

# EVOLUCIÓN DE LOS EXPLOSIVOS INDUSTRIALES

Por  
Víctor Legorburu Zuazua  
y  
Luis Sánchez Barbero

## 1.- INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento en 1847 de la nitroglicerina por el químico italiano Ascanio Sobrero y de la dinamita gelatinosa en 1870 por el ingeniero sueco Alfred Nobel, los explosivos industriales han experimentado un gran auge en las últimas décadas.

El desarrollo de los nuevos productos explosivos se ha dirigido hacia una mayor seguridad en su manipulación y un menor costo no sólo en su fabricación, sino también en su aplicación, al poderse facilitar su carga a granel o por bombeo.

Estos objetivos se consiguieron primero con el desarrollo de la mezcla de aceites minerales con el nitrato amónico o Anfo. A continuación se fabricaron los geles explosivos o Hidrogeles. Finalmente se han desarrollado las emulsiones explosivas y sus mezclas con el Anfo.

Actualmente se fabrica una gama muy amplia de explosivos industriales, que permite al usuario elegir el más adecuado para su trabajo. Esta selección se basa en la determinación de una serie de parámetros del macizo rocoso a volar, en la definición previa de la geometría de la

voladura y en el conocimiento de un conjunto de propiedades, que caracterizan cada tipo de explosivo.

## 2.- PROPIEDADES DE LOS EXPLOSIVOS INDUSTRIALES

Las características que diferencian los explosivos industriales, no sólo se refieren a las que existen entre cada "familia" de ellos, sino también dentro de cada una de ellas.

De esta forma la aplicación de los explosivos se realiza en cada caso de una forma idónea con la consecución de rendimientos máximos posibles.

La elección del explosivo teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas se basa en los siguientes parámetros:

- Potencia explosiva.
- Velocidad de detonación.
- Densidad de encartuchado.
- Resistencia al agua.
- Sensibilidad y aptitud a la propagación.
- Humos.

### 2.1 Potencia explosiva.

La potencia de un explosivo es su capacidad de fracturar y proyectar la roca a volar. Esta definición no es muy precisa, puesto que para volar rocas blandas se necesita un explosivo de baja potencia. Realmente esta propiedad es el resultado de la combinación de su velocidad de detonación y del volumen de gases producidos en la explosión.

Existen varios métodos para valorar esta característica, utilizándose normalmente la deformación producida en el interior de un bloque de plomo o Traulz y la reacción que mueve un balancín o Mortero Balístico.

Esta propiedad se debe tener

en cuenta no sólo relacionándola con las características físicas de la roca a volar, sino también con la situación geométrica de la voladura. Este último caso se presenta en los barrenos del cuele del frente de avance en un túnel o de una galería, puesto que en esa reducida zona del cuele, si se utiliza un explosivo muy potente se produce una deformación plástica de la roca, en vez de su arranque.

## **2.2 Velocidad de detonación.**

La velocidad de detonación es la correspondiente al desplazamiento a través del explosivo de la onda de detonación. Este parámetro tiene un significado físico de potencia cedida por la detonación del explosivo, ya que a mayor velocidad mayor será también la energía cedida en el mismo tiempo

La energía proporcionada durante la explosión se manifiesta en parte por la onda de detonación, destinada a fisurar la roca y por otra parte en los gases que a elevada presión y temperatura, ensanchan las grietas, proyectando los fragmentos de roca.

En el caso de una roca dura y tenaz, el efecto más importante para producir su voladura es el conseguir su fisuración y por el contrario, si la roca es blanda y deleznable, es mejor que la explosión de lugar a una gran cantidad de gases.

En cualquier caso, la eficacia de un explosivo está determinada por la aproximación entre el valor de la denominada impudencia del explosivo, que es el producto de su densidad por su velocidad de detonación y de la impedancia del macizo rocoso, producto de su densidad por su velocidad de propagación sísmica.

La velocidad de un mismo tipo de explosivo depende del diámetro del

cartucho, del grado de confinamiento y de la energía recibida para su iniciación.

La medida de la velocidad de detonación se puede realizar por diferentes métodos, según la precisión que se quiera conseguir, siendo los más frecuentes los de Dautriche, el del Cronógrafo y el de Kodowimeter.

## **2.3 Densidad del encartuchado.**

La densidad del encartuchado depende del parámetro físico del peso específico del explosivo y del grado de compactación. Esta se realiza de forma que en cada explosivo sea la óptima para desarrollar su máxima velocidad, potencia, etc.

En general, los explosivos de alta densidad tienen mayor potencia y velocidad de detonación y además, son más resistentes al agua.

## **2.4 Resistencia al agua.**

Esta propiedad depende de los elementos constituyentes del explosivo, especialmente del nitrato amónico, pues esta sal oxidante es muy higroscópica. Lo contrario ocurre con la nitroglicerina, por lo cual los explosivos que contienen este compuesto orgánico resisten mucho la presencia del agua o el ambiente húmedo. También, debido a sus componentes, son muy resistentes los hidrogeles y las emulsiones, y prácticamente inutilizable en el caso de que exista agua en los barrenos es el Anfo, por su alto contenido en nitrato amónico.

## **2.5 Sensibilidad. Aptitud a la detonación**

La sensibilidad es la facilidad relativa de un explosivo para detonar, cuando se le somete a un estímulo externo. Los explosivos deben mantenerse insensibles ante los golpes o rozamientos

accidentales, para conseguir una mayor seguridad en su manejo; pero debe detonar cuando se quiere iniciar su explosión.

Actualmente se tiende a utilizar explosivos muy poco sensibles, para que su carga sea lo más segura posible, especialmente si ésta se hace mecánicamente; su iniciación tiene entonces que realizarse a través de una pequeña carga intermedia, cuya introducción en el barreno se hace por otros medios más seguros.

El grado de insensibilidad de un explosivo se mide por medio de ensayos, que provocan choques o rozamientos convenientemente normalizados y semejantes a los casos extremos a los que pudiese estar sujeto el explosivo.

Los hidrogeles y las emulsiones, no reaccionan ante estos estímulos, mientras que las gomas son más o menos sensibles según la proporción, que tengan de nitroglicerina, aunque ante un manejo adecuado también estos explosivos son seguros.

La sensibilidad de un explosivo está relacionada con la aptitud a la detonación, cuando se produce cerca de él una explosión. Este parámetro, que tiene su interés práctico cuando el explosivo se encuentra confinado en un barreno, se obtiene mediante ensayos con diferentes distancias de separación, efectuados al aire libre sobre cualquier material inerte como es el mismo suelo.

## **2 . 6 Humos.**

Los humos de una voladura están formados por el conjunto de gases resultantes de la explosión. En ellos existen gases derivados de la reacción química de los componentes del explosivo, producidos por la detonación además de vapor de agua y finas partículas de los productos propios del explosivo y de la roca volada.

Los gases de la explosión tienen una gran importancia cuando se realizan voladuras en túneles o en la minería subterránea, puesto que suelen tener compuestos químicos nocivos, como son los óxidos de carbono y los vapores nitrosos.

Lógicamente la escasez de componentes ricos en oxígeno y la abundancia de nitratos en el explosivo da lugar a humos más nocivos. Por lo tanto, los explosivos cuyo componente mayoritario es el nitrato amónico, como en el caso del Anfo, son poco para el uso en voladuras subterráneas; las gomas y las emulsiones son un caso intermedio y los hidrogeles son los mejores,

## **3.-TIPOS DE EXPLOSIVOS INDUSTRIALES**

Los diferentes tipos de explosivos industriales se pueden agrupar en seis grandes familias, cada una de las cuales tienen unas características muy definidas y propias de cada una de ellas. Estas son:

- Pólvora de mina.
- Explosivos sensibilizados con nitroglicerina,
- ANFO.
- Hidrogeles.
- Emulsiones explosivas.
- ANFO pesado.

### **3 . 1**

La pólvora de mina es un producto deflagrante y no realmente explosivo, puesto que su velocidad de propagación es de 400 m/s y por lo tanto no detona.

Cuando la pólvora negra se inicia confinada dentro de un barreno no se produce una onda de choque. Sólo actúan

los gases sobre la roca, presionándola y rompiéndola en los tramos situados entre los barrenos, sin dañar el resto de la roca. Por esta razón, la pólvora negra se emplea preferentemente para separar bloques grandes de las rocas ornamentales de su macizo.

Este producto explosivo es muy sensible al agua, por lo que no se debe utilizar en barrenos que contengan agua.

### **3, 2 Explosivos sensibilizados con Nitroglicerina.**

En el proceso de fabricación de estos explosivos, la nitroglicerina se gelatiniza con nitrocelulosa, Además se añaden proporciones variables de nitrato amónico y otros productos, que les confieren diferentes propiedades, dando lugar a una amplia gama de Gelatinas especiales, apropiadas para diferentes usos.

En general, estos explosivos tienen una consistencia plástica, que permite un buen encartuchado, una buena resistencia al agua, por lo que se pueden utilizar en todas las condiciones por encima y por debajo del nivel freático e incluso bajo el mar. Estas propiedades junto con su elevada potencia explosiva, densidad y velocidad de detonación, hacen que estos explosivos sean adecuados para la voladura de las rocas más duras, especialmente en las labores subterráneas.

Dentro de este tipo de explosivos se fabrican también los denominados de seguridad, en los que se añade un producto inhibidor y otros que al reaccionar entre sí en el momento de la explosión son inhibidores y que impiden la inflamación del grisú, polvo de carbón o mezclas de ambos en las minas de carbón.

### **3.3 ANFO.**

A la mezcla de nitrato amónico con aceites minerales se le denomina ANFO. A este producto explosivo se le pueden añadir otros componentes que aumentan su potencia.

El ANFO es un material granulado, por lo que se puede cargar en los barrenos a granel vertiéndolo desde sacos o mecánicamente desde camiones. Una de sus mayores ventajas es su seguridad en el manejo y el ser un explosivo que da un buen rendimiento en la voladura de rocas blandas o muy fracturadas, pues su explosión produce un gran volumen de gases. Por el contrario tiene baja potencia, y no se puede usar cuando existe agua en los barrenos. Los gases que produce son muy nocivos, lo que limita mucho su uso en túneles y minería subterránea.

### **3, 4 Hidrogeles.**

Los hidrogeles, también llamados papillas explosivas, están formados por un oxidante, generalmente un nitrato y un reductor, junto los gelatinizantes y estabilizantes, que le dan una buena consistencia e impiden la difusión dentro de él de la posible agua exterior, por lo que resiste muy bien la humedad y el agua de los barrenos.

Estos geles explosivos son muy seguros ante impactos y ondas subsónicas, sus humos son muy poco tóxicos, tienen una elevada potencia y permiten su carga a granel y mecanizada. Esta última ventaja supone a su vez una mejora en el rendimiento del explosivo, pues su contacto con la pared del barreno es más estrecho, evita el encartuchado y minimiza el personal y el tiempo de carga de la voladura.

### **3.5 Emulsiones.**

Las emulsiones explosivas

son unas dispersiones estables de dos líquidos, una solución acuosa y compuesto orgánico aceitoso, inmiscibles entre sí, pero que con un emulsionante se mantienen en estado disperso.

La fase acuosa está formada por una solución de oxidantes y la orgánica por un aceite mineral, que es el componente reductor. En principio es una mezcla semejante a la del ANFO, pero con la diferencia importante, de que las gotitas de agua con oxidantes están rodeadas de aceite, dando lugar a que se produzca un contacto más íntimo entre esos dos componentes, aumentando su potencia explosiva; además se consigue una gran resistencia al agua, pues el aceite impermeabiliza y evita una mayor disolución del nitrato, contenido en la fase acuosa.

La potencia de estos explosivos, se evalúa por métodos diferentes al péndulo balístico, considerando otros parámetros que se definen a continuación.

“ENERGÍA ABSOLUTA POR PESO” (AWS): Valor de la energía calorífica obtenida por medio de los calores específicos de formación de las reacciones, que se producen en la detonación del explosivo por unidad de peso, expresado por lo tanto en cal/g.

“ENERGÍA ABSOLUTA POR VOLUMEN” (ABS): Valor de la energía, obtenida al multiplicar el AWS por la densidad del explosivo, expresándose el valor en cal/cc, Este parámetro es más representativo de la energía cedida por el explosivo, ya que es función de su densidad.

“FACTOR DE ENERGÍA” (EF): Su magnitud da el número de calorías necesarias para volar un metro cúbico de roca, calculándose al multiplicar el AWS, por la relación entre el peso del explosivo utilizado en la voladura y el volumen total

de roca arrancada, es decir, por el consumo específico. Su valor viene dado en cal/m<sup>3</sup>.

Así como en los explosivos industriales tradicionales, su potencia se refiere a la de la Goma Pura, que se toma como unidad patrón en el ensayo del péndulo, dándole el valor de 100, en el caso de las emulsiones, estos valores se refieren al ANFO, como patrón.

De la consideración anterior se llegan a determinar dos valores fundamentales, que son:

“ENERGÍA RELATIVA POR UNIDAD DE PESO” (RWS): Relación entre las AWS de la emulsión y del ANFO, multiplicada por 100.

“ENERGÍA RELATIVA POR UNIDAD DE VOLUMEN” (RWS): Relación entre las ABS de la emulsión y del ANFO, multiplicada por 100.

### 3.6 ANFO pesado.

El ANFO pesado es un nuevo explosivo conseguido por la mezcla adecuada entre una emulsión explosiva y ANFO.

**El ANFO pesado es un explosivo con características intermedias entre sus dos componentes, teniendo una mejor resistencia al Anfo, mayor densidad y potencia, aumentando su rendimiento y ampliando su uso en la voladura de cualquier tipo de material, con un costo menor de voladura.**

Presión (GPa)

Este tipo de explosivo es altamente seguro frente a estímulos subsónicos, roces, impactos, etc. Permitiendo su carga a granel o mecanizada por medio de bombeo desde camión. Su sensibilidad es la apropiada para iniciarse con una carga

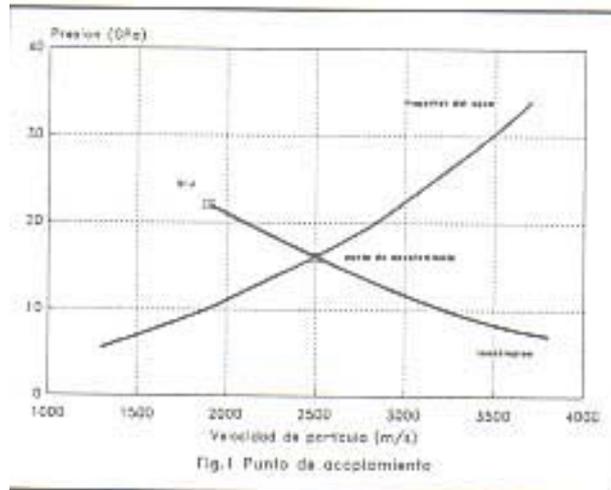
multiplicadora o un cartucho de explosivo sensible al detonador.

La potencia de estos explosivos, se evalúa como en el caso de las emulsiones, siendo sus valores intermedios entre el de estas y el del Anfo. Su RBS es de 125, para la mezcla del 30% de emulsión y el 70% de Anfo, con una densidad de 1,15 g/cc.

#### 4.- ENERGIA DE CHOQUE Y BURBUJA

La energía de los explosivos se está evaluando actualmente por medio de un nuevo método de ensayo, consistente en la detonación del explosivo bajo el agua y la determinación de las llamadas energía de choque y burbuja. Éstas son transmitidas al agua por la onda de choque y por los gases producto de la explosión.

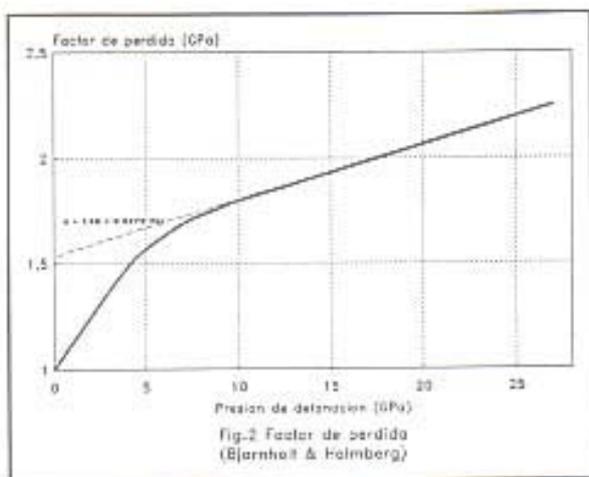
La energía de choque se relaciona con el poder rompedor del explosivo y la de burbuja es una medida del trabajo útil de la expansión de los gases, que produce el arranque del material fragmentado por la voladura.



La detonación de un explosivo induce, en el medio que la rodea, una onda de choque que depende de las propiedades del propio medio y de las características de los productos de la detonación. Estos se encuentran en algún punto de su curva adiabática dinámica o de Hugoniot, probablemente el estado de Chapman-Jouquet o (Figura 1). A partir de ese punto los productos se expansionan de una forma isentrópica mucho más rápido que la difusión del calor al medio, acelerándose y convirtiendo así su energía interna en cinética.

Si el medio que rodea el explosivo es el agua, sus partículas adquirirán una velocidad, evolucionando según curvas o de acoplamiento. El resto de la energía se transformará en trabajo de expansión de los gases contra el agua o vaporización del agua, calentamiento de la misma, etc. La suma de la energía de choque ( $E_c$ ) la energía de burbuja ( $E_b$ ) y las pérdidas ( $E_p$ ) es el calor de explosión a volumen constante ( $Q_v$ ).

La energía de pérdida es una fracción de la energía de choque, por lo que se puede relacionar con ella por medio del factor de pérdida ( $\mu$ ), que en una función creciente de la presión de detonación del explosivo (Figura 2)



En resumen, los datos para calcular las energías de choque y burbuja, según lo expuesto, son:

- Calor de explosión a volumen constante ( $Q_v$ )

- Estado C–J. En concreto, la presión de detonación, para el cálculo del factor de pérdida ( $\mu$ ) y la energía interna de los productos, para calcular la energía de choque.

- Isentrópica de los productos de la explosión, hasta su intersección con la Hugoniot del agua.

Todas estas magnitudes se pueden calcular con un código termodinámico, desarrollado por UEE y denominado “DETCOM”, empleando la ecuación de estado BKW de Cowan y Fickett.

De la ecuación del impulso aplicado a un choque, se deduce, si el medio está inicialmente en reposo y el choque es intenso:

$$P = \delta_0 * V * v \quad (1)$$

Donde  $V$  es la velocidad de choque,  $v$  la de las partículas y  $\delta_0$  es la densidad inicial. Las velocidades  $V$  y  $v$  verifican aproximadamente una relación lineal determinada experimentalmente, que es:

$$V = c * s * v$$

Siendo  $c$  y  $s$  constantes del material, que para el agua son 1.483 m/s y 2 respectivamente.

Por lo tanto la ecuación (1) queda:

$$P = \delta_0 * (c + s * v) * v$$

que es el Hugoniot del agua, cuya intersección con la isentrópica calculada de

los productos de detonación, identifica un estado cuya energía interna se ha calculado con DETCOM. Si  $E_{cj}$  es la energía interna del estado C-J y  $E_1$  la del punto de intersección:

$$E_c = E_{cj} - E_1$$

Igualmente calculable con DETCOM el estado de la explosión a volumen constante y, por lo tanto, el calor de explosión  $Q_v$  y la energía de la burbuja, que es:

$$E_b = Q_v - \mu * E_c$$

El factor  $\mu$  se calcula a partir de la presión de detonación, con la función de la figura 2, utilizándose la recta  $\mu = 1,52 + 0,0276 * P_{cj}$ , cuando la presión de detonación es superior a 10 GPa.

## 5.- DETONADORES ELECTRÓNICOS

Entre los accesorios de una voladura son fundamentales los que inician la detonación del explosivo. Desde el detonador de mecha, seguido por el eléctrico y posteriormente por los detonadores Nonel, Magnadet, Hercudet, y multiplicadores temporizados convencionales, se ha llegado actualmente a fabricar el Detonador Electrónico.

El sistema del detonador electrónico se compone básicamente de dos elementos, uno de los cuales es el detonador propiamente dicho y el otro el mando y programación, constando de una parte analógica, una digital y del sistema de encendido. La primera trata las señales recibidas por los cables de conexión y las envía a la parte digital, que las interpreta, generando los tiempos de retardo y dando la señal de encendido a la cerilla inflamatoria,

Este tipo de detonadores tiene la posibilidad de regularse con gran

exactitud su retardo. Esta mejora permite un mejor grado de fragmentación y una menor vibración con no mucho mayor costo.

Una de las mayores ventajas de los detonadores electrónicos es la seguridad, ante cualquier corriente extraña que incidentalmente llegase a sus cables de conexión, ya que es necesario un código cifrado para que la corriente pasase a cargar el condensador cuya descarga inicia la cerilla.