

# INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DE LAS ROCAS Y DE LOS MACIZOS ROCOSOS EN EL DISEÑO Y RESULTADO DE LAS VOLADURAS.

Emilio López Jimeno

Ingeniero de Minas (LIMEISA)

## Resumen

Se analiza la influencia de las propiedades de las rocas y del macizo rocoso en los resultados de las voladuras, así como de la elección por parte del proyectista de los parámetros de diseño más adecuados en orden a obtener resultados óptimos.

## 1. INTRODUCCION

Las dificultades surgidas al establecer modelos analíticos sobre el comportamiento de las rocas frente a los mecanismos de fragmentación por acción de cargas explosivas, han hecho que esta técnica se encuentre en una fase de desarrollo inferior al de otras ramas de la ingeniería.

Las voladuras que hasta épocas recientes venían considerándose como un "arte" nacido de la experiencia y pericia de los artilleros, ha ido transformándose paulatinamente en una técnica basada en los análisis detallados y racionales del conjunto de parámetros que intervienen en los procesos de rotura de la roca. Así, podemos diferenciar tres grupos de variables:

- Propiedades de la roca.
- Propiedades del explosivo.
- Geometría de la voladura y secuencia de iniciación.

El primero de estos grupos constituye el principal obstáculo en el camino hacia la voladura óptima.

Los materiales 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 conducen a un determinado entorno a una Litología particular con - unas heterogeneidades debidas a los agregados minerales poli--- cristalinos 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 estructu rales (planos de estratificación, fracturas, diaclasas, etc).

Los intentos realizados hasta hoy han consistido en relacionar los resultados de las voladuras con alguna de las propiedades particulares de las rocas. Desgraciadamente, el éxito ha sido escaso y nunca se ha llegado a establecer una clasificación - cuantitativa para evaluar la competencia de las rocas frente al proceso de fragmentación.

A nuestro juicio, dos son las causas de tan limitado éxito, por un lado las ya apuntadas heterogeneidades y discontinuidades de los macizos rocosos, y por otro, la discrepancia entre las propiedades mecánicas de una muestra inalterada ensayada en labora torio y las propiedades del entorno del que se ha extraído la muestra.

Por todo ello, el presente artículo pretende ponderar la influen cia relativa de las propiedades mecánicas de los materiales y discontinuidades geológicas existentes cuando el macizo rocoso se somete a una variación brusca del estado de tensiones como es el provocado por la detonación de una carga explosiva.

Especial hincapié se hará en aquellas consideraciones geológicas sobre las que el proyectista de voladuras puede actuar, como son la orientación del frente de voladura, elección del tipo de explosivo, etc.

En la figura adjunta se establece la interdependencia que existe entre las propiedades de las rocas, las variables controlables y algunas de las operaciones básicas que constituyen el ciclo minero.

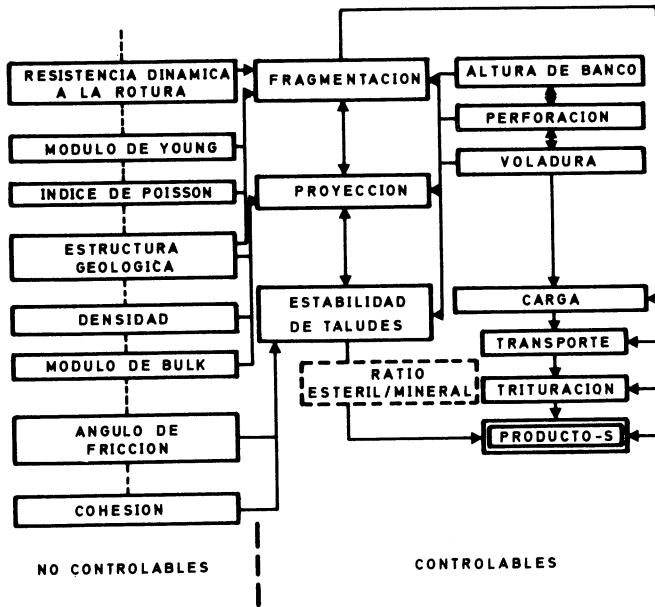


Fig. 1. Interacción de las propiedades de la roca y las variables controlables con las operaciones mineras.

## 2. MECANISMOS DE FRAGMENTACION EN UNA VOLADURA

Las voladuras pueden considerarse como sistemas en los que el explosivo actúa y la roca reacciona. La actuación del explosivo puede asociarse al efecto combinado de la onda de choque (Energía de tensión -  $E_t$ ) y los gases de explosión (Energía de burbuja -  $E_b$ ). La fracturación debida a cada una de estas energías depende de las propiedades resistentes de las rocas.

Prescindiendo del análisis de las teorías sobre el mecanismo de rotura, se han identificado siete modos de fragmentación de la roca.

1. Trituración del material más próximo al barreno.
2. Agrietamiento radial.
3. Rotura por reflexión.
4. Fracturación por liberación de carga.
5. Apertura de las grietas por acción de los gases.
6. Fracturación por cizalladura.
7. Rotura por colisión del material proyectado.

## 3. PROPIEDADES DE LAS ROCAS

### 3.1. DENSIDAD

Las rocas densas requieren una mayor cantidad de energía para lograr una fragmentación satisfactoria, así como un buen desplazamiento y esponjamiento del escombros.

La expresión del impulso impartido a la roca por acción de los gases es:

$$\int_0^{t_v} p \cdot a \cdot dt = M \cdot v$$

donde:

p = Presión de los gases en el instante "t".

a = Area sobre la que actúan los gases en el instante "t".

M = Masa que corresponde desplazar al barreno.

v = Velocidad de proyección.

t<sub>v</sub> = Tiempo en que los gases actúan hasta que escapan a la atmósfera.

De su análisis se deduce que en rocas con una gran densidad, deberán tomarse las siguientes medidas:

- Aumentar el diámetro de perforación (La presión de barreno -  $p_b = K \cdot \rho \cdot v^2$  y "v - velocidad de detonación" aumenta en algunos explosivos como el ANFO, con el diámetro del barreno).
- Reducir el esquema (a = Espaciamiento efectivo x Altura de banco) y modificar la secuencia de encendido.
- Controlar la efectividad del retacado con el fin de aumentar "t<sub>v</sub>" y hacer que los gases escapen por el frente libre y no por el retacado.
- Utilizar explosivos con una alta energía de burbuja.

Cuando la proyección y el esponjamiento son de vital importancia (como es el caso de minerales fisurados o friables de alta densidad) es más ortodoxo expresar los consumos energéticos en Kg/t y MJ/t que en unidades de Kg/m<sup>3</sup> ó MJ/m<sup>3</sup>.

### 3.2. RESISTENCIAS DINAMICAS DE LA ROCA

Las resistencias estáticas a compresión y a tracción se utilizan en un principio como parámetros definitorios de la aptitud de la roca a la voladura. Así se estableció el índice de volabilidad (Hino, 1959) como la relación  $\frac{R_c}{R_t}$ , de modo que a un mayor ratio resultaría más fácil fragmentar el material.

El tratamiento ortodoxo de los problemas reales obliga a considerar las resistencias dinámicas, ya que éstas aumentan con el índice de carga (Rinehart, 1958; Persson et al, 1970) pudiendo llegar a alcanzar valores entre 5 y 13 veces mayores que las estáticas.

Desafortunadamente, los parámetros dinámicos de la roca determinados en laboratorio no son representativos por la heterogeneidad y anisotropía de los macizos rocosos y por la imposibilidad de reproducir los ensayos en condiciones similares a los periodos de carga de una voladura, que son inferiores a 0,1 ms. En ocasiones, los valores de laboratorio han superado a los obtenidos "in situ" en proporciones de 5 a 8, siendo las macrofisuras y las tensiones residuales de la roca las responsables de tales discrepancias.

Cuando la intensidad de la onda de choque supera a la resistencia dinámica a la compresión ( $R'_c$ ) se produce una trituración de la roca circundante a las paredes del barreno por colapso de la estructura intercristalina. Pero esta trituración contribuye muy poco a la fragmentación ( $< 1\%$ , Hagan 1978) y provoca una fuerte disminución de la energía de tensión, llegando en rocas

porosas a suponer el 30% (Cook, 1958).

Por ello se recomienda:

- Seleccionar explosivos que desarrollen en las paredes del barrenamiento tensiones inferiores o iguales a  $R'_c$ .
- Para un explosivo dado, provocar una variación de la curva presión-tiempo (P-t), por desacoplamiento de la carga dentro del barrenamiento.

Estos puntos tienen su máxima expresión en el diseño de voladuras perimetrales o de contorno.

Durante la propagación de la onda de choque, la roca se ve sometida a una intensa compresión radial desarrollándose tensiones tangenciales de tracción. Si estas tensiones superan la resistencia dinámica a tracción ( $R'_t$ ) se inicia la formación de grietas radiales alrededor de la zona triturada que rodea al barrenamiento. El número y longitud de las grietas radiales aumenta con:

1. La intensidad de la onda de choque en la pared del barrenamiento o en el límite exterior del anillo de roca triturada.
2. La disminución de  $R'_t$  y el factor de atenuación de la energía de tensión.

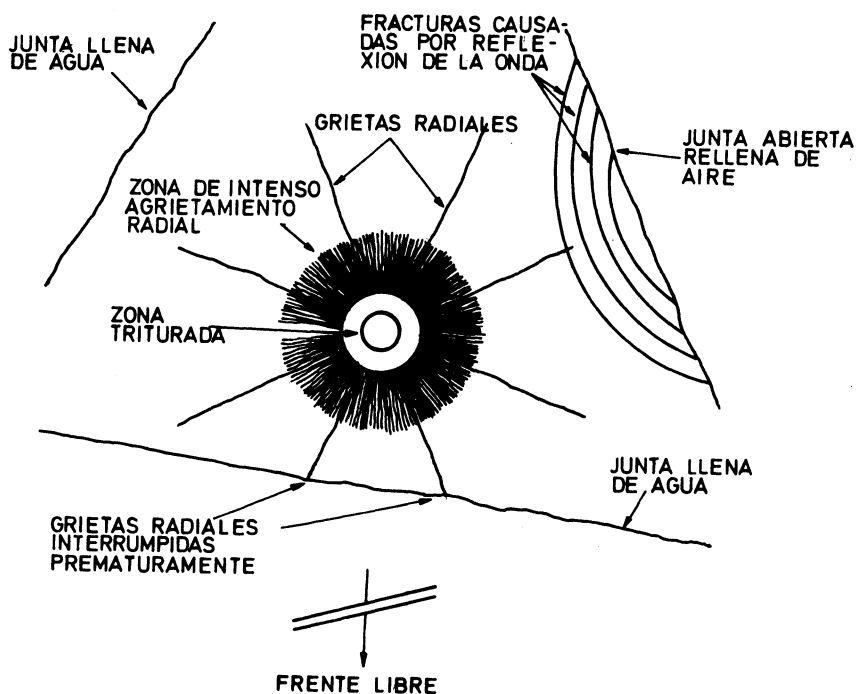


Figura 2. Trituración y agrietamiento radial alrededor de un barreno y descostramiento interior por reflexión de la onda de choque.

Las grietas radiales se distribuyen sistemáticamente alrededor del barreno propagándose en todas las direcciones. La presencia de grietas o juntas naturales puede facilitar según su orientación la extensión de algunas grietas radiales o la reflexión de la onda de choque produciéndose una rotura por reflexión interior o spalling.

De lo expuesto se deduce la importancia relativa de la resistencia dinámica a tracción, que para fines prácticos puede suponer de un 5 a un 10% de la resistencia a compresión dinámica simple.



### 3.3. PROPIEDADES ELÁSTICAS DE LAS ROCAS

Antes de analizar las propiedades elásticas de las rocas, es preciso poner de manifiesto algunos hechos relevantes. Las presiones generadas por los explosivos, especialmente en la proximidad de los barrenos pueden llegar a ser superiores a 10 PGa. Los módulos de Young están próximos a 50 PGa y la resistencia a la compresión de la mayoría de las rocas varía entre 0,1 y 0,4 PGa. Bajo estas condiciones, la aplicación estricta de la teoría de la elasticidad no daría resultados muy positivos (Hagan et al, -- 1979).

#### A. Límite elástico de Hugoniot

En la práctica, las rocas presentan un alto límite elástico de Hugoniot. Para esfuerzos por debajo de este límite las rocas actúan elásticamente y no experimentan ningún tipo de deformación permanente. Como los límites de Hugoniot para la mayoría de las rocas varían entre 4 y 11 PGa (Harries, 1979), se supondrá un comportamiento elástico de éstas.

#### B. Módulo de Young e Índice de Poisson

Para determinar las deformaciones elásticas provocadas en el mecanismo de la voladura, es preciso definir los módulos elásticos del material mediante métodos dinámicos (sísmicos) mejor que estáticos (mecánicos).

Antes de continuar, recordaremos que:

- El módulo de Young (E) se define como la relación entre el es

fuerzo unitario de compresión o tracción y la deformación longitudinal unitaria

$$E = \frac{\Delta F/A \text{ (Esfuerzo unitario)}}{\Delta L/L \text{ (Deformación unitaria)}}$$

- Índice de Poisson ( $\nu$ ), ó la relación entre el cambio unitario del área de la sección con la deformación longitudinal unitaria.

$$\nu = \frac{\Delta S/s \text{ (Cambio unitario del área)}}{\Delta L/L \text{ (Deformación longitudinal unitaria)}}$$

Como las velocidades de propagación de las ondas sísmicas son función de las características elásticas de los materiales a través de las cuales se propagan, es posible servirse de ellas para, previa determinación de la densidad en laboratorio, calcular los módulos elásticos con las siguientes ecuaciones:

$$E = V_s \cdot \frac{\left[ 3 \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4 \right]}{\left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}$$

$$\nu = 0,5 \cdot \frac{\left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2 \right]}{\left[ \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}$$

Donde:

$V_p$  = Velocidad de propagación de las ondas longitudinales.

$V_s$  = Velocidad de propagación de las ondas transversales.

$\rho$  = Densidad.

En la práctica para un índice de Poisson medio de 0,25 puede su-  
ponerse que  $V_p = 1,73 V_s$ .

Por otro lado, las propiedades elásticas de las rocas ígneas y  
metamórficas pueden correlacionarse bien con la densidad. Así -  
del tratamiento estadístico de los valores aportados por Clark  
(1966) para rocas con una densidad entre 2,6 y 3,4 t/m<sup>3</sup>, resul-  
ta:

Vélocidad de propagación (m/s)	Desviación standard (m/s)	Coef. de correlación
V <sub>p</sub> = 3450 . - 3920	570	0,85
V <sub>s</sub> = 1900 . - 2010	380	0,83

Quando el módulo de Young es alto, los gases del explosivo en-  
contrarán resistencia para comprimir y dilatar la roca. La in-  
fluencia del índice de Poisson es menos evidente pero puede re-  
lacionarse con la fragmentación. El índice de Poisson indica co-  
mo el material almacena y libera energía. Así una roca con un  
valor alto almacenará energía más fácilmente que otra con un va-  
lor inferior. Por ello, para un nivel de energía dado, se espe-  
rará una mejor fragmentación de la roca cuando el índice de --  
Poisson sea bajo (Sassa e Ito, 1970).

### C. Módulo de Bulk o de incompresibilidad

Es la relación entre la presión y el cambio unitario de volúmen

$$K = \frac{\Delta P \text{ (Incremento de presión)}}{\Delta V/V \text{ (Variación volumétrica)}}$$

Puede calcularse a partir de la ecuación:

$$K = \frac{(V_p)^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}{3 (1 - \nu)}$$

Y sirve para estimar la proyección de la roca, pues la presión de los gases que dentro de las grietas empujan a la roca hacia el frente libre es función del módulo de Bulk.

### 3.3.1. DETERMINACION IN SITU DE LAS CONSTANTES ELASTICAS DE LAS ROCAS

La determinación de las constantes elásticas de las rocas por métodos directos, resulta extremadamente difícil ya que las probetas chequeadas en laboratorio, no incluyen las discontinuidades estructurales y cambios litológicos del macizo rocoso del que proceden. Para obtener una muestra representativa sería necesario que tuviera al menos unas dimensiones 10 veces mayores que la distancia media entre discontinuidades o planos de fractura.

Las tendencias se han dirigido hacia la determinación "in situ" de las constantes elásticas de las rocas, para tener en cuenta todas las discontinuidades, tensiones residuales, etc. Para ello y con el empleo de técnicas geofísicas, se medirán las velocidades de las ondas longitudinales y transversales (sísmica de refracción, estudios up-holes y cross-hole, etc) y las densidades de los distintos materiales, bien en laboratorio o por -

testificación Gamma-Gamma.

Estas técnicas se caracterizan por su bajo coste y relativa simplicidad de interpretación, pudiéndose aplicar al diseño de las voladuras con la medición de las siguientes propiedades:

1. Módulo de Young e índice de Poisson (Ver epígrafe 3.3.).
2. Características de las juntas o fracturas, incluyendo frecuencia, volúmen y orientación dentro del macizo.
3. Resistencia a la compresión.

Algunas de las aplicaciones más directas al campo de las voladuras son las desarrolladas por Broadbent (1974), Heinen y Dimock (1976), en las que se relaciona con éxito los resultados de las voladuras con las velocidades sísmicas de propagación, en otras palabras, el consumo específico de explosivo o más concretamente el factor de energía y la velocidad sísmica.

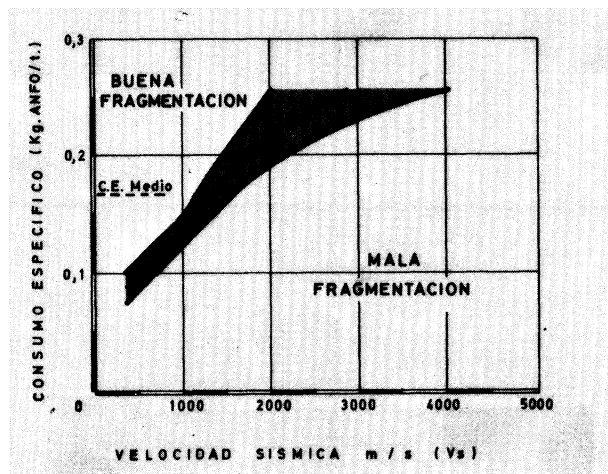


Fig. 3. Correlación entre velocidad sísmica y consumo específico

Como puede observarse, conforme aumenta la velocidad sísmica se requiere una mayor cantidad de energía para una fragmentación satisfactoria. Es ampliamente conocido el criterio de acoplamiento de impedancias ( $\text{Velocidad de propagación en la roca} \times \text{densidad de la roca} = \text{Velocidad de detonación} \times \text{densidad del explosivo}$ ) en el intento de maximizar la transferencia de energía del explosivo a la roca.

Este método ha tenido gran éxito en una explotación americana de cobre donde se han llegado a reducir los costes de perforación y voladura hasta un 17%.

Algunas de las precauciones a tener en cuenta cuando se adopta esta técnica son:

1. Cuando el material se encuentra saturado de agua, la velocidad sísmica puede ser unos 300 m/s mayor que la que corresponde al material seco, pero el posible aumento en el consumo específico queda compensado por la mayor dificultad de rotura de ese material.
2. Los registros sísmicos se realizarán cuando las unidades de operación estén paradas con el fin de evitar posibles interferencias.
3. En época invernal con grandes heladas, pueden medirse velocidades sísmicas 600 m/s superiores a las registradas en condiciones normales. Esto es debido a que las ondas secundarias alcanzan los geófonos antes que las primarias. Esta discrepancia puede corregirse contrastando los datos recogidos con los pertenecientes al banco superior en la zona de estudio.

4. Utilizar un espaciamiento correcto entre geófonos a fin de -  
evitar anomalías producidas por niveles profundos o minados  
y hacer las medidas en dos sentidos según una misma direc--  
ción.

PROPIEDADES GEOMECAICAS DE DIVERSOS TIPOS DE ROCA

TIPO DE ROCA	LOCALIDAD	RESISTENCIA A TRACCION (M Pa)	RESISTENCIA A COMPRESION (M Pa)	MODULO DE ELASTICIDAD (10 GPa)	VELOCIDAD LONGITUDINAL (m/s)	INDICE DE POISSON	DENSIDAD (t/m <sup>3</sup> )
Anfibolita	India	--	423	--	5.700	--	3,12
Basalto	U.S.	10,7	149	6,2	5.230	0,275	2,88
Arenisca	W. Virginia	1,38	134	0,69	3.935	0,309	1,87
Arenisca	U.S.	0,27	10,6	0,59	2.100	--	2,51
Caliza	W. Virginia	5,17	158	5,52	5.000	0,250	2,68
Diorita		5,52	219	3,79	3.660	--	2,83
Dolomia	U.S.	2,52	54,7	2,83	4.025	0,250	2,68
Esquistos	U.S.	9,17	165	7,68	5.480	0,203	2,85
Gneis	Canadá	3,1	210	6,3	5.700	0,260	0,26
Gneis	U.S.	13,7	224	8,1	5.730	0,217	2,80
Granito	U.S.	9	186	4,3	4.850	0,327	2,70
Granodiorita	Ontario	12	220	5,1	6.100	0,330	2,70
Magnetita	Canadá	17,5	345	8,3	4.600	--	3,90
Mármol	U.S.	15,2	251	10,6	6.710	0,284	3,04
Pizarra	U.S.	6,39	85,4	6,59	5.170	0,167	2,64
Serpentina	U.S.	5,1	113	5,3	5.380	0,333	2,75
Taconita	Minnesota	17,1	251	9,3	6.143	0,249	2,95



### 3.4. POROSIDAD

Podemos distinguir dos tipos de porosidad: Porosidad intergranular o de formación y porosidad de disolución o post-formación.

La primera cuya distribución en el macizo puede considerarse uniforme provoca dos efectos:

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

Los Cálculos indican que las longitudes de las grietas originadas por la onda de tensión en una roca muy porosa son aproximadamente el 25% de las inducidas en rocas no porosas con la misma composición mineralógica (Hagan, 1979). El trabajo de fragmentación de rocas muy porosas, se realiza casi en su totalidad por la energía de burbuja, por lo que deberán observarse las siguientes recomendaciones:

- Utilizar explosivos con una relación  $\frac{E_{\text{burbuja}}}{E_{\text{tensión}}}$  elevada, como por ejemplo ANFO.
- Incrementar la  $E_{\text{burbuja}}$  a costa de la  $E_{\text{tensión}}$  mediante el desacoplamiento de las cargas (L. Jimeno, 1980).
- Retener los gases de voladuras a alta presión con un dimensionamiento adecuado de la longitud y tipo de retacado.
- Con varios frentes libres, mantener dimensiones iguales de la piedra en cada barreno.

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 (Karstificación). Los espacios vacíos - son mucho mayores y su distribución es menos uniforme que la de la porosidad intergranular.

Las cavidades intersectadas por los barrenos no solo dificultan la perforación con la pérdida de varillaje y atranques, sino incluso la eficiencia de la voladura. Algunos de los problemas - que originan se exponen a continuación y son especialmente graves con los explosivos a granel y bombeables:

1. Cuando cada barreno se carga con una cantidad de explosivo dada, se produce una excesiva concentración de cargas en las cavidades y, por consiguiente, una reducción del explosivo en la parte superior de los barrenos.

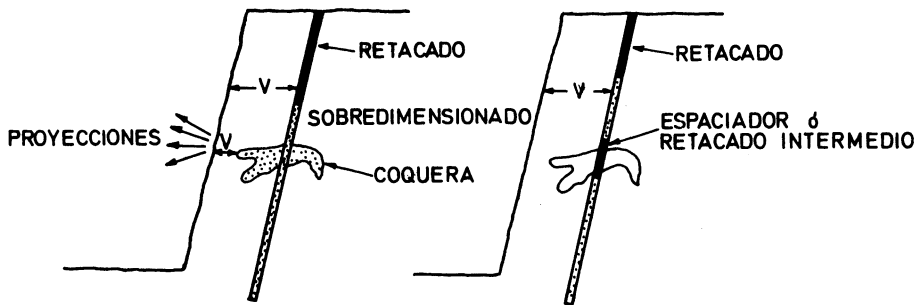


Fig. 4. Ejecución correcta de la carga de un explosivo a granel en un terreno con coqueras.

Estos problemas pueden solventarse cuando es posible situar un retacado o espaciador intermedio a la altura de la coquera o cavidad que corta al barreno, en caso contrario, deberá intentarse aumentar la energía de explosivo en la parte alta de los barrenos contiguos con el fin de obtener una fragmentación adecuada de la roca afectada por el retacado.

2. Si los barrenos se cargan con explosivo hasta alcanzar una dimensión del retacado, las coqueras conectadas con los barrenos originarán grandes concentraciones de explosivo con el consiguiente riesgo de cortes, proyecciones y sobreexcavaciones.

Si los barrenos no intersectan a las cavidades, el rendimiento de la voladura disminuye por:

1. La prematura terminación de las grietas radiales al ser intersectadas, en su propagación, por los huecos existentes.

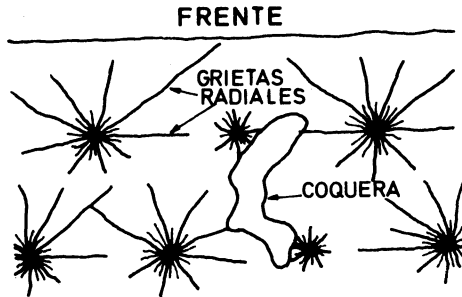


Figura 5. Terminación prematura de las grietas radiales al intersectar una cavidad.

2. La rápida caída de la presión de los gases al intercomunicarse el barreno con las cavidades. Y por ello, el frenado de la apertura de grietas radiales al escapar los gases hacia los espacios vacíos.

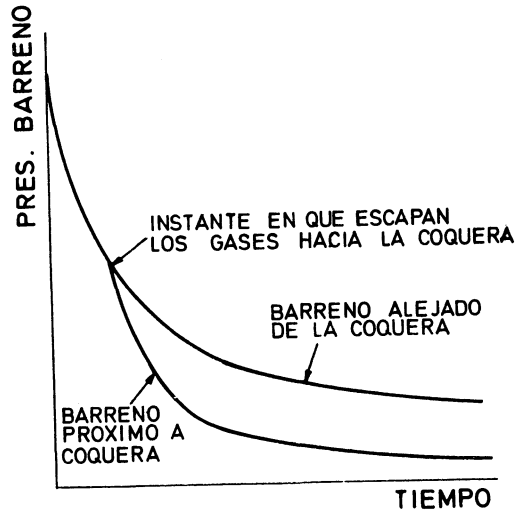


Figura 6. Caída de presión por el escape de los gases hacia un espacio vacío

### 3.5. FRICCIÓN INTERNA

Como las rocas no constituyen un medio elástico perfecto, parte de la energía de la onda de tensión que se propaga a través de él, se convierte en calor por diversos mecanismos. Estos mecanismos son conocidos por "fricción interna" ó "capacidad de amortiguación específica-SDC" que miden la disponibilidad de las rocas para atenuar la onda de tensión generada por la detonación del explosivo. La SDC varía considerablemente con el tipo de roca: desde valores de 0,02-0,06 para los granitos (Win-

des, 1950; Blair, 1956) hasta los de 0,07-0,33 para areniscas. La SDC aumenta con la porosidad, la permeabilidad, las juntas y el contenido en agua de la roca. También aumenta considerablemente con los niveles meteorizados en función de su espesor y alteración.

La intensidad de la fracturación debida a la onda de tensión aumenta conforme disminuye SDC. Así por ejemplo, los explosivos - tipo slurry son más efectivos en formaciones duras y cristalinas que en los materiales blandos y descompuestos (Cook, 1961; Lang, 1966). Por el contrario, en estos últimos, el ANFO es más adecuado a pesar de su menor energía de tensión.

#### 4. PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

##### 4.1. PLANOS DE DISCONTINUIDAD PRE-EXISTENTES

Todas las rocas de la naturaleza presentan algún tipo de discontinuidad -microfisuras y macrofisuras- que influyen de manera decisiva en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y consecuentemente en los resultados de las voladuras. En efecto, en el caso de voladuras de producción, un porcentaje de la pila de escombros se presentará en tamaños superiores al admitido por el equipo de carga y la machacadora, por lo que se requerirá - una fragmentación adicional con el consiguiente aumento de los costes de producción. Por otro lado, en la construcción de instalaciones portuarias y presas de escollera se hacen necesarias determinadas dimensiones y porcentajes de roca que raramente - son conseguidos en voladuras de producción.

De las consideraciones anteriores se desprende la importancia del estudio de las regularidades estructurales cuantitativa y cualitativamente.

El estudio detallado deberá basarse en el análisis de los resultados de los sondeos y su correlación con los datos recogidos de la observación directa definiendo localización, orientación (dirección y buzamiento), espaciado, espesor, tipo de relleno y coeficiente de rugosidad de dichos planos.

Las discontinuidades pueden ser cerradas, abiertas o rellenas, y por ello con diferentes grados de transmisión de la energía del explosivo. Las paredes de estas discontinuidades son superficies planas sobre las cuales se reflejan las ondas de choque atenuando y dispersando la energía desarrollada.

En discontinuidades cerradas o bien cementadas, las grietas radiales inducidas por la detonación las cruzarán permitiendo su propagación a través del macizo. Cuando las discontinuidades están abiertas y sin material de relleno, la reflexión de la onda de choque puede originar la fracturación por descostramiento interno (Figura 2). Las grietas radiales serán en este caso interrumpidas prematuramente al no transmitir esfuerzos de tracción, se mejorará la fragmentación entre el barrenado y la discontinuidad, pero se reducirá al otro lado de ésta.

Un efecto similar puede suceder si el material que rellena las discontinuidades tiene una impedancia acústica inferior a la de la roca, la energía de la onda refractada aumentará conforme la impedancia del relleno se aproxime a la de la roca.

Otro efecto de las juntas abiertas cuando intersectan a los barrenos, es el prematuro escape de los gases producidos y la caída drástica de la presión de barreno. Consecuentemente, la fragmentación y el desplazamiento debido a la energía de burbuja - disminuirá y especialmente cuando esas juntas abiertas conectan el barreno con el frente libre. Otros efectos negativos son los constituidos por las frecuentes proyecciones, mayor nivel de onda aérea y las sobreexcavaciones.

A. CARACTERIZACION DEL MACIZO ROCOSO

Una de las clasificaciones más extendidas es la establecida a partir del R.Q.D. (Deere, 1968) que se define como el porcentaje de la longitud de testigo recuperado en trozos mayores de 10 cm. respecto a la longitud del sondeo

R.Q.D.	Calidad de la roca
0 - 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Por otro lado cuando no se dispone de sondeos, puede determinarse el "Volumetric Joint Count - Jv" como el número total de juntas por metro cúbico, obtenido al sumar las juntas que hay por metro para cada familia de juntas.

$J_V$	Características del macizo
1	Bloque masivos
1 - 3	Bloques grandes
3 - 10	Bloques tamaño medio
10 - 30	Bloques pequeños
30	Bloques muy pequeños

Palmstrom (1974) relacionó el índice  $J_V$  con el RQD estableciendo la expresión:

$$R.Q.D. = 115 - 3,3J_V \text{ (para } J_V < 4,5; R.Q.D. = 100)$$

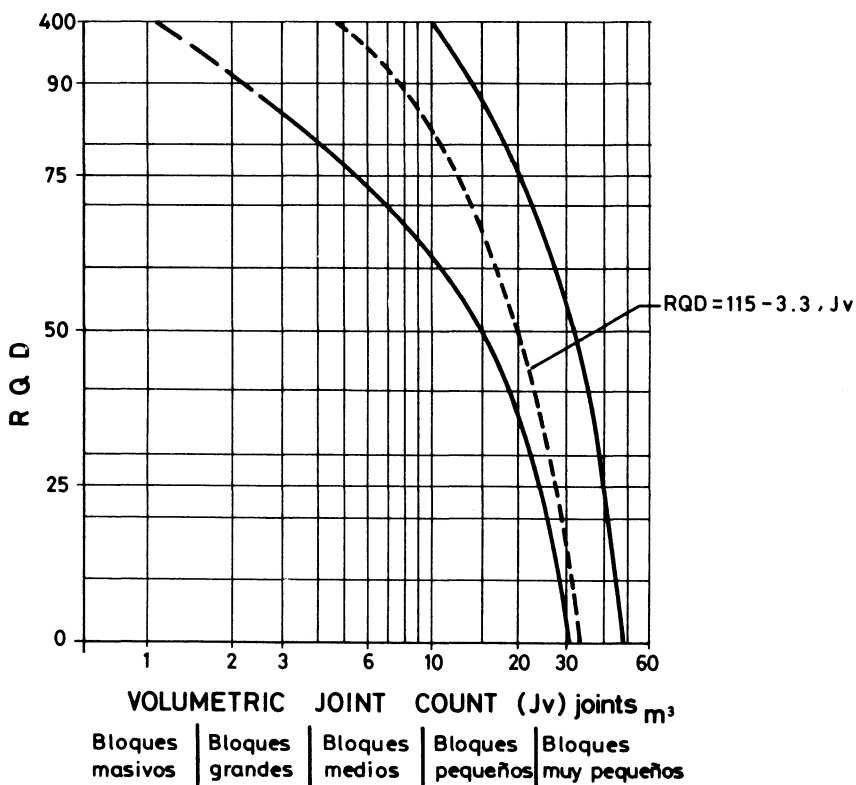


Figura 7. Relación entre R.Q.D. y  $J_V$



Merrit (1968) también ha establecido una correlación entre el R.Q.D. y el índice de velocidad del macizo, que se define como el cuadrado de la relación entre la velocidad sísmica en el sondeo y en el laboratorio, que son en esencia equivalentes a las velocidades en el macizo rocoso y en la matriz rocosa.

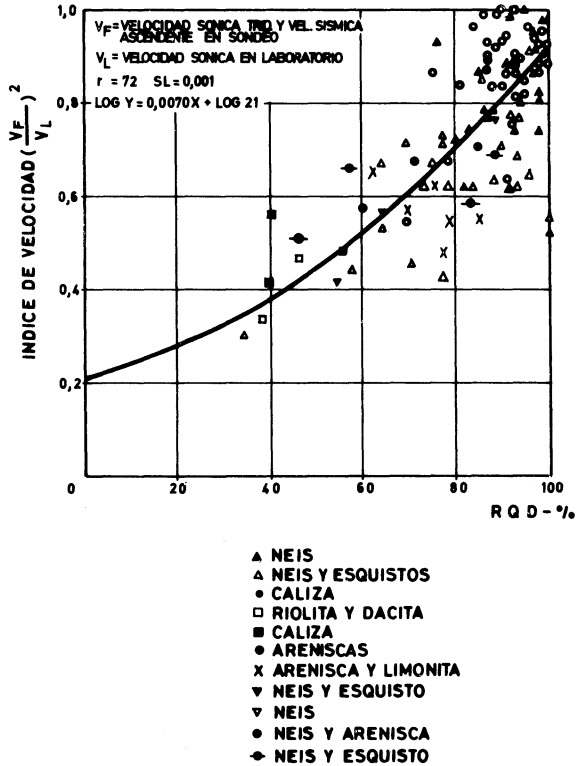


Figura 8. Correlación entre R.Q.D. e índice de velocidad

Helfrich et al (1970) mediante sísmica de refracción, relaciona las velocidades de propagación de las ondas longitudinales en material de fracturado "Vp1" e intensamente fracturado "Vpo" con el número de fracturas por metro "n" y la velocidad sísmica en un frente dado "Vpe".

$$n = \frac{\frac{1}{Vpe} - \frac{1}{Vp1}}{\frac{Vp1 - Vpo}{Vp1 \times Vpo}} K$$

siendo "K" una constante.

Otra investigación más reciente es la debida a Sjogren et al (1979) que relaciona la velocidad de propagación longitudinal y el R.Q.D. con distintos parámetros geomecánicos.

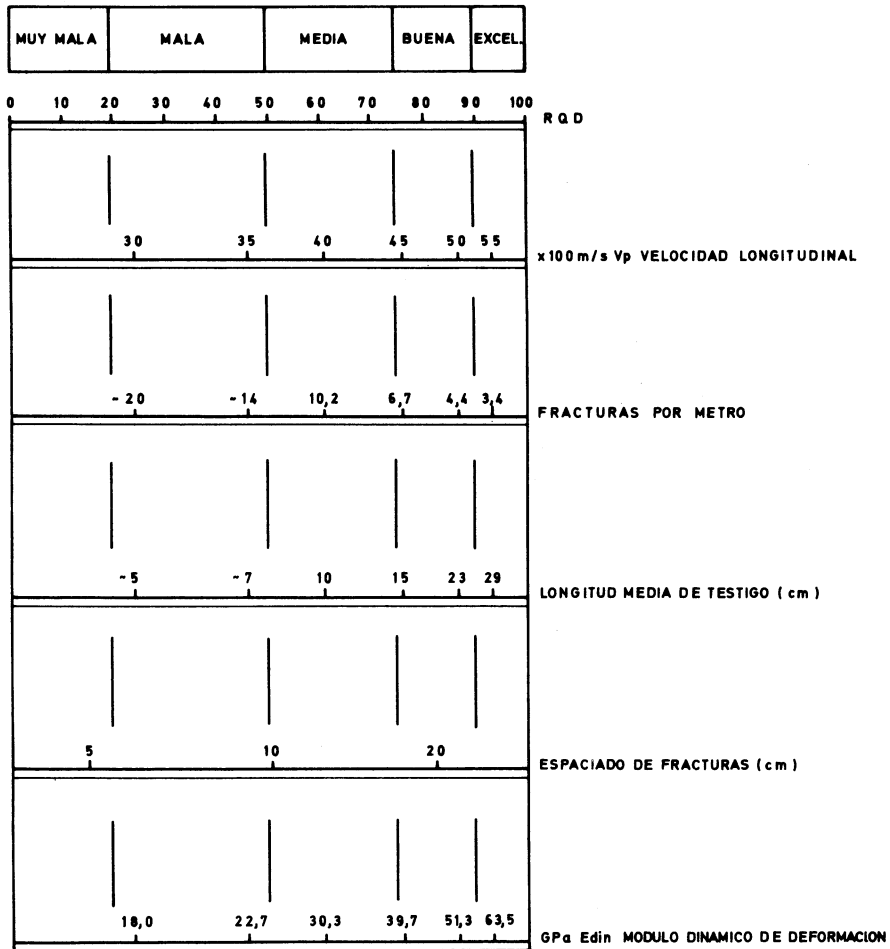


Figura 9. Correlación entre distintos parámetros geomecánicos del macizo con el R.Q.D. y velocidad de transmisión longitudinal

Un índice importante en la caracterización del macizo rocoso y a partir del cual se evidencian los cambios litológicos así como las direcciones preferentes de las discontinuidades y esfuerzos tectónicos, es el de anisotropía. Una de las expresiones

más empleadas cuando se realiza prospección sísmica es la definida por Bur:

$$A = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{(V_{\max}/2 - V_{\min}/2)}$$

**B. DISEÑO DE LAS VOLADURAS ATENDIENDO AL CONTROL ESTRUCTURAL**

La tendencia actual en el campo de las voladuras se dirige hacia el empleo de grandes diámetros de perforación 12-15". Esto obliga a plantear esquemas muy abiertos en los que el efecto de las discontinuidades geológicas es cada vez más acusado al ser mayor el número de planos de debilidad entre barrenos contiguos, máxime si los sistemas de juntas han dado lugar a la conformación de bloques.

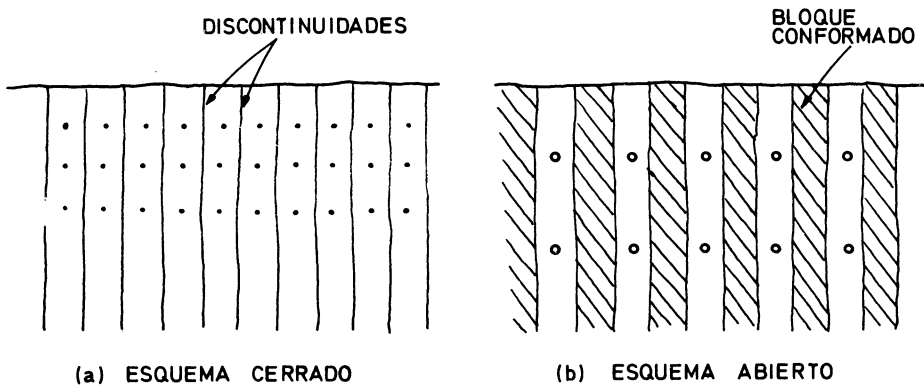


Figura 10. Efecto de las discontinuidades en dos esquemas de voladura con diámetros de barreno pequeños (a) y grandes (b).

Obviamente una de las formas para reducir la influencia de las discontinuidades estructurales consiste en aumentar la perforación específica ( $\text{ml}/\text{m}^3$ ) con lo que la probabilidad de atravesar un bloque dado aumenta a expensas de incrementar el coste de perforación. Existen otras herramientas basadas en la orientación de los frentes que pueden ayudar a mejorar los resultados de las voladuras.

La mejor fragmentación se obtiene cuando la dirección de abatimiento forma  $90^\circ$  con la dirección predominante de las discontinuidades (Belland, 1966). Con esta configuración, el nuevo frente suele coincidir con un plano de discontinuidad posibilitando el empleo de espacimientos mucho mayores que la piedra. Cuando las juntas son subverticales, esta disposición minimiza los problemas de repiés pero, sin embargo, es necesaria la perforación inclinada para mantener una dimensión de la piedra constante en la primera fila de barrenos.

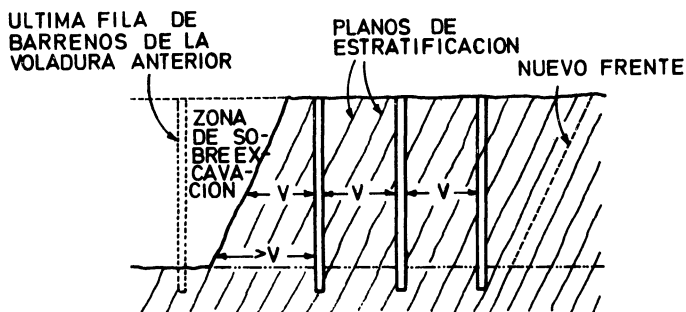


Figura 11. Excesiva piedra en el repiés provocada por la estructura del macizo.

Otro inconveniente suele ser la sobreexcavación detrás de la última fila de barrenos. En estos casos, se obtienen mejores resultados cuando el frente forma con la dirección de las discontinuidades dominantes un ángulo de hasta  $45^\circ$  ó  $135^\circ$ . Pero cuando dicho ángulo oscila entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$  se desarrollarán grandes grietas detrás de la última fila dejando una cara de banco irregular y escalonada. Estas grietas son juntas que han sido abiertas por la invasión de los gases y por la acción del movimiento relativo de la roca. Para minimizar estos problemas se recomienda un esquema similar al de la figura adjunta.

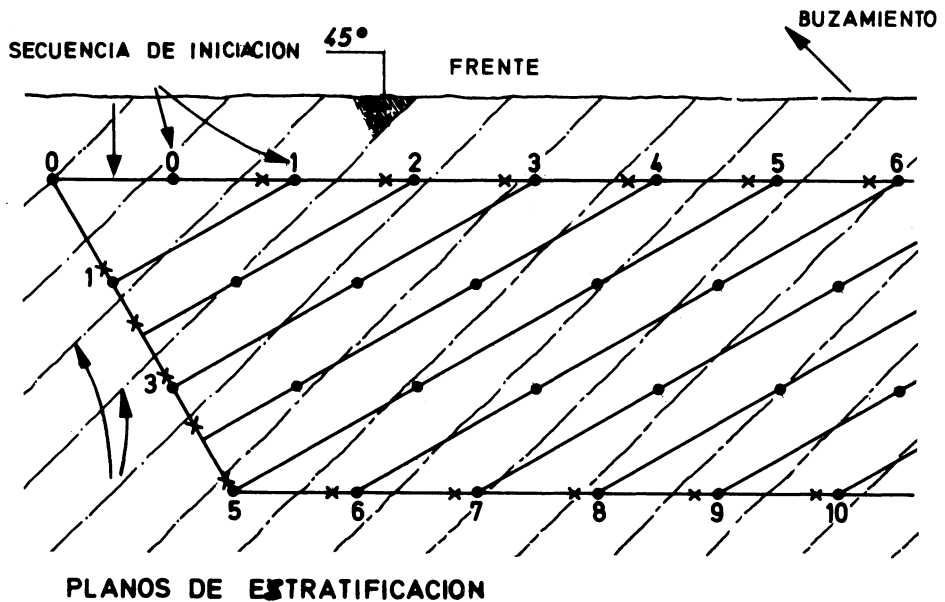


Figura 12. Esquemas de voladura al tresbolillo "VI"

Las voladuras en las que el frente es normal a la dirección de las discontinuidades suele dar también buenos resultados.

Cuando la estratificación o los sistemas de juntas presentan una pequeña inclinación  $<30^\circ$  se recomienda que los barrenos sean normales a dichos planos con el fin de aumentar el rendimiento de la voladura.

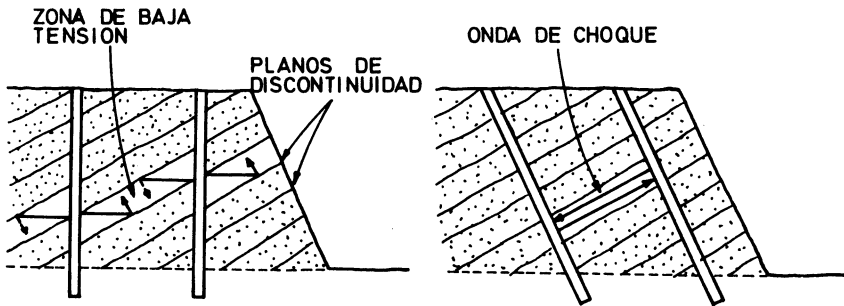


Figura 13. Mejora de la fragmentación con la perforación inclinada.

Si los estratos son semihorizontales y presentan un buen despegue a la cota del piso puede prescindirse de la sobreperforación que normalmente tiene una longitud de 8 veces el diámetro de perforación.

Otro intento por considerar las discontinuidades estructurales en el diseño de voladuras es aquel en que se relaciona la fre-

cuencia de fracturas y la resistencia a cizallamiento de las mismas con el consumo específico de explosivo (Ashby, 1977).

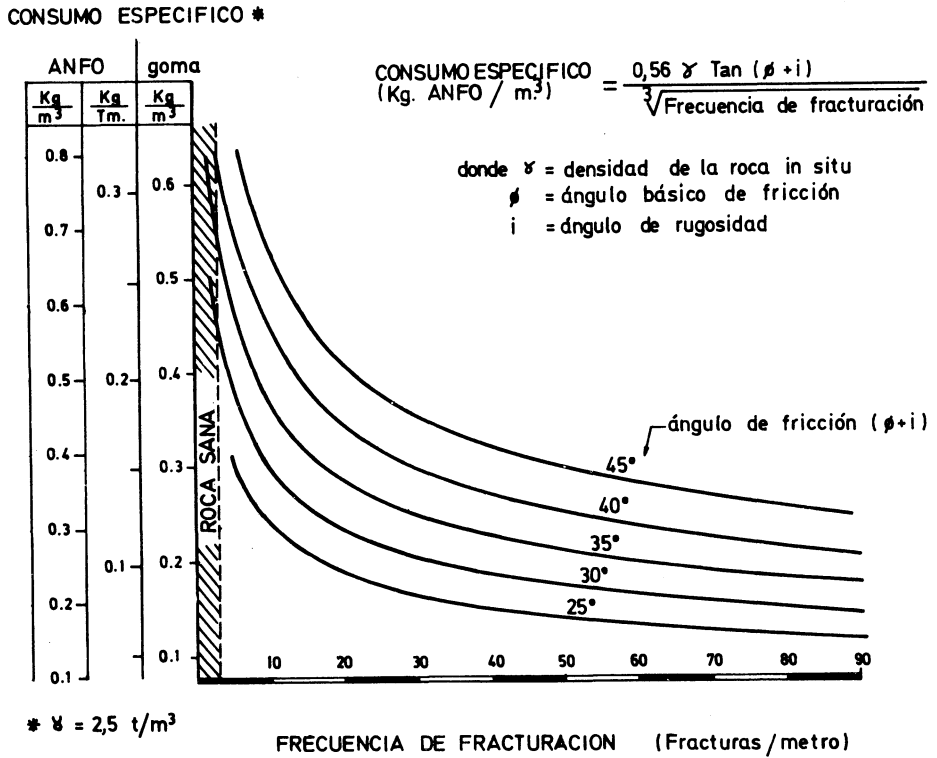


Fig. 14. Relación empírica entre el consumo específico, frecuencia de fracturación y resistencia al corte de las mismas desarrollado en la mina de Bouganville.

#### 4.2. CAMBIOS LITOLÓGICOS

Las voladuras en zonas donde se produce un cambio litológico brusco, por ejemplo estéril y mineral, y consecuentemente una



variación de las propiedades resistentes de las rocas obliga a la reconsideración del planteamiento del diseño basado en:

- a- Esquemas iguales para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias.
- b- Distintos esquemas con igual carga por barrenos. Esta disposición suele adoptarse manteniendo la dimensión de la piedra igual (Figura 15), ya que la introducción de un esquema -- E x V distinto en cada zona entrañaría una mayor complejidad de perforación y un escalonamiento del nuevo frente creado.

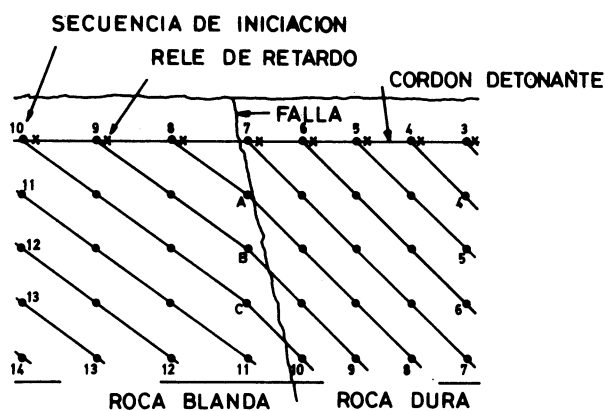


Figura 15. Cambio de esquema recomendado  $V = V_1$  ;  $E \neq E_1$

Los yacimientos estratiformes semihorizontales que presenten al gún horizonte muy resistente pueden aconsejar un tipo de voladuras particular en las que las cargas se alojen en los barrenos perfectamente confinadas a la altura de tales horizontes, también suele aconsejarse que la localización de los multiplicadores en las columnas de explosivo coincida con los niveles más

duros a fin de aprovechar al máximo la energía de tensión desarrollada.

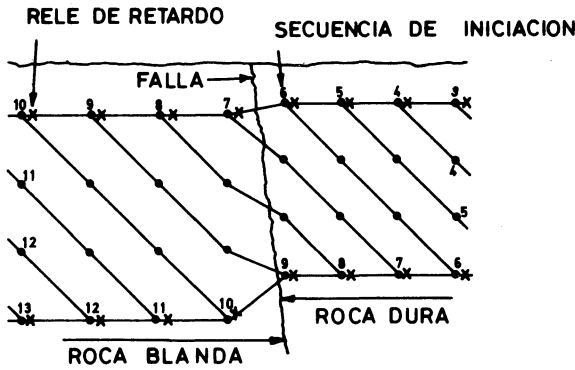


Figura 16. Esquema no recomendado.

Cuando se encuentran en contacto dos materiales de características resistentes muy diferentes como por ejemplo, una caliza competente en contacto con arcillas muy plásticas (terreno Kárstico) y si los barrenos atraviesan estas formaciones, se producirá una gran pérdida de energía asociada con la caída de presión de los gases al producir deformaciones plásticas en dichas arcillas, y por consiguiente se obtendrá una mala fragmentación.

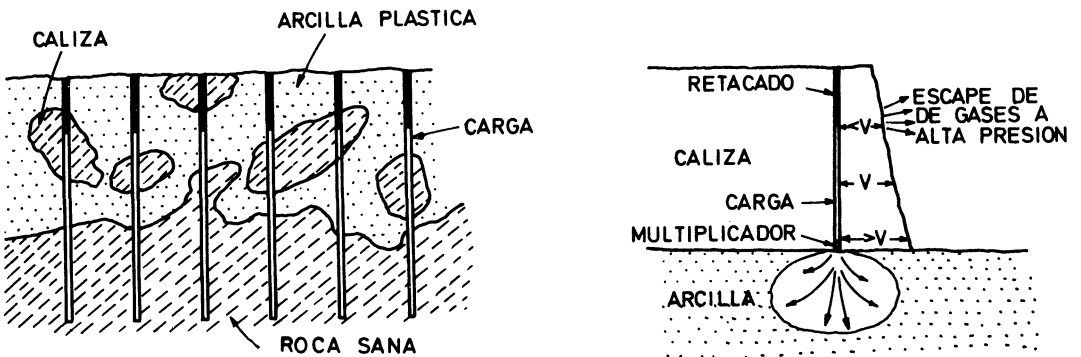


Figura 17. Casos típicos de cambios litológicos con contacto entre rocas competentes y materiales plásticos.

Para aumentar el rendimiento de las voladuras se pueden adoptar las siguientes medidas:

1. Retacar con material adecuado (de tamaño 1/17 de diámetro de perforación) aquellas zonas del barreno que estén en contacto con material plástico o próximo a ellas. Para realizar ésto es necesario un cuidadoso control de la perforación observando el detritus y midiendo longitudes perforadas.
2. Emplear cargas de explosivo totalmente acopladas a la roca competente con una gran velocidad de detonación y una relación de Energía de tensión/Energía de burbuja alta..
3. Localizar los multiplicadores o primers en el punto medio de la roca competente para incrementar la resultante de la onda de tensión que actúa a ambos lados.
4. Evitar el prematuro escape de los gases a la atmósfera asegurando que tanto la longitud de retacado (al menos 20 d) y la dimensión de la piedra son correctas en la parte superior de los barrenos.

#### 4.3. CONTENIDO EN AGUA

Las rocas porosas y los macizos intensamente fracturados cuando se encuentran saturados de agua presentan habitualmente ciertos problemas:

- Necesidad de seleccionar explosivos no alterables por el agua.
- Pérdida de barrenos por hundimientos internos y consecuentemente:

- Dificultades en la perforación inclinada.

Por otro lado, el agua afecta a las rocas y a los macizos rocosos en los siguientes aspectos:

- a- Aumenta la velocidad de propagación de las ondas elásticas.
- b- Reduce la resistencia de las rocas a compresión y a tracción (Obert y Duval, 1967) al ser menor la fricción entre partículas.
- c- Reduce la atenuación de la onda de tensión y por ello, se intensifican los efectos de rotura por  $E_t$  (Ash, 1968).
- d- Las juntas llenas de agua permiten el paso de las ondas de tensión sin que se produzca un descostramiento interno. Pero cuando el macizo entra en tensión, ese agua se moviliza ejerciendo un efecto de cuña que puede llegar a producir una gran sobreexcavación.

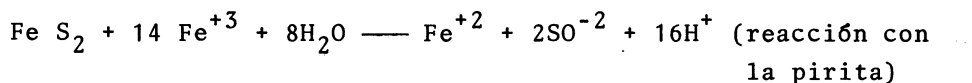
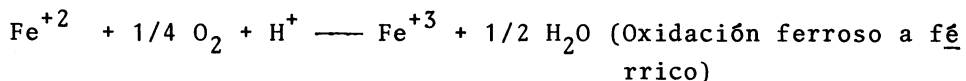
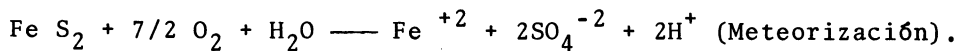
#### 4.4. TEMPERATURA DEL MACIZO ROCOSO

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

Las últimas investigaciones del U.S.B.M. apuntan a una primera reacción entre el ANFO y el sulfato ferroso hidratado, y más especialmente entre el nitrato amónico y el sulfato ferroso hidra

tado, iniciándose una reacción exotérmica que se automantiene a partir de los 80°C.

Este sulfato ferroso es uno de los productos de descomposición de las piritas, además del sulfato férrico y el ácido sulfúrico.



Estas reacciones se ven favorecidas por la presencia de ciertas bacterias oxidantes como la "thiobacillus ferro oxidans" y "thiobacillus tiooxidans" que mantienen indefinidamente las reacciones.

Cuando el ANFO se carga en los barrenos, éste se pone en contacto con la pirita, pero también con el sulfato ferroso y férrico desencadenándose múltiples reacciones complejas.

Para obviar este inconveniente que, en varias ocasiones ha desembocado en graves accidentes, se han añadido diversas sustancias inhibitoras al 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°C (Miron et al, 1979).

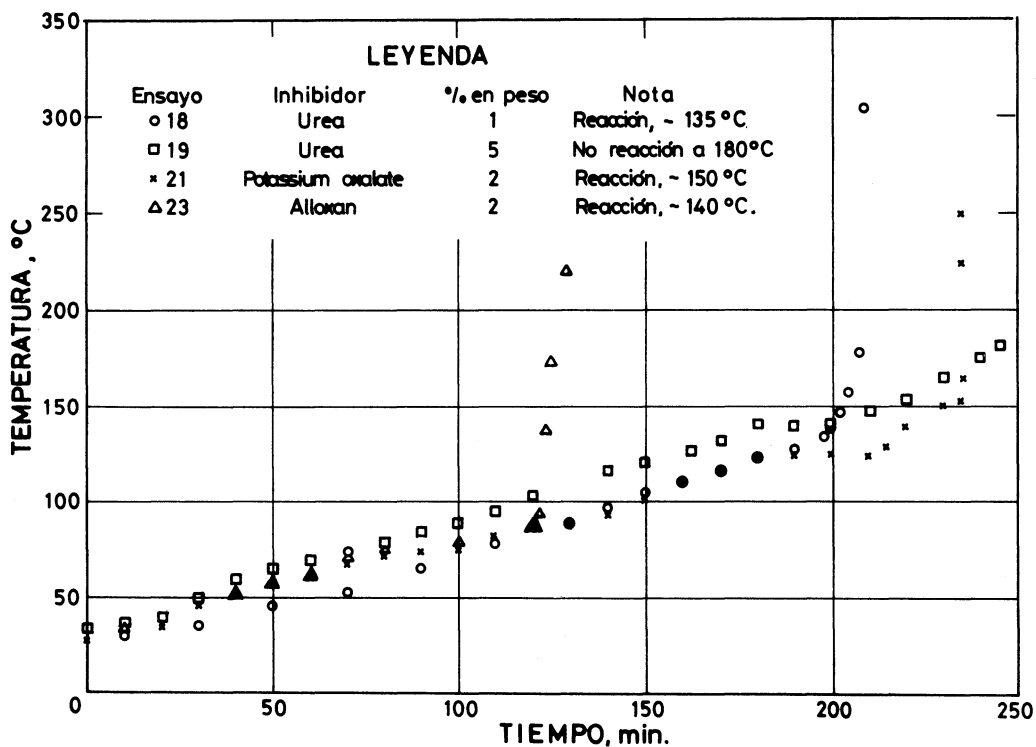


Figura 18. Perfiles tiempo-temperatura para mezclas de ANFO-mineral-sulfato ferroso e inhibidor.

La sensibilidad de los explosivos tipo slurry depende también de la temperatura de la roca con la que esté en contacto, por ello es necesario prestar la mayor 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.

### 5. CONCLUSIONES

Los resultados de las voladuras dependen básicamente de las pro

piedades del explosivo y del macizo rocoso. Los intentos por correlacionar esos dos grupos de parámetros no han tenido el éxito esperado ante la dificultad de seleccionar muestras representativas que integren las discontinuidades y heterogeneidades del macizo rocoso.

Una vez caracterizado éste, la primera etapa en el diseño de una voladura consiste en elegir el tipo de explosivo que mejor se adapte a las propiedades geomecánicas de la roca y condiciones de trabajo. En la segunda etapa, se procede a estudiar la cantidad y distribución de las cargas. Para esta fase se han desarrollado múltiples métodos y expresiones empíricas, pero a nuestro juicio, una de las que aportaría mayor fiabilidad sería aquella que contemplase la velocidad sísmica de propagación de las ondas elásticas en el medio a fragmentar. En esta línea están trabajando algunos centros de investigación internacional y nuestra aportación a este campo la expusimos en las VI Jornadas Minero-Metalúrgicas de Huelva (1980).

La tercera etapa corresponde a la adecuación del diseño geométrico con las variables del control geoestructural, así como el cálculo de tiempos óptimos de retardo.

## B I B L I O G R A F I A

- ASH, R.L. 1968. The design of Blasting Rounds, Ch.7.3. Surface Mining, Ed. E.P. Pfleider, AIME (1968).
- ASH, R.L. 1973. The influence of Geological Discontinuities on Rock Blasting, Ph.D. Thesis, University of Minnesota - (1974).
- ATCHISON, T.C. 1968. Fragmentation Principles, Ch.7.2. Surface Mining, Ed.E.P. Pfleider, AIME (1968)
- BELLAND, J.M., 1966. Structure as a control in Rock Fragmentation. Carol Lake Iron Ore Deposits, CIM Bulletin, V.59, N.647 (Marzo, 1966).
- BHANDARI, S., 1974. Blasting in Non-homogeneous Rocks, Australian Mining, v.66, N.5. (Mayo 1974).
- BLAIR, B.E., 1956. Physical Properties of Mine Rock, Part III. USBM RI No. 5130 (1955); Part IV USBM-RI, N° 5244 (1956)
- BROADBENT, CD., 1974. Predictable blasting with in-situ seismic surveys, Mining Engineering, V.26. N.4 (Abril, 1974).
- DALLY, J.W. and FOURNEY, W.L. 1977. Influence of Flaws on Fragmentation, Proc. 6th International Colloquium on Gas Dynamics of Explosions and Reactive Relative Systems. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden Agosto 1977.
- DUVALL, W.I., ATCHISON, T.C. 1957. Rock Breakage by Explosives, USBM RI N° 5356 (1957).



- GRANT, C.H. 1970. How to make explosives do more work. Mining Magazine. Agosto 1970.
- HAGAN, T.N., 1973. Brock Breakage by Explosives, Proc. National Symposium on Rock Fragmentation, Australian Geomechanics Society, Adelaide, Feb. 1973.
- HAGAN, T.N. and JUST, G.D., 1974. Rock Breakage by Explosives. Theory, practice and optimisation, Proc. 3rd Congress International Society of Rock Mechanics, Vol. II-B.
- HAGAN, T.N., 1979. The effects of some structural properties of rock on the design and results of blasting. ICI Australia Operations Pty. Ltd. Melbourne.
- HARRIES, G. 1978. Breakage of rock by explosives. Aus. I.M.M. Melbourne.
- HOEK, E., and BRAY, J.W. 1977. Rock Slope Engineering. I.M.M. London.
- LANG, L.C. and FAVREAU, R.F., A Modern Approach to Open Pit Blast Design and Analysis, CIM Bulletin. V.65 N° 722 (June 1972)
- LOPEZ JIMENO, E. 1980. Parámetros críticos en la fragmentación de rocas con explosivos. VI Jornadas Minero-Metalúrgicas. Huelva, 1980.
- MECER, J.K. 1980. Some aspects of blasting physics. IQT. Quarry Management and products. December 1980.
- MERRIT, A.H. 1972. Geological predictions for underground excavations. North American RETC Conference.

- OBERT, L and DUVAL, W.I. 1967. Rock Mechanics and Design of Structures in Rocks, John Wiley and Sons, Inc. New York, N.Y.
- POLAK, E.J. 1971. Seismic Attenuation in Engineering Site investigations, Proc. Ist Aust. N.Z. Conf. Geomechanics, Melbourne, 1971.
- RINEHART, J.S. 1970. Fractures and strain generated in joints and layered rock masses by explosions. Proc. Syn. Mechanism of Rock Failure by explosions. Fontaineblau. October.
- SASSA K. and ITO, I. 1974. On the Relation between the Strength of a Rock and the pattern of Breakage by Blasting. Proc. 3rd Congress International Society of Rock Mechanics. Denver.
- SJOGREN, B., OFSTHUS, A, SANDBERG, J., 1979. Seismic classification of Rock mass qualities. Geophysical prospecting N° 27.
- WILD, H.W. 1976. Geology and Blasting in open pits. Erzmetall, V. 29, n° 9.