

Explosivos

TEMA 1. GENERALIDADES Y DEFINICIONES.

Características físicas de los explosivos.

Explosivo: composición o mezcla de dos sustancias, una explosiva y otra no-explosiva. Son dos sustancias, una oxidante, y otra reductora.

Cuando un cartucho explota los gases son aproximadamente 10.000 veces el volumen inicial del cartucho.

Para que haga el mejor efecto procuraremos que esté el cartucho lo más encerrado posible.

Para hacer una voladura *barrenaremos* el terreno, a continuación llenamos el barreno con explosivo, y el espacio que quede del barreno sin rellenar se *retaca*, es decir, tapan el agujero lo mejor posible, lo que permitirá una voladura mucho más efectiva. En caso de no realizar este retacado, la voladura pegará bocazo, es decir, los gases producidos en la reacción se escaparán por la parte superior del agujero abierto, con lo cual perderemos mucha efectividad en la voladura.

Características generales de los explosivos.

Las características básicas de un explosivo y que nos van a ayudar a elegir el explosivo más idóneo para un fin determinado son las siguientes:

- 1.- Estabilidad química.
- 2.- Sensibilidad.
- 3.- Velocidad de detonación.
- 4.- Potencia explosiva.
- 5.- densidad de encartuchado.
- 6.- Resistencia al agua.
- 7.- Humos.

1.- Estabilidad química.

Es la aptitud que el explosivo posee para mantenerse químicamente inalterado durante un cierto periodo de tiempo.

Esta estabilidad con la que el explosivo parte de fábrica se mantendrá sin alteraciones mientras las condiciones de almacenamiento sean adecuadas. Esto permitiría al usuario tener un producto totalmente seguro y fiable para los trabajos de voladura.

Las pérdidas de estabilidad en los explosivos se producen bien por un almacenamiento excesivamente prolongado o bien porque las condiciones del lugar no sean las adecuadas.

Si los explosivos son polvulentos con nitrato amónico se estropearán perdiendo dinero pero no tendremos accidentes.

Los explosivos con nitroglicerina si pierden su estabilidad química puede significar que la nitroglicerina se ha descompuesto. El cartucho suda o se observan manchas verdes en la envoltura. En este caso el peligro es inminente y es imprescindible la destrucción de este explosivo.

2.- Sensibilidad.

Se define la sensibilidad de un explosivo como la mayor o menor facilidad que tiene un explosivo para ser detonado. Se dice por lo tanto que un explosivo es muy *sensible* cuando detona sin dificultades al detonador y a la onda explosiva que se produzca en sus cercanías. Un explosivo *insensible* es todo lo contrario.

Los explosivos sensibles aseguran pocos fallos en los barrenos. Los insensibles por lo contrario provocarán más barrenos fallidos. En este sentido son mejores los explosivos sensibles. Ahora bien, están más cercanos a producirse una explosión fortuita que los explosivos insensibles en los que la probabilidad de accidente es prácticamente nula. En este sentido los insensibles son más seguros que los sensibles.

Existe otro concepto de sensibilidad debido a experimentos realizados en los laboratorios, donde se realizan la sensibilidad *al detonador*, sensibilidad *a la onda explosiva*, sensibilidad *al choque* y sensibilidad *al rozamiento*. De estas las dos primeras son deseadas, mientras que las dos últimas son sensibilidades indeseadas.

- **Sensibilidad al detonador.** Todos los explosivos industriales precisan para su iniciación como norma general de la detonación de otro explosivo de mayor potencia. Este explosivo puede ir colocado dentro de un detonador, de un cordón detonante o de un multiplicador, según el procedimiento que sigamos para la iniciación de la explosión. Si algún explosivo no fuera sensible al detonador, entonces los multiplicadores salvarían esta pega, aunque el 99% de los explosivos que actualmente se fabrican son sensibles al detonador.
- **Sensibilidad a la onda explosiva.** Se basa en determinar la máxima distancia a que un *cartucho cebado* transmite la detonación a otro cartucho receptor. Colocamos cartuchos en línea y ambos a continuación del otro, separados una determinada distancia *d*. Pero lo que sucede en realidad es que al cargar los barrenos entre cartucho y cartucho pueden haber materias inertes que siempre dificultan la propagación y a veces llegan a anularla. Por esta razón la norma indica que *la carga cuando se trate de explosivos encartuchados estará constituida por una fila de cartuchos en perfecto contacto unos con otros*.

Cartucho cebado: Cartucho con detonador. (Es el cartucho madre).

- **Sensibilidad al choque.** Los diferentes tipos de explosivos industriales pueden ser o no sensibles al choque, lo cual no quiere decir otra cosa que en algunos explosivos se puede producir su iniciación por un fuerte impacto. La forma de determinar la sensibilidad al choque se hace mediante una maza que se coloca a una determinada altura con una masa definida, se mide la altura hasta que el explosivo explota.
- **Sensibilidad al roce.** Al igual que con la sensibilidad al choque existen algunos explosivos que son sensibles al rozamiento. Es por esto que existe un ensayo normalizado que nos indica si un explosivo es sensible o no al rozamiento, y en caso de serlo en que grado lo es. Este ensayo se realiza con una máquina provista de un objeto cuyo coeficiente de rozamiento conocemos. La sensibilidad se conoce pasándolo por la longitud de todo el explosivo cada vez con mayor intensidad hasta que el explosivo explota.

3.- Velocidad de detonación.

V = velocidad buscada.

v = Velocidad de mecha. (Conocida).

$$t = \frac{BC}{V} + \frac{CE}{v} = \frac{BE}{v} \quad (1)$$

$$V = \frac{BC}{t - \frac{CE}{v}}$$

$$\frac{BC}{V} = \frac{BE}{v} - \frac{CE}{v} \quad V = \frac{BC}{\frac{BE}{v} - \frac{CE}{v}} \quad (2)$$

$$V = \frac{BC \cdot v}{BE - CE}$$

La velocidad de detonación es la característica más importante del explosivo. Cuanto más grande sea la velocidad de detonación del explosivo, tanto mayor es su potencia.

Se entiende por *detonación de un explosivo* a la transformación casi instantánea de la materia sólida que lo compone en gases. Esta transformación se hace a elevadísimas temperaturas con un gran desprendimiento de gases, casi 10.000 veces su volumen.

Sea un cartucho de un determinado explosivo **M** del cual queremos hallar su velocidad de detonación **V**. Si le introducimos un detonador en el interior y a su vez le practicamos dos orificios **B** y **C** de los que salen una mecha patrón cuya velocidad de detonación es conocida, **v**, y colocamos una placa de plomo, como indica la figura, tendremos lo siguiente.

Al explotar el detonador explota todo el cartucho, pero lo hace antes en B que en C, ¿por qué?. Porque está más cerca del detonador.

Por lo tanto las ondas no se encuentran en el punto medio **D**, sino en otro punto **E** (visible en la placa por ser de plomo la placa).

El tiempo empleado en seguir un camino o el otro es el mismo, por lo tanto se cumple (1), y operando llegamos a (2) que nos determina la velocidad de detonación **V** de un explosivo.

Para algunos trabajos interesan explosivos lentos, de poca potencia. (En canteras de roca ornamental). Si queremos grandes producciones (sobre todo estéril), usaremos explosivos de baja velocidad de detonación, de poca potencia.

4.- Potencia explosiva.

La potencia puede definirse como la capacidad de un explosivo para fragmentar y proyectar la roca.

Depende por un lado de la composición del explosivo, pese a que siempre es posible mejorar la potencia con una adecuada técnica de voladura.

Para la medida de la potencia de un explosivo existen en el laboratorio diferentes técnicas de las cuales es la más empleada la del péndulo balístico. Por este procedimiento se mide la potencia de un explosivo en porcentaje en relación con la goma pura, a la que se le asigna por convenio la potencia del 100 %.

5.- Densidad de encartuchado.

La densidad de encartuchado es también una característica importante de los explosivos, que depende en gran parte de la granulometría de los componentes sólidos, y tipo de materias primas empleadas en su fabricación. El usuario en este caso nada tiene que hacer.

Al ser fundamental que los fondos de los barrenos estén completamente llenos de explosivos, si estos tuvieran densidad menor de uno y los barrenos tuvieran agua física, los cartuchos flotarían siendo imposible la carga del barreno. Utilizar en este caso explosivos de densidad inferior a uno sería un gravísimo error.

6.- Resistencia al agua.

Se pueden diferenciar tres conceptos:

- 1.- Resistencia al contacto con el agua.
- 2.- Resistencia a la humedad.
- 3.- Resistencia al agua bajo presión de la misma.

Se entiende por resistencia al agua o resistencia al contacto con el agua a aquella característica por la cual un explosivo sin necesidad de envuelta especial mantiene sus propiedades de uso inalterables un tiempo mayor o menor, lo cual permite que sea utilizado en barrenos con agua.

Si un terreno contiene agua emplearemos gomas, riogeles, etc., cuyo comportamiento al agua es excelente. Nunca se deben emplear explosivos polvulentos (Anfos) en contacto directo con el agua. Ahora bien, si el agua la agotamos con la carga de fondo, podremos emplear en la carga de columna explosivos polvulentos. En cualquier caso los explosivos polvulentos se comportan muy bien en barrenos sumamente húmedos si el contacto con el agua no es mucho. Es aconsejable en estos casos hacer la mitad de barrenos para cargarlos rápidamente y efectuar la pega.

En referencia al tercer punto, nos referimos no solo a que el explosivo soporte el contacto con el agua, sino que además aguante altas presiones debidas a las grandes profundidades. Los explosivos utilizados en este caso contienen como aditivos metales pesados, que les confieren características muy especiales, como es el caso de la goma GV submarina.

7.- Humos.

Se designa como humos al conjunto de los productos resultantes de una explosión, entre los que se encuentran gases, vapor de agua, polvo en suspensión, etc. Estos humos contienen gases nocivos como el óxido de carbono, vapores nitrosos, etc., y si bien su presencia no tiene importancia en voladuras a cielo abierto, si la tiene en voladuras en minas subterráneas y sobre todo si se realizan en lugares con poca ventilación. En este caso pueden ocasionar molestias e intoxicaciones muy graves a las personas que vayan a inspeccionar la voladura.

Para los trabajos subterráneos la composición del explosivo debe tener una proporción suficiente de O₂ capaz de asegurar la combustión completa.

Sensibilidad y diámetro crítico.

Sensibilidad: Puede definirse como la facilidad relativa del mismo para detonar.

Esto presenta una paradoja para los técnicos en explosivos, pues por un lado una elevada sensibilidad supone una clara ventaja de cara al funcionamiento del explosivo, pero a su vez puede suponer una gran desventaja en

cuanto al riesgo de detonar bajo cualquier estímulo accidental. Así pues, vemos que existen dos conceptos distintos dentro del término genérico de sensibilidad; el primero relacionado con la mayor o menor facilidad para que un explosivo detone cuando se desea, que denominaremos **sensibilidad deseada**, mientras que el segundo se refiere a la mayor o menor propensión a que un explosivo detone bajo cualquier estímulo accidental, que denominaremos **sensibilidad indeseada**.

Este último concepto, inédito hasta ahora en la tecnología de los explosivos, puede cuantificarse en algunos casos como el mínimo estímulo accidental necesario para que se produzca una explosión. En otras palabras, podemos afirmar que una alta sensibilidad indeseada trae consigo una elevada susceptibilidad a la detonación accidental, mientras que una baja sensibilidad indeseada equivale a una baja propensión a la iniciación fortuita, bajo el estímulo de cualquier fuente de energía distinta de la normalmente empleada.

Siempre existe un solapamiento entre ambas sensibilidades, por lo que en general una alta sensibilidad deseada implica una elevada sensibilidad indeseada y viceversa.

Esta tendencia está muy acentuada en los explosivos convencionales, en los que se parte de un producto altamente sensible a todo tipo de estímulos, al que se le insensibiliza con una serie de productos.

Entre los explosivos más comúnmente empleados, las **dinamitas** son los de mayor sensibilidad, por llevar en su composición nitroglicerina. Todas ellas se inician fácilmente con detonadores ordinarios y desde luego con cordón detonante de 12 gr / ml. Los **hidrogeles** son mucho más insensibles, no llevan nitroglicerina y requieren unos iniciadores más potentes, aunque también todos detonan con detonadores ordinarios y cordones detonantes de 12 gramos para arriba. Estos explosivos evitan todo riesgo de explosión debido a roces violentos o grandes presiones, como por ejemplo ser pisados por las orugas de un tractor o una excavadora.

Diámetro crítico: Cualquier explosivo en forma cilíndrica tiene un diámetro por debajo del cual no se propaga la velocidad de detonación.

Para explosivos nitrados, como el $\text{NO}_3 \text{NH}_4$, puede alcanzar valores hasta de 10 pulgadas, pudiendo ser insignificante tanto para la pentrita como para el nitrato de plomo, que son los que se utilizan en los cordones detonantes y detonadores.

Es necesario decir que en el diámetro crítico influye la densidad y el confinamiento de los explosivos en los barrenos.

TEMA 2. COMBUSTIÓN COMPLETA EN LAS REACCIONES EXPLOSIVAS.

Combustión completa en las reacciones explosivas.

NOTA. *Cae siempre en examen, sobre todo los ejercicios.*

No es fácil estudiar detalladamente la influencia del oxígeno en las características del explosivo; sin embargo es necesario procurar que si se van a utilizar en minería subterránea no se forme el temido CO (monóxido de carbono), porque este gas se fija en la sangre dando lugar a un compuesto llamado *Carboxihemoglobina*, que paraliza las funciones vitales sin que la agonía se advierta. Además este gas no es fácilmente detectable ya que es incoloro, inodoro e insípido.

Para lograr este objetivo, el oxígeno debe de estar en la proporción necesaria para que la combustión sea completa, dando así lugar a que todos los átomos de carbono se oxiden completamente dando CO_2 . Todos los átomos de hidrógeno que se formen deben dar lugar a moléculas de H_2O , pudiendo estar también presentes moléculas de nitrógeno, así como moléculas de oxígeno O_2 .

$(x + y) \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \dots\dots\dots$

EJERCICIOS PRÁCTICOS.

1.- Calcular el coeficiente m de la nitroglicerina en una gelamonita preparada con nitrocelulosa, así como la composición centesimal de esta mezcla explosiva para que se verifique una combustión completa.

Nitrocelulosa: $\text{C}_{24} \text{H}_{32} (\text{O NO}_2)_8 \text{O}_{12}$. Pm: 1008.

Nitroglicerina: $\text{C}_3 \text{H}_5 (\text{O NO}_2)_2$. Pm: 227.

2.- Calcular la composición centesimal de un explosivo compuesto por 3 moles de TNT y $(\text{NH}_4) \text{NO}_3$ para que se verifique una combustión completa.

TNT: $\text{C}_6 \text{H}_2 (\text{NO}_2)_3$.

N.A: $\text{NO}_3 \text{NH}_4$.

3.- Se dispone de dos explosivos: cheditta y tetralita. Calcular el porcentaje de cada uno de ellos para que en su mezcla se verifique una combustión completa.

Cheditta: $\text{Cl O}_4 \text{NH}_4$.

Tetralita: $\text{C}_6 \text{H}_2 (\text{NO}_2)_3 \text{N CH}_3$.

Balance de oxígeno.

Se usa para conocer el porcentaje de oxígeno que le sobra a un elemento, o el porcentaje que le falta de oxígeno.

1.- Determinar el balance de oxígeno de la tetralita, cuya reacción explosiva es.

$2 \text{C}_6 \text{H}_2 (\text{NO}_3)_4 \text{N CH}_3 \text{ ----- } \text{CO}_2 + 13 \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + 4 \text{H}_2 + 5 \text{N}_2$

2.- Calcular el balance de oxígeno de la nitroglicerina, cuya reacción explosiva es:

$\text{C}_3 \text{H}_5 (\text{NO}_3) \text{ ----- } 3 \text{CO}_2 + 5 / 2 \text{H}_2\text{O} + 3 / 2 \text{N}_2 + 1 / 4 \text{O}_2$

3.- Calcular el balance de oxígeno de la pentrita, cuya reacción explosiva es:

$\text{C}_3 \text{H}_5 (\text{NO}_3)_3 \text{ ----- } 3 \text{CO}_2 + 5 / 2 \text{H}_2\text{O} + 3 / 2 \text{N}_2 + 1 / 4 \text{O}_2$

TEMA 3.- EXPLOSIVOS COMERCIALES.

Generalidades.

Una vez vistas las propiedades generales de los explosivos, ha llegado el momento de ver las distintas clases de explosivos que nos ofrece el mercado, para elegir el adecuado en cada aplicación. Dividiremos los explosivos comerciales en dos grandes grupos.

- Explosivos con nitroglicerina.
- Explosivos sin nitroglicerina.

- **Explosivos con nitroglicerina.** Son sin duda los más potentes de los dos. Esta cualidad no es siempre la mejor, ya que en ocasiones se prefieren explosivos menos potentes, con el fin de conseguir una granulometría grande. Son explosivos más delicados, necesitan mejores condiciones de almacenamiento.
- **Explosivos sin nitroglicerina.** Son más seguros, algo más inestables y también de una potencia apreciable, aunque menor.

Dinamitas.

Se entiende como tales aquellas mezclas sensibles al detonador entre cuyos ingredientes figura la nitroglicerina. Su número y clase es extremadamente variado según países y marcas, variando también sus componentes adicionales, siendo los principales componentes los siguientes:

- **Explosivo base:** nitroglicerina.
- **Explosivos complementarios:** trilita, nitrobenzeno, etc.
- **Aditivos generadores de oxígeno:** nitrato amónico, nitrato sódico, nitrato potásico, así como cloratos y percloratos.
- **Sustancias que aumentan la potencia:** aluminio, silicio y magnesio.

Clases de dinamitas.

1.- GOMAS.

Están constituidas fundamentalmente por nitroglicerina y nitrocelulosa, pudiendo llevar en su composición los elementos anteriormente dichos.

Sus principales ventajas son su consistencia plástica, una gran densidad, magnífico comportamiento al agua y una gran potencia, siendo la goma pura el más potente de los explosivos comerciales.

Estos explosivos han sido sustituidos por las denominadas gomas especiales debido precisamente a su elevada sensibilidad unida a su alto precio.

2.- GOMAS ESPECIALES.

Incorporan como agente oxidante el nitrato amónico, que no siendo un explosivo base, contribuye a la energía de la explosión, al mismo tiempo que actúa como oxidante, para obtener un balance de oxígeno adecuado. Esto permite obtener un explosivo de potencia algo menor que las anteriores gomas, con menores proporciones en nitroglicerina.

Ya no son tan excesivamente sensibles y además nos ofrecen un menor costo por unidad de potencia. Conservan su plasticidad, tienen un comportamiento algo peor al agua, pero excelente de todas maneras, pero son los más adecuados para la mayoría de los trabajos que se presentan en la práctica, pudiéndose utilizar en barrenos llenos de agua.

Su aplicación fundamentalmente es como carga de fondo de barrenos de mediano y gran diámetro, y para la voladura de rocas de consistencia de dura a muy dura, utilizándose como carga de columna nagolita.

Para diámetros por debajo de dos pulgadas suele utilizarse como carga única del barreno porque al ser 2 pulgadas el diámetro crítico de las nagolitas, su utilización es imposible.

Agente explosivo de baja densidad: anfo, nafo, nagolitas.

Se conocen con el nombre de explosivos polvulentos, siendo conocidos en España como nagolitas. Empezaron a emplearse en la década de los setenta, llegando su consumo a ser el 75% de los explosivos utilizados en el mundo. Es un explosivo con unas características individuales muy malas, (hidroscópico, poco potente, mala conservación, ...), sin embargo su precio lo hace el más utilizado hoy en día en minas a cielo abierto.

Se trata de principalmente de una mezcla de nitrato amónico más fuel – oil.

Características más importantes de los anfos.

Se descubrió sobre el 1950 después de una desastrosa explosión que tuvo lugar en una fábrica de nitrato amónico en EE.UU. Aparte de otras consecuencias, este hecho centró la atención de los fabricantes en el potencial demostrado por el nitrato amónico, y a partir de los años 60 se empezó a utilizar con éxito el nitrato amónico sensibilizado con fuel–oil.

Así surgieron los anfos, que por su potencia relativamente elevada, facilidad de manipulación y sobre todo por su bajo precio, ganó con rapidez la supremacía en la mayoría de las canteras y minas a cielo abierto existentes.

Características intrínsecas y extrínsecas.

Se llaman intrínsecas aquellas en las que el operario no puede actuar. Las más importantes son:

- Tamaño y tipo de grano.
- Contenido en fuel–oil.
- Contenido de agua.
- Sensibilidad.

Factores externos son aquellos en los que el usuario tiene mucho en que actuar.

- Densidad de la carga.
- Diámetro del barreno.
- Iniciadores.

Características Intrínsecas.

TAMAÑO Y TIPO DE GRANO.

Tienen forma de granos, parecidos a los granos de arroz, son porosos, rellenos de aire, ya que así tienen una mayor velocidad de liberación de la energía. La porosidad óptima parece estar próxima a $0.07 \text{ cm}^3 / \text{gr}$

CONTENIDO EN FUEL– OIL.

La influencia del fuel–oil incorporado a la mezcla de nitrato amónico, en proporciones variables viene reflejada en la figura. La máxima velocidad de detonación se alcanza para un contenido en fuel–oil de 5´5 %; igualmente para esta proporción se alcanza el equilibrio en oxígeno.

En la zona (1), al disminuir el porcentaje en fuel–oil, significa que aumenta el porcentaje en nitrato, y como este es un dador de oxígeno, la zona (1) presenta un claro exceso en oxígeno. En esta zona se ve que la velocidad de detonación disminuye muy rápidamente, a la vez que el descenso en porcentaje en fuel–oil.

En la zona (2), donde ya la proporción en nitrato amónico es más pequeña, hay un defecto de oxígeno, y si bien la velocidad de detonación también disminuye, lo hace de forma más suave que en la zona (1).

CONTENIDO DE AGUA.

En la figura se muestra la influencia del agua sobre la velocidad de detonación de las nagolitas. Es de sobra conocida la propiedad del nitrato amónico de ser muy hidróscopico (absorbe la humedad). Con porcentajes de contenidos en agua inferiores al 9% la velocidad va disminuyendo, pero conservando siempre velocidades mayores a los 2000 m. Con humedades superiores al 9% no se deben utilizar nagolitas a granel; En este caso habría que encargar nagolitas envueltas en plástico para retrasar dicha absorción de agua.

SENSIBILIDAD.

Se entiende por sensibilidad la mayor o menor facilidad que tiene un explosivo para ser detonado.

Los anfos son unos explosivos de detonación no ideal, es decir, son muy insensibles, cualidad esta que es útil para evitar accidentes, pero puede provocar el fallo en el barrenado.

En la mayoría de los casos se usan como carga de columna, siendo la carga de fondo las gomas, encargándose estas de la correcta explosión de toda la carga.

En ocasiones la nagolita se puede utilizar sola en grandes diámetros de sondeo, mayores siempre de 7 pulgadas. En este caso conviene aumentar la sensibilidad, consiguiéndose esto con el aumento de la densidad en el interior del barrenado, prensando la nagolita con la tacadera, con cuidado en pasarnos, ya que la nagolita podría sufrir fallos, debiendo procurar que la densidad no sobrepase del 0'95 – 0'96 %.

Factores externos.

DENSIDAD DE CARGA.