

Tecnología de los Explosivos

Tema 1.2. Tipos de explosivos



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

CLASIFICACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS

Explosivos lentos/deflagrantes. Con velocidades inferiores a 2000 m/s (pólvoras, compuestos pirotécnicos, compuestos propulsores para artillería y cohetería, con escasa aplicación en minería y obra civil, salvo en el caso de las rocas ornamentales).

Explosivos rápidos/detonantes. Con velocidades superiores a 2000 m/s.



EXPLOSIVOS PRIMARIOS. Por su alta energía y sensibilidad se emplean como iniciadores para detonar los secundarios, por lo que algunos se emplean en detonadores y multiplicadores (fulminato de mercurio, pentrita, hexolita)...

EXPLOSIVOS SECUNDARIOS. Aplicados en el arranque de rocas, de menor sensibilidad que los primeros, si bien desarrollan un mayor trabajo útil. Serán mezclas de sustancias explosivas o no explosivas.

EXPLOSIVOS PRIMARIOS

CARACTERÍSTICAS

También denominados iniciadores, detonan ante pequeño estímulo (llama, fricción, impacto, descarga eléctrica o radiación). Su sensibilidad depende de su estructura cristalina y granulometría, pudiendo reducirse por flegmatización (gralmente. con agua). Suelen soportar bien la temperatura, pero no la llama. Su diámetro crítico es por lo general muy pequeño (< 1 mm). Su calor de explosión (energía liberada) es muy bajo respecto de los secundarios (400 Kcal/kg frente a 1000 kcal/kg). Velocidad de detonación baja comparada con los secundarios (en el entorno de 5000 m/s). La pentrita, clasificada generalmente como secundaria, puede resultar muy sensible con granulometría muy fina, por lo que suele emplearse habitualmente como primario.

LOS MÁS USADOS

NITRURO DE Pb (a)
ESTIFNATO DE Pb (b)

El fulminato de Hg era muy usado antiguamente, no así en la actualidad.

EXPLOSIVOS PRIMARIOS



Imagen: Ben Mills - Own work, Public Domain.
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3990227>.

ONC-Hg-CNO



Imagen: Paramilitary at the German language Wikipedia
[GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC-BY-SA-3.0
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons.

FULMINATO DE Hg

Descrito por Howard en 1800. Nobel lo empleó como detonador para iniciar la dinamita, iniciándose entonces la aplicación a gran escala.

Es la sala del ácido cianico: $(\text{CON})_2\text{Hg}$.

Es un polvo cristalino grisáceo, insoluble en agua, de densidad 4,4 en cristal. El polvo suele prensarse hasta una densidad de 2,5 a 3.

Su sensibilidad se ve influida por factores como la granulometría, la pureza o el grado de humedad, por lo que su fiabilidad es poca.

EXPLOSIVOS PRIMARIOS

NITRURO DE Pb

Preparado por primera vez en 1891. Sal del ácido hidrazoico (N_3H), también llamado nitihídrico.

También llamado azida de Pb, es un polvo cristalino blanco. Presenta dos variedades cristalinas (ortorrómbica y monoclinica). La última variedad es indeseable por la excesiva sensibilidad de sus cristales en forma de aguja.

La densidad de la variedad ortorrómbica es de 4,70 y 1,2 en polvo. La estabilidad térmica es grande (puede almacenarse de forma casi indefinida a temperaturas $< 50^\circ C$).

Muy sensible a estímulos mecánicos y eléctricos.

Con objeto de reducir su sensibilidad se flegmatiza añadiendo entre un 3 y un 5% de hidróxido de Pb, y un 3% de dextrina o similar.

Para mejorar su baja sensibilidad a la llama se mezcla con estífnato de Pb en la fabricación de detonadores. No se insensibiliza por compresión, por lo que se puede mejorar su velocidad de detonación y calor de explosión prensándolo.

PRENSADO HASTA 4 gr/cm^3 de densidad, detona a 5000 m/s con 350 kcal/Kg.

Empleado en la fabricación de detonadores

	NITRURO PURO	FLEGMATIZADO Y DEXTRINADO
SENSIBILIDAD AL IMPACTO	4 J	5,8 J
SENSIBILIDAD A LA FRICCIÓN	0,1 N	4 N
SENSIBILIDAD A LA ELECTRICIDAD ESTÁTICA	0,1 mJ	5 mJ

En caso de estar dextrinado, con humedad ataca al cobre, por lo que son pertinentes los casquillos de aluminio o acero. Con vainas de latón deberá secarse bien.

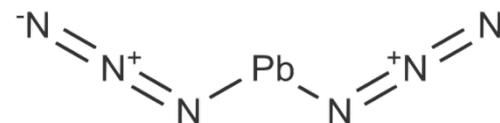
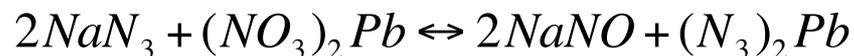


Imagen: Mrgreen71 (Own work) [GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>) or CC BY-SA 3.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)], via Wikimedia Commons.

REACCIÓN PARA LA FABRICACIÓN:



EXPLOSIVOS PRIMARIOS

ESTIFNATO DE Pb

Preparado por primera vez en 1920. Sal del ácido estífnico o trinitrorresorcina, que cristaliza con una molécula de H₂O, que flegmatizar reduciendo la sensibilidad al impacto (4J).

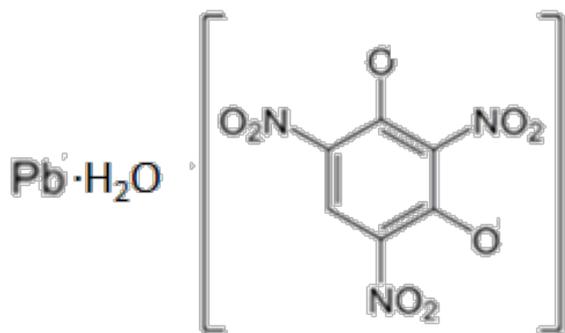
Polvo cristalino marrón rojizo de gran estabilidad hasta 75°C, nada higroscópico. Su temperatura de inflamación es de unos 280°C, a 5°C/min.

Su gran sensibilidad a la llama le hace útil mezclado con el nitruro de Pb, para facilitar en los detonadores la iniciación por la cerilla.

Al ser alto su contenido en metal (44,25%), es un explosivo débil. A una densidad de 2,9 detona a 5200 m/s, con un calor de explosión de 370 kJ/kg.

Se fabrica a partir de la reacción de una sal de Mg con trinitrorresorcina y nitrato de plomo.

REACCIÓN PARA LA FABRICACIÓN:



OTROS EXPLOSIVOS INICIADORES

De menor interés por su baja estabilidad térmica:
TETRACENO (C₂H₈N₁₀O) Y DIAZODINITROFENOL (C₆H₂N₄O₅).

LOS EXPLOSIVOS SECUNDARIOS

EXPLOSIVOS CONVENCIONALES

Precisan para su fabricación de sustancias intrínsecamente explosivas que actúan como sensibilizadores de las mezclas.

**DINAMINTAS GELATINOSAS.
DINAMITAS PULVERULENTAS.
DE SEGURIDAD.**

AGENTES EXPLOSIVOS

Los agentes explosivos no llevan, salvo en determinados casos, ingredientes intrínsecamente explosivos. Cabe destacar:

**ANFO/NAFO.
ALANFO.
HIDROGELES.
EMULSIONES.
ANFO PESADO/HEAVY NAFO/ HEAVY ANFO.
DE SEGURIDAD.**

LAS DINAMITAS GOMAS

Reciben su nombre por la consistencia gelatinosa, obteniéndose al mezclar nitroglicerina con nitrocelulosa, resultando una mezcla más energética que la nitroglicerina. El nitrato amónico es elemento predominante además en su composición.

La consistencia gelatinosa le confiere una excelente resistencia al agua, además de una elevada densidad, característica que unida a su alta potencia y velocidad de detonación, las hacen adecuadas para la carga en fondo de barrenos o la voladura de rocas de dureza media/alta, resultando además imprescindibles para realizar voladuras submarinas.

Son adecuados en lugares con gran cantidad de agua, en voladuras de contorno, y aplicaciones tanto a cielo abierto como de interior.

LAS DINAMITAS PULVERULENTAS

Suelen llevar nitroglicerina, pudiendo llevar también trilita (e.g.: ligamita). Al ser pulverulentos, si no se añade un producto impermeabilizante, la resistencia al agua es mala. Su potencia, densidad y velocidad de detonación es menor que las dinamitas gelatinosas, siendo adecuadas para volar rocas semiduras o blandas, y restringiéndose generalmente a barrenos sin agua. Destacan entre sus aplicaciones las voladuras subterráneas.

ANFOS

Explosivos pulverulentos constituidos por mezcla de nitrato amónico y un combustible líquido, necesitan buena iniciación para una correcta detonación (mediante cordones detonantes, cebos de goma o multiplicadores. Dada su consistencia, no resiste al agua. La carga mecanizada es sencilla. Se comercializa en sacos, en cambi3n tolva, o tambi3n encartuchado.

El contenido de combustible juega un papel de gran importancia. La mezcla estequiométrica corresponde a un 94,3% de NA y un 5,7% de gas-oil (50 Kg de Nitrato Amónico por 3,7 l de fuel-oil.

El incremento en el porcentaje de gas-oil aumenta la insensibilidad (con un 2% puede iniciarse con detonador, con una cantidad superior al 7% la sensibilidad inicial decrece notablemente).

ANFOS. ALANFO

Para elevar la energí3 del ANFO, desde 1968 se viene fabricando Alanfo, consistente en ańadir partículas de Aluminio al propio ANFO, con unos buenos resultados t3cnicos y econ3micos, sobre todo cuando las rocas son masivas y los costes de perforaci3n altos. El límite pr3ctico desde un punto de vista econ3mico se sitúa entre el 13 y el 15% de Aluminio. Por encima del 25 hace disminuir la eficiencia energ3tica.

HIDROGELES

Dispersiones en las que la fase continua es una solución acuosa (8-20% de agua) de nitrato amónico saturada (en ocasiones con otros oxidantes como nitrato sódico, perborato sódico, etc) y la fase dispersa está formada por combustibles sólidos y los restantes oxidantes requeridos. Pueden aplicarse sustancias sensibilizantes, como sustancias intrínsecamente explosivas (pentrita), partículas de aluminio recubiertas de productos hidrófugos, o nitratos de amina (nitrato de momonetilamina, NMMA). Son sensibles al detonador, cordón detonante o cualquier multiplicador. Su aplicación principal es la carga de barrenos a cielo abierto.

VENTAJAS

- Alta seguridad frente a estímulos subsónicos.**
- Posibilidad de mecanización de la carga.**
- Buena resistencia al agua.**
- Producción de humos de muy baja toxicidad.**
- Gran adaptación al barreno.**
- No producen dolores de cabeza durante su almacenamiento y empleo.**
- Elevadas potencias.**

NOTA: DENSIDAD DE MUERTE

Para los hidrogeles y las mezclas tipo ANFO la variación de la sensibilidad con la densidad es mucho mayor que para los explosivos gelatinosos. Por encima de valores de $1,1 \text{ g/cm}^3$, cae drásticamente, por lo que las densidades y las presiones que producen dichos niveles de confinamiento se denominan “Densidades y Presiones de Muerte”.

La desensibilización puede ligarse a presiones hidrostáticas (barrenos muy profundos) o a presiones dinámicas (ya sea por cordón detonante de gramaje escaso), efecto canal (efecto del aire), o debido a cargas adyacentes.

EMULSIONES

Se componen de dos fases: oxidante (solución de nitratos) y oleosa (combustibles: aceites y ceras*, fase continua). Debe añadirse un agente emulsionante, que rebaja la tensión superficial, y aditivos sensibilizantes. Existen muchas posibilidades dentro de esta familia, desde aquellas que para ser iniciadas necesitan un potente multiplicador, y se bombean con camiones en barrenos de gran calibre, hasta las encartuchadas de pequeño calibre, sensibles al detonador óctuple.

VENTAJAS

Menor precio, ya que en su fabricación no se precisa el uso de nitroglicerina o componentes de alto coste.
Excelente resistencia al agua.
Posibilidad de conseguir productos con densidades entre 1 y 1,45 g/cm.
Elevadas velocidades de detonación, 4000 a 5000 m/s, con poco efecto del diámetro de encartuchado.
Gran seguridad de fabricación y manipulación.
Posibilidad de mecanizar la carga y preparar mezclas con ANFO.

ANFO PESADO

Mezcla de emulsión y ANFO en proporciones variables, que condicionarán la resistencia al agua. Si el contenido en anfo es alto, baja la densidad (de $1,25 \text{ g/cm}^3$ a $1,10 \text{ g/cm}^3$). A mayor sea el contenido en nitrato amónico, menor es la densidad resultante. Si la proporción de emulsión es alta, la velocidad de detonación es alta y se pueden bombear desde el camión.

DIFERENCIAS DEL ANFO PESADO CON RESPECTO AL ANFO

Mayor energía, velocidad de detonación y densidad.

Mejora la bombeabilidad.

Mayor dificultad para carga con helicoides.

Mejores características de sensibilidad.

Gran resistencia al agua.

Posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del barreno.

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

Para entender la función e importancia de los explosivos de seguridad, previamente hay que estudiar las atmósferas potencialmente explosivas que pueden darse en la minería subterránea de carbón, causadas por el grisú, el polvo de carbón, o la combinación de ambos. El R.G.N.B.S.M. distingue entre las siguientes categorías de mina y labores subterráneas:

De primera categoría o sin grisú: no existe grisú ni gases inflamables.

De segunda categoría o débilmente grisoso: se desprende una cantidad reducida de grisú u otros gases inflamables.

De tercera categoría /fuertemente grisoso: en las que se desprende una cantidad importante de grisú y otros gases inflamables.

De cuarta categoría o con desprendimiento instantáneo de gas: en las que puede desprenderse súbitamente grisú u otros gases inflamables, arrastrando importantes cantidades de gases.

Los explosivos de seguridad comenzaron a desarrollarse a finales del siglo XIX, empleándose en aquella época en la minería de carbón las pólvoras y los explosivos rompedores. Inicialmente se desarrollaron envueltas de seguridad, constituidas por arena, geles con agua cristalizada, o cloruros (volatilizaban el calor).

Estas envolturas podrían desmoronarse o bien aumentar el diámetro. A partir de los años cuarenta se incorporaron los inhibidores a la masa del explosivo, mejorando notablemente la seguridad. En los cincuenta aparecen los explosivos de intercambio iónico. Los últimos explosivos en surgir son los hidrogeles y emulsiones de seguridad.

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

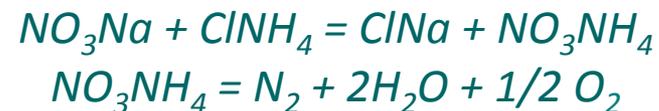
EXPLOSIVOS CON ADITIVO INHIBIDOR

En estos explosivos el grado de seguridad se lograba mediante un aditivo incorporado como inhibidor de la inflamación del grisú y del polvo de carbón. Este se introduce en la formulación del explosivo. A medida que aumenta el contenido del producto inhibidor, se producen un aumento de la seguridad, **acompañada de una pérdida gradual de las características explosivas.**

EXPLOSIVOS DE INTERCAMBIO IÓNICO

En la composición del explosivo entrar a formar parte un par de compuestos (par salino) cuya reacción en el momento de la detonación genera la formación del inhibidor. El par salino puede estar formado por nitrato sódico y cloruro amónico, que en su reacción producen el oxidante del explosivo (nitrato amónico), y el inhibidor (cloruro sódico) en estado naciente, de efectividad unas tres veces superior a las registradas en estado normal.

La reacción del par salino es desencadenada por la detonación del sensibilizador (por lo general nitroglicerina), verificándose como sigue:



La energía es aportada en dos fases (la primera, de detonación del sensibilizador; la segunda de reacción del par salino, generando el inhibidor y el nitrato amónico, descomponiéndose éste último al verificarse la detonación.

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

HIDROGELES Y EMULSIONES DE SEGURIDAD

Adecuación en la formulación de dichos explosivos para su lograr conformidad a los requisitos de seguridad exigidos en minería de carbón, manteniendo sus características básicas. Las características de estos hidrogeles de seguridad quedan disminuidas en comparación con las de los normales. Esto mismo es aplicable a las emulsiones.

EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

La catalogación y ensayos de los explosivos de seguridad se realizan según pruebas concretas. Los ensayos con atmósferas explosivas se realizan en galerías de ensayo, compuestas de una cámara de explosión (en ella se generan las condiciones a simular), y una cámara de expansión (para dirigir los gases o llamaradas si se producen). Los barrenos se simulan mediante morteros (cilindros de hierro con un taladro longitudinal a lo largo del eje). Los morteros pueden presentar distintas longitudes (largo o corto), y configuraciones (cilíndrico o de esquina).

En la cámara de explosión se simulan las condiciones más desfavorables que pudiesen presentarse en una mina, con metano, polvo de carbón depositado o en suspensión, o mezcla de metano y polvo en suspensión.

Los tipos de ensayos que se realizan son los siguientes:

Mortero corto con o sin placa: simula la existencia de una carga debidamente separada de una posible bolsa de grisú.

Mortero largo: representa una carga disparada sin retardo, dando bocazo en una atmósfera del 9% de metano. Se prueban distintas longitudes de carga, porque no siempre la mayor es la que ofrece una mayor probabilidad de inflamación.

Cargas suspendidas: colgadas en el interior de la galería longitudinalmente, simulando una carga que detona al aire al ser proyectada o dejada al descubierto por un barreno próximo, que ha salido adelantado en la secuencia de tiro.

Mortero en esquina: simula el fenómeno de inflamación del grisú por reflexión de la onda de choque y gases de explosión contra un objeto duro (paredes laterales o frontales de la galería).

PÓLVORA

Mezcla terciaria de azufre, nitrato potásico y carbón vegetal. No es propiamente un explosivo, ya que **DEFLAGRA, NO DETONA**. Se caracteriza por un gran volumen de gases de combustión, cuyo empuje genera la rotura de la roca, en lugar de por el efecto rompedor de la onda de choque.

La velocidad de detonación es baja en comparación con las velocidades de detonación de los explosivos, pudiendo llegar a 500 m/s en confinamiento y con determinados calibres.

Es bastante sensible al roce y la llama, por lo que se deben contemplar las adecuadas medidas de seguridad en su manejo. Los humos de combustión de la pólvora son tóxicos, por lo que ha de darse mucha importancia a la ventilación en trabajos subterráneos.

Para la iniciación no se requiere detonador, basta con una llama o chispa como la producida por la mecha lenta.

Suele utilizarse en combinación con el cordón detonante (buen iniciador).

Las pólvoras se suministran en granulado, añadiendo al final del proceso grafito, que al ser conductor evita las cargas electrostáticas, y actúa como lubricante.

En la actualidad las aplicaciones se reducen a labores de arranque de rocas ornamentales, en las que por la acción de empuje la separación del bloque del macizo se produce sin daño.