

TECNICAS DE TRONADURA EN LA GRAN MINERIA



Análisis inicial del problema



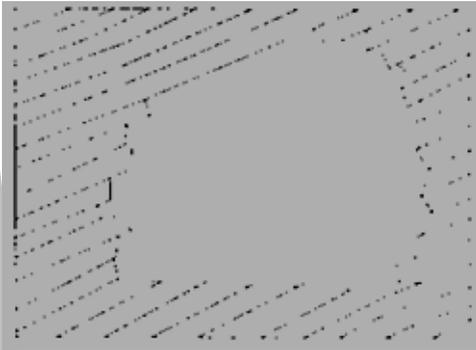
SITUACIÓN INICIAL

La voladura convencional en túneles y trabajos de mina, dejan perfiles irregulares según el sistema de diaclasamiento de la roca, normalmente afecta a la estructura remanente llegando a profundidades de 2 m aproximadamente, la roca maltratada y debilitada según su tipo y condición, puede tener consecuencias de inestabilidad o desprendimiento con el tiempo.

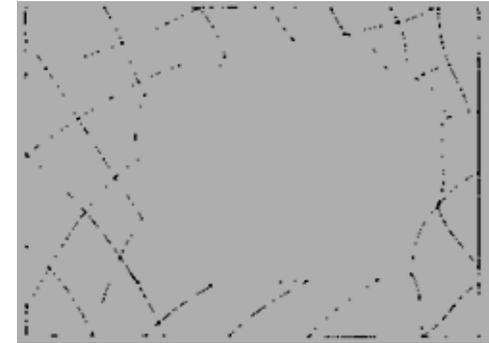
SITUACION INICIAL (Resumen)

- ✓ **Las operaciones poseen problemas de sobre rotura.**
- ✓ **No se tiene un buen auto sostenimiento.**
- ✓ **Existe alta dilución del mineral.**
- ✓ **Las labores en general poseen agrietamientos excesivos.**
- ✓ **Los costos de sostenimiento artificial resultan demasiado altos para la operación.**

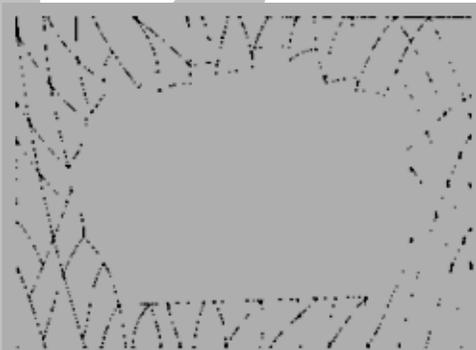
EFFECTOS DEL DIACLASAMIENTO DE LA ROCA EN LA VOLADURA CONVENCIONAL



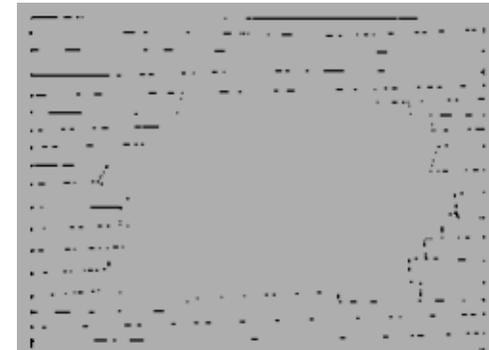
FISURAMIENTO LAMINAR



FISURAMIENTO CÚBICO



FISURAMIENTO CUNEIFORME



ESTRATIFICACIÓN PLANA

OBJETIVO

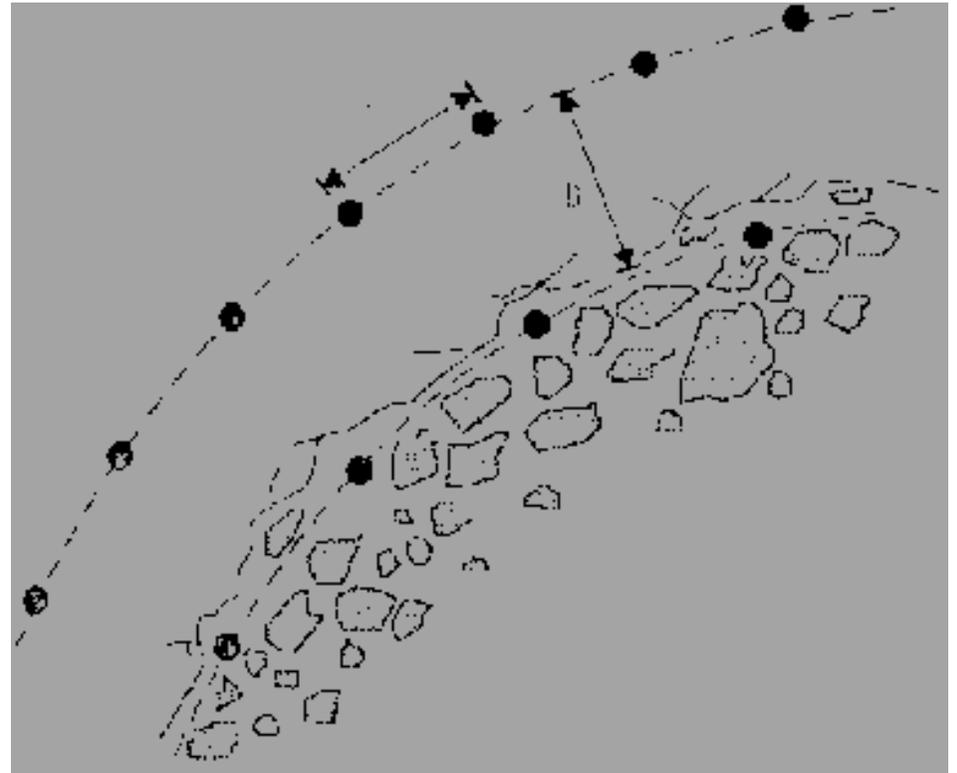
- ✓ **Evitar la sobre rotura (overbreak).**
- ✓ **Obtener superficies de corte lisas.**
- ✓ **Lograr una mejor estabilidad.**
- ✓ **Disminuir la dilución del mineral.**
- ✓ **Evitar agrietamientos.**

VOLADURA CONTROLADA

- ✓ **Consiste en el empleo de cargas explosivas lineales de baja energía colocadas en taladros muy cercanos entre sí, que se disparan en forma simultánea.**

VOLADURA CONTROLADA

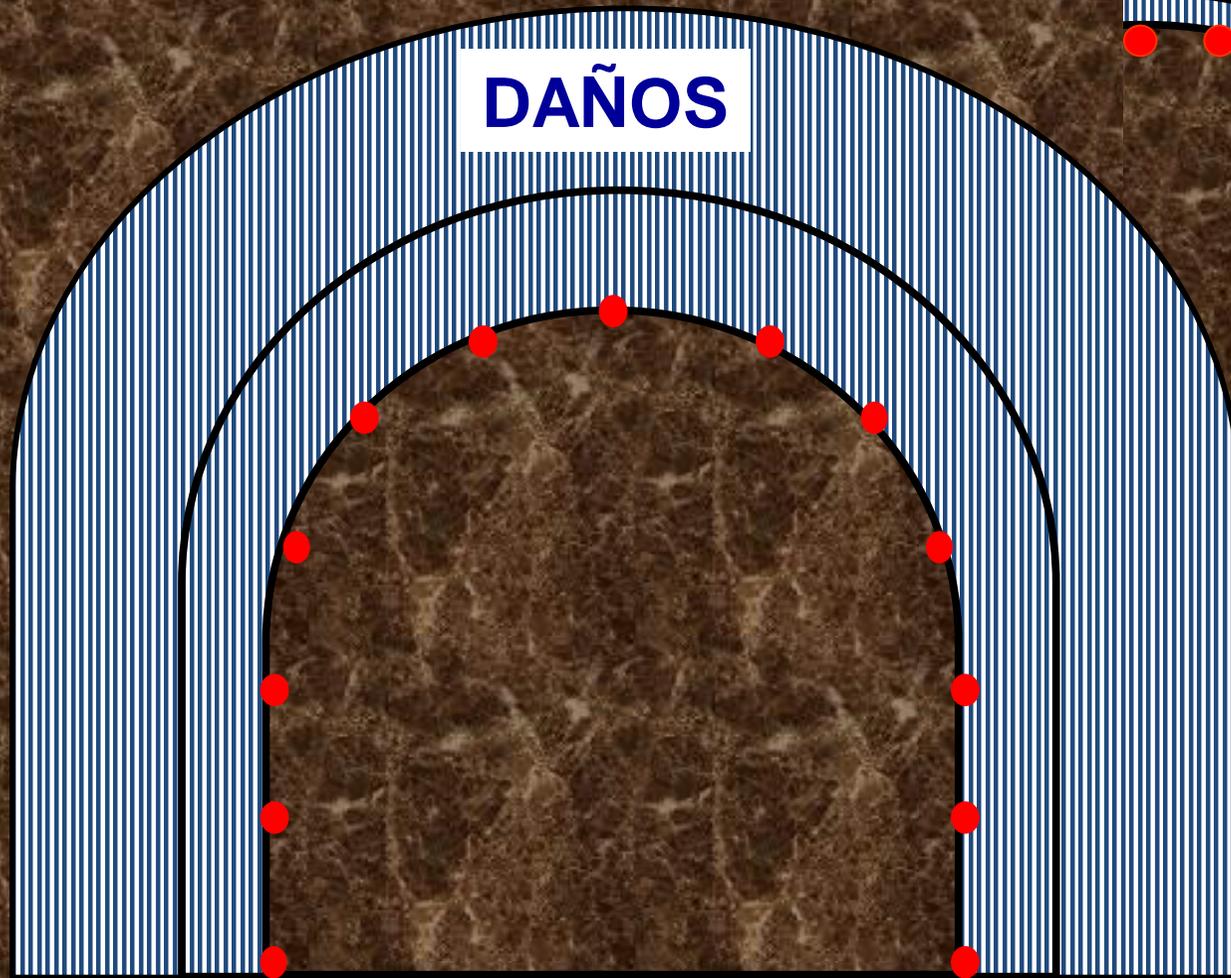
- ✓ Busca crear y controlar la formación de una grieta o plano de rotura continuo, que limite la superficie final de un corte o excavación



GRADO DE AFECTACIÓN

En la voladura convencional, normalmente todos los taladros del núcleo suman sus efectos de impacto a los de la corona o periferia afectando a la roca remanente como se puede apreciar en los gráficos siguientes, en los que también se aprecia la reducción de este efecto con la voladura controlada.

**CON VOLADURA
CONVENCIONAL**



± 1,5 m

**CON VOLADURA
CONTROLADA**



± 0,20 a 0,50 m

TIPOS DE CONTROL

- ✓ **Voladura de Pre-Corte o Pre-Spliting:**
El disparo del corte de contorno es anterior a la voladura principal.

- ✓ **Voladura de Recorte:**
El disparo del corte de contorno es posterior a la voladura principal.

USOS DE LA VOLADURA CONTROLADA

- ✓ **Acabado superficial de túneles de obras hidráulicas o viales.**
- ✓ **Cámaras subterráneas para mejorar el auto-sostenimiento de techos y paredes.**
- ✓ **Piques y chimeneas.**
- ✓ **Límite final de bancos en minería a tajo abierto.**
- ✓ **Límite final de extracción de bloques de piedra ornamental en canteras de mármol, caliza marmórea, etc.**



VOLADURA CONTROLADA

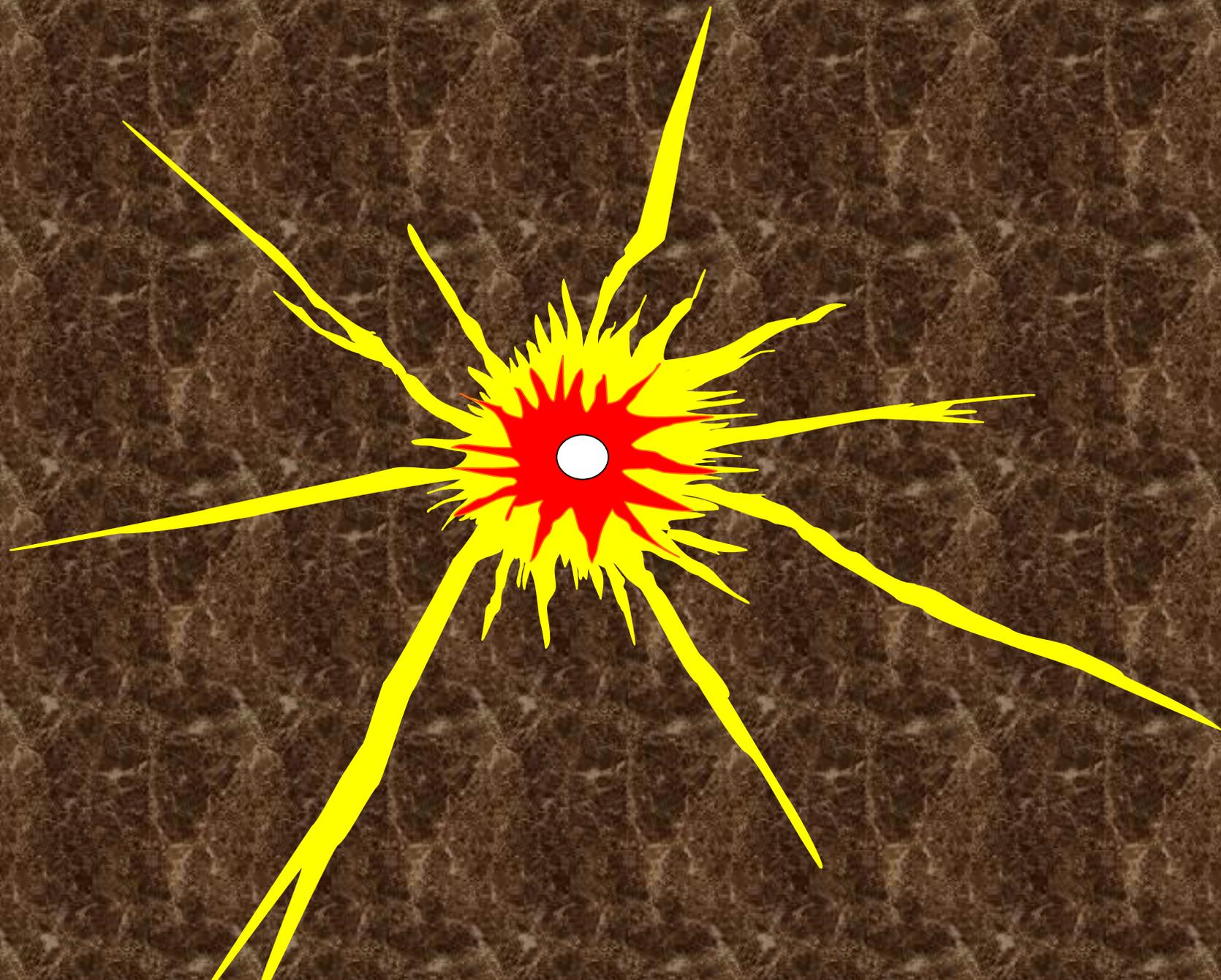
¿En qué consiste?

TEORÍA DEL MÉTODO

- 1. Una carga explosiva crea, al detonar, grietas radiales en una zona adyacente en la que la roca se triturará y se pulverizará.**

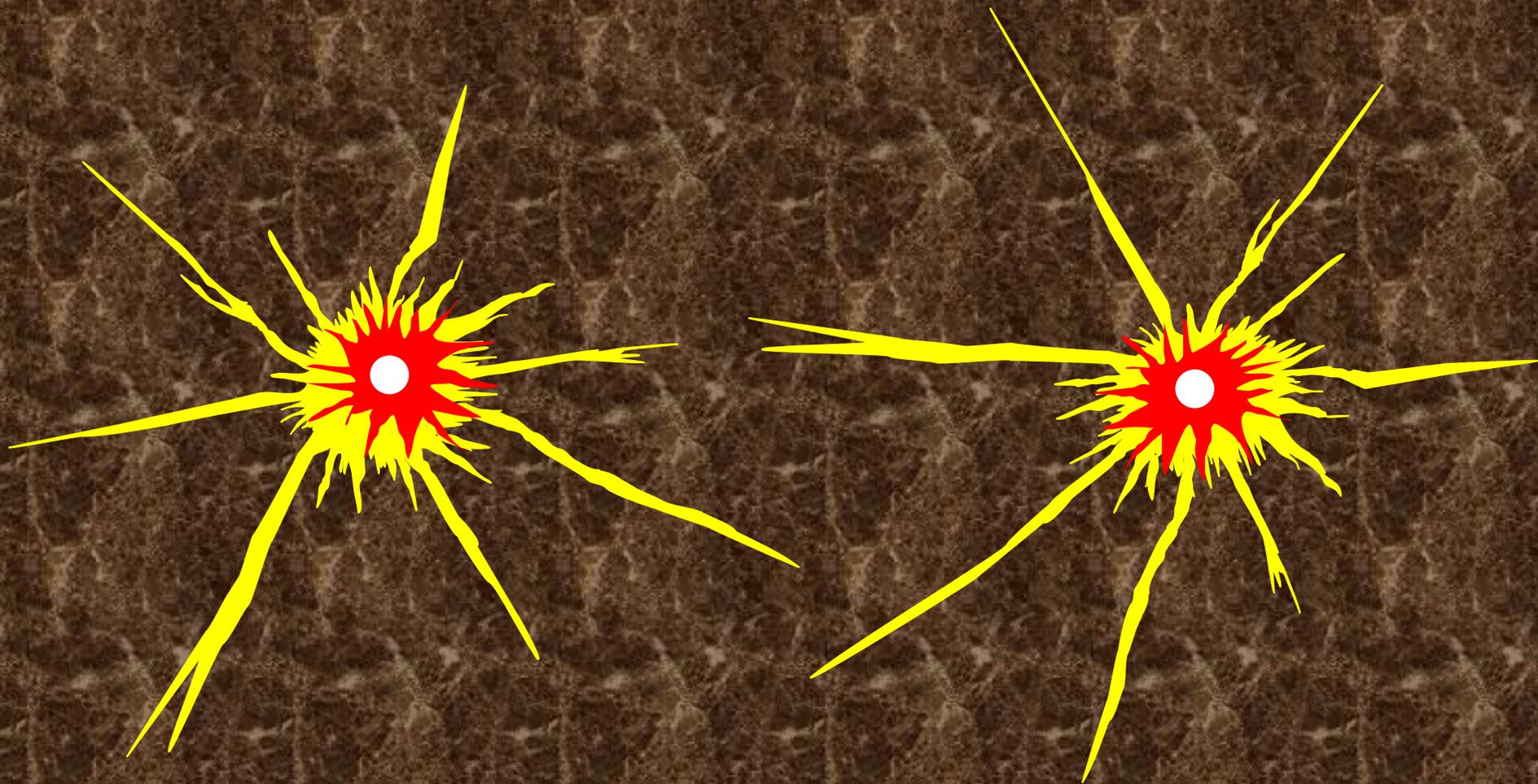
A esto se le denomina:

Fisuramiento Radial.



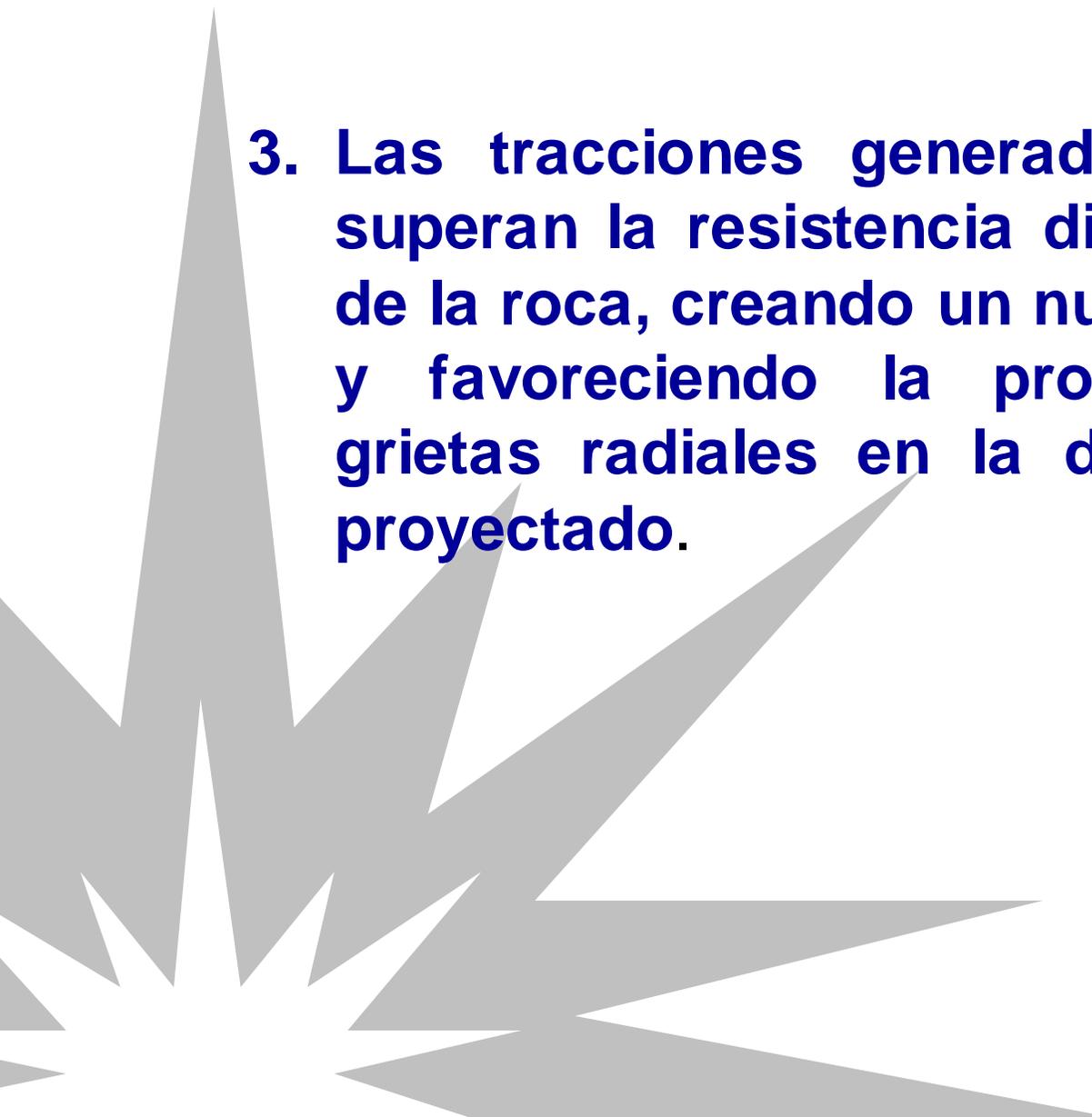
TEORÍA DEL MÉTODO

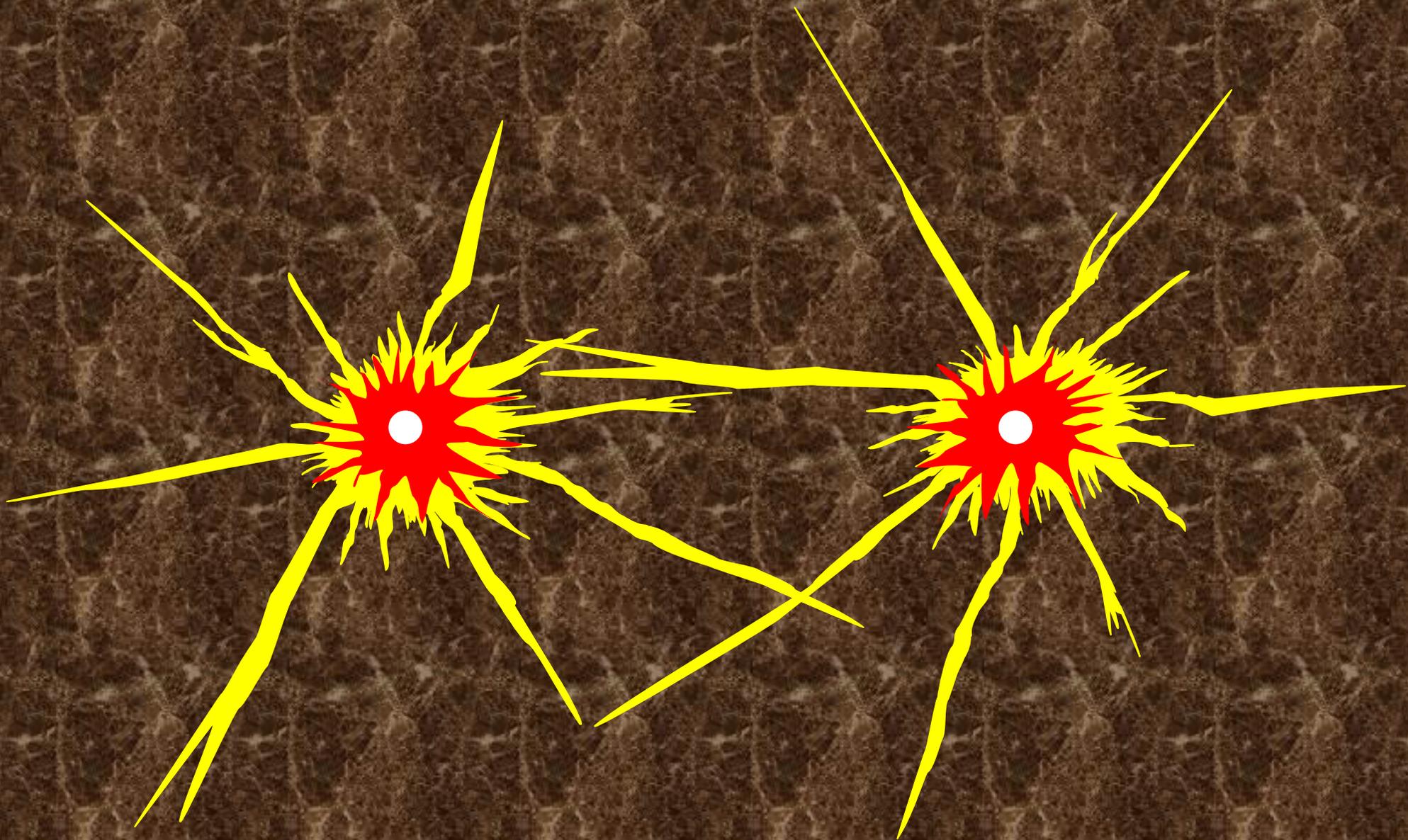
- 2. Cuando son dos las cargas que se disparan simultáneamente, se producen esfuerzos de tracción complementarios perpendiculares al plano axial.**



TEORÍA DEL MÉTODO

3. Las tracciones generadas en ese plano superan la resistencia dinámica a tracción de la roca, creando un nuevo agrietamiento y favoreciendo la propagación de las grietas radiales en la dirección de corte proyectado.

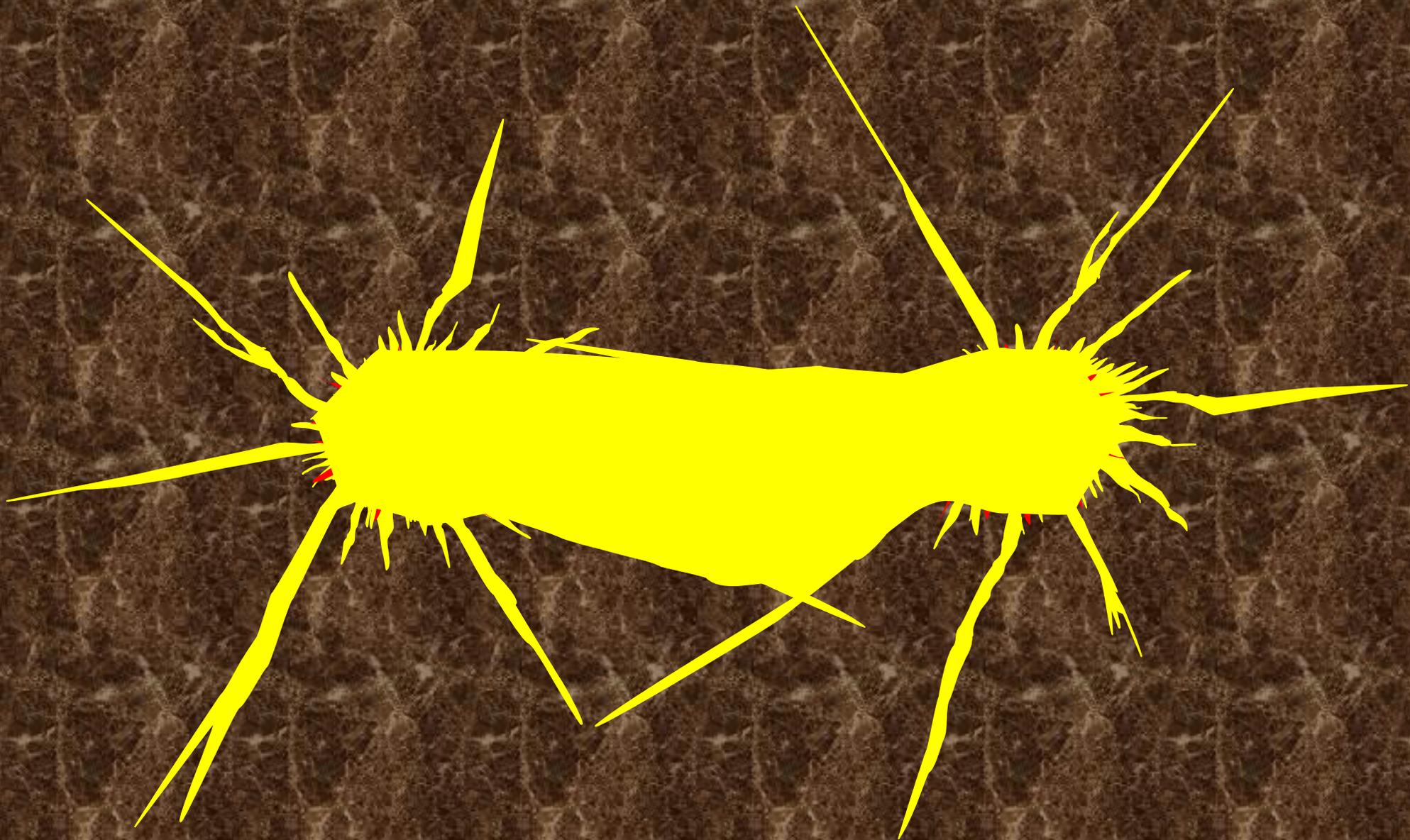




TEORÍA DEL MÉTODO

- 4. Estas grietas se amplían y extienden bajo la acción de cuña de los gases de explosión que se infiltran en ellas.**

La propagación preferencial en el plano axial junto con el efecto de apertura por la presión de los gases permiten obtener un plano de fractura definido.





VOLADURA CONTROLADA

**Diferencias, ventajas y
desventajas**

DIFERENCIAS ENTRE VOLADURA CONVENCIONAL Y CONTROLADA

Voladura convencional

- Relación de espaciamiento a burden: $E = 1,3$ a $1,5 B$.
- Relación de acoplamiento máxima de $1,2$ a 1 .
- La carga de explosivo ocupa los $2/3$ de la longitud del taladro.
- Uso de taco inerte.

Voladura controlada

- Menor espaciamiento de burden: $E = 0,5$ a $0,8 B$.
- Explosivo de mucho menor diámetro que el del taladro.
- Carga explosiva linear distribuida a todo lo largo del taladro.
- Taco inerte para mantener al explosivo dentro del taladro, no para confinarlo.

DIFERENCIAS ENTRE VOLADURA CONVENCIONAL Y CONTROLADA

Voladura convencional

- Empleo de explosivo con el mayor brisance y empuje dentro de la relación energía/costo.
- Disparo de todos los taladros de la voladura siguiendo un orden de salida, espaciados en tiempo de acuerdo a un esquema de secuencias.

Voladura controlada

- Empleo de explosivo de baja velocidad y brisance.
- Disparo simultáneo de todos los taladros de la línea de corte, sin retardos entre sí.

VOLADURA CONTROLADA

Ventajas

- ✓ **Busca producir superficies de roca lisas y estables.**
- ✓ **Contribuye a reducir la vibración de la voladura principal y la sobreexcavación.**
- ✓ **Produce menor agrietamiento en la roca remanente.**
- ✓ **Es una alternativa para la explotación de estructuras débiles e inestables.**

VOLADURA CONTROLADA

Desventajas

- ✓ **Costo relativamente mayor que la voladura convencional.**
- ✓ **Mayor tiempo de preparación en la obra.**
- ✓ **En material detrítico incompetente o deleznable puede no llegar a dar resultados óptimos.**



VOLADURA CONTROLADA

Tipos de control



VOLADURA DE PRE-CORTE

VOLADURA CONTROLADA DE PRE-CORTE

Consiste en crear en el cuerpo de roca una discontinuidad o plano de fractura (grieta continua) antes de disparar la voladura principal o de producción, mediante una fila de taladros generalmente de pequeño diámetro, muy cercanos, con cargas explosivas desacopladas y disparos instantáneos.

VOLADURA CONTROLADA DE PRE-CORTE

Este puede realizarse también simultáneamente con los de producción pero adelantándolos una fracción de tiempo de 90 a 120 ms, siendo el disparo de dos etapas.

Debemos tener información del comportamiento y del tipo de roca en la que se vamos a utilizar éste método, podemos considerar como guía algunas ecuaciones, como las de C. Konya:

VOLADURA CONTROLADA DE PRE-CORTE

El factor de carga por pie perforado no debe causar daño a la roca, pero la presión de detonación debe ser suficiente como para crear la acción de corte, se puede estimar con la fórmula siguiente :

$$q = D^2 / 28$$

Donde:

q : carga de explosivo por pie de taladro (lb/pie).

D : diámetro de los taladros vacíos (plg).

VOLADURA CONTROLADA DE PRE-CORTE

El cálculo del espaciamiento entre los taladros de pre-corte será determinado por la ecuación:

$$**E = 10 \times D**$$

Donde:

E : espaciamiento (plg).

D : diámetro de los taladros vacíos (plg).



VOLADURA DE RECORTE

VOLADURA CONTROLADA DE RECORTE

Consiste en la voladura de un fila de taladros cercanos, con cargas desacopladas, pero detonadas después de la voladura “principal” o de producción.

VOLADURA CONTROLADA DE RECORTE

Debido a que ésta técnica implica el arranque de roca hacia un frente libre, el espaciamiento normalmente es mayor que en el pre-corte, pudiendo ser determinado por la ecuación:

$$E = 16 \times D$$

Donde

E : espaciamiento.

D : diámetro del taladro vacío.

VOLADURA CONTROLADA DE RECORTE

El disparo en este tipo de voladura controlada es también en dos etapas, primero los taladros de producción y después, con una diferencia de unos 100 ms, los de recorte (corona).

El burden, así mismo, tiene una distancia razonable y calculable, después de haber salido la voladura principal.

Cuando los taladros de recorte tienen el mismo diámetro que los de producción la técnica se conoce como *Trim Blasting*.

VOLADURA CONTROLADA DE RECORTE

El burden debe ser mayor que el espaciado para asegurar que las fracturas se “encadenen” apropiadamente entre los taladros antes que el bloque de burden se desplace, se estima con la ecuación siguiente :

$$B = 1,3 E$$

Donde

B : burden o línea de menor resistencia.

E : espaciado entre taladros.



**VOLADURA
AMORTIGUADA**

VOLADURA AMORTIGUADA

Es prácticamente una voladura convencional pero en la que se ha modificado el diseño de la última fila, tanto en su esquema geométrico que es más reducido, como en las cargas de explosivo que deben ser menores y desacopladas. El disparo es normalmente en una sola etapa.



VOLADURA CONTROLADA

Condiciones necesarias

VOLADURA CONTROLADA

Condiciones necesarias en Perforación

- ✓ El diámetro de los taladros de contorno normalmente es igual a los de producción.
- ✓ La precisión de la perforación es fundamental, tanto por el alineamiento como por el paralelismo de los taladros.
- ✓ El espaciamiento entre taladros debe de ser menor que el de la voladura convencional.

Condiciones necesarias en carguío

- ✓ **Explosivos especiales de baja energía y velocidad.**
- ✓ **La carga de columna debe de ser desacoplada (no atacada) para poder formar un anillo de aire alrededor del explosivo que amortigüe el efecto de impacto, absorbiendo parte de la energía de la explosión y debe de distribuirse a todo lo largo del taladro.**

Condiciones necesarias en carguío

- ✓ **Se requiere una carga de fondo con factor de acoplamiento cercano al 100%.**
- ✓ **Es necesario sellar los taladros con tacos inertes para contener los gases y evitar que la columna desacoplada sea impulsada del taladro.**

Condiciones necesarias en el disparo

- ✓ El disparo de todos los taladros del corte periférico *debe ser simultáneo*, o máximo en dos o tres etapas de retardo *muy cercanas*, de lo contrario el plano de corte puede no formarse completamente.
- ✓ Usar explosivos de brisancia baja por ejemplo EXSACORTE, EXSASPLIT o dinamita espaciada.

VOLADURA CONTROLADA

- ✓ La velocidad pico de partícula debe de mantenerse por debajo de los 700 ó 1 000 mm/s. Esta velocidad puede ser estimada con la siguiente fórmula empírica:

$$v = C_e / (R * b)$$

Donde:

v = velocidad pico de partícula.

C_e = carga, en caja explosiva (kg).

R = distancia radial desde el punto de detonación, en m.

b = constante que depende de las propiedades estructurales y elásticas de la roca.

VOLADURA CONTROLADA

Condiciones necesarias en el disparo

Si se usan cartuchos convencionales de dinamita éstos deben de estar debidamente espaciados entre sí (normalmente una distancia equivalente a la longitud de un cartucho) iniciados axialmente con cordón detonante de bajo gramaje (3 g/m).

- ✓ Cuando se usen agentes de voladura estos deben de ser de baja densidad, normalmente granulares, tales como el Examon-P.**

VOLADURA CONTROLADA

Condiciones necesarias en el disparo

- ✓ **Cuando se utilice el sistema *Air-Deck* con sólo carga de fondo y taco inerte, se requerirá un adecuado control para asegurar resultados y la roca debe de ser compatible con el método.**
- ✓ **El uso de cordón detonante de alto gramaje (60, 80, 120 g/m). Reducirá la densidad de carga linear pero es muy costoso.**



VOLADURA CONTROLADA

Parámetros importantes

VOLADURA CONTROLADA

Presión del taladro

Es la presión ejercida por la expansión de gases de detonación en las paredes del taladro. Cuanto menor sea esta presión menor será el daño a la pared final de la voladura, esta presión es aproximadamente el 50% de la presión de detonación del explosivo.

VOLADURA CONTROLADA

Presión del taladro

Se hará necesario entonces reducir esta presión ya sea desacoplando y/o espaciando la carga explosiva. La formula para calcular la presión de taladro es la siguiente :

$$PT = de * VOD^{2/8}$$

Donde : PT = presión de taladro.

de = densidad del explosivo.

VOD = velocidad de detonación .

VOLADURA CONTROLADA

Presión del taladro

El grado de acople de una carga explosiva está dada por :

$$Cr = C^{1/2} * De / Dt$$

Donde : Cr = relación de acoplamiento.

De = diámetro del explosivo.

Dt = diámetro del taladro.

C = % del taladro cargado con explosivo.

VOLADURA CONTROLADA

Presión del taladro

La presión dentro del taladro cargado con explosivo desacoplado y espaciado, será :

$$P_{td} = P_T * C_r^{2,4}$$

Donde : P_{td} = presión dentro del taladro desacoplado.

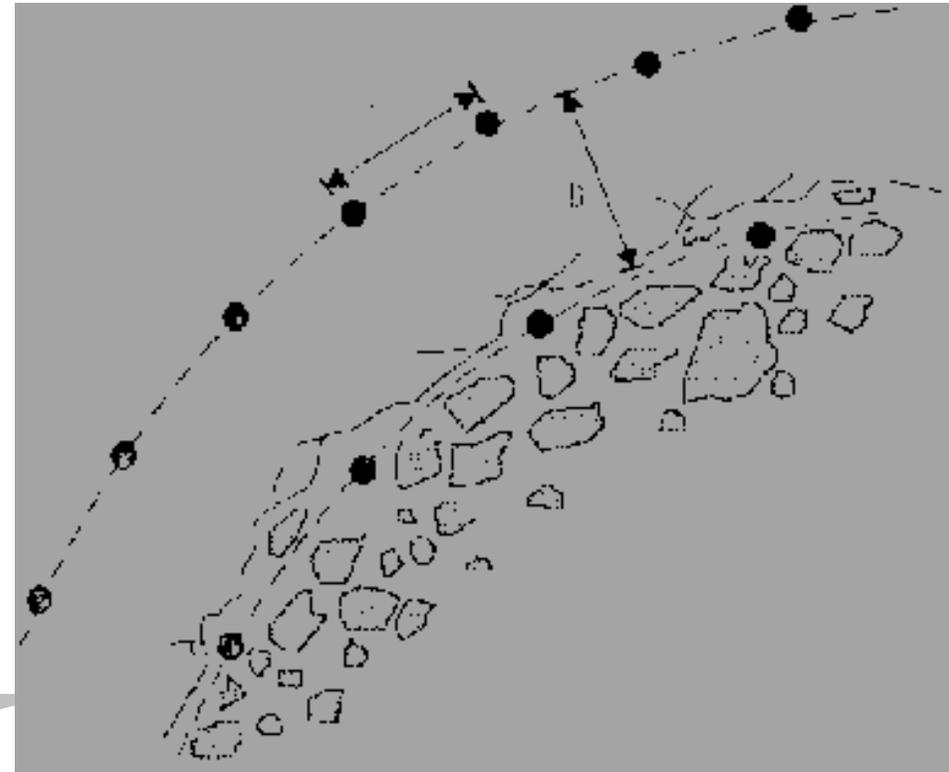
P_T = presión de taladro.

C_r = relación de acoplamiento.

VOLADURA CONTROLADA

Relación de espaciamiento (E) y burden (B)

El espaciamiento entre taladros en una voladura controlada depende del tipo de roca y diámetro de la perforación. Por lo general se puede partir de un valor de B/E entre 1 y 1,5.



VOLADURA CONTROLADA

Relación de espaciamento (E) y burden (B)

Podemos partir de la siguiente relación para calcular el espaciamento de taladros periféricos :

$$E \text{ menor o igual a } Dt^*(Ptd + T)/T$$

Donde : **E** : espaciamento entre taladros.

T : resistencia a la tracción de la roca.

Dt : diámetro del taladro.

Ptd: presión dentro del taladro desacoplado.

VOLADURA CONTROLADA

Precisión en los taladros

Los taladros deben perforarse paralelos y ubicarse en un mismo plano de corte.



VOLADURA CONTROLADA

Control de la carga lineal

Para taladros de contorno con diámetros de perforación entre 38 y 51 mm se recomienda la siguiente tabla práctica:

Diámetro de taladro (mm)	Diámetro de explosivo (mm)	Carga lineal (kg/m)	Espaciamiento (m)	Burden (m)
38	22	0,240	0,30 a 0,40	0,40 a 0,60
51	25	0,500	0,50 a 0,60	0,70 a 1,00

Tipos de explosivos para voladura controlada

- ✓ EXSACORTE: En tubos plásticos acoplables.
- ✓ EXSASPLIT : En tubo plástico entero, de longitud especificada.
- ✓ EXADIT : Cartuchos de dinamita espaciadas con madera o caña y cordón detonante de bajo gramaje ubicado a lo largo del taladro.
- ✓ EXAMON-P : Con el método llamado *Tracer*.



VOLADURA CONTROLADA

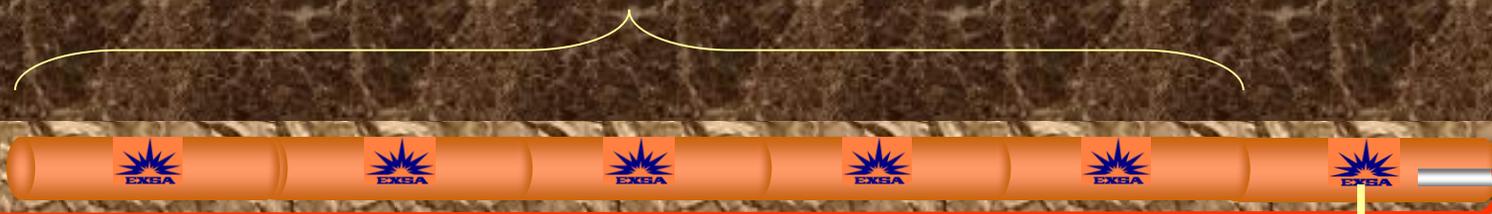
Ejemplos

ESQUEMAS DE VOLADURA CONTROLADA

Voladura Amortiguada

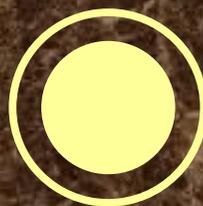
Taladro con carga convencional, con explosivo de baja energía (EXADIT) sin atacar, sin taco. Iniciación con detonador en la boca o al fondo.

CARTUCHOS DE EXADIT



CEBO

SECCIÓN DEL TALADRO:



ESQUEMAS DE VOLADURA CONTROLADA

Voladura Amortiguada

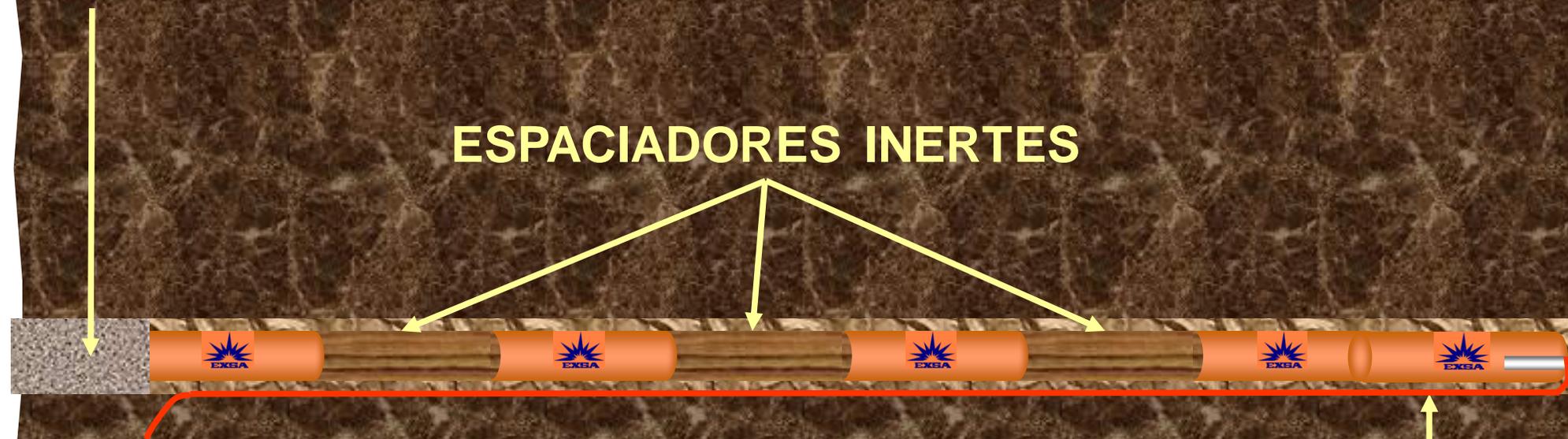
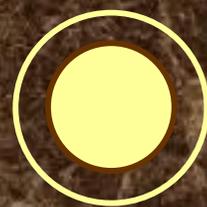
Esquema del carguío en taladros periférico con cartuchos de dinamita espaciada con material inertes o aire libre y cordón detonante a lo largo del taladro.

TACO INERTE

ESPACIADORES INERTES

CORDÓN DETONANTE

SECCIÓN DEL TALADRO:



ESQUEMAS DE VOLADURA CONTROLADA

Voladura Amortiguada

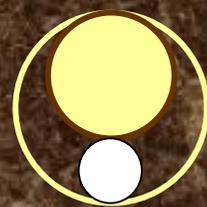
Cartuchos convencionales fijados a distancias determinadas sobre una media caña de tubo de plástico - diámetro del cartucho de 22 a 38 mm y diámetro del taladro 50 a 75 mm como ejemplo.

TACO INERTE

ESPACIOS VACÍOS

TUBO DE PLÁSTICO

SECCIÓN DEL TALADRO:



ESQUEMAS DE VOLADURA CONTROLADA

Voladura Amortiguada

Taladro con explosivo especial para voladura controlada (EXSACORTE o EXSASPLIT), en tubos rígidos de plástico para acoplamiento linear, centrados en el taladro de mayor diámetro mediante plumas o rosetas.

TACO INERTE

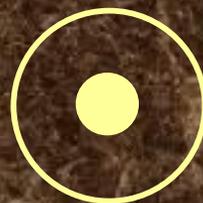
EXSACORTE

CEBO (CON ELÉCTRICO)

DETONADOR

NO

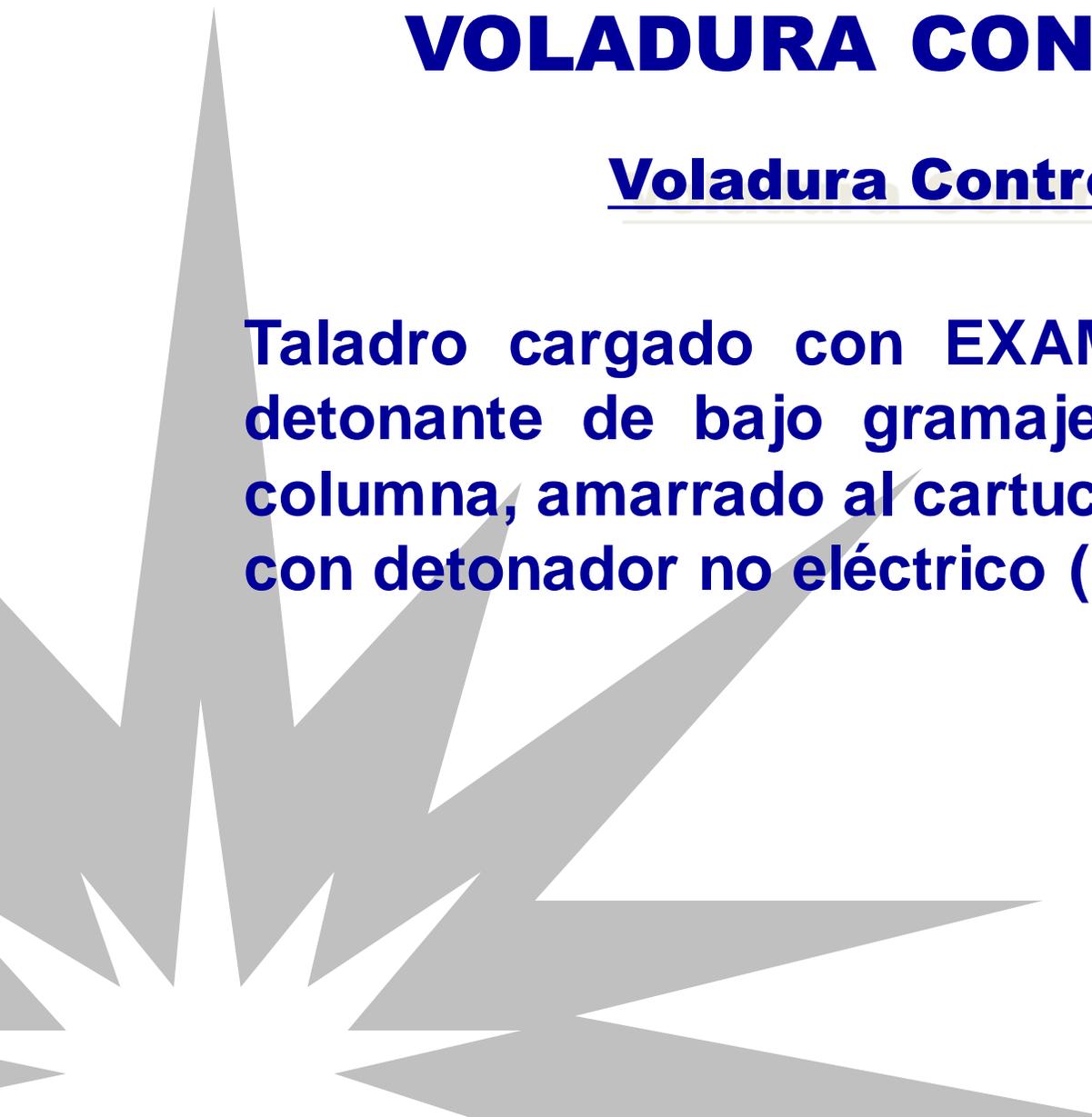
SECCIÓN DEL TALADRO:



ESQUEMAS DE VOLADURA CONTROLADA

Voladura Controlada

Taladro cargado con EXAMON-P y cordón detonante de bajo gramaje axial en toda la columna, amarrado al cartucho cebo e iniciado con detonador no eléctrico (Primadet).

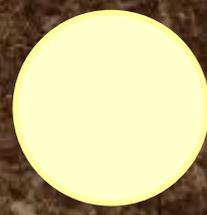
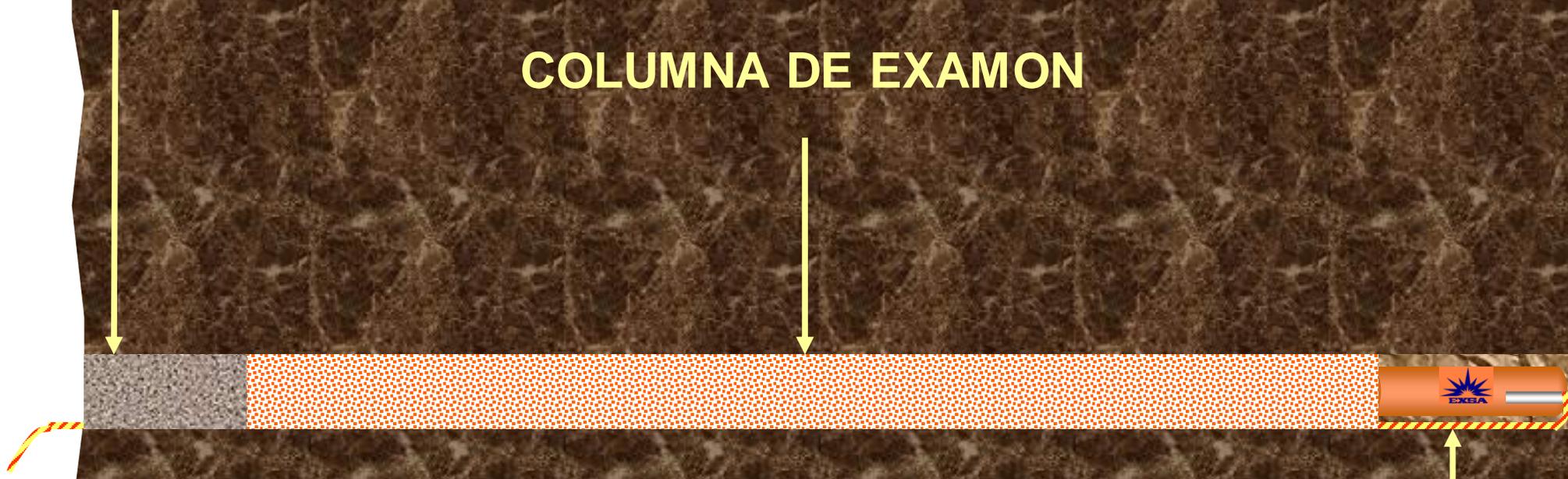


TACO INERTE

COLUMNA DE EXAMON

CEBO (CON CORDÓN DETONANTE)

SECCIÓN DEL TALADRO:





VOLADURA CONTROLADA

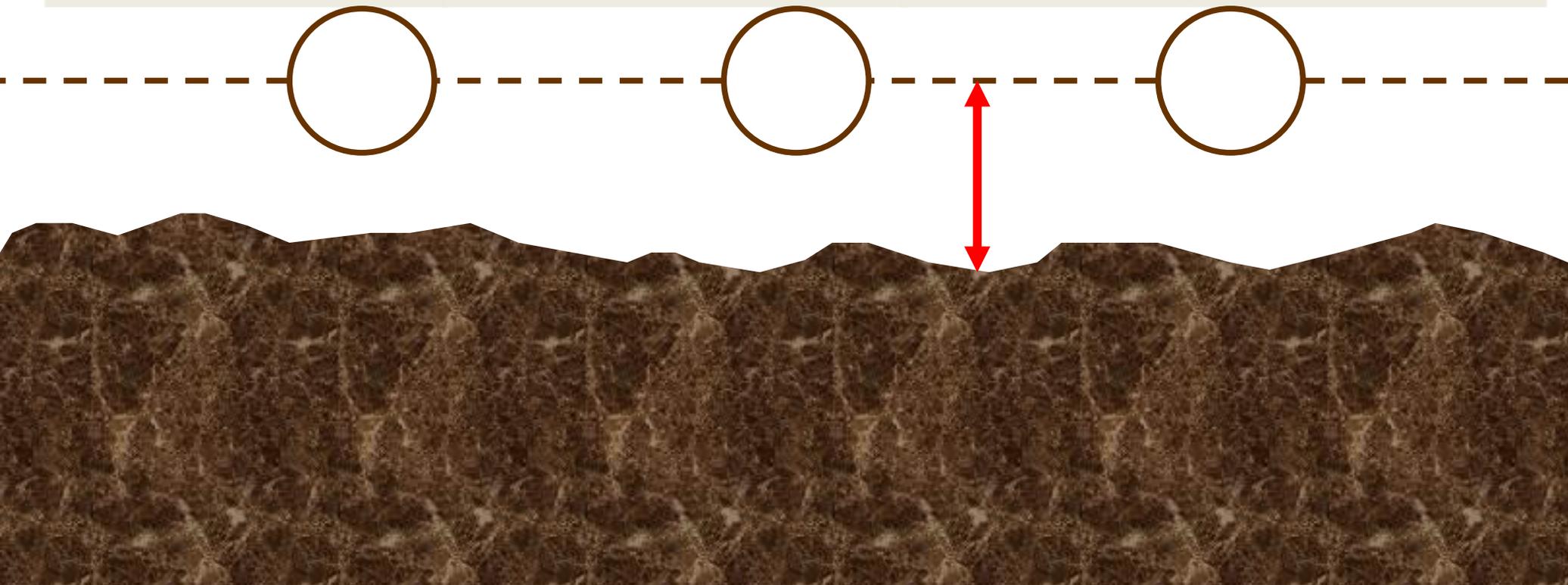
Evaluación de Resultados

FALLA	MOTIVO	SOLUCIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Ninguna.	<ul style="list-style-type: none">• Ninguna.	<ul style="list-style-type: none">• Ninguna.

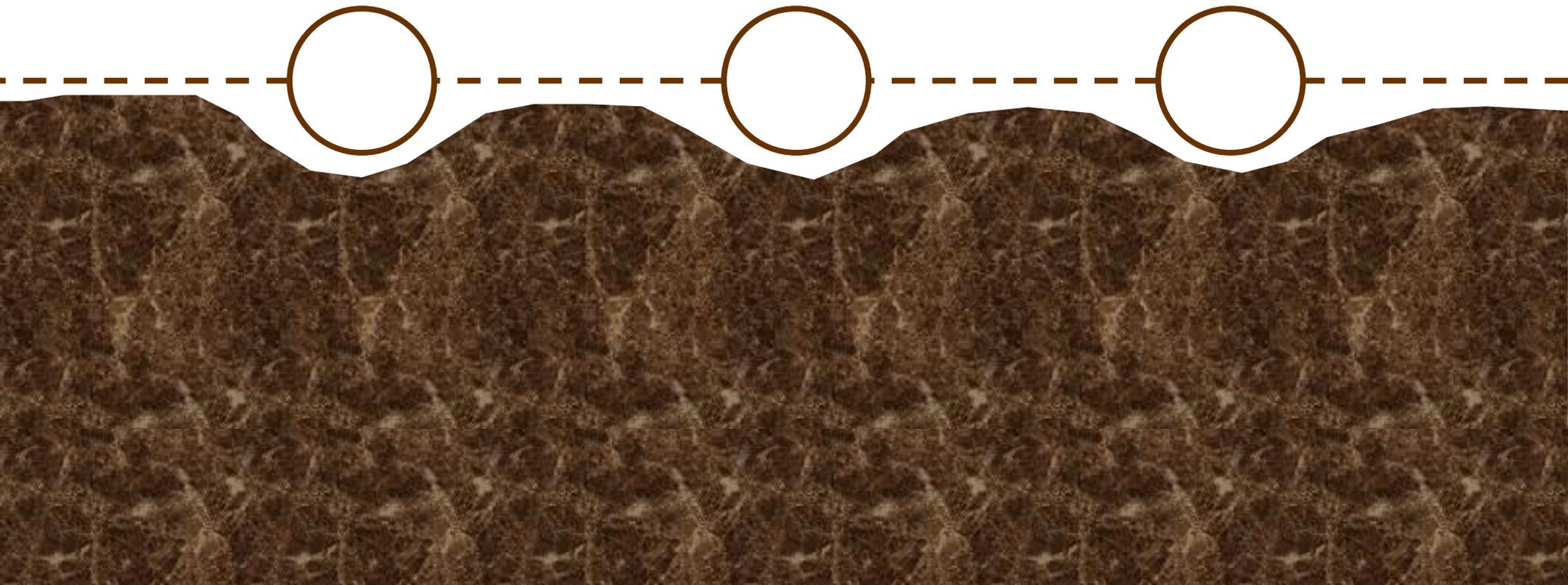
Perfil de Excavación



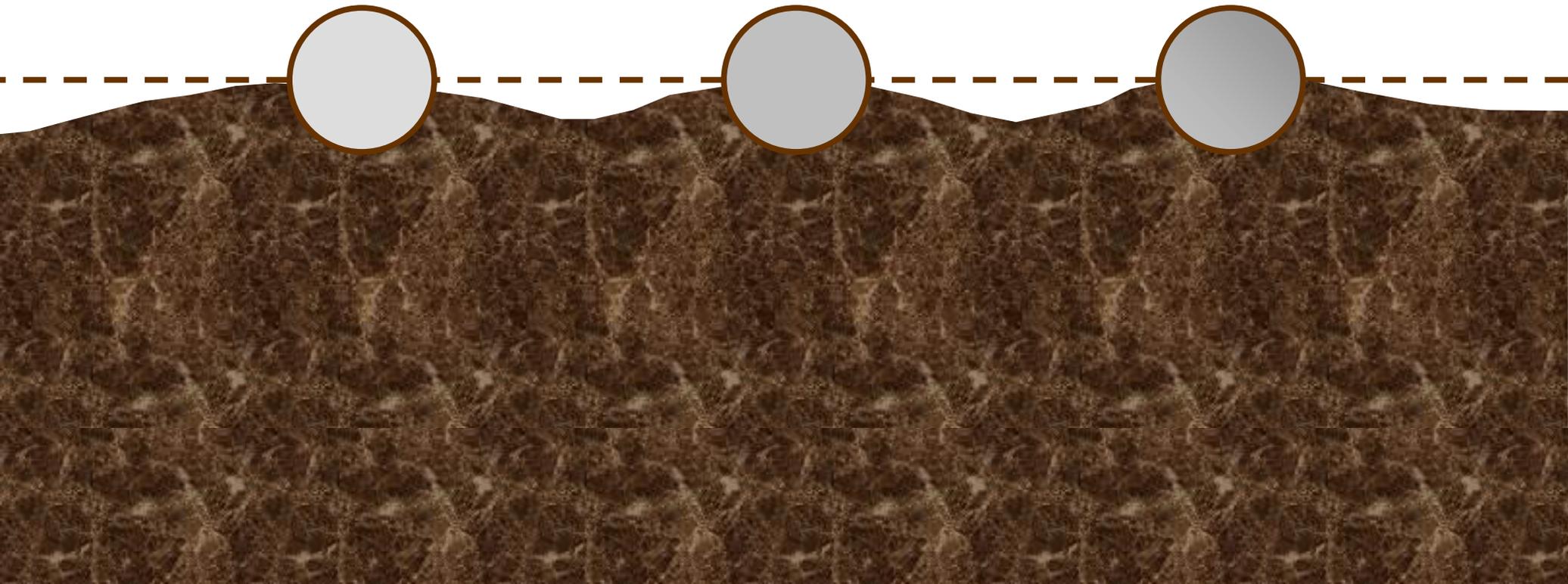
FALLA	MOTIVO	SOLUCIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Sobre-excavación general.	<ul style="list-style-type: none">• Sobrecarga.• Fila anterior de taladros sobrecargados.	<ul style="list-style-type: none">• Disminuir carga.• Aumentar el espaciado.• Distanciar fila anterior.• Aumentar tiempo de retardo entre filas de voladura primaria.



FALLA	MOTIVO	SOLUCIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Sobre-excavación alrededor de los taladros.	<ul style="list-style-type: none">• La presión de tala dro es superior a la resistencia diná mica a compre sión de la roca.	<ul style="list-style-type: none">• Disminuir la densi dad lineal de carga y aumentar el desaco plado.



FALLA	MOTIVO	SOLUCIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Sobre-excavación entre los taladros.	<ul style="list-style-type: none">• Espaciado entre taladros demasiado pequeños.	<ul style="list-style-type: none">• Aumentar el espaciado entre taladros.



FALLA	MOTIVO	SOLUCIÓN
<ul style="list-style-type: none">• Roca sobre sa liente entre los taladros.	<ul style="list-style-type: none">• Espaciado excesivo entre taladros.	<ul style="list-style-type: none">• Reducir el espaciado entre taladros.• Aumentar ligeramente la carga.



Fin de la presentación
Muchas gracias

