, cuando los bancos son bajos comparados con el bordo, la rigidez es un factor que debe ser considerado. Cuando los bancos son altos, la rigidez deja de ser de consideración.

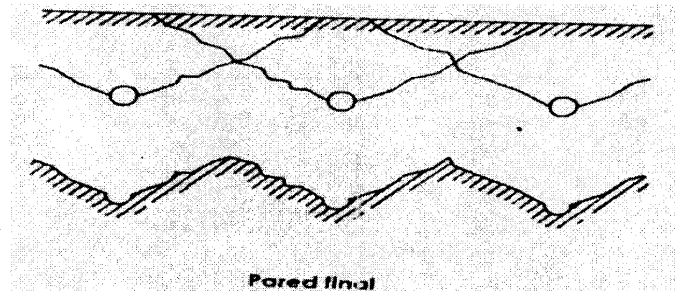
Por lo tanto, hay dos factores que deben considerarse. El primero es determinar si los barrenos disparan ya sea instantáneamente o con retardo. El segundo es si los bancos se consideran bajos o altos comparados con el bordo. La primera decisión respecto a si los

barrenos disparan simultáneamente o retardados es obvia. La segunda decisión respecto a la clasificación de los bancos debe estar ligada a las dimensiones físicas tales como la altura del banco y el bordo, la relación de rigidez o L / B se utiliza para hacer esta determinación. Si L/B es menor a 4 y mayor a 1, Los bancos se consideran bajos y la rigidez debe de ser considerada. Por otra parte, si L/B es mayor a 4, la rigidez deja de ser considerada, existen por lo tanto, 4 condiciones que deben de ser discutidas por separado, iniciación instantánea y bancos bajos, iniciación instantánea y bancos altos, iniciación retardada y bancos bajos e iniciación retardada y bancos altos.

Zona quebrada debido al espaciamiento cercano



Paredes ásperas debidas al espaciamiento excesivo



3.7.1.2 INICIACIÓN INSTANTÁNEA EN BANCOS BAJOS

Para poder revisar el plan de voladura y determinar si el espaciamiento se encuentra dentro de los límites normales, se utilizará la siguiente ecuación.

$$S = (L + 2B) / 3$$

Ec. 9

Donde:

S = Espaciamiento
L = Altura del Banco
B = Bordo

Si el espaciamiento calculado con la ecuación anterior se encuentra dentro de un \pm 15% del espaciamiento real, este se encuentra dentro de los límites óptimos. En ningún caso el espaciamiento deberá ser menor al bordo.

3.7.1.3 INICIACIÓN INSTANTÁNEA EN BANCOS ALTOS

Para funcionar como un banco alto, la altura del banco dividida entre el bordo debe ser de 4 o más, con la iniciación instantánea entre barrenos, la siguiente relación puede ser usada para verificar si el espaciamiento se encuentra dentro de los límites permitidos.

$$S = 2 B$$

Ec. 10

Donde :

S= espaciamiento

B= bordo

Si el espaciamiento calculado con la ecuación anterior se encuentra dentro de un \pm 15% del espaciamiento real, este se encuentra dentro de los límites racionales.

3.7.1.4 INICIACIÓN RETARDADA EN BANCOS BAJOS

Cuando la relación de rigidez es entre 1 y 4, y la iniciación es retardada entre los barrenos, se usa la siguiente relación para verificar el espaciamiento:

$$S = (L + 7B) / 8$$

Ec. 11

Donde:

S = Espaciamiento

L = Altura del Banco

B = Bordo

Si el espaciamiento calculado con la ecuación anterior se encuentra dentro de un \pm 15% del espaciamiento real, este se encuentra dentro de los límites razonables.

3.7.1.5 INICIACIÓN RETARDADA EN BANCOS ALTOS

Cuando la relación de rigidez L/B es igual a 4 o más y los barrenos de una misma hilera están retardados, se utiliza la siguiente ecuación para verificar el espaciamiento:

$$S = 1.4 B$$

Ec. 12

Donde:

S = Espaciamiento

B = Bordo

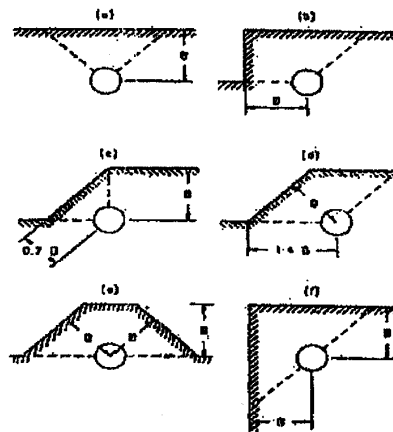
Si el espaciamiento calculado con la ecuación anterior se encuentra dentro de un \pm 15% del espaciamiento real, este se encuentra dentro de los límites necesarios.

3.7.2 FRAGMENTACIÓN MÁXIMA

Para poder maximizar la fragmentación y minimizar los efectos secundarios no deseados en una voladura, las variables de diseño como bordo, taco, sub-barrenación, espaciamento, y tiempo de retardo deben de seleccionarse de tal manera que todas las variables trabajen en conjunto para comprender mejor la relación entre las variables, se usarán figuras para ilustrar los efectos al tener variables equiparadas apropiadas e inapropiadamente. A menos que se especifique lo contrario, se asumirá que no existe complicaciones geológicas y que las alturas de los bancos son por lo menos de $4B$.

Cuando se construye una plantilla de voladura, todos y cada uno de los barrenos debe ser analizado para determinar si ésta responderá adecuadamente. El analizar los bordos y espaciamentos si considerar el tiempo de iniciación produce una idea equivocada de lo que ocurrirá cuando cada barreno dispara. Si una plantilla esta diseñada correctamente, se notará una secuencia repetitiva en la forma de los cráteres producidos por cada barreno. Dependiendo de la relación del barreno y la cara libre se crearán diferentes formas de cráteres debido a los barrenos que disparan independientemente, esto puede verse en la figura 3. Para facilitar el análisis, se puede asumir que el ángulo de la línea de ruptura formada por la línea del bordo y el bordo del cráter es de 45° . Si un barreno tiene más de una dirección de bordo al momento de su detonación, la distancia a la cara libre a lo largo de ambos bordos deberá de ser igual. La figura 3a ilustra el ángulo de rompimiento cuando una cara libre vertical está presente. Para los propósitos de este análisis, la cara libre horizontal o frente del banco no será considerada, ya que la discusión anterior es evidente que los explosivos funcionan preferencialmente en forma radial hacia fuera de los barrenos. La figura 3b están presentes dos caras libres que forman un ángulo de 90° , los patrones de ruptura serán diferentes que en la figura 3a. En la figura 3f un corte en esquina ilustra un área diferente de ruptura debido a la orientación de la cara. Si el barreno esta en una esquina con dos caras libres el área de ruptura es equivalente a dos cráteres del área mostrada en la figura 3a. En la Figura 3e, el cráter será considerablemente mayor que aquellos de las figuras 3d y 3a.

CRATERES



Es aparente que para la misma cantidad de explosivo utilizada en cada barreno en los ejemplos anteriores, se fragmentan diferentes cantidades de rocas dependiendo de la orientación hacia la cara libre. Este sencillo ejemplo muestra que el factor de carga, o sea, la cantidad de explosivo utilizado por volumen de roca explotada no es un número constante dentro de una misma voladura, aún cuando el tipo de roca y el explosivo sean idénticos.

3.7.3 CORRECCIÓN POR CONDICIONES GEOLÓGICAS

La geología del material a quebrar, es el factor más importante para determinar el diseño total de la voladura. Hay muchas teorías que relacionan la velocidad sónica y la dureza de la roca utilizada para determinar la cantidad de explosivo requerido para quebrar el material. Para determinar estos factores, es generalmente necesario, llevar a cabo numerosas pruebas de campo. En la mayoría de los casos, los resultados obtenidos se basan en la suposición que el material a quebrar es homogéneo. Los resultados de estas pruebas pueden ser usados como una guía para ayudar a determinar el espaciamiento y bordes de los barrenos, la cantidad de explosivo requerida y el tipo de explosivo. Pero el análisis final de la determinación generalmente se basa en un factor de juicio obtenido por años de experiencia.

Frecuentemente, el grado de penetración de la barrenación se usa como una guía para determinar la dureza de la roca. Esto no es necesariamente un buen criterio en la dificultad de quebrar el material. En muchos casos una roca muy dura y quebradiza, volará con menos dificultad que una roca suave y esponjosa. La estratificación de la formación, es un factor muy importante en el diseño de la voladura. Donde la estratificación consiste en vetas laminadas y delgadas y horizontales, la roca generalmente puede quebrarse y ser fragmentada adecuadamente con bordos y espaciamientos relativamente largos con un consumo bajo de explosivos. Si la formación es masiva, con solo unas cuantas laminaciones requerirá de bordos y espaciamientos cercanos y un consumo alto de explosivos.

Cuando la estratificación tiene un ángulo agudo de inclinación es generalmente ventajoso desarrollar la cara de la voladura con un ángulo no menor de 45° (y de preferencia 90°) con respecto a la estratificación. Frecuentemente, la dirección del desarrollo no es un factor controlable y la cara debe desarrollarse paralela a la estratificación. En este tipo de desarrollo, los bordos y espaciamientos deben ser reducidos y la barrenación en ángulo que coincidirá con el ángulo de la laminación deberá considerarse muy seriamente.

Ningún número será suficiente para determinar el bordo exacto en un tipo de roca en particular por la naturaleza de las variables en la geología. Aun cuando las características de esfuerzos no hayan cambiado el modo de depositación y estructuras geológicas de los masivos rocosos deben ser considerados para el diseño de la voladura. La manera en como los estratos están ubicados influencia también en la cantidad de explosivo utilizado o en el diseño del bordo en el patrón de voladura.

Existen dos tipos de esfuerzos en las rocas donde la energía del explosivo debe ser de suma importancia. Esta es la fuerza de tensión de los masivos rocosos y la fuerza de tensión de la matriz rocosa. La fuerza de tensión de la matriz rocosa es el esfuerzo que podemos medir utilizando el modo "Brazilian" o utilizando los módulos de ruptura en las pruebas de compresión uniaxial dadas por la maquinas de prueba. Estos procedimientos mecánicos nos dirán si utilizamos muestras in situ o material utilizado para pruebas. Es preferible utilizar los resultados de estas pruebas ya que se utilizan muestras intactas, ya que en las otras las muestras son de material quebrado. Haciendo esto se esta midiendo únicamente el esfuerzo por matriz rocosa y no el esfuerzo en el masivo rocoso. El esfuerzo del masivo rocoso puede ser mucho menor siendo así el esfuerzo matriz rocoso mas fuerte. Podemos tener una roca con alta dureza que puede estar altamente fracturada, fisurada o laminada. Sin embargo el depósito o banco pudiera estar al borde del colapso simplemente por su estructura rocosa.

Para aproximar la desviación de la fórmula original para el bordo y el promedio de las condiciones de la roca que resultan de la estructura rocosa, podemos anexar a la formula dos constantes, K_d que es una corrección de la forma de depositación de la roca y K_s , siendo esta la corrección según se estructura geológica. K_d tiene valores desde 1.0 hasta 1.18 en donde se describe la inclinación de los estratos. El método de clasificación esta dividido en tres clases generales de depositación: estratos con echados inclinados hacia el corte o tajo, estratos con echado inclinado hacia la cara o en el masivo rocoso, y otros casos de depositación.

Correcciones por el tipo de depositación	K_d
Estratos con inclinación del echado hacia el corte.	1.18
Estratos con inclinación del echado hacia la cara.	0.95
Otros tipos de depositacion.	1.00

La corrección por estructura geológica se relacionara por la cantidad de fracturas de la roca en el lugar, en los esfuerzos entre fracturas y la frecuencia en cementacion entre las capas de la roca. El factor de corrección por estructuras es de 0.95 hasta 1.30. los masivos rocosos intactos tendrán un K_s igual a 0.95, al igual que una roca dura severamente fracturada tendrá un valor de K_s igual a 1.30.(Hoek.1980)

Correcciones por estructura geológica	K_s
Altamente quebrada, profundas fracturas con alta cementacion entre capas.	1.30
Pequeñas cementaciones entre capas con pocas fracturas.	1.10
Masivo rocoso intacto.	0.95

Para poder entender mejor estos factores de corrección ilustramos el siguiente ejemplo:

La formación geológica es una capa horizontal de caliza (gravedad especifica 2.6) con muchas familias de fracturas. Esta altamente laminada con infinidad de capas cementadas. El explosivo a utilizar será emulsión (gravedad especifica. 1.20) fuerza relativa 130. Los

cartuchos serán de 5" de diámetro que se introducirán en un diámetro de barreno de 6.5" Barrenos húmedos.

$$B = 0.67 D_e (St_v / SGr)^{0.33}$$

$$B = 0.67 (5) (130 / 2.6)^{0.33}$$

$$B = 12.3 \text{ Ft}$$

Corrección por condiciones geológicas:

$$B = K_d \times K_s \times B$$

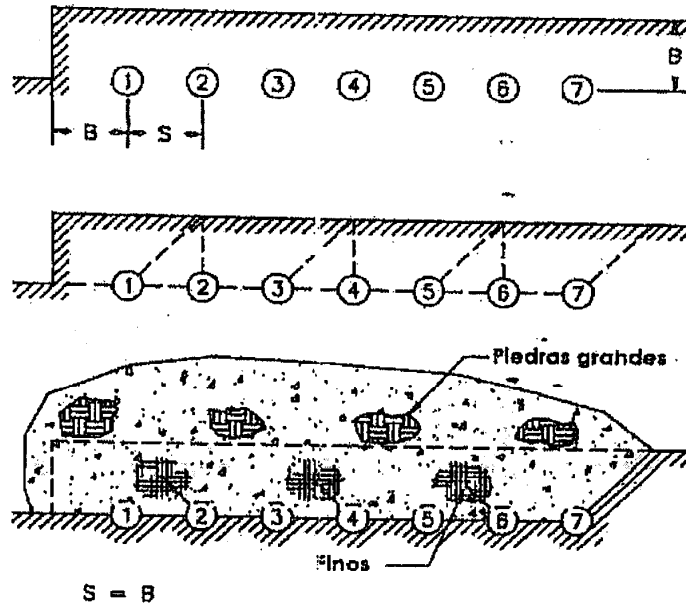
$$B = 1 \times 1.3 \times 12.3$$

$$B = 16 \text{ Ft}$$

Primeramente se cálculo el promedio de bordo. Con cartuchos de 5" de diámetro el bordo promedio es de 12.3 Ft. Cuando se aplica la corrección por factores geológicos tendremos un bordo de 16 Ft

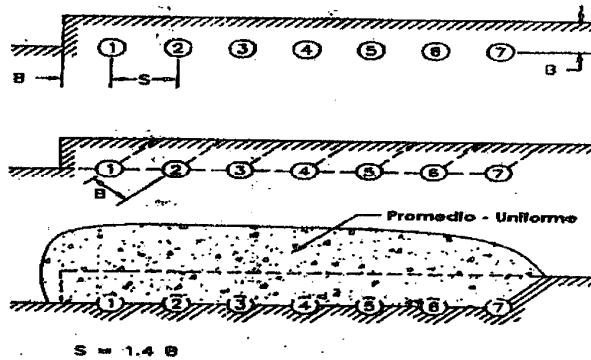
3.7.4 CONSTRUCCIÓN DE PATRONES.

Hilera sencilla retardos progresivos, $S=B$



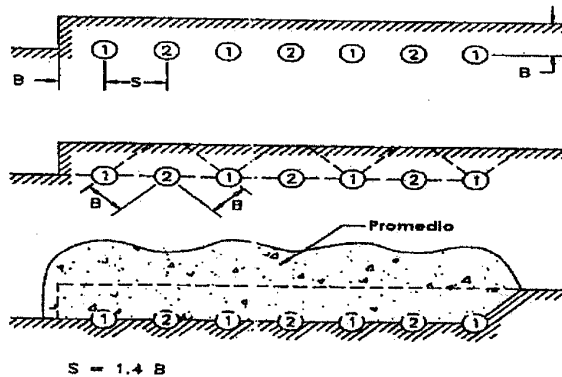
Condiciones: Plantilla de barrenación:	Todos los barrenos espaciados a la distancia del bordo
Tiempo de iniciación:	Retardos MS progresivos Nivel de vibración: Baja cada barreno en un retardo diferente
Fragmentación:	Das distribuciones separadas, finos y algunas piedras grandes
Banco alto:	$L/B > 4$

Hilera sencilla retardos progresivos, $S = 1.4B$



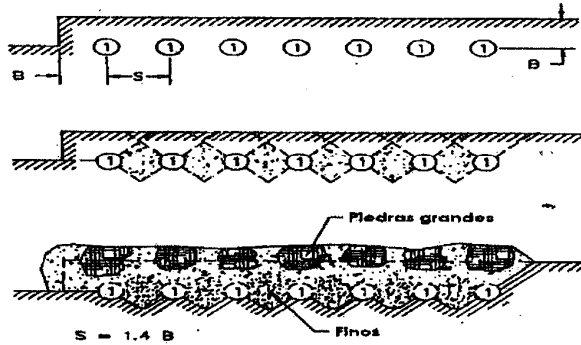
Condiciones:	Plantilla de barrenación:	Primer barreno, a la distancia del bordo desde la cara. El espaciamento es $1.4 B$ para $L/B \geq 4$.
	Tiempo de iniciación:	Retardos MS progresivos.
	Nivel de vibración:	Baja, cada barreno en un retardo diferente.
	Fragmentación:	Uniforme, una distribución cerrada.
	Banco alto:	$L/B > 4$

Hilera sencilla retardos alternados, $S = 1.4B$



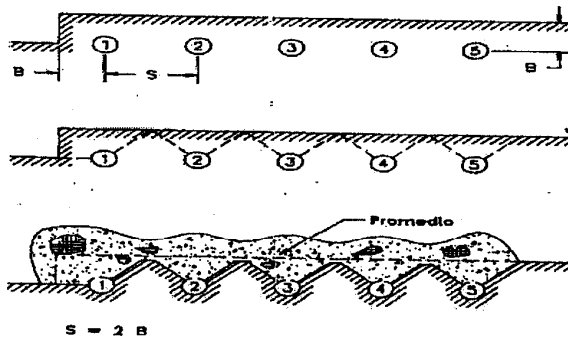
Condiciones:	Plantilla de barrenación:	Primer barreno, a la distancia del bordo desde la cara. El espaciamento es $1.4 B$ para $L/B \geq 4$.
	Tiempo de iniciación:	Retardos MS alternados.
	Nivel de vibración:	Alta, ya que la mitad del total de los barrenos disparan en el mismo retardo.
	Fragmentación:	La mayoría de la roca en dos distribuciones de tamaño diferentes.
	Banco alto:	$L/B > 4$

Hilera sencilla iniciación instantánea, $S=1.4B$



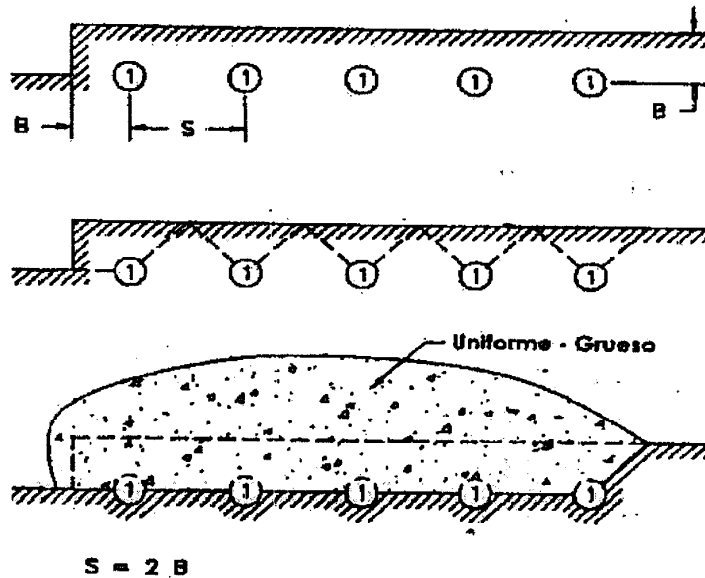
Condiciones:	Plantilla de barrenación:	Primer barreno, a la distancia del borde desde la cara. El espaciamiento es $1.4 B$ para $L/B \geq 4$. Instantánea.
	Tiempo de iniciación:	Alta, ya que todos los barrenos disparan en el mismo retardo.
	Nivel de vibración:	La mayoría de la roca en dos tamaños de distribución (finos y rocas grandes)
	Fragmentación:	$L/B > 4$
	Banco alto:	

Retardos progresivos, $S=2B$



Condiciones:	Plantilla de barrenación:	Primer barreno, a la distancia del borde desde la cara. El espaciamiento es $1.4 B$ para $L/B \geq 4$. Instantánea.
	Tiempo de iniciación:	Alta, ya que todos los barrenos disparan en el mismo retardo.
	Nivel de vibración:	La mayoría de la roca en dos tamaños de distribución (finos y rocas grandes)
	Fragmentación:	$L/B > 4$
	Banco alto:	

Hilera sencilla iniciación instantánea, $S=2B$



Condiciones:	Plantilla de barrenación:	Primer barreno, a la distancia del bordo desde la cara. El espaciamiento es $2B$ para $L/B \geq 4$.
	Tiempo de iniciación:	Instantánea a lo largo de la hilera.
	Nivel de vibración:	Alta.
	Fragmentación:	Uniforme, gruesa.
	Banco alto:	$L/B > 4$

Corte en V (esquinas rectas), retardos progresivos, $S = 1.4B$
 Corte en V (esquinas en ángulo), retardos progresivos, $S = 1.4B$

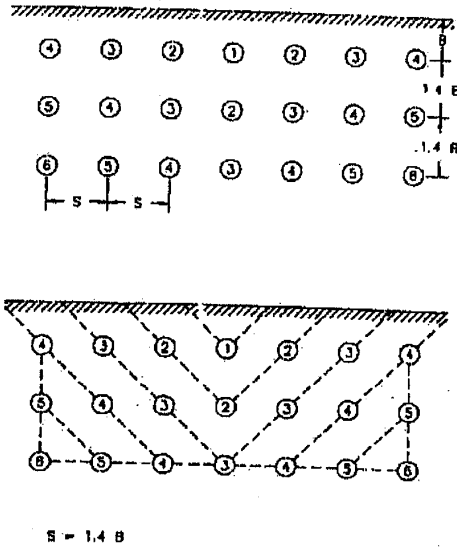


Figura 7-16 Corte en V (esquinas rectas), Retardos progresivos, $S = 1.4B$

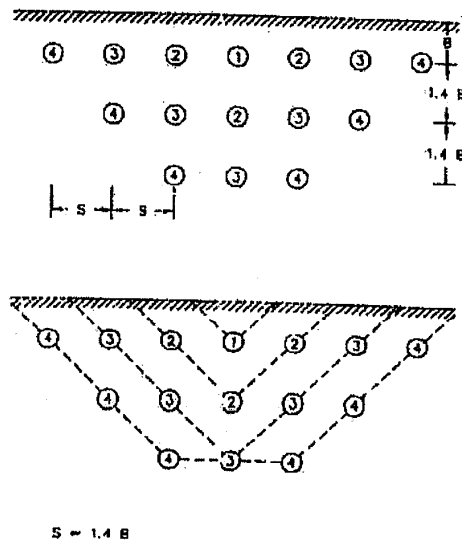


Figura 7-17 Corte en V (esquinas en ángulo), Retardos progresivos, $S = 1.4B$

Corte en caja, retardos progresivos, $S=1.4B$
 Corte en caja, retardos alternados, $S=1.4B$

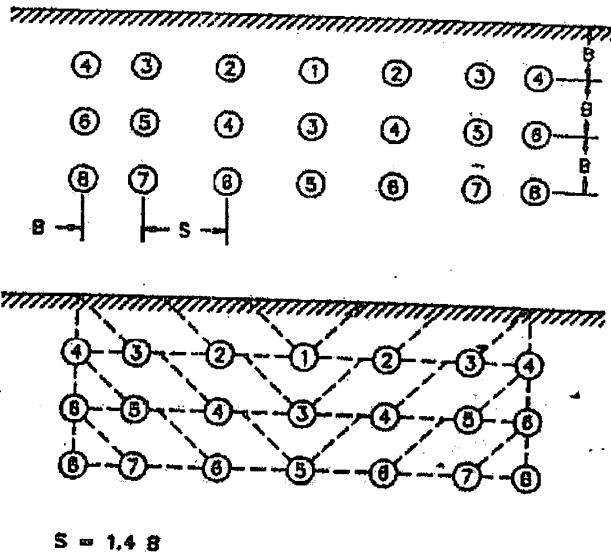


Figura 7-18 Corte en caja, Retardos progresivos, $S = 1.4B$

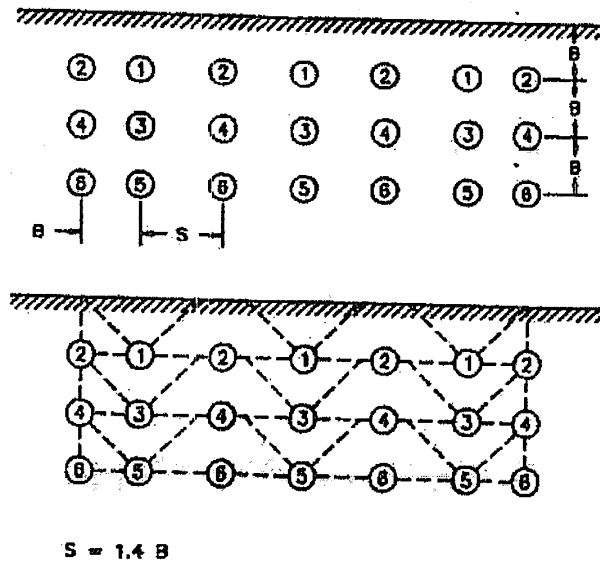


Figura 7-19 Corte en caja, Retardos alternados, $S = 1.4B$

Esquina recta, disparado en Echelon, $S=1.4B$
Esquina con ángulo, disparado en Echelon, $S=1.4B$

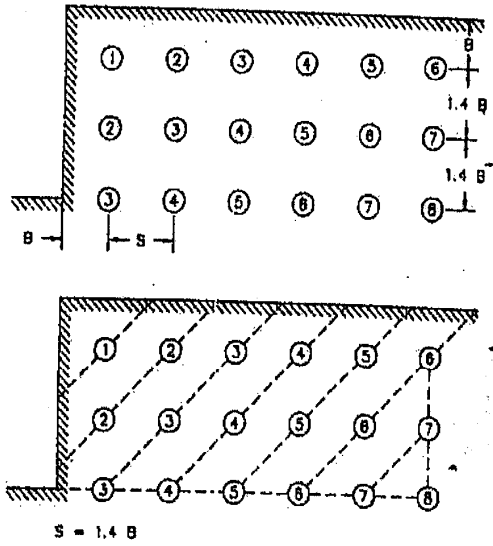
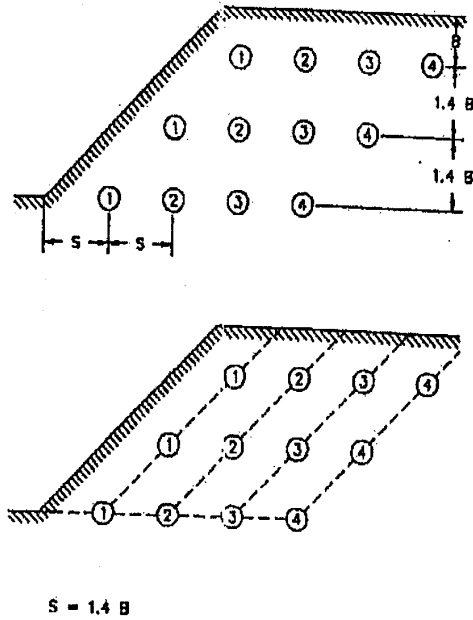


Figura 7-20 Esquina recta, disparado en Echelon, $S = 1.4B$



Esquina en ángulo, hileras instantáneas, $S=2B$
 Esquina en ángulo, retardos progresivos, $S=1.4B$

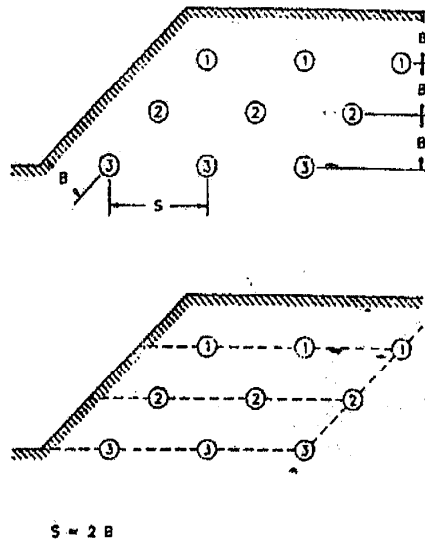


Figura 7-22 Esquina en ángulo, Hileras instantáneas, $S = 2B$

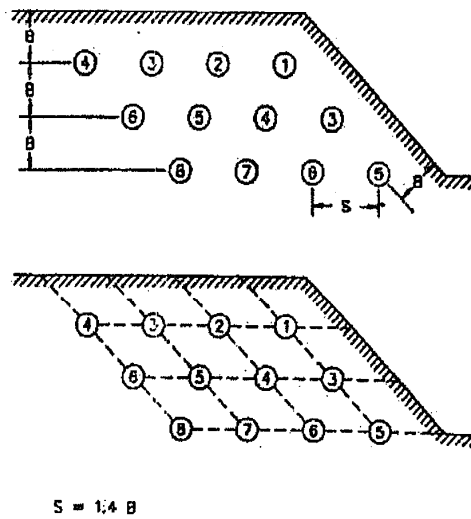


Figura 7-23 Esquina en ángulo, retardos progresivos, $S = 1.4B$