

# OPTIMIZACIÓN DE VOLADURAS Y VIBRACIONES GENERADAS

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERIA DE RECURSOS  
MINERALES Y ENERGIA



**SERGIO PEREZ RICO**

**SEPTIEMBRE 2018**





TRABAJO FIN DE GRADO  
SERGIO PEREZ RICO  
GIRME





PROYECTO REALIZADO POR:

**SERGIO PEREZ RICO**

DIRIGIDO POR:

**D. EMILIO TRIGUEROS TORNERO**

**AREA DE EXPLOTACION DE MINAS**

FIRMADO:

**EMILIO TRIGUEROS TORNERO**

**FECHA: SEPTIEMBRE 2018**

### **AGRADECIMIENTOS:**

Agradezco especialmente a D. EMILIO TRIGUEROS TORNEO su labor, guía y dedicación, así como su interés en mí como estudiante para realizar “mano a mano” el presente proyecto. Igualmente agradezco al Director Facultativo D. José Corrales Briceño por permitirme tomar datos en la explotación MARCOTSA y al Director Facultativo Adjunto D. Javier Rodríguez Pérez por su confianza en mi persona, colaboración en el estudio, asesoramiento y el trato demostrado.

Igualmente, agradezco todo el ánimo y apoyo de mis padres (D. José Pérez Maestre y Doña Adoracion Rico Mira), familiares, pareja sentimental y amigos que han colaborado, tanto de forma técnica como emocional.



## INDICE GENERAL

1. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO	6
2. DEFINICION DEL PROBLEMA TRATADO	7
3. FUNDAMENTO TECNOLOGICOS	9
3.1. TIPOS DE REACCION EN FUNCION DE LA CINETICA QUIMICA	10
3.1.1. Combustión	11
3.1.2. Deflagración	11
3.1.3. Detonación	11
3.2. EXPLOSIVOS EN LA INDUSTRIA MINERA	12
3.3. MECANISMOS DE ROTURA DE LA ROCA MEDIANTE EL USO DEL EXPLOSIVO	16
3.3.1. Agrietamiento radial	19
3.3.2. Reflexión de la onda de choque	20
3.3.3. Rotura por flexión	20
3.3.4. Rotura por colisión	21
3.4. TRANSMISION DE LA ONDA DE CHOQUE EN UN MACIZO ROCOSO	22
3.4.1. Rendimiento energético de las voladuras	23
3.5. PROPIEDADES DE LAS ROCAS Y MACIZOS ROCOSOS Y SU INFLUENCIA EN LOS RESULTADOS DE LAS VOLADURAS	26
3.5.1. Propiedades de las rocas	26
3.5.1.1. Densidad	26
3.5.1.2. Resistencias dinámicas de las rocas	27
3.5.1.3. Porosidad	27
3.5.1.4. Fricción interna	28
3.5.1.5. Conductividad	29
3.5.2. Propiedades de los macizos rocosos	30
3.5.2.1. Litología	30
3.5.2.2. Fracturas preexistentes	31
3.5.2.3. Tensiones de campo	34
3.5.2.4. Presencia de agua	34
3.5.2.5. Temperatura del macizo rocoso	35



3.6. VARIABLES CONTROLABLES DE LAS VOLADURAS	36
3.6.1. Diámetros de los barrenos	37
3.6.2. Altura de banco	39
3.6.3. Inclinación de los barrenos	40
3.6.4. Retacado	41
3.6.5. Sobreperforación	42
3.6.6. Piedra y espaciamento	44
3.6.7. Esquemas de perforación	45
3.6.8. Geometría del frente libre	46
3.6.9. Tamaño y forma de la voladura	47
3.6.10. Desacoplamiento de las cargas	48
3.6.11. Explosivos y su distribución en los barrenos	50
3.6.12. Consumos específicos de los explosivos	52
3.6.13. Tiempos de retardo y secuencias de encendido	53
3.6.14. Desviación de los barrenos	54
4. INFORMACION SOBRE LA CANTERA DONDE SE HA REALIZADO EL ESTUDIO	
4.1. DESCRIPCION Y LOCALIZACION DE LA CANTERA ESTUDIADA	55
4.2. CONTEXTO GEOLOGICO Y LITOLOGICO DE LA ZONA	58
4.3. CARACTERISTICAS DEL MACIZO ROCOSO	62
5. METODOLOGIA UTILIZADA	64
5.1. EQUIPOS DE MEDIDA BLASTMATE III	67
6. TOMA DE DATOS Y ANALISIS DE LOS MISMOS	71
7. CONCLUSIONES	94
8. BIBLIOGRAFIA EMPLEADA	97



TRABAJO FIN DE GRADO  
SERGIO PEREZ RICO  
GIRME





## *1. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO*

El objetivo de este proyecto consiste en desarrollar una metodología de toma de datos de campo que permita obtener los parámetros de la voladura y las vibraciones en el macizo rocoso generadas por la misma. De este modo, relacionar las características que mejoran los resultados de la voladura de producción y las vibraciones generadas.

Se quiere llegar a la mayor optimización en el diseño de las voladuras al relacionar los resultados analizados con los factores característicos del tipo de roca, con el objetivo de minimizar el consumo específico de explosivo, minimizar las vibraciones y mejorar la fragmentación del producto final.

Para ello se han monitoreado 4 voladuras en una cantera a cielo abierto de producción de roca ornamental, en nuestro caso el producto explotado es caliza marmórea. Posteriormente se ha evaluado la evolución de estas frecuencias según la posición del geófono, teniendo en cuenta la distancia y el material de transmisión de las ondas.

También se puede utilizar el monitoreo de las vibraciones como una herramienta de diagnóstico, ya que se puede determinar el grado de interacción entre las variables de la voladura, así como predecir las vibraciones producidas por voladuras futuras.

Por lo tanto, el estudio de las vibraciones generadas por las voladuras en producción sirve de gran ayuda para conseguir un mayor rendimiento en la producción al optimizar los parámetros característicos de las voladuras, ya sea bien, modificando la carga de explosivo por barreno, diámetro y longitud, y/o la secuenciación de la detonación.



## *2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA TRATADO*

Habitualmente es necesario conocer la influencia de la energía desarrollada por las voladuras y que se transmite por el terreno. Las cargas de tipo dinámico transmitidas pueden afectar a la propia roca en las proximidades, cuando es una roca ornamental que puede agrietarse, o afectar a los taludes, desprendimiento de bloques inestables, afección a las estructuras de las construcciones o provocar molestias en el vecindario.

Los controles de voladuras tienen como objetivo garantizar que los efectos no superen ciertos umbrales de posible daño. Se consiguen las leyes de amortiguación de la onda generada, de manera que se pueda conocer las máximas cargas utilizables para cada distancia. Con los tiros de prueba y control se consigue conocer las leyes de amortiguación.

Son múltiples los factores que intervienen en la propagación, que al final quedan diluidos dentro de las ecuaciones que relacionan las velocidades de vibración con la carga de explosivo y la distancia. Son los coeficientes empleados en la ley de amortiguación los que dependen del resto de factores.



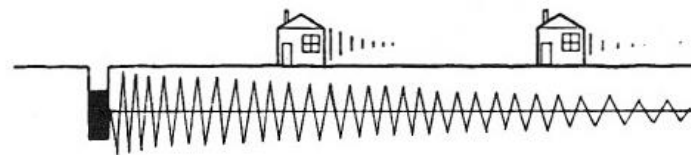


Antes del análisis los resultados del estudio, cabe esperar que:

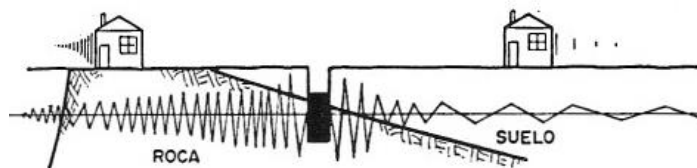
En los macizos rocosos homogéneos y masivos las vibraciones se propagan en todas direcciones; mientras que en otros con discontinuidades y con presencia de estructuras geológicas complejas, las ondas de propagación pueden variar con la dirección y presentar diferentes formas de difusión

A mayor carga explosiva, mayor magnitud de vibraciones, que es lo mismo que a mayor consumo específico de explosivo mayor magnitud en las ondas de generación

Conforme aumenta la distancia, la intensidad de las vibraciones disminuye



a. EFECTO DE LA DISTANCIA



b. EFECTO DE LA GEOLOGIA

En este trabajo se toman datos en diferentes situaciones para intentar averiguar la evolución de los coeficientes y de qué manera están relacionados con la calidad de la roca y la secuencia de los tiros.



### 3. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS:

Para el desarrollo e interpretación de este estudio es necesario una información inicial básica desde la historia de los explosivos en la industria minera hasta las características de estos y del macizo rocoso.

Los explosivos son sustancias químicas con un cierto grado de inestabilidad en los enlaces atómicos de sus moléculas que, ante determinadas circunstancias o impulsos externos, propicia una reacción rápida de disociación y nuevo reagrupamiento de los átomos en formas más estables. Esta reacción, de tipo oxidación-reducción, es inducida térmicamente por los llamados “puntos calientes”, se conoce con el nombre de detonación y origina gases a muy alta presión y temperatura, los cuales generan a su vez una onda de compresión que recorre el medio circundante.

De esta forma, la energía química contenida en el explosivo se transforma en la energía mecánica de esa onda de compresión. La clave que le proporciona su singular poder expansivo es su capacidad de liberarla en un corto espacio de tiempo.

La onda de compresión se genera por el aumento de volumen que sufren los productos de reacción en forma gaseosa, de manera que se dispone de energía mecánica suficiente y aplicable a la fragmentación de rocas, convirtiéndose en un elemento clave en minería y en todo tipo de excavaciones en roca.

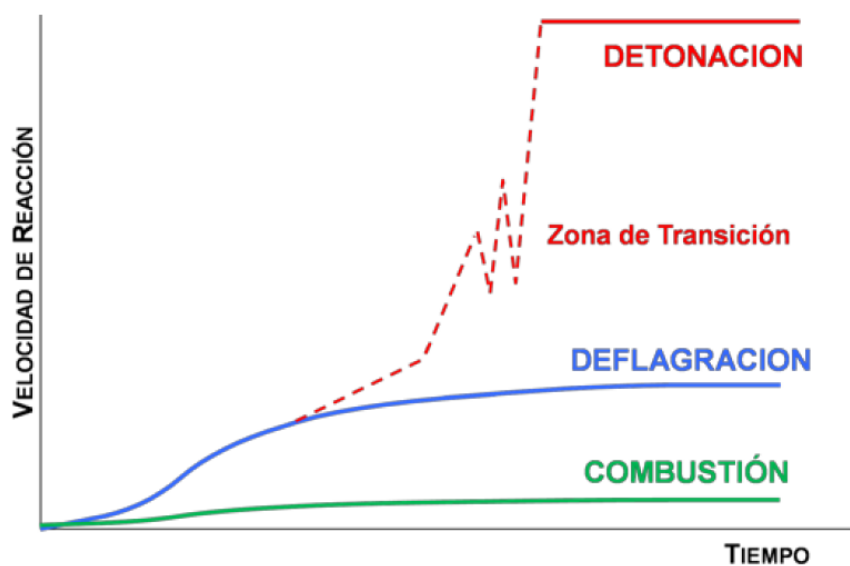
Onda aérea, que se propaga en el aire	Llamas
Onda sísmica, que se propaga en la tierra	Chorros y proyecciones de materia en general



### 3.1. TIPOS DE REACCION EN FUNCION DE LA CINETICA QUIMICA:

Los explosivos industriales están constituidos por una mezcla de sustancias, unas combustibles y otras comburentes, que debidamente iniciadas, dan lugar a una reacción química de oxidación cuya característica fundamental es su rapidez.

El impulso energético aplicado a las moléculas de un explosivo genera fuerzas que, superando las de atracción entre los átomos, hace que las moléculas se disocien y a continuación se reagrupen en formas más estables. La energía liberada en esta reacción exotérmica, en forma de onda de presión y alta temperatura, provoca la sucesiva disociación de las moléculas adyacentes, de forma que la reacción se propaga a todas las partículas. Por otro lado, la velocidad con que se efectúa esta propagación puede estabilizarse hasta alcanzar un cierto valor. De esta forma, la reacción de oxidación se puede dividir en tres tipos de reacción en función de la velocidad a la que se produce:





### 3.1.1. Combustión:

La combustión es una reacción química de oxidación en la que generalmente se desprende una gran cantidad de energía. La velocidad de reacción es menor de 1 m/s y se puede observar a simple vista la reacción en forma de llama.

### 3.1.2. Deflagración:

Una deflagración es una combustión súbita con llama a baja velocidad de propagación, sin explosión. Se suele asociar erróneamente con las explosiones, usándose a menudo como sinónimo.

La reacción que produce una deflagración es idéntica a la de la combustión, pero la cinética de la reacción se desarrolla a una velocidad mayor que la combustión, pero inferior a la velocidad con que se propagaría el sonido en el propio explosivo. Es, por tanto, una reacción subsónica.

### 3.1.3. Detonación:

La detonación es una combustión supersónica que se caracteriza porque genera una onda de choque. En ese frente de onda se generan altos gradientes de presión y temperatura, ya que la reacción química se produce instantáneamente.



### 3.2. EXPLOSIVOS EN LA INDUSTRIA MINERA:

Cada tipo de explosivo tiene una composición específica y definida. Esto supone que sus características son diferentes, y, en consecuencia, cada explosivo tiene una aplicación diferente en función de las necesidades de la voladura.

Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos según la velocidad de su onda de choque:

- ❖ Explosivos rápidos y detonantes: con velocidades entre 2000 y 7000 m/s.
- ❖ Explosivos lentos y deflagrantes: con menos de 2000 m/s

Los deflagrantes comprenden a las pólvoras, compuestos pirotécnicos y compuestos propulsores para artillería o cohetería. Casi sin ninguna aplicación en la minería o ingeniería civil, salvo en el caso de las rocas ornamentales.

Los explosivos detonantes se dividen en “Primarios” y “Secundarios” según su aplicación. Los Primarios por su alta energía y sensibilidad se emplean como iniciadores para detonar a los Secundarios, entre ellos podemos mencionar a los compuestos usados en los detonadores y multiplicadores (fulminato de mercurio, pentrita, etc.).

Los secundarios son los que se aplican al arranque de rocas y aunque son menos sensibles que los primarios desarrollan mayor trabajo útil. Estos compuestos son mezclas de sustancias explosivas o no, cuya razón de ser estriba en el menor precio de fabricación, en el mejor balance de oxígeno obtenido, y en las características y propiedades que confieren los ingredientes a las mezclas en lo relativo a la sensibilidad, densidad, potencia, resistencia al agua, etc.



Los explosivos industriales de uso civil y explotaciones de áridos se dividen a su vez en dos grandes grupos, que en orden de importancia por nivel de consumo son:

- ❖ Agentes explosivos: estas mezclas no llevan, salvo ningún caso, ingredientes intrínsecamente explosivos:
  - ANFO: nitrato amónico con gasoil (a granel y inutilizable con presencia de agua).
  - ALANFO: ANFO con presencia de aluminio con el objetivo de aumentar la densidad y, por lo siguiente, la energía que resulta por unidad de longitud de columna.
  - HIDROGELES: soluciones acuosas saturadas de nitrato amónico, a menudo con otros oxidantes.
  - EMULSIONES: mantienen las propiedades de los hidrogeles, pero mejoran la potencia y la resistencia al agua.
  - ANFO PESADO: mezcla de emulsión con ANFO consiguiendo una mayor energía, mejor sensibilidad y mejor resistencia al agua.
  
- ❖ Explosivos convencionales: precisan para su fabricación de sustancias intrínsecamente explosivos que actúan como sensibilizadores de las mezclas:
  - GELATINOSOS: disoluciones de nitroglicerina, utilizados como cargas de fondo para el arranque de rocas duras y muy duras en medios húmedos.
  - PULVURENTOS: mezclas explosivas de nitroglicerina con tierra (base inerte) o con oxidantes y combustibles (base activa) que aportan una potencia adicional.
  - DE SEGURIDAD: explosivos preparados para el uso en minas de carbón con ambientes inflamables de polvo y grisú.



TRABAJO FIN DE GRADO  
SERGIO PEREZ RICO  
GIRME



Nombre comercial		Pot. Rel. %	Densidad encartu. gr/cm <sup>2</sup>	Vel. Deton. m/s	Energía especif. kgm/kg	Resis. al agua	Aplicaciones
ANFO	Nagolita	65	0.8	2000	94400	Mala	Voladura de rocas blandas y como carga de columna de los barrenos
	Alnafo	75	0.8	3000	96100	Mala	Voladura de rocas blandas y semiduras
	Naurita	65	0.8	2000	94320	Mala	Diseñada para barrenos con temperaturas elevadas
HIDROGELES	Riogel 0	75	1.35	3500	80500	Excel.	Voladuras rocas blandas o como carga de columna
	Riogel 1	80	1.17	4300	85750	Excel.	Voladura rocas semiduras y trabajos subterráneos
	Riogel 2	85	1.2	4500	---	Excel.	Voladuras rocas duras como carga de fondo y trabajos subterráneos
	Riogel VF	76	1.3	4500	---	Excel.	Vertible como carga de fondo en voladuras de gran calibre
ELMULSIONES	Riomex 1	62	1.25	4800	---	Excel.	Como carga de columna en voladuras a cielo abierto
	Riomex 2	69	1.15	5100	---	Excel.	Voladura de rocas de resistencia media-dura como carga de fondo
	Riomex VF	72	1.135	4200	---	Excel.	Vertible como carga de fondo en rocas con resistencias media a dura



Nombre comercial	Pot. Rel. %	Densidad encartu. gr/cm <sup>2</sup>	Vel. Deton. m/s	Energía especif. kgm/kg	Resis. al agua	Aplicaciones	
<b>GELATINOSOS</b>	Goma 1-ED	90	1.45	6000	104158	Muy Buena	Voladura de rocas muy duras, uso mas restringido que el resto de las gomas
	Goma 2E-C	85	1.4	5200	100410	Buena	Carga de fondo de los barrenos en voladuras a cielo abierto
	Goma 1E-AGV	80	1.55	7000	96800	Muy Buena	Trabajos con grandes presiones de agua. Prospecciones sísmicas
	Goma 2-BD	80	1.15	5200	98410	Buena	Voladuras suaves, cueles con débil concentración, precortes y recortes
<b>PULVURENTOS</b>	AMONITA 2-I	70	0.95	3000	87500	Buena	Voladura en rocas semiduras y blandas
	Ligamita 1	77	1.1	3300	84600	Mala	Voladura a cielo abierto de rocas semiduras y blandas
	Sabulita 0	72	1.2	4500	76400	Mala	Voladura a cielo abierto de rocas semiduras y blandas





### 3.3. MECANISMO DE ROTURA DE LA ROCA MEDIANTE EL USO DEL EXPLOSIVO:

En la detonación de un explosivo se pueden diferenciar dos fases:

- ❖ Primera fase: representada por la presencia de una onda de detonación de mayor o menor velocidad, característica representativa en gran medida del poder rompedor del explosivo.
- ❖ Segunda fase: representada por la formación de un gran volumen de gases a elevada temperatura.

Cuando el explosivo se encuentra confinado dentro de un barreno y se detona, se genera una onda de detonación que se propaga a través de la roca circundante. En un punto próximo al barreno esa onda de detonación produce un efecto de compresión al llegar al mismo, pero al sobrepasarlo, ese esfuerzo se convierte en un esfuerzo de tracción. Esta primera onda de choque recorre la roca circundante a velocidades entre 3.000 y 5.000 m/s.

La resistencia a tracción de la roca es del orden de 10 a 100 veces menor que su resistencia a compresión. Será más fácil, por tanto, producir su rotura por un efecto a tracción.

Con esta consideración puede decirse que la fragmentación de la roca se debe a estos dos fenómenos:

- ❖ Reflexión de las ondas de compresión.
- ❖ Expansión de los gases.



Cuando una onda de compresión llega desde un medio de mayor impedancia característica a otro de menor impedancia, parte de ella se transmite a éste como onda de compresión, pero otra parte se refleja hacia atrás como onda de tracción.

Se entiende por impedancia característica ( $Z$ ) el producto de la densidad del medio ( $\rho$ ) por la velocidad de propagación de la onda en el mismo ( $c$ ). Así, se puede diferenciar entre impedancia característica de la roca y del explosivo:

La impedancia de la roca se define como:

$Z_{Roca} = \rho_{Roca} \cdot c_{Roca}$	
$\rho$ : densidad de la roca	$c$ : Velocidad de propagación de las ondas en la roca

De manera genérica, puede decirse que, cuanto más blanda es la roca, la velocidad de propagación de las ondas es menor.

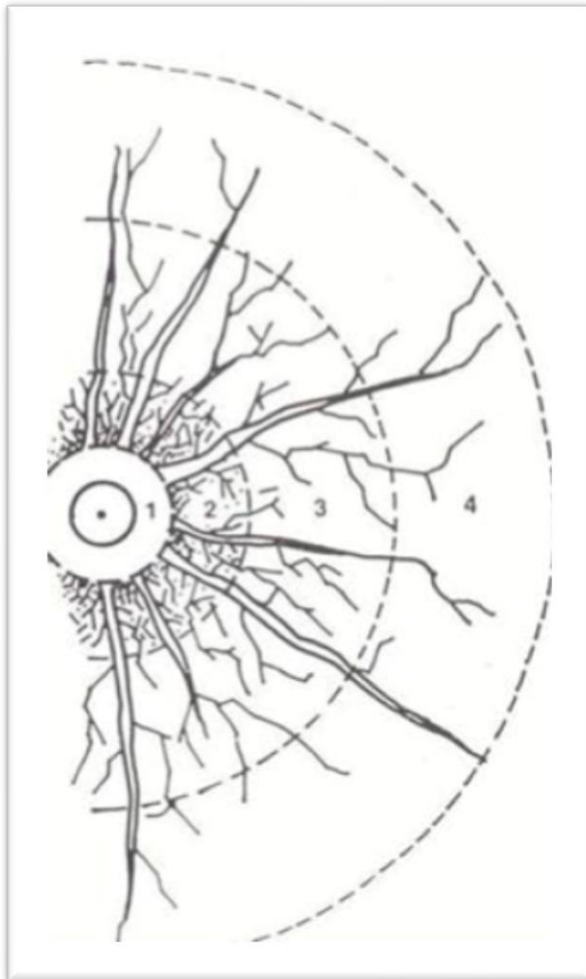
Del mismo modo, para el explosivo:

$Z_{Explosivo} = \rho_{Explosivo} \cdot c_{Explosivo}$	
$\rho$ : densidad del explosivo	$c$ : Velocidad de detonación del explosivo



Si hacemos detonar un barreno sin ningún tipo de cara libre observaríamos una serie de fenómenos que ocurrirían alrededor del barreno:

- ❖ Ensanchamiento del barreno por rotura plástica de la roca, motivado por el efecto de compresión de la onda de detonación.
- ❖ Creación de fisuras (a veces microfisuras) generadas por ese efecto de tracción de la onda de detonación. Estas fisuras son de tipo radial y a veces muy difíciles de observar.



1. Zona de fluencia plástica.
2. Zona de aplastamiento (alto grado de fracturación).
3. Zona de grietas radiales (moderadamente fracturadas).
4. Zona poco fracturada.
5. Zona sin fracturación.



Esta primera etapa es básica para la rotura de la roca. En ella es empleada la parte de energía del explosivo que corresponde a la onda de detonación y que no alcanza valores superiores al 10% de la energía total del explosivo.

En el caso de existencia de una cara libre en las proximidades del barreno, la onda de choque será reflejada en esa superficie, produciendo sobre ella un esfuerzo de tracción, encontrando la roca una libertad de desplazamiento que permite la ampliación del radio fisurado y el desconchamiento de la roca en esa cara libre en tanta mayor profundidad cuanto mayor es la carga y su grado de confinamiento, mayor potencia y poder rompedor del explosivo y menor es la distancia a la cara libre.

A esta primera fase de formación de grietas y desconchamiento le sigue una segunda fase, más lenta, en la cual los gases del explosivo a elevada presión y temperatura penetran por estas fisuras originalmente creadas por la onda de detonación, abriéndolas totalmente y lanzando la roca hacia adelante en su frente libre.

### 3.3.1. Agrietamiento radial

Durante la propagación de la onda de choque la roca circundante al barreno es sometida a una intensa compresión radial que induce componentes de tracción en los planos tangenciales del frente de la dicha onda. Cuando las tensiones superan la resistencia dinámica a tracción de la roca se inicia una formación de una densa zona de grietas radiales alrededor de la zona triturada que rodea el barreno.

El número y longitud de esas grietas radiales aumenta con:

1. La intensidad de la onda de choque en la pared del barreno o en el límite exterior del anillo de roca triturada.
2. La disminución de la resistencia dinámica a tracción de la roca y el factor de atenuación de la energía de tensión.



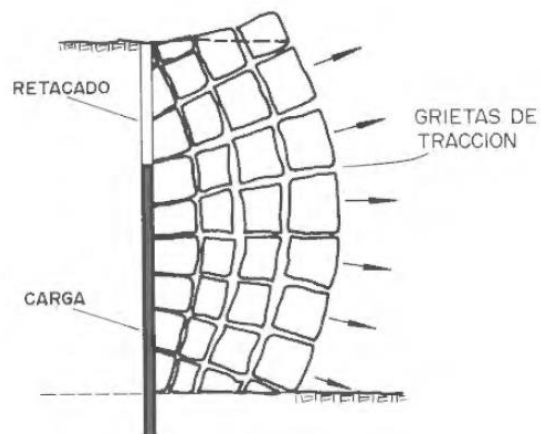
### 3.3.2. Reflexión de la onda de choque

Cuando la onda de choque alcanza una superficie libre se generan dos ondas, una de tracción y otra de compresión, tal y como se ha detallado en los apartados anteriores. Esto sucederá cuando las grietas radiales no se hayan propagado más de una distancia equivalente a un tercio de la que existe desde la carga a esa superficie libre. Aunque la magnitud relativa de las energías asociadas a las dos ondas depende del ángulo de incidencia de la onda de choque primaria, la fracturación es causada generalmente por la onda de tracción reflejada. Si las tensiones de tracción superan la resistencia dinámica de la roca se producirá hacia el interior un fenómeno conocido por descostramiento.

El frente de onda reflejada es más convexo que el de la onda incidente, por lo que índice de dispersión de la energía de la onda de tracción es mucho mayor cuando la superficie es cilíndrica, como la del barreno central de un cuele, que cuando se dispone de un plano como sucede en una voladura de banco.

### 3.3.1. Rotura por flexión

Durante y después de los mecanismos de agrietamiento radial y descostramiento, la presión ejercida por los gases de explosión sobre el material situado frente la columna de explosivo hace que la roca actúe como una viga doblemente empotrada en el fondo del barreno y en la zona del retacado, produciéndose la deformación y el agrietamiento de esta por los fenómenos de flexión.





### 3.3.2. Rotura por colisión

Los fragmentos de roca creados por los mecanismos anteriores y acelerados por los gases son proyectados hacia la superficie libre, colisionando entre sí y dando lugar a una fragmentación adicional. Tal y como se muestra en la imagen tomada en uno de los disparos efectuados para la realización de este estudio.



*Ilustración 1. Secuencia en la pega de una voladura convencional en banco situada en la cantera donde se ha realizado el estudio.*



### 3.4. TRANSMISION DE LA ONDA DE CHOQUE EN UN MACIZO ROCOSO

La presión de la detonación puede expresarse de forma simplificada por:

$PD = \frac{\rho_e \cdot VD^2}{4}$	$PT_m = \frac{2}{1 + n_z} \cdot PD$
PD = Presión detonación (kPa)	$\rho_e$ = Densidad explosivo (gr/cm <sup>3</sup> )
VD = Velocidad detonación (m/s)	
$n_z = \frac{\rho_e \cdot VD}{\rho_r \cdot VC}$	
$n_z$ = relación entre impedancia del explosivo y de la roca	VC= Velocidad propagación de las ondas en el medio rocoso (m/s)
$\rho_r$ = Densidad de la roca (gr/cm <sup>3</sup> )	

Esto significa que la onda explosiva se transmite tanto mejor a la roca cuanto más se acerca la impedancia del explosivo a la de la roca.

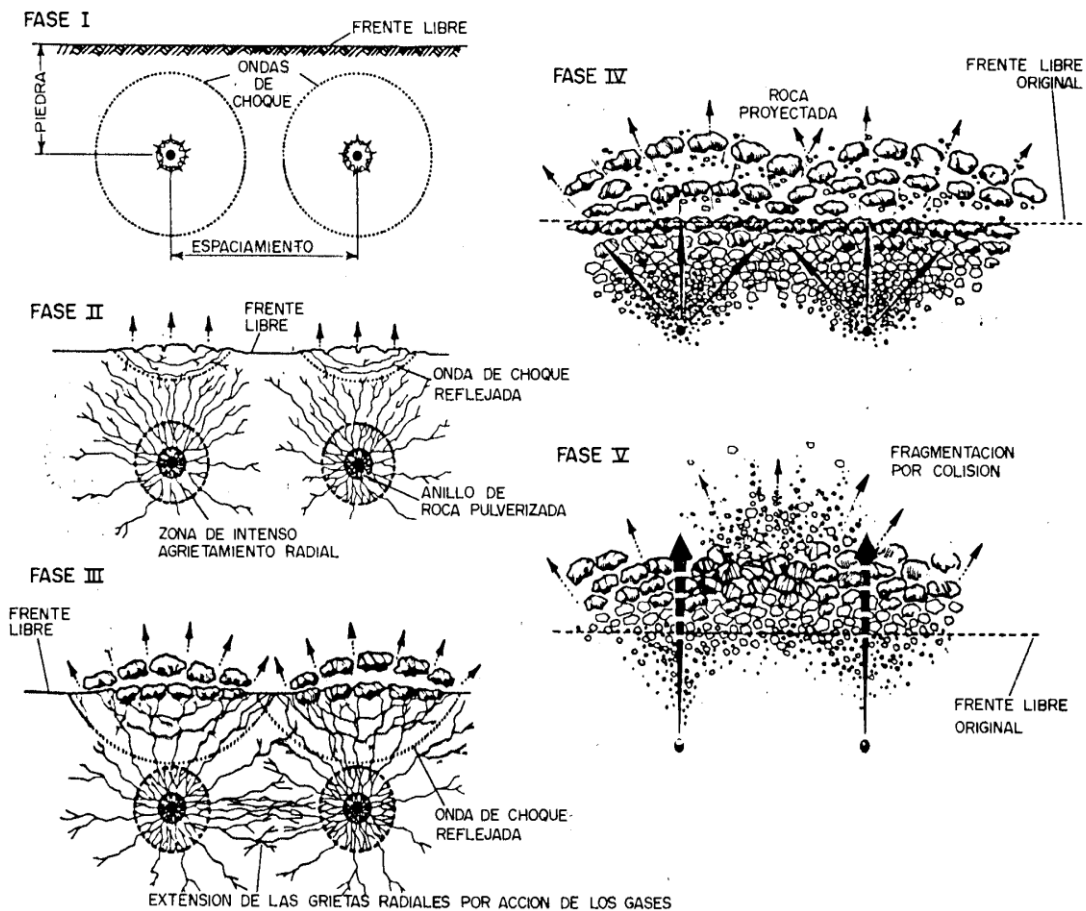
Si la onda en su camino encuentra materiales diversos, con impedancias diferentes, y en correspondencia con superficies de separación que pueden estar en contacto o separadas por aire o agua, la transmisión de la onda de choque estará gobernada por la relación de impedancias de los distintos tipos de roca, pudiendo parcialmente transmitirse y a mismo tiempo reflejarse en función de dicha relación.



Cuando las impedancias de los medios son iguales, gran parte de la energía se transmitirá y el resto se reflejará, llegándose a una situación límite cuando, por ejemplo, entre roca y aire, donde se reflejará casi la totalidad de la energía transportada por la onda de compresión en forma de tensión de tracción, pudiendo adquirir especial importancia en el proceso de rotura de la roca.

### 3.4.1. Rendimiento energético de las voladuras:

La acción de los explosivos sobre las rocas es pues la resultante de un conjunto de acciones elementales, que actúan escalonadamente y en ocasiones de forma simultánea en pocos milisegundos, asociadas a los efectos de la onda de choque que transporta la Energía de Tensión y a los efectos de los gases de explosivo.







La energía total desarrollada por el explosivo y medida por el método propuesto por Cole, puede expresarse entonces como la suma de esas dos componentes.

$ETD = ET + EB$	
$ET = \frac{K_1}{Q} \int P^2 \cdot dt \left(\frac{cal}{g}\right)$	$EB = \frac{K_2}{Q} \cdot T_e^3 \left(\frac{cal}{g}\right)$

Estimaciones efectuadas por Hagan (1977) han puesto de manifiesto que solamente un 15% de la energía total generada en la voladura es aprovechada como trabajo útil en los mecanismos de fragmentación y desplazamiento de la roca.

Por otro lado, Rascheff y Goemans (1997) establecieron un modelo teórico de reparto de energía, a partir de ensayos sobre bloques cúbicos de roca sumergidos en piscinas, estos investigadores afirmaban que aproximadamente el 53% de la energía del explosivo iba asociada a la onda de choque. Este valor depende de las condiciones de experimentación y pueden encontrarse resultados muy dispares que van desde el 5% al 50% de la energía total, según los distintos tipos de roca que se desean fragmentar y la clase de explosivo empleado.

Así, en una roca dura, la Energía de Tensión de un explosivo rompedor es más importante en la fragmentación que la energía del efecto de los gases de expansión, sucediendo lo contrario en las formaciones blandas, porosas o fisuradas y los explosivos de baja densidad.



De los ensayos efectuados por Rascheff y Goemans, se resume la siguiente tabla con el reparto de la energía de la onda de choque:

	<b>BLOQUE DE GRANITO CON CONFINAMIENTO INFINITO</b>	<b>VOLADURA CONVENCIONAL DE GRANITO EN BANCO</b>	<b>BLOQUE DE GRANITO SUMERGIDO EN AGUA</b>
<b>Pulverización</b>	15%	15%	15%
<b>Fisuración radial primaria</b>	3%	3%	2%
<b>Prolongación de fisuras</b>	0%	16%	39%
<b>Energía transmitida</b>	82%	34%	22%
<b>Energía aprovechada</b>	18%	34%	56%

Puede observarse que en las voladuras convencionales en banco una gran parte de la energía de onda de choque se transforma en energía sísmica que da lugar a las vibraciones del terreno a la cual se sumará parte de la energía de los gases.

No debe olvidarse, que para conseguir unos resultados óptimos en las voladuras es preciso no sólo fragmentar la roca sino esponjarla y desplazarla una determinada distancia, por lo que los gases juegan también en las últimas etapas un papel decisivo.



### **3.5. PROPIEDADES DE LAS ROCAS Y MACIZOS ROCOSOS Y SU INFLUENCIA EN LOS RESULTADOS DE LAS VOLADURAS:**

Los materiales que constituyen los macizos rocosos poseen ciertas características físicas que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que sobre ellos han actuado. El conjunto de estos fenómenos conduce en un determinado entorno, a una litología particular con unas heterogeneidades debidas a los agregados minerales policristalinos y a las discontinuidades de la matriz rocosa (poros y fisuras); y a una estructura geológica en un estado tensional característico, con un gran número de discontinuidades estructurales.

#### 3.5.1. Propiedades de las rocas:

##### 3.5.1.1. Densidad

Las densidades y las resistencias de las rocas presentan normalmente buena relación. Las rocas de baja densidad se deforman y se rompen con facilidad, requiriendo un factor de energía relativamente bajo mientras que las rocas densas precisan una mayor cantidad de energía para lograr una fragmentación satisfactoria, así como un buen desplazamiento y esponjamiento.

En rocas con alta densidad para que el impulso impartido a la roca por la acción de los gases sea el adecuado, deberán tomarse las siguientes medidas:

- ❖ Aumentar el diámetro de perforación para elevar la presión de barreno.
- ❖ Reducir el esquema y modificar la secuencia de encendido.
- ❖ Mejorar la efectividad del retacado para hacer que los gases escapen por el frente libre y no por el retacado.



### 3.5.1.2. Resistencias dinámicas de las rocas

Cuando la intensidad de la onda de choque supera a la resistencia dinámica a la compresión se produce una trituración de la roca circundante a las paredes del barreno por colapso de la estructura intercrystalina. Pero la trituración contribuye muy poco a la fragmentación y provoca una fuerte disminución de la energía de tensión:

Por ello, se recomienda:

- ❖ Seleccionar explosivos que desarrollen en las paredes del barreno tensiones inferiores o iguales a la resistencia dinámica a la compresión.
- ❖ Provocar una variación en la curva Presión-Tiempo, por desacoplamiento de la carga dentro del barreno.

### 3.5.1.3. Porosidad

Existen dos tipos de porosidad: la intergranular o de formación y la de disolución o post-formación.

La primera (puede ser uniforme en el macizo rocoso), provoca dos efectos:

- ❖ Atenuación de la energía de la onda de choque.
- ❖ Reducción de la resistencia dinámica a la compresión e incremento de la trituración y porcentaje de finos.

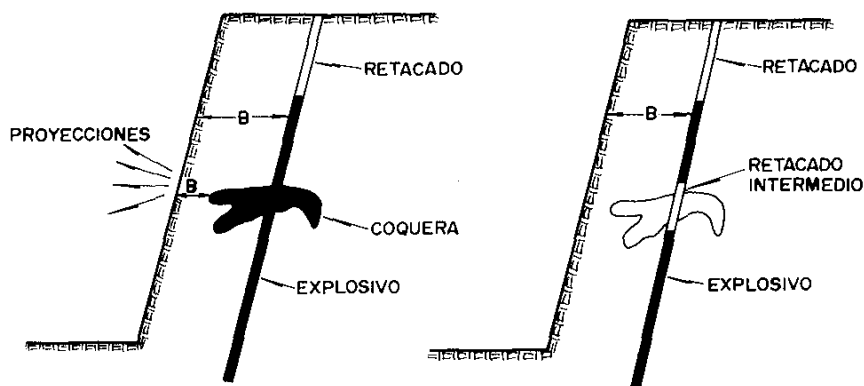


El trabajo de fragmentación de rocas muy porosas se realiza por la energía generada por los gases de expansión, por lo que se deberán de observar las siguientes recomendaciones:

- ❖ Utilizar explosivos como el ANFO.
- ❖ Desacoplamiento de cargas y los sistemas de iniciación.
- ❖ Retener los gases de voladuras con un retacado adecuado.
- ❖ Mantener dimensiones iguales de la piedra en cada barreno cuando existen varios frentes.

La porosidad de post-formación es la causada por los huecos y cavidades que resultan de la disolución del material rocoso por las aguas subterráneas.

Las cavidades interceptadas por los barrenos no solo dificultan la perforación con la pérdida de varillaje y atraques, sino incluso la eficiencia de la voladura, especialmente cuando se utilizan explosivos a granel.





#### 3.5.1.4. Fricción interna

Parte de la energía de la onda de tensión que se propaga a través del medio rocoso se convierte en calor por diversos mecanismos. A este fenómeno se le denomina fricción interna o capacidad de amortiguación específica (SDC), capacidad de atenuar la onda de tensión generada por la detonación del explosivo.

La SDC varía con el tipo de roca, con valores de 0,02-0,06 para los granitos hasta los de 0,07-0,33 para areniscas. Estos rangos aumentan con la porosidad, la permeabilidad, las juntas y el contenido en agua de la roca.

Si la SDC disminuye, obtenemos una mayor intensidad de fracturación debida a la onda de tensión.

#### 3.5.1.5. Conductividad

Cuando las rocas poseen cierta conductividad se pueden generar fugas o derivaciones de corriente por parte de los detonadores. Las medidas que deben tomarse para evitar estos problemas son:

- ❖ Verificar que los cables de los detonadores disponen del aislamiento plástico en buen estado.
- ❖ Todas las conexiones del circuito están debidamente aisladas y protegidas.



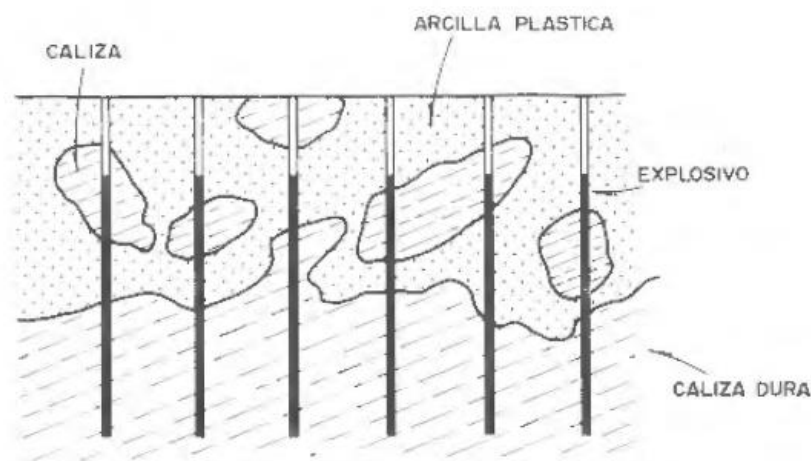
### 3.5.2. Propiedades de los macizos rocosos:

#### 3.5.2.1. Litología

Donde nos encontramos con un cambio litológico brusco, por ejemplo, estéril y mineral, estamos obligados a reconsiderar el diseño de la voladura, ya que dicho cambio conlleva una variación de las características del medio rocoso. Se pueden sugerir dos caminos:

- ❖ Esquemas iguales para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias.
- ❖ Esquemas distintos, pero con igual carga por barreno.

Cuando dos materiales con características muy resistentes se encuentran en contacto, como por ejemplo una caliza competente con unas arcillas plásticas, y los barrenos atraviesan estas variaciones de materiales, se registrarán pérdidas de energía asociadas con la caída de presión y escape de los gases, produciéndose deformaciones rápidas de dichos materiales blandos y una mala fragmentación.





En estos casos se recomienda estas acciones y de este modo, mejorar el rendimiento de las voladuras:

- ❖ Retacar con material adecuado aquellas zonas del barreno que estén en contacto con material plástico o próximo a ellas.
- ❖ Emplear cargas de explosivo totalmente acopladas a la roca competente con una gran velocidad de detonación.
- ❖ Situar los multiplicadores en el punto medio de la roca dura para incrementar la resultante de la onda de tensión que actúa a ambos lados.
- ❖ Evitar el escape prematuro de los gases a la atmosfera asegurando las dimensiones del retacado y de la piedra.

#### 3.5.2.2. Fracturas preexistentes

Las discontinuidades en los macizos rocosos son muy comunes, ya sea por microfisuras o macrofisuras, que de manera decisiva influyen en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, y seguidamente, en los resultados de las voladuras.

Estas aberturas en el terreno generan una variación en la propagación de la onda de choque, las cuales la reflejan atenuando y dispersando la energía desarrollada por el explosivo.





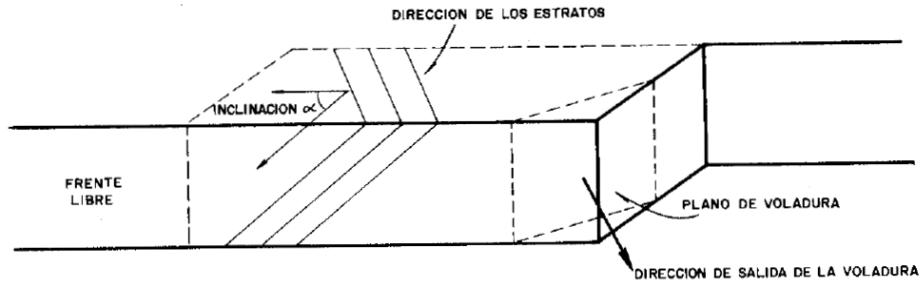
ABSORCION DE LA ENERGIA DE LA ONDA DE TENSION EN LAS FRACTURAS	ABERTURA DE LAS FRACTURAS (mm)	NATURALEZA DE LAS FRACTURAS
PEQUEÑA <20%	0	Fuertemente cementada
	0-4	Cementada con un material de impedancia acústica similar a la de la matriz
LIGERA 20-40%	<0,5	Fracturas rellenas con aire o agua
	<4	Cementada con material con impedancia acústica 1,5-2 veces mayor que la de la matriz
MEDIA 40-80%	0,5-1	Fracturas abiertas rellenas con aire o agua
GRANDE >80%	0,1-1	Fracturas rellenas con material suelto y poroso
	1	Fracturas abiertas rellenas de material suelto poroso, aire y agua

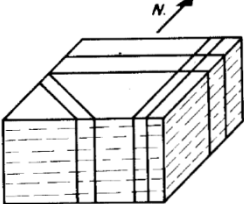
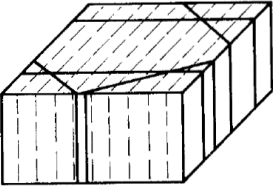
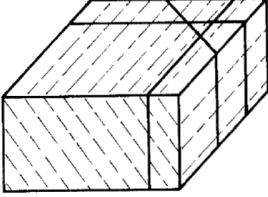
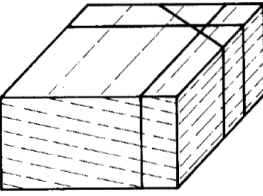
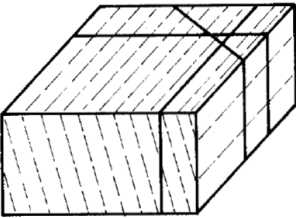
La fragmentación está influenciada por el espaciamiento entre los barrenos (S), la separación entre las juntas (J) y el tamaño máximo de bloque admisible (M).

Otro aspecto a tener en cuenta en el diseño de las voladuras es el control geoestructural del macizo rocoso, que se refiere a la orientación relativa del frente y dirección de salida de la pega con respecto a la dirección y buzamiento de los estratos.



**DISEÑO DE VOLADURAS ATENDIENDO AL CONTROL GEOESTRUCTURAL**



	<b>INCLINACION DE LOS ESTRATOS</b>	<b>ANGULO ENTRE LA DIRECCION DE LOS ESTRATOS Y LA SALIDA DE LA VOLADURA</b>
	$\alpha = 0^\circ$	<b>Dirección de salida indiferente</b>
	$\alpha = 90^\circ$	$\beta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$ <b>Buena frag. / Frente irregular</b> $\beta = 45^\circ = 135^\circ = 225^\circ = 315^\circ$ <b>Frag. Variable / Frente en dientes sierra</b> $\beta = 90^\circ = 270^\circ$ <b>Dirección más favorable</b>
	$\alpha = 45^\circ$	$\beta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$ <b>Buena</b> $\beta = 45^\circ = 135^\circ$ <b>Desfavorable</b> $\beta = 90^\circ$ <b>Poco favorable</b> $\beta = 225^\circ = 315^\circ$ <b>Aceptable</b> $\beta = 270^\circ$ <b>Muy favorable</b>
	$0^\circ < \alpha < 45^\circ$ Similar al anterior, la dureza es determinante	$\beta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$ <b>Buena</b> $\beta = 45^\circ = 135^\circ$ <b>Desfavorable</b> $\beta = 90^\circ$ <b>Poco favorable</b> $\beta = 225^\circ = 315^\circ$ <b>Aceptable</b> $\beta = 270^\circ$ <b>Muy favorable</b>
	$45^\circ < \alpha < 90^\circ$	$\beta = 90^\circ$ <b>Poco favorable</b> $\beta = 270^\circ$ <b>Favorable</b> Dependiendo de $\alpha$ y la competencia de la roca, los resultados estarán próximos a $\alpha = 45^\circ$ o $\alpha = 90^\circ$



### 3.5.2.3. Tensiones de campo

Cuando las tensiones de campo residuales, tectónicas y/o gravitacionales actúan, el esquema de fracturas generado alrededor de los barrenos puede estar influenciado por la concentración no uniforme de tensiones alrededor del mismo.

Las grietas originadas por la detonación tienden a propagarse radialmente desde los barrenos siguiendo la dirección de las tensiones principales.

### 3.5.2.4. Presencia de agua

Los macizos rocos con porosidad e intensamente fracturados se encuentran saturados de agua, presentando ciertos problemas:

- ❖ Uso de explosivos no alterables por el agua.
- ❖ Posible pérdida de barrenos por hundimientos internos.
- ❖ Perforación inclinada dificultada.

El agua también afecta al macizo en los siguientes aspectos:

- ❖ La velocidad de propagación de las ondas elásticas aumenta en terrenos porosos y agrietados.
- ❖ La resistencia a compresión y tracción de las rocas se reduce al ser menor la fricción entre las partículas.
- ❖ La atenuación de las ondas de choque se reduce, por eso se intensifican los efectos de rotura.



### 3.5.2.5. Temperatura del macizo rocoso

Los yacimientos que contienen piritas suelen presentar problemas de altas temperaturas de la roca por efecto de la oxidación lenta de este mineral, haciendo que los agentes explosivos tipo ANFO reaccionen exotérmicamente con la pirita excitándose a partir de una temperatura de  $120\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Un método para solucionar este inconveniente consiste en añadir diversas sustancias inhibidoras del ANFO, tales como urea, oxalato potásico, etc... Llegando a la conclusión de que con el aporte al ANFO de un 5% en peso de urea se evita la reacción exotérmica de la mezcla ternaria hasta una temperatura de  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La sensibilidad de los explosivos tipo hidrogel depende también de la temperatura de la roca con la que esté en contacto, por ello, es necesario prestar gran atención a este fenómeno.

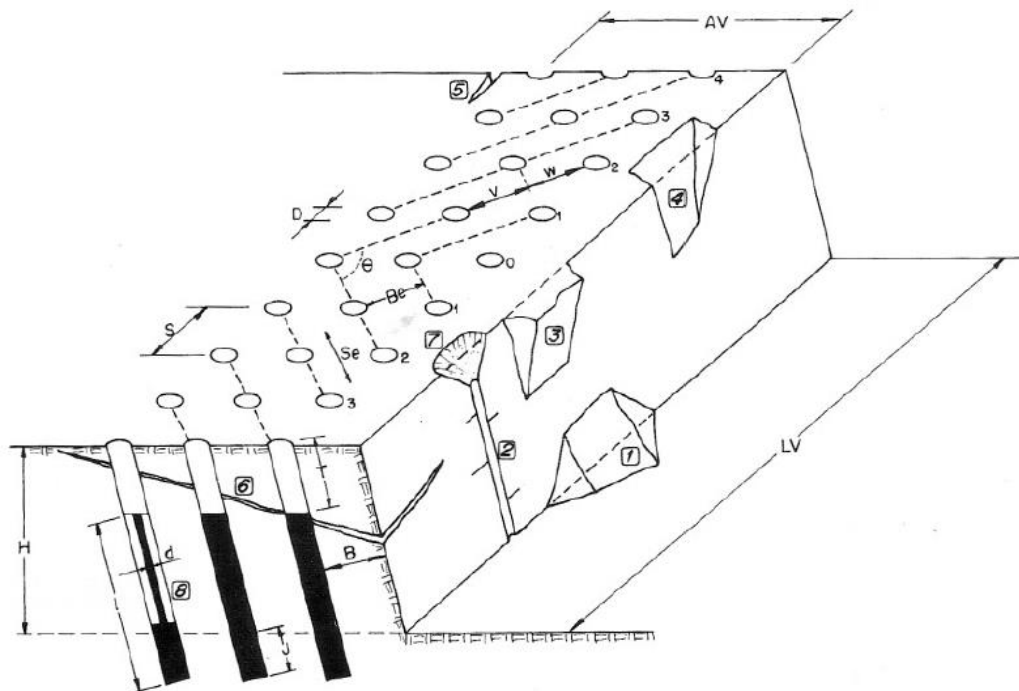
Una recomendación general cuando se presentan estos problemas es la de limitar el número de barrenos por voladura, a fin de disminuir el tiempo que transcurre entre la carga y el disparo.



### 3.6. VARIABLES CONTROLABLES DE LAS VOLADURAS:

Las variables que son controlables en el diseño y cálculo de voladuras se clasifican en los siguientes 3 grupos:

- ❖ Geométricas.
- ❖ Químico-Físicas o del explosivo
- ❖ De tiempo.



1	Repié	$H =$ Altura banco	$D =$ Diámetro barreno
2	Caña del barreno	$L =$ Long. Barreno	$d =$ Diámetro carga
3	Voladizo	$B =$ Piedra	$S =$ Espaciamiento
4	Sobreexcavación	$LV =$ Long. Voladura	$AV =$ anchura voladura
5	Grieta de tracción	$B_e =$ Piedra efectiva	$S_e =$ Espaciamiento efectivo
6	Descabezamiento	$T =$ Retacado	$J =$ Sobreperforación
7	Cráter de bocazo	$l =$ Long. Carga	$\theta =$ Angulo salida
8	Carga desacoplada	$v/w =$ Grado equilibrio	$t_r =$ Tiempo retardo



### 3.6.1. Diámetros de los barrenos

El diámetro depende de varios factores:

- ❖ Características del macizo rocoso que se desea volar.
- ❖ Grado de fragmentación requerido.
- ❖ Altura de banco y configuración de las cargas
- ❖ Economía del proceso de perforación y voladura.
- ❖ Dimensiones del equipo de carga.

Si el diámetro del barreno es pequeño, se incrementarán los gastos de perforación, iniciación y cebado, y en las operaciones de carga, retacado y conexión se invertirá mucho mas tiempo y mano de obra. Si el D es mucho mas pequeño, se repartirá mejor la carga del explosivo y por lo tanto la única ventaja que se obtendrá es la de una mejora del consumo específico de explosivo.

Por lo contrario, si los diámetros de los barrenos son grandes se obtendrá una granulometría mayor en las voladuras y podría llegar a ser inaceptable si la familia de las diaclasas y discontinuidades presentan un espaciamiento amplio y conforman bloques in situ.

Se recomienda que el espaciamiento entre barrenos sea menor que la separación media entre fracturas.

El aumento de diámetro va acompañado de las siguientes ventajas:

- ❖ Elevación de la velocidad de detonación de los explosivos.
- ❖ Disminución del coste global de perforación y voladura.
- ❖ Posibilidad de mecanización de la carga de explosivo.
- ❖ Mayor rendimiento de la perforación.
- ❖ Aumento del rendimiento de la excavadora como consecuencia de la reducción de zonas de baja productividad.



En cuanto a la fragmentación se refiere, si lo que se prefiere es que se mantenga constante al aumentar el diámetro, será preciso elevar el consumo específico de explosivo pues las cargas están peor distribuidas en el macizo rocoso.

El retacado aumenta conforme lo hace el diámetro de perforación.

En voladuras a cielo abierto los diámetros cubren un amplio rango desde los 50 mm hasta los 380mm. En obras públicas es habitual operar con valores de diámetro entre 50 y 125 mm, mientras que en minería la tendencia ha sido incrementar este parámetro de diseño, siendo habituales diámetros comprendidos entre 165mm y 310mm.

En trabajos subterráneos el aumento del diámetro de los barrenos ha sido limitados y sólo en la minería metálica se han alcanzado valores entre 125mm y 220mm. En el avance de galerías y túneles se opera en el rango de 32 mm a 64 mm y en las voladuras en banco para excavaciones de cavernas lo normal son calibres entre 64 y 90mm.

En relación con los equipos de carga, debe existir un equilibrio entre las dimensiones de éstos, los diámetros de perforación y la capacidad de las unidades de transporte.



### 3.6.2. Altura de banco

La rigidez de la masa de roca situada delante de los barrenos tiene una gran influencia a la hora del resultado de las voladuras. Cuando la relación entre la altura de banco (H) y la piedra (B) es grande, el desplazamiento y deformación de la roca es fácil, la relación óptima sería  $H/B \geq 3$ .

Si  $H/B = 1$ , obtendríamos una fragmentación gruesa con problemas de sobreexcavación y repiés. Con  $H/B = 2$ , se aminorarían estos efectos, eliminándose con su totalidad cuando  $H/B \geq 3$ .

En las canteras y en las explotaciones de descubierta de carbón se cumple generalmente la condición  $H/B \geq 3$  pero en la minería metálica, esta condición viene impuesta por el alcance de la maquina de carga y la dilución del material, ya que, según estas características hacen variar la altura del banco (H).

Cualquier variación de la piedra o el espaciamiento, cuando la altura de banco es pequeña, tiene una gran influencia en los resultados finales.

Si las alturas de banco son muy grandes, pueden aparecer problemas de desviación en los barrenos que afectarán no sólo a la fragmentación final, sino que también aumentarán el riesgo de generar fuertes vibraciones, proyecciones, y sobreexcavaciones.





### 3.6.3. Inclínación de los barrenos

La perforación inclinada presenta numerosas ventajas, pero también pueden aparecer algunos inconvenientes que deberán ponderarse en cada caso particular.

Las ventajas que presenta la perforación inclinada son:

- ❖ Mejor resultado en la fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la pila del material, ya que aumenta el ángulo de la trayectoria de proyección.
- ❖ Menores problemas de descabezamiento de barrenos, disminuyendo así los cortes y fallos en las voladuras.
- ❖ Mayor rendimiento en la carga del material con palas de ruedas debido al mayor esponjamiento y menor altura de la pila.
- ❖ Menor sobreperforación y mejor aprovechamiento de la energía del explosivo con la consiguiente disminución del nivel de vibraciones producido.
- ❖ Menor consumo específico de explosivo al reflejarse de forma más efectiva la onda de choque en el pie del banco y posibilidad de aumentar la dimensión de la piedra con menor riesgo de aparición de repiés.
- ❖ La explotación de carbón no se produce una sobretrituration de éste durante la voladura del estéril.
- ❖ Mayor rendimiento de la perforación por unidad volumétrica arrancada.



Por el contrario, los inconvenientes son:

- ❖ Desviación de los barrenos cuando éstos son largos.
- ❖ Longitud de perforación mayor.
- ❖ Dificultad en el posicionamiento de las perforadoras y operaciones de emboquille.
- ❖ El empuje de las perforadoras disminuye.
- ❖ Mayor desgaste de las bocas, varillaje y estabilizadores.
- ❖ Menor disponibilidad de los equipos de perforación por los mayores esfuerzos de fatiga y desgastes.
- ❖ El rendimiento de la carga con excavadoras de cables disminuye por la menor altura de la pila del material.
- ❖ Problemas de carga de explosivo, especialmente en barrenos con agua.

#### 3.6.4. Retacado

El retacado en la parte del barreno que se rellena con material inerte con la función de confinar y retener los gases producidos en la explosión para permitir que se desarrolle por completo el proceso de fragmentación de la roca. Si el retacado es insuficiente se producirá un escape de los gases a la atmosfera y con ellos parte de la energía generada por el explosivo será desaprovechada. También se generarían problemas de onda aérea y riesgo de proyecciones. Por el contrario, un retacado excesivo, provocaría poco esponjamiento de la pila del material y un nivel de vibración elevado.

En la determinación del retacado, se deben tener en cuenta:

- ❖ El tipo y el tamaño del material utilizado.
- ❖ La longitud de la columna del retacado.



Normalmente, el material empleado como retacado es el detritus procedente de la perforación de los barrenos, debido a su proximidad a la boca de este. Por otro lado, estudios han determinado que el material granular anguloso, como la piedra procedente del machaqueo, es más efectivo.

El retacado más eficaz se alcanza para tamaños de partícula entre  $1/17 D$  y  $1/25 D$ . Investigaciones indican que utilizando material con dichos tamaños de partículas se puede reducir hasta un 41% la longitud del retacado.

Siempre que sea posible se debe mantener una longitud de retacado superior a  $25D$ , para evitar de esta forma problemas con la onda aérea, proyecciones, cortes y sobreexcavaciones.

Cuando el cebado se realiza en cabeza hay que tener en cuenta el efecto negativo del cordón detonante sobre el material de retacado, ya que lo comprime lateralmente creando una vía de escape prematuro de los gases de explosión a la atmósfera.

### 3.6.5. Sobreperforación

La sobreperforación (J) es la longitud del barreno por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuado que permita al equipo de carga alcanzar la cota de excavación prevista.

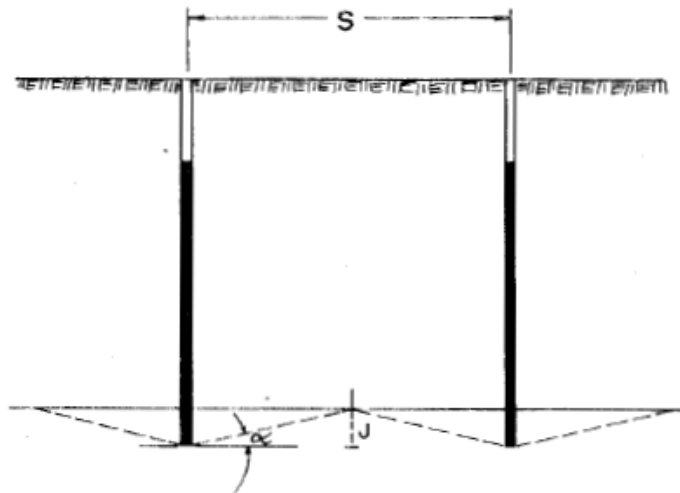
Si la sobreperforación es insuficiente aparecerán repiés en la rasante proyectada dificultando y encareciendo los costes en la operación de carga.



Por otro lado, si es excesiva se producirá:

- ❖ Incremento de los costes y voladura.
- ❖ Aumento en el nivel de vibraciones.
- ❖ Fragmentación excesiva en la parte alta del banco.
- ❖ Aumento del riesgo de descabezamiento y sobreexcavación.

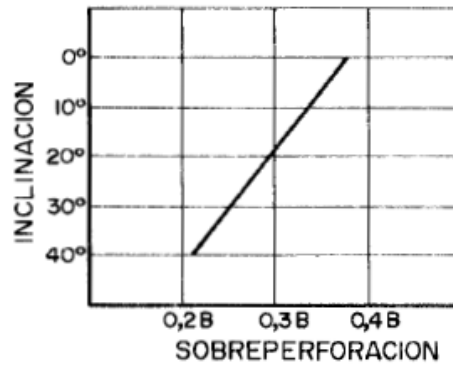
La rotura en el fondo del barreno se produce en forma de conos invertidos cuyos ángulos con la horizontal dependen de la estructura del macizo y de las tensiones residuales. Normalmente, varía entre  $10^\circ$  y  $30^\circ$  ( $\alpha$ ).



El valor de la sobreperforación para que se produzca intersección de las superficies cónicas al nivel de banco vale normalmente  $J=0,3B$ .

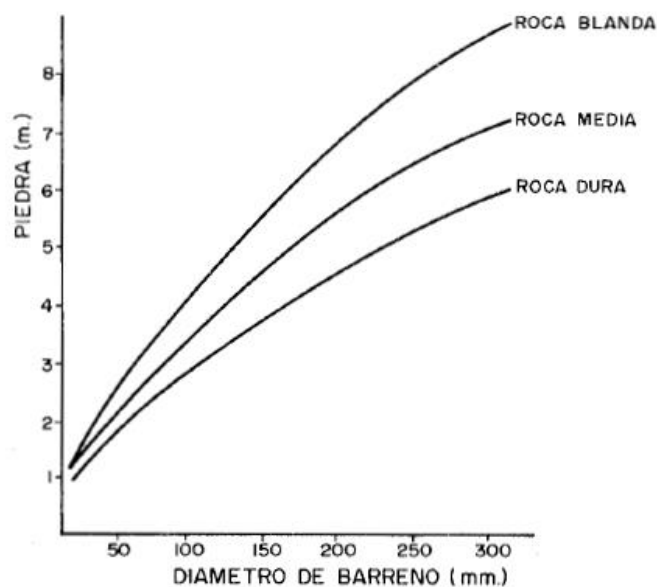


Para disminuir  $J$  es recomendable la utilización de explosivos que proporcionen una elevada concentración de energía por unidad de longitud en la parte inferior de la carga y perforar barrenos inclinados.



### 3.6.6. Piedra y espaciamiento

La piedra ( $B$ ) es la distancia mínima desde el eje de un barreno al frente libre y el espaciamiento ( $S$ ) es la distancia entre barrenos de una misma fila. Estos dos parámetros dependen del diámetro de perforación, de la altura de banco y del grado de fragmentación y desplazamiento del material deseado.





Si la piedra es excesiva, los gases de la explosión encuentran mucha resistencia para agrietar y desplazar la roca, y parte de la energía se transforma en energía sísmica aumentando la intensidad de las vibraciones.

Si la dimensión de la piedra es reducida, los gases se escapan y expanden a una velocidad muy alta hacia el frente libre, impulsando a los fragmentos de roca, proyectándolos de forma incontrolada, y provocando además un aumento en la sobrepresión aérea y el ruido.

Por otra parte, el espaciamiento se calcula en función de la piedra, del tiempo de retardo entre barrenos y de la secuencia de encendido. Si  $S$  es muy pequeño, se producen entre las cargas un exceso de trituración y roturas superficiales en cráter, bloques de gran tamaño por delante de la fila de barrenos y problemas de repiés.

Dimensiones excesivas de espaciamiento dan lugar a una fracturación inadecuada entre cargas, acompañada por problemas de repiés y un frente muy irregular con resaltes de roca en la nueva cara del banco.

### 3.6.7. Esquemas de perforación

En voladuras en banco, los esquemas utilizados son cuadrados o rectangulares, debido a la facilidad de replante de los puntos de emboquille. Los esquemas mas efectivos son los denominados “al tresbolillo” y entre ellos el mejor es el que forma triángulos equiláteros, ya que es el que proporciona la mejor distribución de energía del explosivo en la roca y permite obtener una mayor flexibilidad en el diseño de la secuencia de encendido y dirección de la salida de la voladura.



### 3.6.8. Geometría del frente libre

La geometría del frente más efectiva es aquella en la que cada punto de esa superficie equidista del centro de la carga de explosivo. Con pequeñas cargas esféricas esa situación se presenta en el taqueo de bolos donde con una pequeña carga confinada en un barreno se consigue la rotura con unos pocos consumos que llegan a ser muy bajos, del orden de 80-100 g/m<sup>3</sup>.

Sin embargo, en voladuras de producción con cargas cilíndricas es necesaria mayor cantidad de explosivos.

La geometría del frente más efectiva se consigue:

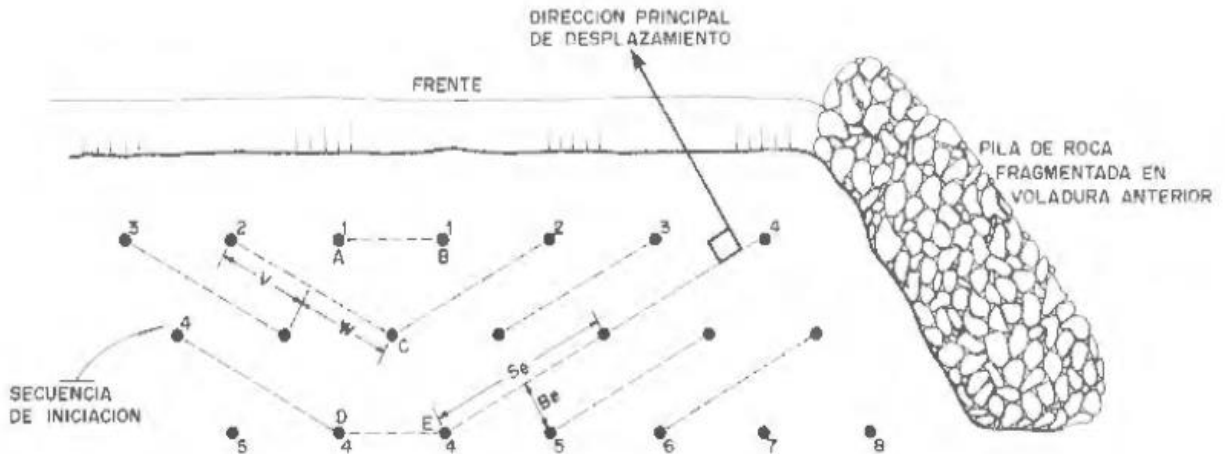
- ❖ Disponiendo de cara libre y los barrenos de forma que sean paralelos o formen el ángulo más pequeño posible.
- ❖ Estando la roca, próxima a la superficie, algo fracturada por las voladuras precedentes.
- ❖ Diseñando una secuencia de encendido en la que cada barreno disponga de un frente que forme una superficie semicilíndrica convexa o biplanar.

Las condiciones del frente debe encontrarse limpio y sin repiés, realizando antes de la voladura las labores auxiliares necesarias. Cuando se dispara una pega teniendo aún sin cargar el escombro de la voladura anterior, que se apoya sobre alguno de los frentes libres, los problemas que aparecen son los siguientes:

- ❖ Se generan mayores intensidades de vibración, mas sobreexcavaciones, y riesgos de inestabilidad.
- ❖ Se precisa un esquema más cerrado y un mayor consumo específico de explosivo.
- ❖ Probable aparición de repiés con aumento de costes de carga y necesidad de voladuras secundarias.



Para solventar algunos de estos problemas se debe iniciar la voladura en un área alejada del frente cubierto y diseñar la secuencia de encendido con una dirección de salida paralela a dicho frente.



### 3.6.9. Tamaño y forma de la voladura

El tamaño de las voladuras debe ser tan grande como sea posible, pues se consiguen las siguientes ventajas:

- ❖ Disminución de los tiempos improductivos de los equipos de perforación y carga, de las operaciones de replanteo, etc.
- ❖ Menor longitud porcentual de la zona perimetral de las voladuras, donde se produce fragmentación más deficiente debido a la mayor dificultad de establecer esquemas regulares, al riesgo de encontrar bloques preformados por las pegas anteriores y al escape prematuro de los gases por las grietas existentes, además del mayor tiempo de supervisión y control que conlleva en si la voladura.





La forma de las voladuras debe ser tal que:

- ❖ Con un frente libre, la relación longitud de frente / anchura (LV/AV) sea mayor que 3.
- ❖ Con dos frentes libres las voladuras deben diseñarse con  $LV/AV > 2$ .

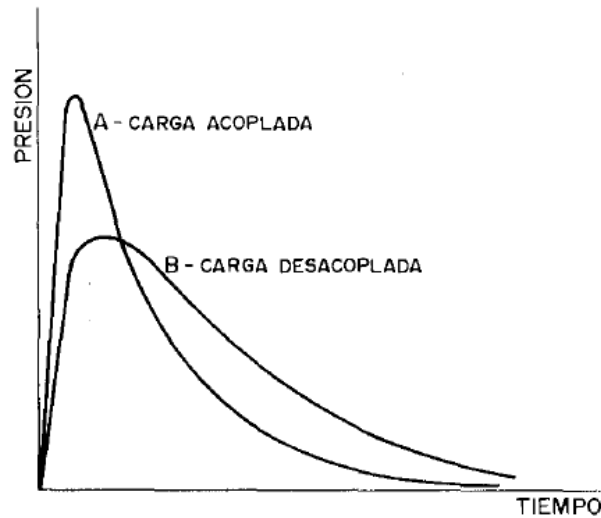
En contraposición, los inconvenientes de las coladuras con filas múltiples son:

- ❖ Aumento de la intensidad de las vibraciones y onda aérea producidas.
- ❖ Aparición de sobreexcavaciones y proyecciones en las últimas filas si no se ha disparado con una secuencia correcta.
- ❖ En rocas blandas, reducción de la bonificación de volumen arrancado por sobreexcavación al disminuir el número de voladuras.

#### 3.6.10. Desacoplamiento de las cargas

La curva Presión-Tiempo de los gases de la explosión puede controlarse para un explosivo encartuchado con dos técnicas conocidas por “Desacoplamiento y espaciado de las cargas”.

- ❖ Desacoplamiento: consiste en dejar un hueco vacío o con material inerte entre la columna del explosivo y la pared del barreno.
- ❖ Espaciado de las cargas: se basa en dividir la carga por medio de separadores de aire o material poroso.



Investigaciones llevadas a cabo, demuestran que empleando desacoplamientos del 65 y 75%, en algunas rocas se mejora la fragmentación y la uniformidad de la granulometría.

La presión efectiva de los gases sobre la pared del barreno con cargas desacopladas o espaciadas viene dada por:

$PB_e = PB \cdot \left(\frac{V_e}{V_b}\right)^{1,2}$	
PB = Presión de barreno	$V_e$ y $V_b$ = volumen del explosivo y volumen del barreno

A día de hoy, el método menos laborioso, más efectivo y económico de controlar la curva Presión-Tiempo trata en diluir con un material específico, en la proporción adecuada, el explosivo a granel empleado en la voladura.



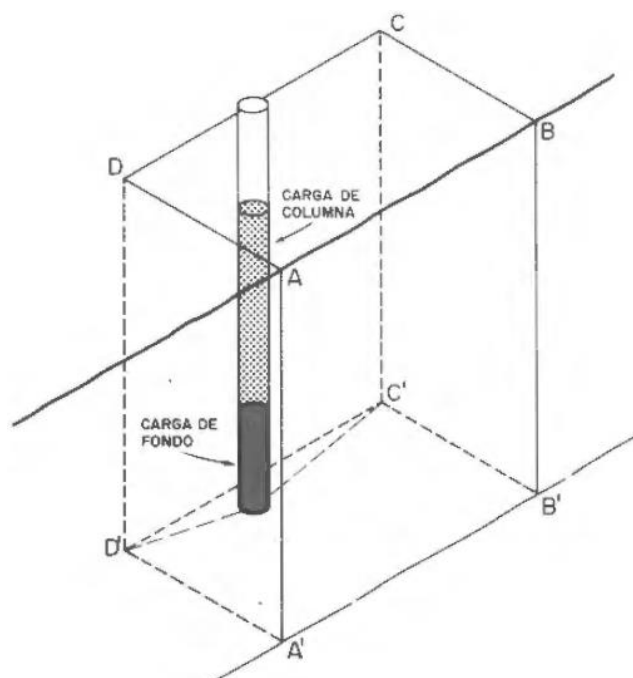
### 3.6.11. Explosivos y su distribución en los barrenos

Para operaciones determinadas hay que tomar decisiones cuidadosas entre los explosivos disponibles en el mercado y el tipo de roca en el que se va a trabajar.

En las rocas masivas, toda su superficie específica del material se crea en la voladura y los explosivos adecuados son de mayor potencia y velocidad de detonación que producen una alta presión de barreno. Por otro lado, en rocas intensamente fracturadas donde la superficie total de las discontinuidades representa un área relativamente mayor que la que se crea en la voladura, los explosivos de baja densidad y velocidad de detonación son los de mayor eficiencia.

Cuando la detonación de un explosivo crea demasiados finos, por efecto de la trituración de la roca, se deberán de emplear agentes de baja densidad como el ANFO y las mezclas de éste con sustancias inertes.

En cuanto a la distribución de las cargas del explosivo en los barrenos, la energía necesaria para que se produzca la rotura no es



constante en toda su altura. La energía generada por el explosivo debe superar la resistencia a la tracción de la roca en la sección CDD'C' y la resistencia a cizallamiento en la sección A'B'C'D'.



La resistencia a cizallamiento es superior a la resistencia de tracción, por lo tanto, es preciso emplear una distribución de cargas selectiva, de tal forma que la energía específica en el fondo del barreno sea de 2 a 2,5 veces superior a la energía empleada de la columna. De este modo, en el fondo se deben de emplear explosivos de alta densidad y potencia como lo son la dinamita, los hidrogeles y emulsiones. Por otro lado, explosivos de baja densidad y potencia media en la carga de columna del barreno, como el ANFO o hidrógeles y emulsiones de baja densidad.





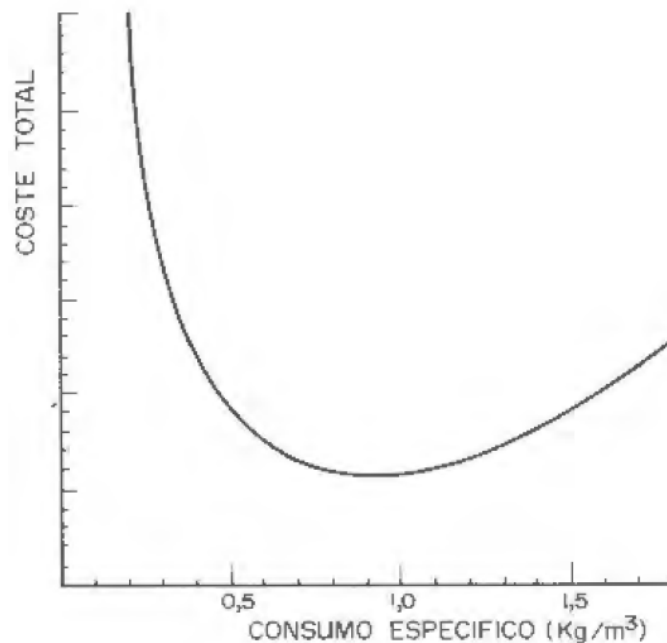
### 3.6.12. Consumos específicos de los explosivos

El consumo específico es el parámetro conocido el cual define la cantidad de explosivo utilizado para fragmentar  $1\text{m}^3$  o  $1\text{t}$  de roca.

El consumo específico (CE) de una voladura se incrementa con:

- ❖ El aumento del diámetro de los barrenos, la resistencia de la roca y el grado de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento requerido.

Los consumos específicos altos, proporcionan una buena fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la roca, menor problemas de repiés y ayudan a alcanzar el punto óptimo de los costes totales de operación (representado en la gráfica de la izquierda).





A continuación, se indican los valores típicos del consumo específico en diversas clases de rocas para voladuras en banco a cielo abierto.

TIPO DE ROCA	CONSUMO ESPECIFICO (kg/m <sup>3</sup> )
Rocas masivas y resistentes	0,6 – 1,5
Rocas resistencia media	0,3 – 0,6
Rocas muy fracturadas, alteradas o blandas	0,1 – 0,3

### 3.6.13. Tiempos de retardo y secuencias de encendido

Los tiempos de retardo entre barrenos y las secuencias de encendido juegan en las voladuras un papel muy importante pues sirven para disminuir las cargas operantes, y por consiguiente los niveles de vibración producidos, y hacer que se consiga una mayor efectividad en los mecanismos de rotura y un control sobre el desplazamiento de la roca, la sobreexcavación, los repiés y las proyecciones.

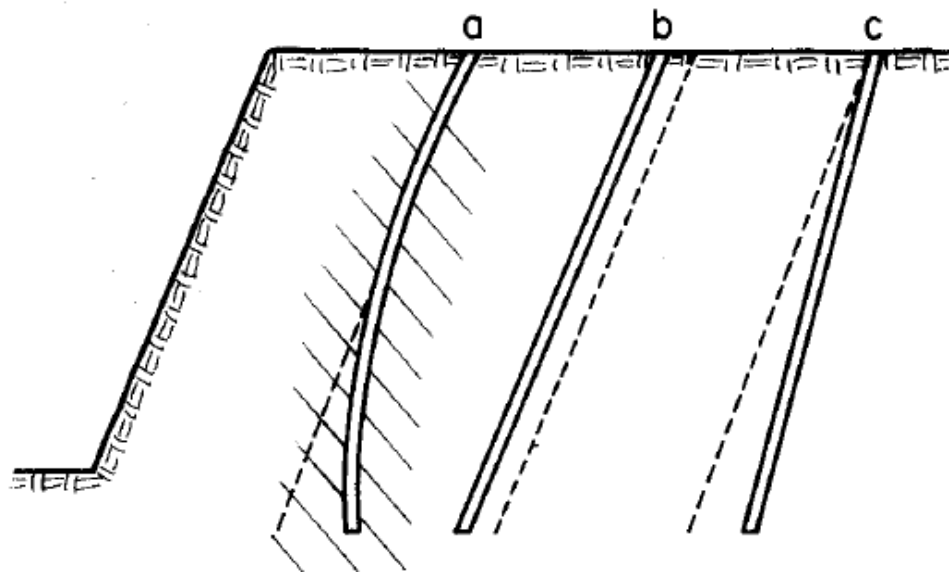




### 3.6.14. Desviación de los barrenos

Se pueden agrupar en tres tipos los factores causantes de las desviaciones de los barrenos.

- ❖ Primero: las propiedades estructurales, como los planos de esquistosidad, las diaclasas, las juntas abiertas con material blando de relleno, los cambios de litología, etc.
- ❖ Segundo: si el diámetro de perforación elegido es demasiado grande comparado con el diámetro del varillaje, se produce una desviación de los barrenos por la falta de resistencia de la sarta al pandeo, y además un desgaste prematuro de ésta.
- ❖ Tercero: los errores de alineación y emboquille que son los mas comunes en las operaciones de perforación.





## **4. INFORMACION SOBRE LA CANTERA DONDE SE HA REALIZADO EL ESTUDIO**

### **4.1. DESCRIPCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE LA CANTERA ESTUDIADA**

La zona de objeto de estudio se sitúa en la sierra del Coto, en la que se encuentran ubicadas las explotaciones de caliza marmórea comercializadas con el nombre de “Crema Marfil”. Dicha Sierra se enclava en la parte más occidental de Alicante muy próxima al límite con la de Murcia, dentro de la comarca del Vinalopó, perteneciendo casi en su totalidad al Municipio de Pinoso.

Se localiza en la hoja nº 470 del mapa topográfico nacional escala 1:50.000, abarcando la Sierra, una superficie aproximada de unos 10km, situándose entre las coordenadas U.T.M:

672,500 – 677,500

4246,500 – 4251,00

El acceso al yacimiento Coto de Pinoso se realiza desde la localidad de Pinoso, siguiendo la carretera CC-3223 hasta El Rodriguillo y continuando desde éste por la desviación hacia La Algueña. A unos 1.200m de dicho cruce existe una pista asfaltada que conduce hasta las canteras.

La altura máxima de la Sierra se sitúa en el alto de Algarejo en el extremo Este, con 1.043m. Las explotaciones se encuentran entre los 600 y 870 metros siendo la cota media del entorno alrededor de los 500 – 600 metros de altitud.





La zona donde se ha realizado el estudio objeto de este trabajo de final de grado pertenece a la organización empresarial MARMOLES COTO S.L., con dominio social en Monte El Coto, parcela Z, 03650 de Pinoso, adjudicataria y explotadora de la cantera denominada SOLANA DE LA FOSCA I.

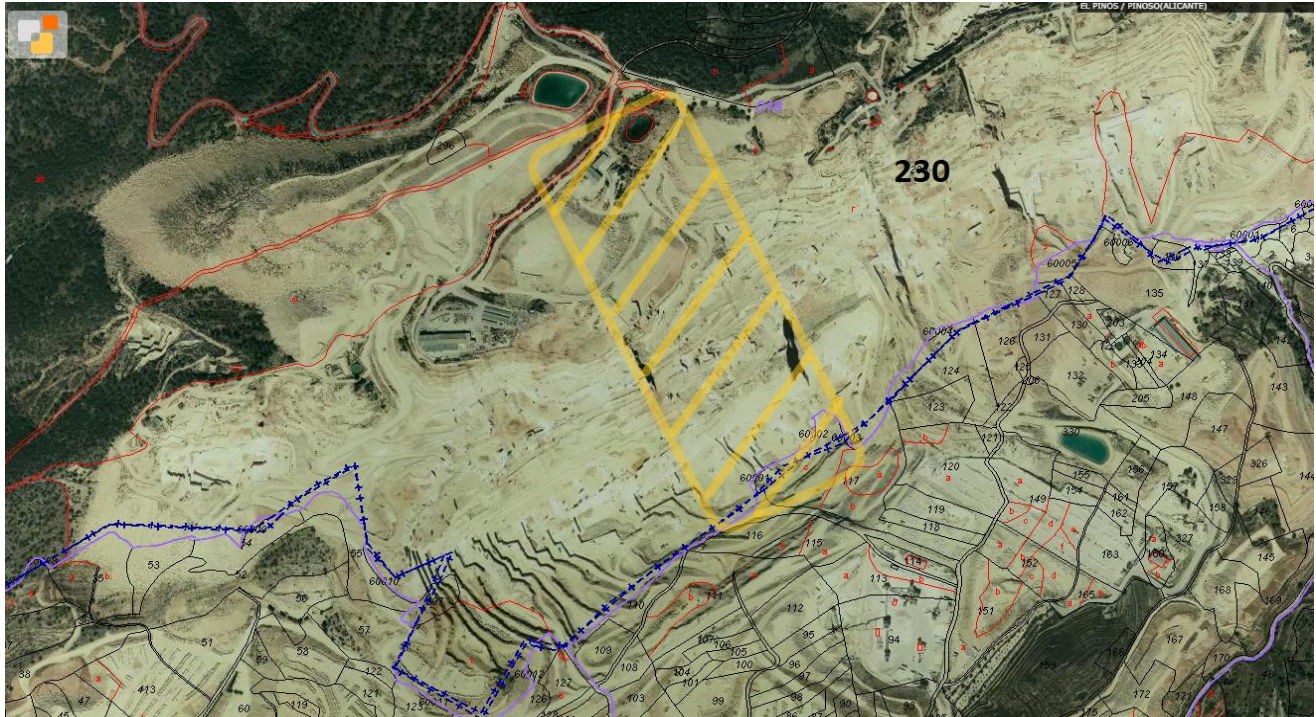
Como se puede observar en la imagen, la cantera está limitada por la parte sur, por el municipio de Algueña, y por la parte noroeste, por el municipio de Pinoso.

### **CANTERA “SOLANA DE LA FOSCA I” Nº 7.1 INVENTARIO. TITULAR DE LA EXPLOTACIÓN “MARCOTSA”**





En cuanto a la información catastral del emplazamiento, la explotación pertenece al polígono 18, parcela 230 (BARRANCO RITA, PINOSO).



#### DATOS DESCRIPTIVOS DEL INMUEBLE

Referencia catastral	03105A018002300000WI
Localización	Polígono 18 Parcela 230 BARRANCO RITA. EL PINOS / PINOSO (ALICANTE)
Clase	Rústico
Uso principal	Agrario
Superficie construida	8.962 m <sup>2</sup>
Año construcción	1975

#### PARCELA CATASTRAL

Parcela construida sin división horizontal



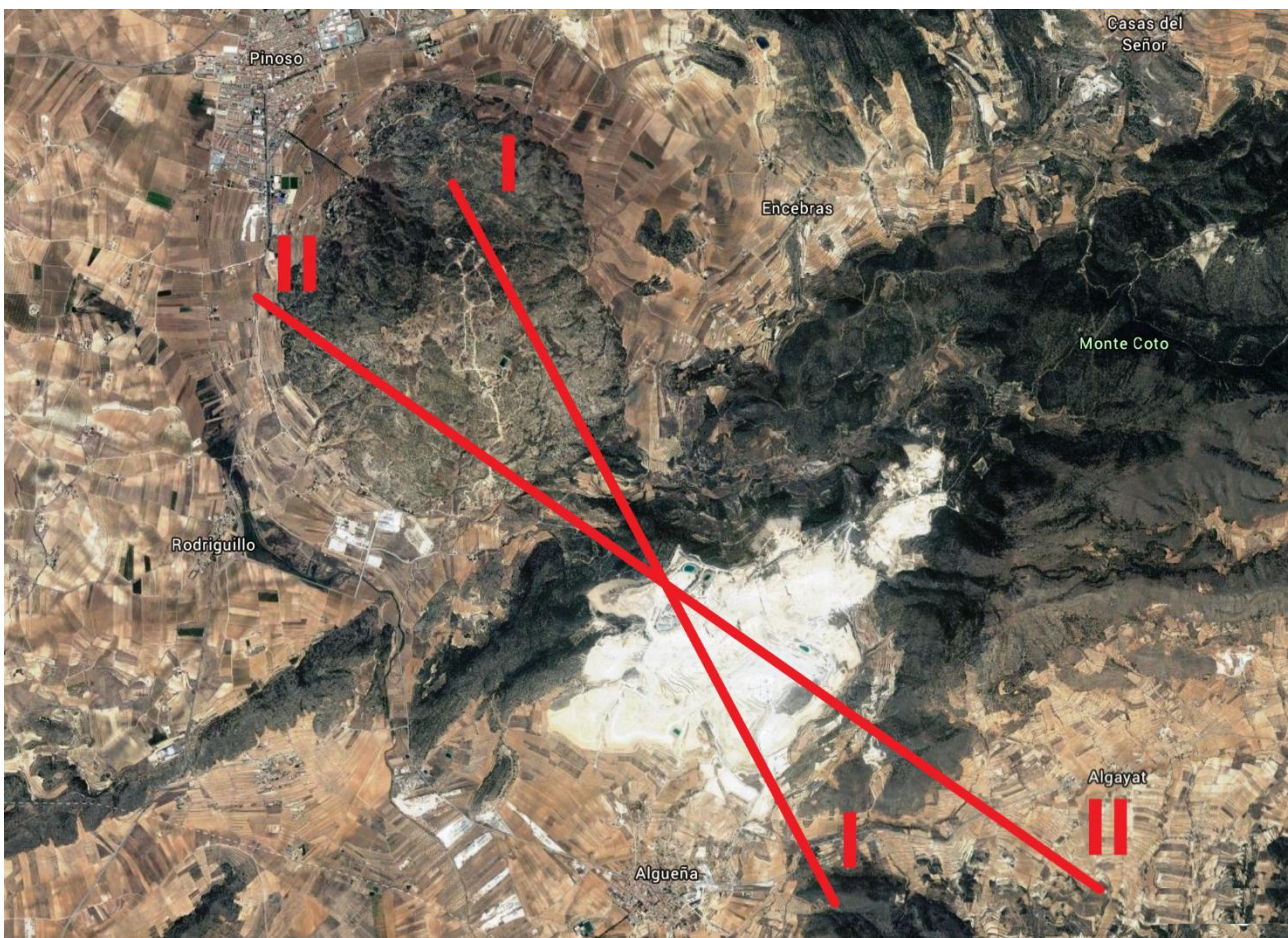
Localización	Polígono 18 Parcela 230 BARRANCO RITA. EL PINOS / PINOSO (ALICANTE)
Superficie gráfica	6.934.918 m <sup>2</sup>



## 4.2. CONTEXTO GEOLÓGICO Y LITOLÓGICO DE LA ZONA

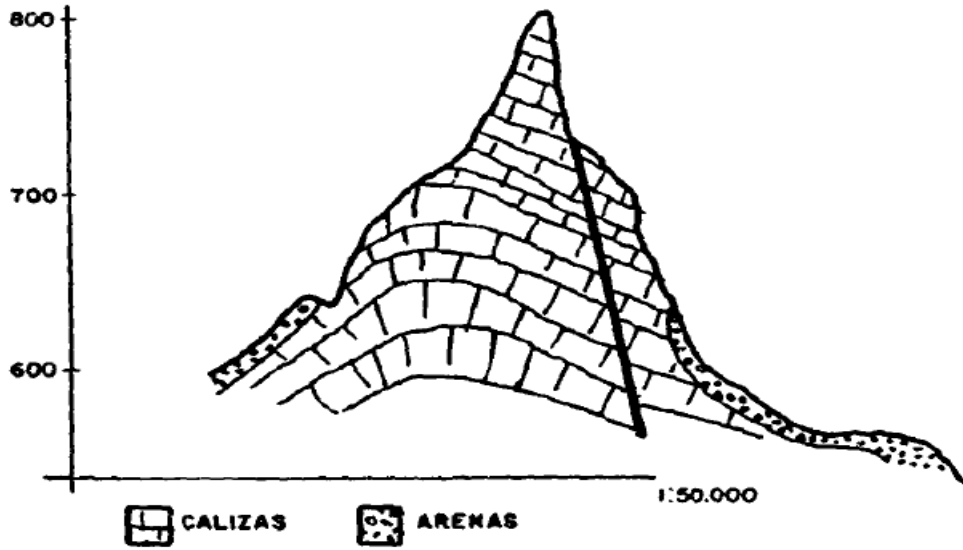
La región en la que está enclavada el área de estudio se sitúa en la parte oriental de las zonas externas de las Cordilleras Béticas. Bajo un punto de vista tecto-sedimentario aparecen representados en dicha región materiales de relleno Neógeno-cuaternarios.

En la siguiente imagen se muestra la situación de los cortes geológicos que muestran la estructura de la Sierra y la disposición de los materiales.

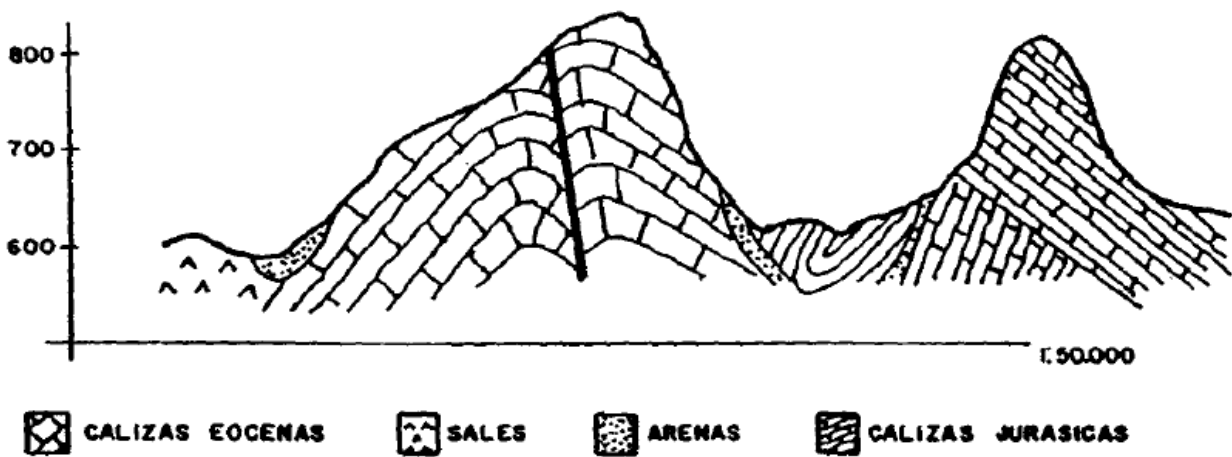




**CORTE - I**



**CORTE - II**





En el Prebético interno se distinguen diversas facies en los materiales que lo componen. Se localizan en este dominio las calizas eocenas de la Formación Coto donde actualmente se están explotando bajo la denominación comercial “Crema Marfil”. Afloran dentro de la provincia de Alicante, en los términos de Pinoso, Monóvar, La Romana y La Algueña, siendo los únicos materiales del Prebético que reúnen las características apropiadas para uso ornamental.

Litológicamente el mármol “Crema Marfil” es una caliza recristalizada de grano fino y color blanco-crema con algunas vetas de calcita irregularmente repartidas. El componente esencial es la calcita y como accesorios, minerales opacos.

El Subbético externo, formado por materiales de edad mesozoica y naturaleza predominantemente calcárea, constituye una unidad alóctona que en la zona de Monte Coto cabalga sobre el Prebético interno.

Finalmente, los sedimentos miocenos, pliocenos y cuaternarios forman el relleno de gran parte de los valles y zonas bajas de la región.

Bajo el punto de vista tectónico la Sierra del Coto y su prolongación oriental, macizo de Gorgori, conforman un gran anticlinal de dirección NE-SO, en parte oculto en los alrededores de Tres Fuentes por el cabalgamiento del manto subbético. Este pliegue, en la Sierra del Coto, está desarrollado sobre margas verdes y calizas numulíricas eocenas, mientras que los flancos están formados por calizas y margas oligocénicas.



Morfológicamente la zona del Coto constituye la prolongación oriental de la Sierra del Reclot, que presenta una dirección NE-SO a lo largo de 10km de longitud y unos 4km de amplitud máxima, alcanzando la altitud máxima en el pico de Algarejo (1.043m). El conjunto de la Sierra destaca sobre la morfología suave de llanura de 500-600m de altitud. Dentro de esta morfología también destaca, al NO de la Sierra del Coto, el diapiro salino de planta circular y unos 3,5km de diámetro conocido como el Cerro de la Sal, cuya cota máxima alcanza los 893m.

Las pendientes en general son fuertes; en la zona central y ladera Norte son del orden de 20-25%, mientras que en la ladera Sur llegan hasta el 50%.

La red de drenaje corresponde a una zona árida, de tipo torrencial que han dado lugar a los depósitos situados al pie de la Sierra y que actualmente son cultivados.

No existe ningún curso permanente de agua en la zona. Como cauces mayores, debe destacar la Rambla Villa que drena toda la región y su afluente la Rambla de las Tres Fuentes que drena el núcleo de la Sierra.



### 4.3. CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO

Posee una densidad aproximada de  $2,7 \text{ t/m}^3$  ya que se trata de una roca caliza. Se considera una densidad de orden medio, por lo que no es necesaria una excesiva energía para lograr una fragmentación exitosa, así como un buen desplazamiento y esponjamiento del material.

En cuanto a las características de resistencia del material:

<b>RESISTENCIA DINÁMICA A LA TRACCIÓN</b>	5 MPa	Fracturación por movimiento radial relativo a la zona circundante al barreno, causada por la onda de tensión
<b>RESISTENCIA DINÁMICA A LA COMPRESIÓN</b>	90 MPa	Fracturación por liberación de carga que se debe a la caída súbita de presión en el barreno, debida al escape de los gases
<b>RESISTENCIA DINÁMICA AL CIZALLAMIENTO</b>	NULO	Rotura inexistente en los planos de separación al paso de la onda de choque, ya que estamos ante formaciones rocosas sedimentarias.



Por lo que hace referencia a las propiedades mecánicas de las rocas:

<b>ÍNDICE DE POISON</b>	0,25	Propiedad elástica de las rocas que sirve para determinar las deformaciones elásticas provocadas en el mecanismo de la voladura
<b>MÓDULO DE YOUNG</b>	72.160 MPa	Sirve para determinar deformaciones elásticas provocadas en el mecanismo de la voladura
<b>LÍMITE ELÁSTICO DE HUGONIOT (incompresibilidad)</b>	5,52 (en 10GPa)	Para esfuerzos por debajo de este límite, las rocas actúan elásticamente y no experimentan ningún tipo de deformación





## 5. *METODOLOGÍA UTILIZADA*

Se entiende por vibraciones los fenómenos de transmisión de energía mediante la propagación de un movimiento ondulatorio a través de un medio. El fenómeno de vibraciones provocado por una fuente o emisor, esto es, un generador de vibraciones, y por un objeto o receptor de las mismas. El fenómeno de las vibraciones se manifiesta mediante un movimiento ondulatorio.

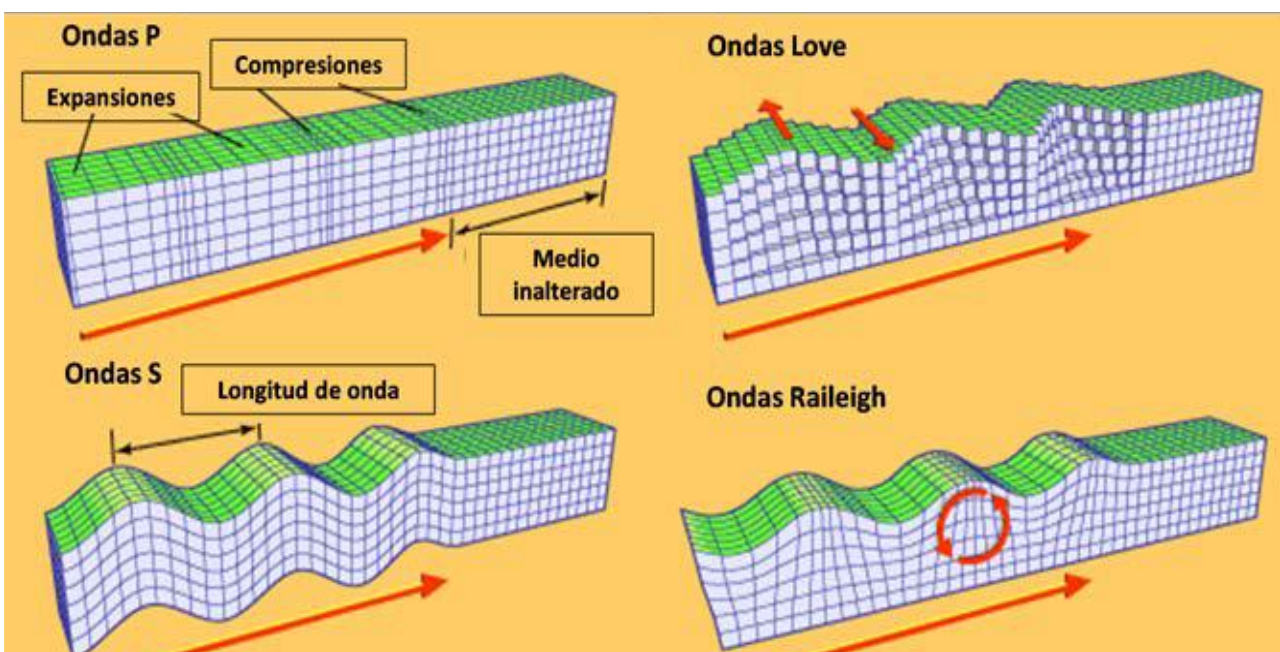
En la detonación de una masa de explosivo confinada en el interior de un barreno provoca, de manera súbita, una elevada presión que actúa como un impacto brusco sobre sus paredes, manifestándose en forma de onda de detonación que progresa a través de la masa de roca que envuelve el agujero. En definitiva, la máxima tensión soportada por un elemento de material circundante será función inversa de la distancia.

Se pueden distinguir varios aspectos del fenómeno. Uno de ellos es la propagación o transmitividad de la vibración por el medio y otro es el movimiento propio que el paso de la vibración genera en las partículas del medio (velocidad de onda y velocidad de partícula). En el caso de la velocidad de partícula posee una serie de parámetros medibles tales como el desplazamiento, la velocidad, aceleración de la partícula y frecuencia del movimiento ondulatorio.



Las distintas ondas mecánicas transmitidas a través del terreno se denominan ondas sísmicas, y se clasifican en dos grupos: ondas internas y ondas superficiales. En este estudio nos centraremos en las ondas internas.

- ❖ **ONDAS INTERNAS PRIMARIAS (ondas P):** se propagan dentro de los materiales, produciendo alternativamente compresiones y dilataciones, y dando lugar a un movimiento de las partículas en la dirección de propagación de las ondas. Son las más rápidas y producen cambios de volumen.
- ❖ **ONDAS INTERNAS TRANSVERSALES (ondas S):** dan lugar a un movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La velocidad de las ondas transversales está comprendida entre la de las ondas longitudinales y la de las ondas superficiales. Los materiales a causa de estas ondas experimentan cambios de forma pero no de volumen.
- ❖ Ya dentro de las ondas tipo S podemos encontrarnos las Ondas Love (ondas L) y las ondas Rayleigh (ondas R).





Las velocidades de las ondas P y S pueden estimarse a partir de las características elásticas de los materiales con las siguientes expresiones:

$VC_p = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{\rho \times (1 - 2\nu) \times (1 + \nu)}}$	$VC_s = \sqrt{\frac{E}{2 \times \rho \times (1 + \nu)}}$
<p>VC<sub>p</sub> = Velocidad ondas longitudinales</p> <p>VC<sub>s</sub> = Velocidad ondas transversales</p>	<p><math>\rho</math> = Densidad de la roca <math>\nu</math> = Coeficiente de Poisson E = Modulo de Young</p>

Es importante una correcta caracterización de estas ondas desde el punto de vista de la seguridad y el normativo.

Por un lado, las vibraciones transmitidas a estructuras circundantes pueden provocar daños en las mismas, así como la caída de objetos o rotura de partes frágiles que generan un peligro para las personas. Incluso en el caso de que no exista peligro, no es recomendable alcanzar alto nivel de estas que pudiera provocar molestias en los habitantes de la zona y alentar iniciativas sociales en contra de la explotación.

Por otro lado, es igualmente necesaria, la determinación de tipos de ondas existentes en los registros y sus tiempos en la llegada, pues son útiles para obtener datos de la voladura que puedan ayudar a mejorar la producción de la exploración y de este modo conseguir la optimización de algunos parámetros, por ejemplo, los relacionados con la morfología del macizo rocoso o la cantidad de energía que ha sido necesaria para fracturar los materiales.



La velocidad de partícula límite impuesta por las normativas depende de la frecuencia de vibración. La peor situación se produciría cuando la frecuencia de la onda que va a excitar una determinada estructura fuese igual a la frecuencia de resonancia de dicha estructura. En este caso, las longitudes de onda (inversas de la frecuencia) se aproximan a las longitudes de los elementos que constituyen las estructuras (múltiplos o submúltiplos) pudiéndose provocar resonancia, una máxima absorción de energía y daños.

Es por ello importante conocer la frecuencia que poseen las vibraciones producidas. Hay que tener en cuenta que los análisis de vibraciones no suelen llegar a distinguir entre si los diferentes tipos de ondas que llegan al geófono, y este entre otros es uno de los fines de este proyecto. Los trenes de ondas llegan casi simultáneamente al geófono, pues la diferencia de velocidad entre ellos es pequeña sumado a la pequeña distancia existente entre los barrenos y el aparato de medida (de 30 a 100 metros)

### **5.1. EQUIPOS DE MEDIDA BLASTMATE III**

Para recoger la oscilación generada por el terreno se emplean equipos de medida denominados sismógrafos.

- ❖ Una serie de sensores o elementos para captar ruido y las vibraciones del terreno transformándolos en impulsos eléctricos (micrófonos, velocímetros y acelerómetros).
- ❖ Un amplificador de señal.
- ❖ Un módulo de memoria para el almacenamiento de datos.
- ❖ Algunos modelos incorporan un sistema de impresión que visualiza y gestiona los datos (en el caso de este estudio se ha dispuesto de este tipo de modelo donde se ha podido imprimir los datos registrados en cada momento).



Los geófonos electrodinámicos son los más usados en la actualidad y están basados en el desplazamiento relativo de una bobina en el interior de un campo magnético lo que genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) proporcional a la velocidad de desplazamiento. Uno de los elementos (el imán o la bobina) se fija al aparato y, con éste, al terreno, mientras que el otro está libremente suspendido de aquel y por tanto permanece inmóvil. De esta forma, la velocidad de partícula resulta ser proporcional a la f.e.m. generada.





Los geófonos utilizados son tridireccionales, incorporado tres sensores de velocidad colocados perpendicularmente entre sí para captar la vibración producida en las tres direcciones del espacio. Así puede conocer el movimiento en la dirección trasversal, vertical y longitudinal, y además de la onda aérea por medio de un micrófono.

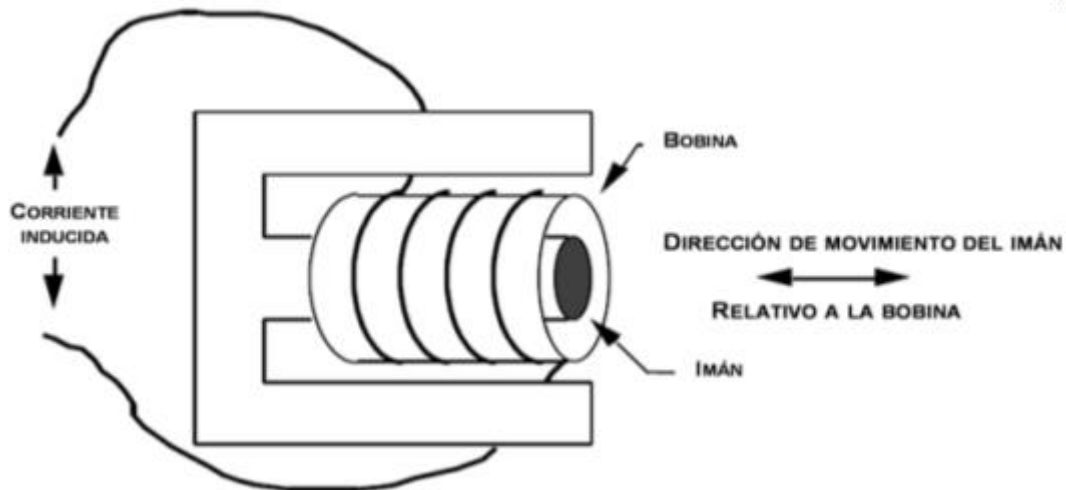
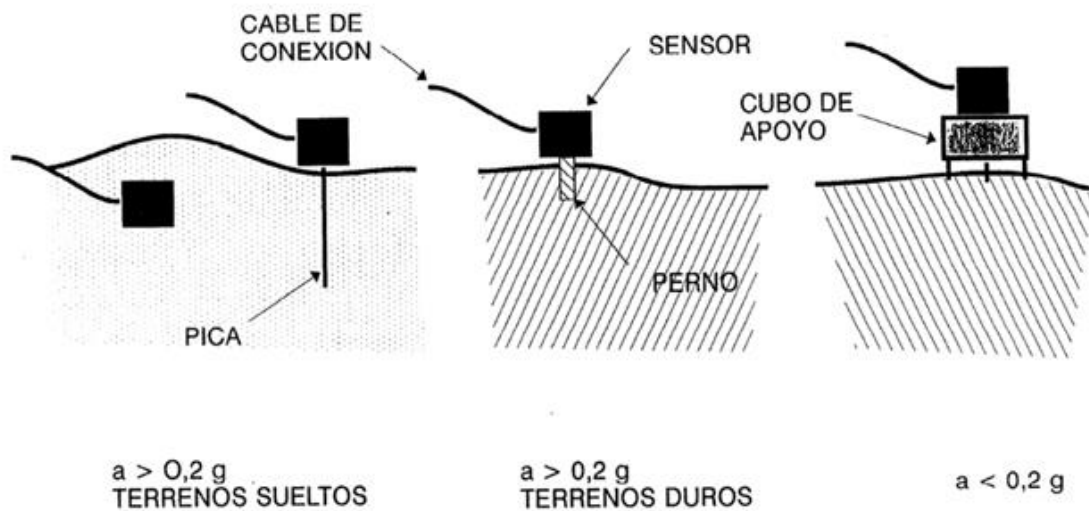


Ilustración 2. Muestra de la disposición del equipo de medida en el caso de nuestro estudio.



La colocación de estos aparatos al terreno dependerá lógicamente de la superficie de fijación y de la magnitud esperable del movimiento a medir. Si se dispone de una superficie plana y horizontal y no es probable que la aceleración del movimiento vibratorio supere el valor de  $0,2g$ , siendo “g” la aceleración de la gravedad, el sensor puede estar simplemente apoyado sobre dicha superficie. En otras circunstancias, el sensor habrá de ser enterrado en el terreno o fijado al mismo mediante un sistema apropiado de adherencia o anclaje.





## 6. TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

Una vez expuestas las variables de las voladuras a las que está ligado el resultado de las mismas, las características del medio rocoso donde se ha efectuado el estudio y las propiedades del equipo de medida y registro; procedemos al análisis de los datos tomados en cada uno de los registros.

Se han medido las vibraciones generadas por 4 voladuras diferentes en las que se han utilizado los siguientes explosivos:

- ❖ NAGOLITA: en este caso se ha empleado en voladuras de rocas blandas (calizas margosas) como carga de columna, utilizando como carga de fondo un hidrogel o un explosivo gelatinoso.
- ❖ HIDROGEL: es el explosivo utilizado como carga de fondo por excelencia. Este explosivo al ser bastante estable hace necesario el uso de detonadores para iniciar la explosión.
- ❖ CORDON DETONANTE: cordón flexible y detonante, impermeable, que contiene pentrita, explosivo con alta velocidad de detonación. Utilizado para transmitir a los explosivos la detonación inicialmente producida por el detonador. En las voladuras se ha utilizado cordón detonante de 12gr/m.
- ❖ DETONADORES NO ELECTRICOS: consta de un tubo de plástico que aloja en su interior una sustancia reactiva que mantiene la propagación de una onda de choque a una velocidad de 2.000m/s. Esta onda de choque tiene suficiente energía para iniciar un detonador de potencia óctuple. Los detonadores no eléctricos están disponibles con varios tiempos de retardo y diversas longitudes de tubo.





Se ha trabajado con dos tipos de voladuras que tienen distinto diseño, con características diferentes en la carga de iniciación de los barrenos, justificadas por las diferencias del macizo rocoso que se desea fragmentar en cada caso.

Los dos tipos de voladura son:

- ❖ VOLADURAS CONVENCIONALES EN BANCO: aquellas que están constituidas por varias filas de barrenos de profundidades variables según la altura del banco, destinadas a fragmentar material de mala calidad. En el caso de nuestro estudio, se han empleado para el desmonte en una zona donde se desea realizar una pista.



*Ilustración 3. Imagen tomada de una de las voladuras convencionales en banco estudiadas.*



- ❖ VOLADURAS CON PRECORTE MECANIZADO: aquellas en las que el material a aprovechar, por su mala calidad, no puede ser aprovechado para la obtención de bloques de caliza ornamental. Este material se fragmenta mediante el empleo de explosivos, con la peculiaridad que el bloque a fragmentar (torta) está independizado del resto del macizo rocoso mediante precorte mecanizado (rozadora de cadena y rozadora de hilo diamantado).



*Ilustración 4. Imagen tomada de una de las voladuras estudiada en mármol con precorte mecanizado.*



En la práctica estamos ante los dos posibles tipos de voladura anteriormente citados. Voladuras en banco convencionales para la implantación de nuevas pistas en la explotación o para realización de desmonte y voladuras con precorte mecanizado para el aprovechamiento del material no apto para bloques de roca ornamental.

### **Parámetros de las voladuras en banco:**

*Diámetro de perforación:* depende de la producción horaria, o ritmo de excavación, y de la resistencia de la roca. Para la ejecución de este tipo de pegadas se ha empleado un **diámetro de perforación de 89mm**, realizados con una perforadora hidráulica de martillo en cabeza.

*Altura del banco:* en función del equipo de carga y del diámetro de perforación. En este caso como se utilizan palas cargadoras sobre neumáticos y diámetro de perforación de 90mm, **la altura de banco recomendada está comprendida entre los 12 y 15m.**

*Esquemas de perforación, sobreperforación y retacado:* El valor de la piedra depende del diámetro de los barrenos, de las características de las rocas y de los tipos de explosivo empleados. Como en este caso la distribución de la carga del barrenos es selectiva, con un explosivo de alta densidad y potencia en el fondo, y otro de baja densidad y potencia media en la columna, los valores de la piedra (B) oscilan entre 33 y 39 veces el diámetro de barreno, dependiendo de la resistencia de la roca y de la altura de la carga de fondo. Por esta razón, la relación de entre el diámetro y la piedra en nuestro caso es de 39 veces, por lo que la piedra son **B=3,5m.**



El espaciamiento (S) entre barrenos de una misma fila varia entre 1,15 veces la piedra, para rocas duras y 1,3 veces la piedra para rocas blandas. En este caso se ha utilizado un esquema de mallas cuadradas, por lo tanto **S=3,5m**.

La longitud del retacado (R) y de la sobreperforación (J) se calculan en función del diámetro de los barrenos y de la resistencia de la roca. Para los casos estudiados **la sobreperforación será de 1m y el retacado superior será 2m**.

*Inclinación de los barrenos:* los barrenos presentan una inclinación de 12°, suficiente para mejorar el rendimiento de la operación de carga al conseguir un mayor esponjamiento y mayor desplazamiento de los escombros.

*Distribución de las cargas:* Los barrenos van a tener una distribución de carga continua con un cartucho cebo de 50mm de Riogel 2 en el fondo de barrenos y Nagolita a granel como carga en columna. En total, cada barreno contará con **2 cartuchos de Riogel** (1m), **carga en columna de Nagolita**, 2m de retacado y 1m de sobreperforación (la longitud de la carga de Nagolita será la resta de la longitud total de barreno y 4m). Con densidades de explosivos de 1,19kg por cartucho de Riogel 2 y 4,97 kg/m. lineal.

*Esquema de encendido:* mediante la combinación de detonadores no eléctricos y conectores en superficie de distintos tiempos de micro-retardo entre barrenos conseguiremos que no exista un solape de cargas (intervalos de 8ms o inferiores de salida de más de un barreno). Para ello se han utilizado detonadores N°8 MS 20 en el cebado en fondo y detonadores en superficie SCX (conectores) J N° 6 de 64, 42 y 17 MS.



<b>RESUMEN VOLADURAS CONVENCIONALES EN BANCO CARACTERISTICAS DE LOS BARRENOS</b>	
Diámetro de los barrenos	89mm
Altura media del barreno	De 11m a 15m
Piedra (B)	3,5m
Espaciamiento (S)	3,5m
Disposición	Malla cuadrada
Inclinación	12°
Sobreperforación	1m
Nagolita a granel	4,97 kg/m. lineal
Riogel 2	2u. 1,19 kg/cartucho
Detonadores no eléctricos	1u./barreno MS20
Conectores no eléctricos	1u./barreno SCX 64, 42, 17, 9 MS



## **Parámetros de las voladuras con precorte mecanizado:**

Las tortas (bloques primarios) que no son aprovechables por estar muy diaclasadas o con mala calidad ornamental, tienen que ser fragmentadas mediante voladuras.

El volumen de roca a volar suele tener dimensiones variables, dependiendo de las dimensiones del banco. La dimensión fija únicamente es el grosor, 3m que es la longitud máxima que puede cortar la rozadora de cadenas, la altura es variable, como máximo 12m y la longitud también, estando comprendida entre los 20 y 40 m.

Diámetro del barreno: para la fragmentación de este material de calidad inferior se ha utilizado un **diámetro de 45mm** entubado con PVC.

Altura del banco: corresponde con la altura de los bancos empleada en la explotación de roca ornamental. Por lo tanto, estamos hablando de **11m de longitud de barreno**, cuando el bloque a fragmentar tiene un total de 12m de altura.

Esquemas de perforación, sobreperforación y retacado: El valor de la piedra depende del diámetro de los barrenos, de las características de las rocas y de los tipos de explosivo empleados. En este caso, necesitamos la mayor fragmentación posible, ya que este material será aprovechado en un molino, por lo tanto, cuanto mayor sea el grado de fragmentación, mayor será la rentabilidad del proceso, por ello la disposición de los barrenos es al tresbolillo.

**Con 1,8m de piedra (B) y 1,5m de espaciamento (S). El retacado consta de 2m de arena fina para evitar la expansión por la boca del barreno. No existe sobreperforación.**



**Inclinación de los barrenos:** No existe inclinación, estamos ante **barrenos verticales.**

**Distribución de las cargas:** la carga va distribuida en cuatro partes, tres de 2kg de Nagolita y una, situada en el extremo inferior del barreno de 4kg de Nagolita, lo que hacen un total de 10kg de Nagolita por barreno. Estas cargas van separadas con retacados intermedios de arena fina, al igual que el retacado superior. Las cargas divididas van unidas entre si con cordón detonante de 12gr/m, el cual lleva colocado un detonador no eléctrico con el motivo de iniciar el explosivo.

**Esquema de encendido:** se han utilizado detonadores N°8 MS 20 para iniciar el cordón detonante y seguidamente la Nagolita, y detonadores en superficie SCX (conectores) J N° 6 de 42 MS.

<b>RESUMEN VOLADURAS EN BLOQUE DE CALIZA MARMOREA CON PRECORTE MECANIZADO</b>	
Diámetro de los barrenos	45mm tubo PVC
Altura media del barreno	11m máx.
Piedra (B)	1,8m
Espaciamiento (S)	1,5m
Disposición	Malla a tresbolillo
Inclinación	No existe
Sobreperforación	No existe
Nagolita a granel	4,97 kg/m. lineal
Detonadores no eléctricos	1u./barreno MS20
Conectores no eléctricos	1u./barreno SCX 42 MS



Una vez definidos los parámetros de los diferentes tipos de las voladuras estudiadas, se van a analizar los resultados tomados de cada una de las pruebas, relacionando el sismograma con algunos de los parámetros variables que existen de la pega, como lo son el número de barrenos, altura, material a fragmentar, entre otros.

Los datos de las voladuras y resultados de los registros se acompañan también de fotografías tomadas en campo en las que se observa la posición de la voladura en el macizo, el desplazamiento de la pila y la fragmentación.



*Ilustración 5. Puesta en la primera prueba.*





## 14/05/2018 VOLADURA CONVENCIONAL EN BANCO



INSTANTEL BlastMate JII

Serial Number BA13823 V 8.12-8.0  
Trigger Source Geo 2.00 mm/s  
Geo Range 254.0 mm/s  
Record Time 286.5s Auto 2048 sps

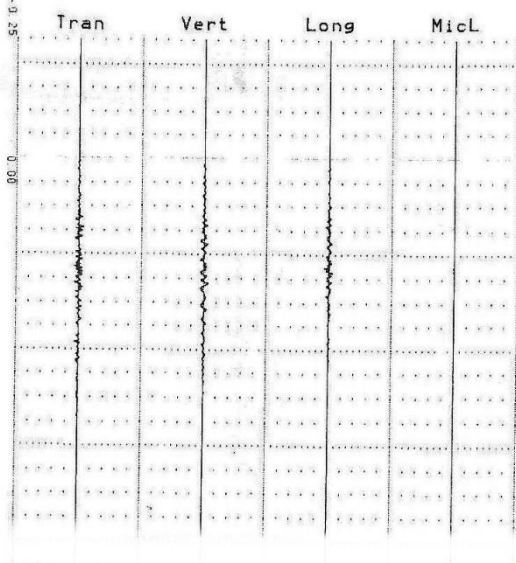
Trigger Long at 14:13:22 May 14 18

	Tran	Vert	Long	
PPV	***	157.4	***	mm/s
ZC Freq	12.3	45	73	Hz
Time	6.322	6.247	6.292	sec
Accel	69.4	30.1	67.5	g
Pk Disp	3.91	2.41	1.97	mm

PVS \*\*\* mm/s at 6.247 Sec

PSPL 128.3 dB(L) at 6.272 Sec  
24 Hz  
\*\*\*: Out of Range

Monitor Log  
May 14 18 13:24:40 May 14 18 14:18:09  
Event recorded(Memory Full Exit)



Nº barrenos	45	Diámetro (D) (mm)	89
Piedra (B) (m)	3,5	Espaciamiento (S) (m)	3,5
Retacado (R) (m)	2	Sobreperforación (J) (m)	1
Inclinación (m)	12º	Altura banco media (m)	15
Carga op. (kg/b)	62	Nagolita (m)	12
Riogel (cart. 0,5m)	2u.	Conectores SCX 17ms	9
Filas	5	Conectores SCX 42ms	27
Columnas	9	Conectores SCX 9ms	9
Tiempo total (ms)	360	Distancia al geo (m)	45
Resultados pico de las ondas (mm/s)	Onda Transversal	x	
	Onda Vertical aprox.	3,5	
	Onda longitudinal	x	
Tiempo actuación del pico ondas después del inicio de la pega (ms)	Onda Transversal	x	
	Onda Vertical aprox.	270	
	Onda longitudinal	x	
Observaciones	<p>Calizas margosas (dureza blanda)</p> <p>Contacto margas/mármol a 20m de la voladura.</p> <p>Uno de los principales inconvenientes en esta pega fue el desperfecto que sufrió el equipo. Ya que uno de los bolos lanzado por los gases de explosión, impactó en el cableado del sismógrafo, cortando y dejándolo incomunicado. Registrándose un total de 286s, por lo que, se completó la memoria y sobredimensionó la escala de los resultados. A pesar de ello, se consiguieron de forma gráfica y aproximada, los valores picos de las ondas registradas.</p>		



En este primer caso y una vez expuestos los resultados del estudio en la tabla anterior, estamos ante una voladura de 2790kg en total de explosivo, con dos cartuchos de Riogel 2 como carga de fondo y Nagolita en columna. Presenta un esquema de voladura con malla cuadrada con conectores SCX 17, 42 y 9 ms en superficie distribuidos en sus diferentes filas. Se realizó con objetivo de desmonte para la implantación posterior de una pista para los diferentes equipos y vehículos de la explotación.

A causa del incidente con uno de los bolos, anteriormente citado, se tuvo que analizar gráficamente el sismograma para hallar de forma manual el resultado pico de la onda vertical, llegando a los 3,5 mm/s. Un valor acorde a las condiciones en las que nos encontrábamos. Hay que destacar que el geófono dejó monitoreando con un rango de disparador del gatillo de 2mm/s, valor que en las posteriores pegase se reduciría para evitar posibles rangos de vibraciones inferiores y, por lo tanto, se podría llegar a no registrar nada.



*Ilustración 6. Voladura convencional en banco efectuada el 14/05/2018*



*Ilustración 7. Disposición del equipo BLASTMATE III protegido improvisadamente por una placa porta implementos.*

En cuanto a la fragmentación final del producto, podemos decir que el resultado fue satisfactorio, ya que no presentaba grandes bolos que posteriormente podría dificultar la carga y descarga de los escombros. Por lo que se refiere a la pila de escombros, presentaba una cierta dispersión y poca altura, algo molesto para los neumáticos de las palas cargadoras y para la operación de carga.



*Ilustración 8. Fragmentación final (pila de escombros).*



## 15/06/2018 VOLADURA EN BLOQUE DE CALIZA MARMOREA CON PRECORTE MECANIZADO

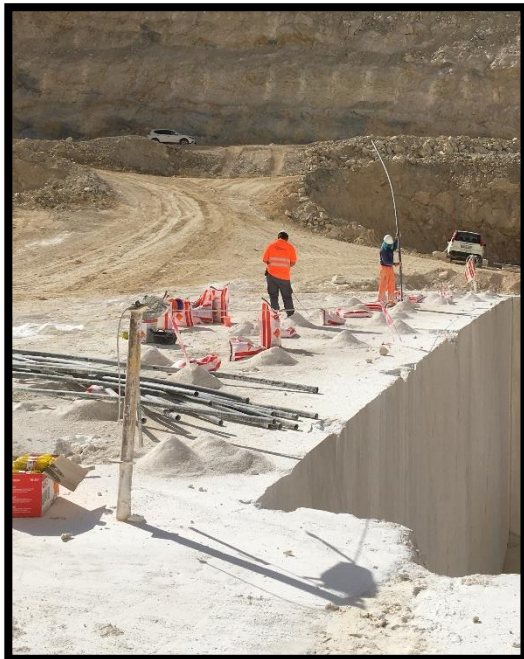
<p><b>Instantel®</b> INSTANTEL BlastMate III</p> <p>Serial Number BA13823 V 8.12-8.0 Trigger Source Geo 1.000 mm/s</p> <p>Geo Range 254.0 mm/s Record Time 3.5s Auto Z048 sps</p> <p>Trigger Long at 12:35:40 Jun 15 18</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tran</th> <th>Vert</th> <th>Long</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PPV</td> <td>5.84</td> <td>8.76</td> <td>6.35</td> <td>mm/s</td> </tr> <tr> <td>ZC Freq</td> <td>7.200</td> <td>4.9</td> <td>1.208</td> <td>Hz</td> </tr> <tr> <td>Time</td> <td>0.197</td> <td>0.018</td> <td>0.041</td> <td>sec</td> </tr> <tr> <td>Accel</td> <td>0.636</td> <td>0.398</td> <td>0.610</td> <td>g</td> </tr> <tr> <td>Pk Disp</td> <td>0.0135</td> <td>0.0286</td> <td>0.0106</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>PVS 9.08 mm/s at 0.019 Sec PSPL 88.0 dB(L) at 0.008 Sec 128 Hz</p> <p>Tran Vert Long MicL</p> <p>2.00 mm/s/div 5.00 pa.(L)/div</p>		Tran	Vert	Long		PPV	5.84	8.76	6.35	mm/s	ZC Freq	7.200	4.9	1.208	Hz	Time	0.197	0.018	0.041	sec	Accel	0.636	0.398	0.610	g	Pk Disp	0.0135	0.0286	0.0106	mm	Nº barrenos	27	Diámetro (D) (mm)	45
		Tran	Vert	Long																														
	PPV	5.84	8.76	6.35	mm/s																													
	ZC Freq	7.200	4.9	1.208	Hz																													
	Time	0.197	0.018	0.041	sec																													
	Accel	0.636	0.398	0.610	g																													
	Pk Disp	0.0135	0.0286	0.0106	mm																													
	Piedra (B) (m)	1,8	Espaciamiento (S) (m)	1,5																														
	Retacado (R) (m)	2	Sobreperforación (J) (m)	0																														
	Inclinación (m)	0	Altura banco media (m)	11																														
Carga op. (kg/b)	10,2	Nagolita (kg)	10																															
Cordón Det. (gr/m)	12	Conectores SCX 17ms	0																															
Filas	2	Conectores SCX 42ms	27																															
Columnas	14	Conectores SCX 9ms	0																															
Tiempo total (ms)	630	Distancia al geo (m)	50																															
Resultados pico de las ondas (mm/s)	Onda Transversal	5,84																																
	Onda Vertical	8,76																																
	Onda longitudinal	6,35																																
Tiempo actuación del pico ondas después del inicio de la pega (ms)	Onda Transversal	190																																
	Onda Vertical aprox.	90																																
	Onda longitudinal	40																																
Observaciones	<p>Caliza marmórea (dureza media/alta)</p> <p>Contacto margas/mármol inexistente</p> <p>Voladura efectuada a causa de la calidad pésima del material.</p> <p>Interesa una fragmentación óptima, ya que posteriormente, el material volado será introducido al molino.</p>																																	



En el caso de este tipo de voladuras, como se ha comentado en el apartado anterior, la carga se entuba en PVC de 45mm de diámetro y la iniciación del explosivo se efectúa con cordón detonante, iniciado por un detonador N° 8 de 20 ms en superficie. Uso de detonadores SCX J 42ms para la secuenciación.



*Ilustración 9. Segunda puesta en voladura en bloque con precorte mecanizado.*



*Ilustración 10. Carga de la voladura en bloque con precorte mecanizado.*



*Ilustración 11. Momento del disparo.*



El objetivo de esta pega es el aprovechamiento del material de pésima calidad en el molino, por lo tanto, la fragmentación en este tipo de voladuras cobra una gran importancia.

El resultado, en este caso, no fue muy adecuado. Se observan bolos de tamaño medio. Pudiendo ser debido al diaclasado inicial del bloque, fracturando la roca por donde no se desea con el paso de los gases de alta presión. Como se ha comentado en uno de los puntos anteriores, las discontinuidades en el material es un gran inconveniente en las voladuras, a causa del escape prematuro de los gases.



*Ilustración 12. Fragmentación final del bloque*

A pesar del precorte mecanizado que sufría el bloque, se llegaron a registrar valores de velocidad de partícula algo superiores. Pudiendo ser dañino para las estructuras cercanas y/o para el macizo de “crema marfil” contiguo al bloque. El valor máximo se registra en la componente vertical, siendo de 8,76 mm/s.



Hay que destacar que los picos registrados en cada una de las componentes (vertical, longitudinal y transversal) son registrados en el momento inicial de la pega (rangos de 90 a 190 ms, total pega = 630ms). Mientras que, en el estudio anterior, realizando el análisis en una voladura convencional en banco, los picos se registraron en el último tercio del tiempo total de la pega (pico registrado en el momento 270ms, total pega = 360ms). Esto podría ser debido a las características del macizo rocoso y la existencia o no de un contacto de diferentes estructuras litológicas entre la localización de la voladura y la puesta del geófono.



## 10/07/2018 VOLADURA CONVENCIONAL EN BANCO (en rampa)

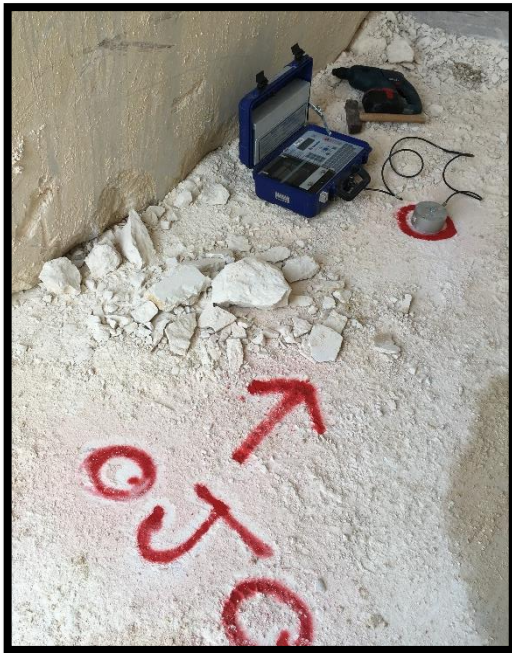
<p><b>Instantel®</b> INSTANTEL BlastMate III Serial Number BA13823 V 8.12-8.0 Trigger Source Geo 0.700 mm/s Geo Range 254.0 mm/s Record Time 3.7s Auto 2048 sps</p> <p>Trigger Long at 12:56:52 Jul 10 18</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tran</th> <th>Vert</th> <th>Long</th> <th>Hz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PPV</td> <td>5.21</td> <td>3.68</td> <td>3.94</td> <td>mm/s</td> </tr> <tr> <td>ZC Freq</td> <td>0.43</td> <td>0.94</td> <td>0.11</td> <td>Hz</td> </tr> <tr> <td>Time</td> <td>0.277</td> <td>0.186</td> <td>0.318</td> <td>ms</td> </tr> <tr> <td>Accel</td> <td>0.242</td> <td>0.186</td> <td>0.318</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Pk Disp</td> <td>0.0245</td> <td>0.0120</td> <td>0.00809</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>PVS 5.47 mm/s at 0.129 Sec PSPL 88.0 dB(L) at 0.035 Sec &gt;200 Hz</p>		Tran	Vert	Long	Hz	PPV	5.21	3.68	3.94	mm/s	ZC Freq	0.43	0.94	0.11	Hz	Time	0.277	0.186	0.318	ms	Accel	0.242	0.186	0.318	mm	Pk Disp	0.0245	0.0120	0.00809	mm	Nº barrenos	35	Diámetro (D) (mm)	89
		Tran	Vert	Long	Hz																													
	PPV	5.21	3.68	3.94	mm/s																													
	ZC Freq	0.43	0.94	0.11	Hz																													
	Time	0.277	0.186	0.318	ms																													
	Accel	0.242	0.186	0.318	mm																													
	Pk Disp	0.0245	0.0120	0.00809	mm																													
	Piedra (B) (m)	3,5	Espaciamiento (S) (m)	3,5																														
	Retacado (R) (m)	2	Sobreperforación (J) (m)	1																														
	Inclinación (m)	12º	Altura banco media (m)	9																														
Carga op. (kg/b)	18	Nagolita (m)	6																															
Riogel (cart. 0,5m)	2u.	Conectores SCX 17ms	26																															
Filas	4	Conectores SCX 42ms	0																															
Columnas	9	Conectores SCX 64ms	9																															
Tiempo total (ms)	600	Distancia al geo (m)	120																															
Resultados pico de las ondas (mm/s)	Onda Transversal	5,21																																
	Onda Vertical aprox.	3,68																																
	Onda longitudinal	3,94																																
Tiempo actuación del pico ondas después del inicio de la pega (ms)	Onda Transversal	277																																
	Onda Vertical aprox.	191																																
	Onda longitudinal	115																																
Observaciones	<p>Calizas margosas (dureza blanda)</p> <p>Contacto margas/mármol a 70m de la voladura.</p> <p>En este caso, trata de una voladura en forma de rampa con una altura de banco media de 10m.</p> <p>Posible solape de registro de vibraciones, ya que la explotación vecina disparó la pega segundos después de que se iniciara la de este estudio.</p>																																	



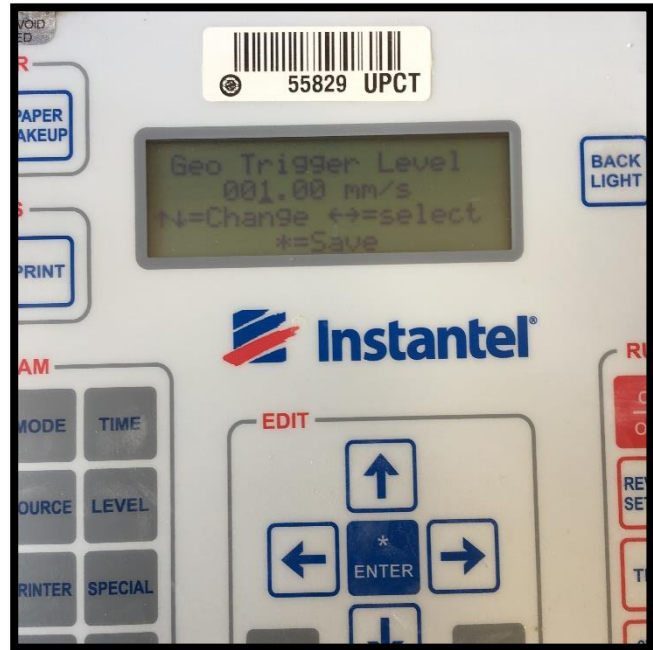


Para este desmonte, se utilizó un total de 700kg de explosivo. Hay que tener en cuenta que la voladura presentaba una rampa, por lo tanto, la altura total media del barreno es de 9m.

Para la secuenciación y conexión de esta pega, se formaron 5 filas con 9 columnas. La malla que presentaba era cuadrada, con dos cartuchos de Riogel como carga de fondo y Nagolita como carga de columna. Conectores J en superficie SCX de 64ms en la primera fila y 17ms en las filas restantes.



*Ilustración 13. Tercera puesta del estudio.*



*Ilustración 14. Condición SOURCE TIGGER, valor a sobrepasar para empezar el registro.*



*Ilustración 15. Carga de la voladura convencional en banco.*



*Ilustración 106. Representación en alzado de la voladura, formando una rampa y con diferentes alturas de barreno.*

En cuanto al resultado final de la pega, podemos decir que fue satisfactoria, ya que la pila de escombros está bien lograda, sin demasiada dispensación de bolos, tamaño regular de los mismos y una altura acorde al equipo de carga.



*Ilustración 13. Fragmentación final de la tercera pega estudiada en este proyecto.*




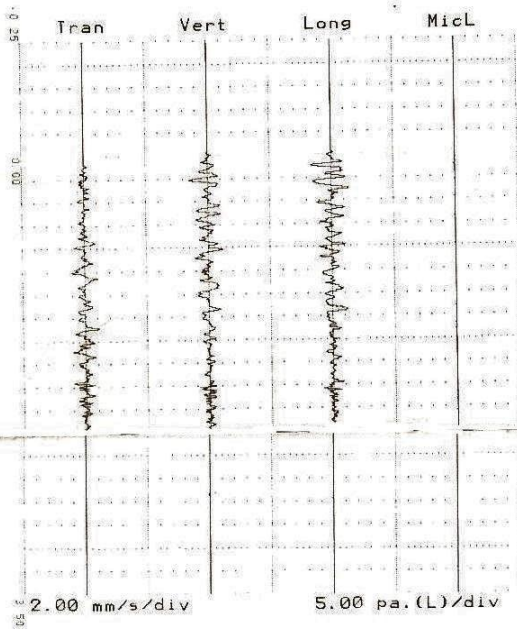
Se registraron valores de velocidad de partícula al elevados teniendo en cuenta la cantidad de explosivo, distancia de la voladura al geófono y existencia de contacto de diferentes litologías. Llegando a un pico en la componente transversal de 5,21mm/s. Pudiendo ser debido a la diferencia de alturas entre los barrenos y la misma carga de fondo, tanto para barrenos con  $h = 13\text{m}$  como para los de  $h = 5\text{m}$ .

El material fragmentado, se puede clasificar con dureza baja-media, ya que consta de una caliza margosa realizando un contacto entre diferencias litológicas, dando lugar a una caliza marmórea de dureza media-alta.

También hay que tener en cuenta que, en la realización de esta pega, puede haber existido un solape de registro en las vibraciones con otra voladura en banco. Este posible solape en el registro se debe a que la explotación vecina, realizó otro disparo segundos después de la que se iniciara en nuestro estudio.



## 23/07/2018 VOLADURA CONVENCIONAL EN BANCO

<div style="text-align: center;">  <p><b>INSTANTEL BlastMate III</b></p> <p>Serial Number      BA13823 V 8.12-8.0 Trigger Source      Geo 0.700 mm/s</p> <p>Geo Range            254.0 mm/s Record Time         3.5s Auto 2048 sps</p> <p>Trigger      Long at 12:55:14 Jul 23 18</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Tran</th> <th>Vert</th> <th>Long</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ppv</td> <td>2.41</td> <td>3.05</td> <td>3.43</td> <td>mm/s</td> </tr> <tr> <td>ZC Freq</td> <td>41</td> <td>49</td> <td>57</td> <td>Hz</td> </tr> <tr> <td>Time</td> <td>0.374</td> <td>0.054</td> <td>0.024</td> <td>sec</td> </tr> <tr> <td>Accel</td> <td>0.133</td> <td>0.159</td> <td>0.159</td> <td>g</td> </tr> <tr> <td>Pk Disp</td> <td>0.0107</td> <td>0.0113</td> <td>0.0148</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>PVS            3.56 mm/s at 0.024 Sec PSPL         88.0 dB(L) at 0.014 Sec                  &gt;200 Hz</p> <div style="margin-top: 20px;">  </div> </div>		Tran	Vert	Long		ppv	2.41	3.05	3.43	mm/s	ZC Freq	41	49	57	Hz	Time	0.374	0.054	0.024	sec	Accel	0.133	0.159	0.159	g	Pk Disp	0.0107	0.0113	0.0148	mm	Nº barrenos	30	Diámetro (D) (mm)	89
		Tran	Vert	Long																														
	ppv	2.41	3.05	3.43	mm/s																													
	ZC Freq	41	49	57	Hz																													
	Time	0.374	0.054	0.024	sec																													
	Accel	0.133	0.159	0.159	g																													
	Pk Disp	0.0107	0.0113	0.0148	mm																													
	Piedra (B) (m)	3,5	Espaciamiento (S) (m)	3,5																														
	Retacado (R) (m)	2	Sobreperforación (J) (m)	1																														
	Inclinación (m)	12º	Altura banco media (m)	15																														
	Carga op. (kg/b)	62	Nagolita (m)	12																														
	Riogel (cart. 0,5m)	2u.	Conectores SCX 17ms	10																														
	Filas	3	Conectores SCX 42ms	20																														
	Columnas	10	Conectores SCX 64ms	0																														
	Tiempo total (ms)	250	Distancia al geo (m)	100																														
Resultados pico de las ondas (mm/s)		Onda Transversal	2,41																															
		Onda Vertical aprox.	3,05																															
		Onda longitudinal	3,43																															
Tiempo actuación del pico ondas después del inicio de la pega (ms)		Onda Transversal	170																															
		Onda Vertical aprox.	54																															
		Onda longitudinal	24																															
Observaciones	<p>Calizas margosas (dureza blanda)</p> <p>Contacto margas/mármol a 30m de la voladura.</p>																																	



Estamos ante la última voladura registrada, en la cual se utilizaron unos 1800kg de explosivo, teniendo en cuenta la carga de ANFO en columna y los dos cartuchos de Riogel en el fondo por barreno.

Presentando una malla cuadrada y con la intención de realizar un desmonte para la creación de una nueva pista para los diferentes equipos y vehículos de la explotación. Ya que, para seguir la dirección del material explotado, es necesaria la reorganización de las pistas para conservar unas alturas y bermas de talud suficientes para garantizar la seguridad.

En cuanto a la conexión de la pega, se han utilizado conectores J en superficie SCX de 17ms (para la primera fila de 10 barrenos) y 42ms para (las siguientes dos filas de 10 barrenos cada uno). Haciendo un tiempo total de voladura de 250ms.



*Ilustración 14. Carga de la voladura convencional en banco.*



*Ilustración 15. Banco a realizar el desmonte mediante voladura no eléctrica.*



La fragmentación que se presenta en el resultado final es adecuada, ya que no se muestran grandes bolos ni gran dispersión de la pila de escombros. Debido a una buena carga operante por barreno para las características que muestran el material, como ya se ha comentado anteriormente, estamos ante una caliza margosa de dureza baja-media.

La secuenciación de los detonadores de diferentes tiempos hace posible la dirección y sentido en la que los escombros se apilarán para que posteriormente, la operación de carga se realice con mayor facilidad. De este modo, la operación de desmonte resulta más económica para la sociedad encargada de la explotación.



*Ilustración 16. Fragmentación final.*



## 7. CONCLUSIONES

Los objetivos establecidos de forma previa y que dependían de la realización de una completa metodología de campo, han resultado muy ambiciosos, por lo que se ha tenido que reducir el alcance por la dificultad de implementar los aparatos en el día a día de la explotación. Se ha trabajado, pues, en una toma de contacto que permitirá establecer las fórmulas de trabajo más convenientes en un futuro estudio.

Por eso, no se han podido precisar, más que de forma cualitativa, el volumen de roca arrancado, el esponjamiento del material volado, las características del macizo rocoso, entre otros; por lo que no se ha podido realizar un análisis tan completo como se deseaba para abordar los parámetros claves para la optimización de las voladuras.

Después de la realización del estudio, a partir de los datos de cuatro voladuras en la cantera de roca ornamental, y una vez ejecutado el análisis de los registros tomados y expuestas las diferentes observaciones de cada uno de los casos, se pueden llegar a algunas conclusiones.

Estas conclusiones se basan pues en los valores y datos tomados, principalmente: **las velocidades de partícula** (vibración mm/s) en las diferentes componentes, **los tiempos** (milisegundos) transcurridos desde que se alcanza la vibración de inicio en el geófono (trigger) hasta que se obtienen los valores pico (máxima velocidad de vibración) para alguna de las componentes (longitudinal, transversal, vertical) de las ondas, el resultado final de **la fragmentación, la situación de la pila de los escombros, tiempo total de la voladura** y las características geotécnicas del **macizo rocoso**.



En cuanto a las **velocidades de partícula**, podemos decir que son **mayores en macizos de roca más compactos y con una mayor dureza**, debido a la mayor velocidad de propagación de la onda y la menor pérdida de la energía al existir menos diaclasas. Así se puede comprobar tras las segundas medidas realizadas para una voladura en bloque con precorte mecanizado, en el que las velocidades de partícula son mayores que las otras medidas realizadas en pegas convencionales en banco para el desmonte de calizas margosas, cuyas características en cuanto a dureza son menores que las calizas marmóreas.

Refiriéndonos a la **fragmentación final**, también las discontinuidades que presenta el macizo son un factor que juega un importante papel. Debido a estas grietas, diaclasas, huecos, etc. los gases generados por la explosión y la energía que contienen de presión, son desaprovechados, ya que los gases encuentran una vía de escape, sin fracturar la roca o, en la mayoría de los casos, fracturándola, creando grandes bolos.

En cuanto a la **pila de escombros**, se tiene que tener muy en cuenta la secuenciación de la pega y la inclinación de los barrenos. Por un lado, una buena conexión con tiempos de retardo diferentes, direcciona los escombros, donde posteriormente se podrá notar una reducción de costes en la operación de la carga. Por otro lado, la inclinación de los barrenos permite un mayor aprovechamiento de la energía generada por el explosivo, ya que se consigue un mayor esponjamiento y fracturación de la roca. La inclinación de la carga también hace posible una mejor disposición de la pila de escombros y así, facilitar la operación de la carga. Por lo tanto, un parámetro que depende de la optimización y las vibraciones generadas en las voladuras podría ser la inclinación de los barrenos y la secuenciación de la pega. Con un buen diseño del esquema de encendido se consigue también reducir el nivel de vibraciones, evitando el solape en la explosión de barrenos, ya que la carga operante se incrementaría de forma aditiva.





Por último, también se ha observado que los **picos de velocidades de partícula** a causa de la onda se producen cuando ha transcurrido un menor tiempo desde el inicio de registro en el caso de las voladuras en bloque, en relación con las de banco. Esto ha de ser debido a la amortiguación de las ondas y la pérdida de energía prematura en los terrenos más blandos, que afecta también a la velocidad de propagación. Los menores tiempos se consiguen en el registro de la voladura en bloque con precorte mecanizado. Un aspecto para tener en cuenta y tener presentes las características del macizo donde se vaya a realizar la voladura.



## 8. BIBLIOGRAFÍA EMPLEADA

- LIMITACIONES DE CARGA OPERANTE PARA VOLADURAS EN CANTERAS DE ROCA ORNAMENTAL. Aplicación a una cantera de Piedra Bateig; *Ingeopres, vol 181. TRIGUEROS, E.; MARTINEZ, J. (2.009).*
- PROYECTO DE VOLADURAS TIPO PARA LA CANTERA SOLANA DE LA FOSCA I (PINOSO, ALICANTE): *Mármoles Coto S.L., 2018*
- MANUAL DE PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS: *Instituto geológico y minero de España. Colaboradores: D. José María Pernia Llera, D. Carlos López Jimeno, D. Fernando Pla Ortiz de Urbina y D. Emilio López Jimeno. Financiado por el Instituto geológico minero de España y efectuado por Estudios y Proyectos Mineros S.A.*
- ESTUDIO DE RESTAURACION DE AREAS MINERAS PINOSO (ALICANTE): *Realizado por Instituto Tecnológico Geominero de España, la GENERALITAT VALENCIANA y CONSULTING de INGENIEROS Y ECONOMISTA S.A.*
- PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS EN MINERIA: *Realizado por Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Laboratorio de Tecnologías Mineras. Dirigido por José Bernaola Alonso, Jorge Castilla Gómez y Juan Herrera Herbet. MADRID 2013*



TRABAJO FIN DE GRADO  
SERGIO PEREZ RICO  
GIRME

