

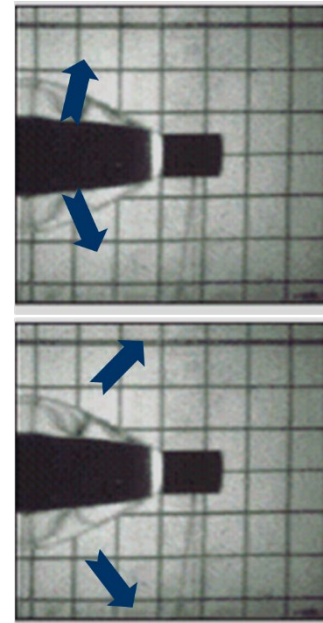
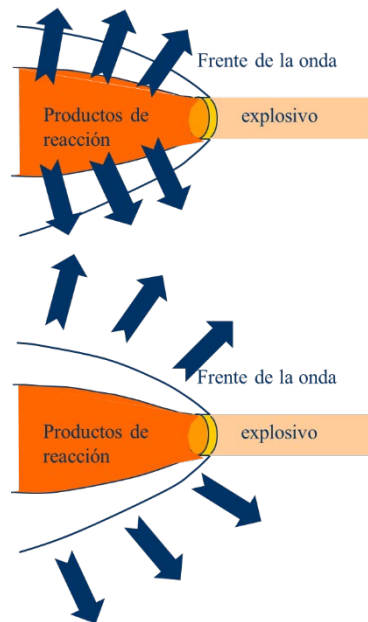
Tema 6. Mecanismos de Fracturación del Macizo Roco por Acción del Explosivo

Índice del Tema:

1. INTRODUCCIÓN
2. EL EFECTO DE LA ONDA DE CHOQUE
3. ROTURA POR EFECTO DE LOS GASES

1. Introducción

Según progresa la detonación de una carga explosiva confinada en el interior de un barreno se van originando gases, con una energía interna muy elevada, que chocan rápidamente contra la roca adyacente. Este impacto produce en el macizo un tren de ondas de deformación/tensión (P y S) que interactúa con las juntas, fracturas, cambios de litología, caras libres..., que va encontrando en su camino,



generándose nuevas ondas. El campo de deformaciones, dinámico, se vuelve extremadamente complejo ya que cada punto del macizo será alcanzado no sólo por las ondas directas que genera cada barreno de la voladura, sino por las transmitidas, las reflejadas y las refractadas que puedan producirse con cada variación de impedancia acústica del macizo.

El tren de ondas se atenúa con la distancia al barreno debido, por una parte, a la divergencia geométrica y, por otra, a que provocan la ocurrencia de fenómenos no elásticos que, en términos generales, se traducen en la rotura de la roca en las cercanías del barreno.

Por otra parte, la energía remanente de los gases, tras el choque y antes de la pérdida de su confinamiento, puede ser lo suficientemente elevada como para contribuir también en la fracturación del macizo.

Son diversos los mecanismos propuestos para explicar la fracturación del macizo por la acción conjunta de las ondas y gases. A modo de compendio, según se alejan las ondas del barreno, se tiene: trituración de la roca si se supera su resistencia en el estado tensional dinámico, inicialmente compresivo, a la que se encuentra sometida. Adyacente a esta zona pueden producirse fracturas cortantes. Posteriormente, debido a la rápida caída de las tensiones tangenciales, pueden formarse grietas radiales algunas de las cuales se extenderán más que el resto en función de factores como la estructura y micro-estructura del macizo o su estado tensional previo. Alcanzado este punto las ondas no pueden fisurar la roca, pero pueden seguir promoviendo su creación o extensión a partir de los poros o fisuras preexistentes en el macizo o, simplemente, promoviendo el esponjamiento del macizo. Cuando las ondas alcanzan las caras libres casi toda su energía se refleja, debido a la baja impedancia acústica del aire, invirtiendo su naturaleza: las tensiones radiales de pico, que al llegar a la cara libre son compresivas, pasan a ser tractivas ocurriendo lo contrario con las tangenciales. Estas ondas pueden producir el descostramiento o spalling de la roca, si se supera su resistencia dinámica a tracción en el régimen en el que se encuentra sometida, o pueden contribuir, por ejemplo, a la extensión de las fisuras preexistentes.

En cuanto a los gases, tras su impacto contra el macizo el valor de su presión media ha disminuido fuertemente debido a las ondas de rarefacción producidas por su rápida expansión. El campo tensional producido por esta presión, que actúa sobre un tiempo relativamente elevado, puede producir fisuras o favorecer su crecimiento a lo largo de alguna de las trayectorias de las tensiones principales. Así mismo, los gases tienden a introducirse por las grietas y fisuras que encuentran, extendiéndolas, a la vez que provocan el movimiento del macizo rocoso. Cuando el barreno no tiene suficiente salida, la componente vertical de dicho movimiento tiende a producir el desgarramiento del macizo hacia la superficie.

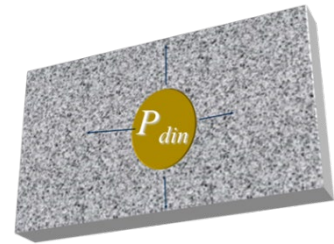
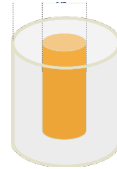
En conclusión, tanto las ondas generadas en el impacto inicial de los gases contra la roca como la energía remanente de los mismos, tras el choque y hasta la pérdida de su confinamiento, contribuyen a la rotura del macizo rocoso. En los epígrafes siguientes se amplía y se ahonda en lo expuesto.

2. El efecto de la onda de choque

Propagación de la onda por el macizo

Inicialmente el pulso de presión dinámico (P_{din}) actúa contra las paredes del barreno originando unas tensiones del orden de magnitud de GPa.

Si la carga está desacoplada la presión cae, debido a la expansión de los gases.

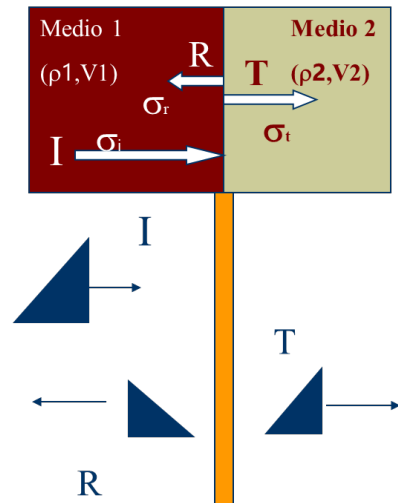


Como consecuencia de los fenómenos plásticos y del continuo incremento de la superficie que abarca la onda, el pulso se atenúa conforme se aleja del barreno.



Cuando la onda se encuentra con una discontinuidad, parte de la energía de la onda se transmite (T) y parte se refleja (R) en función del contraste de impedancias de los medios que atraviesa. La impedancia acústica de un medio (Z) es igual al producto de la densidad del medio por la velocidad de propagación de las ondas P en dicho medio. El contraste de impedancias (c) es el ratio de impedancias entre los dos medios: Z_2/Z_1 .

Igualando tensiones y velocidades de partícula en la discontinuidad, y en el caso de incidencia perpendicular, se obtiene el reparto energético relativo entre la onda reflejada y la transmitida:



$$R = \left(\frac{c-1}{c+1} \right)^2 \quad T = \frac{4c}{(c+1)^2}$$

De las expresiones se deduce que la transferencia de energía de choque es máxima cuando c es 1 (los medios tienen la misma impedancia).

Por otra parte, la impedancia del explosivo es igual al producto de su densidad por su velocidad de detonación. Por tanto, desde la perspectiva de transferencia de energía de choque, para macizos duros y densos es interesante utilizar explosivos con gran poder rompedor mientras que para macizos blandos o fracturados será más conveniente, en general, utilizar explosivos con alta energía de burbuja (gases).

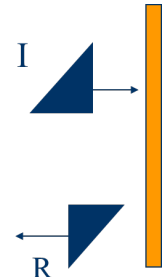
Las magnitudes de las tensiones de la onda transmitida y reflejada, relativas a la onda incidente, son:

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_I} = \frac{c-1}{1+c}$$

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_I} = \frac{2c}{1+c}$$

¿Qué ocurre entonces cuando la onda de presión alcanza una superficie libre?

Como la impedancia del aire es muy pequeña, c se aproxima a cero y la mayor parte de la energía se refleja como onda de tracción si la onda incidente es compresiva y, viceversa, como onda compresiva si la onda incidente es tractiva.

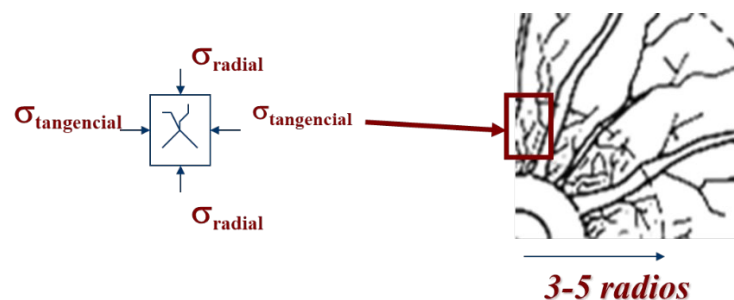


Comprendidos los modelos teóricos del comportamiento de la onda de choque en el macizo, podemos inferir los mecanismos que producen su rotura.

Mecanismos de rotura por acción de la onda de choque

Rotura por superación de la resistencia dinámica a compresión de la roca

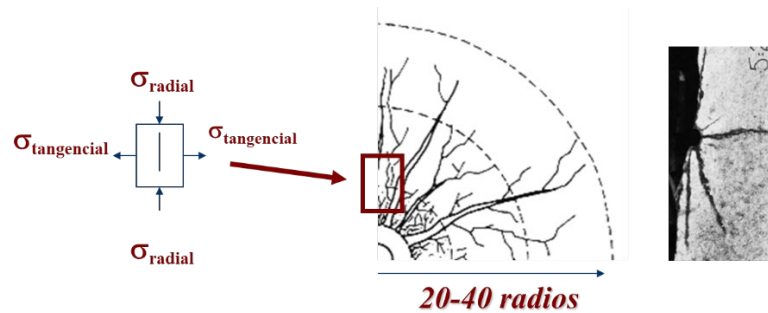
Las tensiones, inicialmente compresivas, trituran la roca que rodea al barreno si superan su resistencia bajo las condiciones de carga (se denomina esta zona como hidrodinámica dado que se desprecia la resistencia de la roca y se supone un comportamiento fluido de la misma). Adyacente a esta zona pueden aparecer fracturas originadas por esfuerzos cortantes (zona no lineal).



Inicialmente, en las inmediaciones del barreno, las tensiones son compresivas

Rotura por superación de la resistencia a tracción

Debido a la caída del valor de la componente tangencial a valores tractivos y favorecida por el hecho de que la resistencia a tracción de la roca es inferior en un orden de magnitud a la resistencia a la compresión, se produce una zona de agrietamiento radial alrededor del barreno- si las tensiones superan el valor de su resistencia.



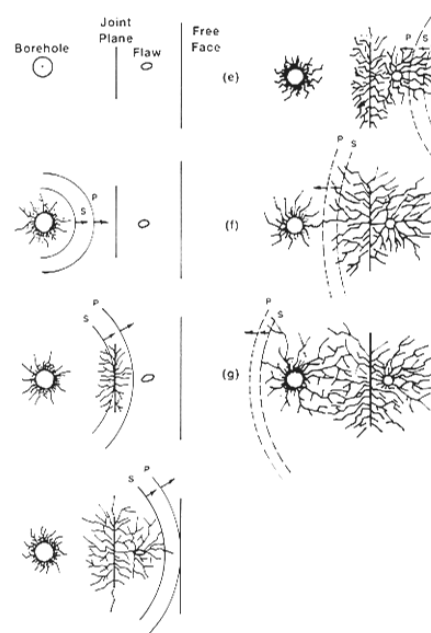
La extensión de las grietas radiales puede ser el doble de la indicada si las cargas están acopladas ($f_a=1$)

Algunas de las fracturas se extenderán más que otras debido a la heterogeneidad natural del macizo (micro-fracturas, fisuras, variaciones locales...) y a la distribución original de tensiones.

A partir de este momento y hasta la llegada de la onda a la cara libre los fenómenos se consideran como prácticamente elásticos, si bien, hay algunos autores que dan gran importancia en el fenómeno de rotura, a lo que se denomina como teoría de la nucleación.

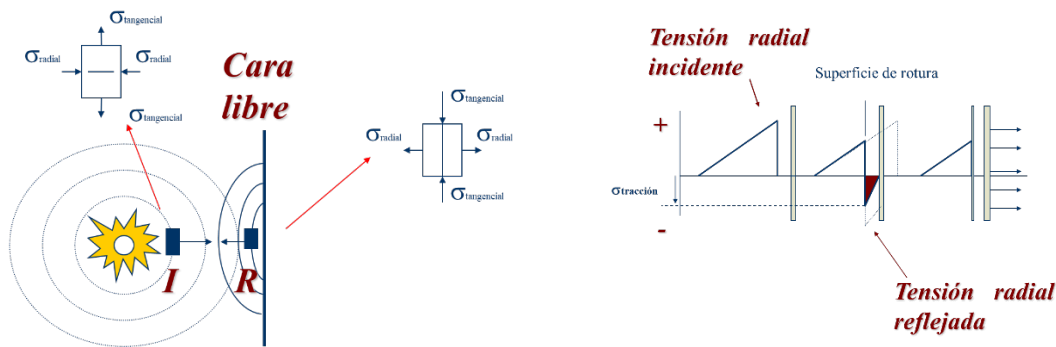
Rotura por formación y activación de fracturas preexistentes debido al paso de las ondas de tensión (interacción de la cola de las ondas P y de la cabeza de las S)

Según esta teoría, con el paso de las ondas a través de las discontinuidades (fisuras, grietas, juntas, estratificación, poros...) se forman y desarrollan nuevas fracturas y se reactivan las preexistentes.



Rotura por el fenómeno de descostramiento (spalling)

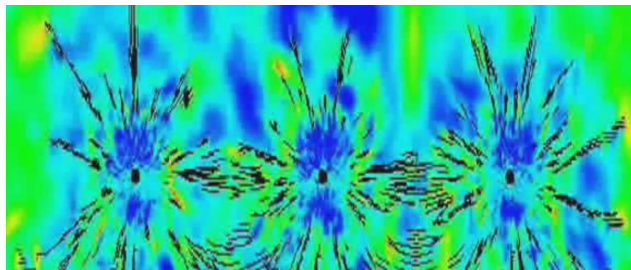
Cuando la onda radial, compresiva, llega a la cara libre se refleja como onda de tracción –y la tangencial, tractiva, como onda de compresión–, pudiendo dar lugar a la rotura en el frente si se supera la resistencia a tracción de la roca. Dichas ondas también extienden las fracturas producidas en las fases anteriores.



Fenómeno de descostramiento debido al rebote de las ondas en la cara libre

Este fenómeno es importante en voladuras en cráter, en las que los consumos específicos son muy elevados (por encima del kg/m^3).

Finalmente, cuando la relación E/V no es muy elevada y los barrenos salen (casi) al mismo tiempo hay una tendencia a la rotura según el plano de unión entre barrenos, por cooperación entre ellos, a la que contribuye también la acción posterior de los gases por su efecto de cuña.



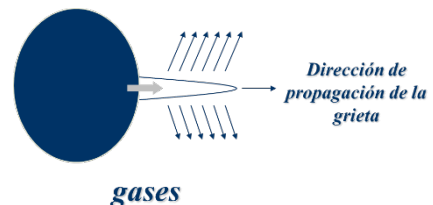
Cooperación en la rotura entre barrenos aadyacentes

3. Rotura por efectos de los gases

La liberación, relativamente lenta, de la energía interna de los gases origina nuevos mecanismos de rotura en la roca que se exponen a continuación.

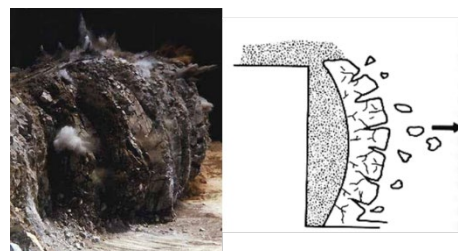
Ampliación de las fracturas existentes

Los gases se introducen por las fracturas/fisuras recién creadas y por las preexistentes ensanchándolas por el efecto cuña que producen.



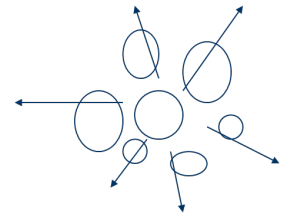
Rotura por flexión del banco

La acción de empuje de los gases provoca la rotura por flexión del banco. Este efecto será más patente cuanto mayor sea la esbeltez del banco.



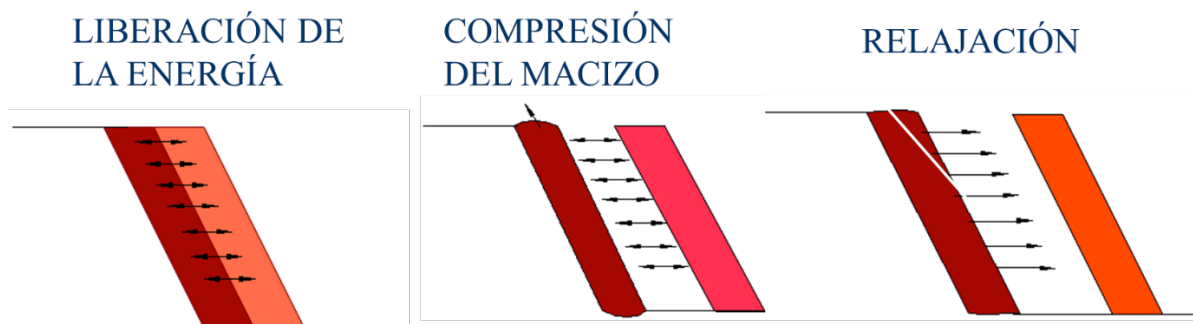
Disgregación y expulsión de los fragmentos

Los gases provocan la disgregación del macizo en fragmentos, que son proyectados con formación de roturas adicionales por choque entre ellos y con el suelo.



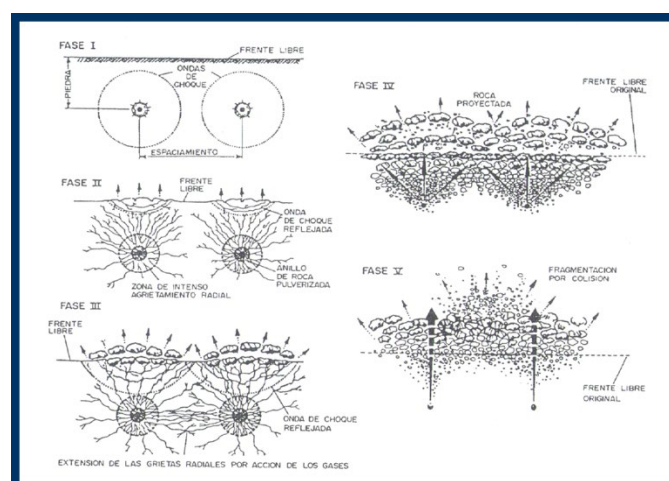
Relajación del macizo tras la liberación de la carga

Los gases comprimen al macizo remanente que, al recuperar su estado inicial cuando aquellos se liberan a la atmósfera, tiende a provocar grietas de tracción en la cabeza del talud. La presencia de fracturas / foliación / pizarrosidad /... puede favorecer este tipo de rotura según sea su orientación.



Formación de grietas de tracción en la cabeza del banco

En definitiva, la rotura del macizo se produce por la acción combinada de todos estos mecanismos (CHOQUE + GASES) que interactúan de forma muy compleja en un macizo, en general con comportamiento anisótropo, y en la que intervienen factores como la estructura inicial y la presencia de agua en el mismo.



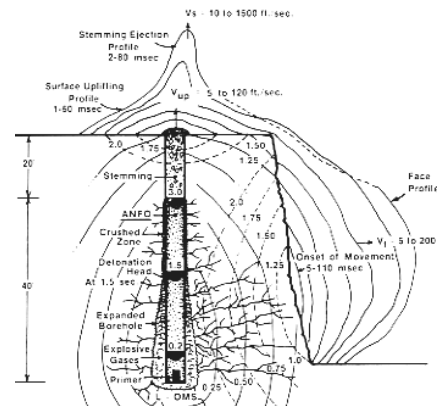
Combinación entre los mecanismos de fracturación

Finalmente, se ofrece un bosquejo temporal de algunos de los fenómenos que ocurren al detonar un barreno. Los datos de interés son los siguientes:

$$d = 5'' \quad h = 12 \text{ m}$$

$$H = 18 \text{ m} \quad V = 4.5 \text{ m}$$

Anfo	Granito
4000 m/s	4500 m/s
800 kg/m ³	2800 kg/m ³



Bosquejo temporal de alguno de los fenómenos ocurridos al detonar la carga explosiva en el barreno

En donde d es el diámetro de perforación, h la altura de carga, H la altura del banco y V la piedra (mínima distancia entre el barreno y la cara libre vertical medida en el pie del banco).

La duración de la detonación del anfo es del orden de 3 ms. En 1 ms la onda llega a la cara libre. Las grietas y gases se propagan, en los instantes iniciales, a unos 1000 m/s. El movimiento del frente comienza en una decena de ms a una velocidad entre 10 m/s y 20 m/s (errores en la perforación o un retacado deficiente pueden causar velocidades de proyección de centenares de m/s).