

## Tema 4. Explosivos

---

### *Índice del Tema:*

1. INTRODUCCIÓN
2. CLASIFICACIÓN
3. EXPLOSIVOS PRIMARIOS O INICIADORES
4. EXPLOSIVOS SECUNDARIOS SIE [TIPO  $CxHyOzNm$ ]
5. EXPLOSIVOS SECUNDARIOS: MEZCLAS EXPLOSIVAS
6. PÓLVORA NEGRA

## 1. Introducción

---

Ya se expuso en los temas anteriores que dentro de los materiales energéticos existen tres grandes familias: los altos explosivos, las pólvoras y las mezclas pirotécnicas. Este capítulo se centrará en los altos explosivos utilizados en los sistemas de iniciación, así como los empleados en la carga de los barrenos para la voladura de rocas.

También se introduce en este capítulo la pólvora negra, que suele incluirse por su uso dentro de las mezclas pirotécnicas. La pólvora negra es un explosivo no detonante y, por tanto, con escaso poder rompedor; esta cualidad es lo que la hace interesante en el laboreo de la roca ornamental en donde, para ciertos tiros, se aprovecha la acción de empuje de los gases que provoca la explosión de la pólvora en vez de la presión de la onda de choque de un alto explosivo ya que, dada su magnitud, podría dañar la roca.

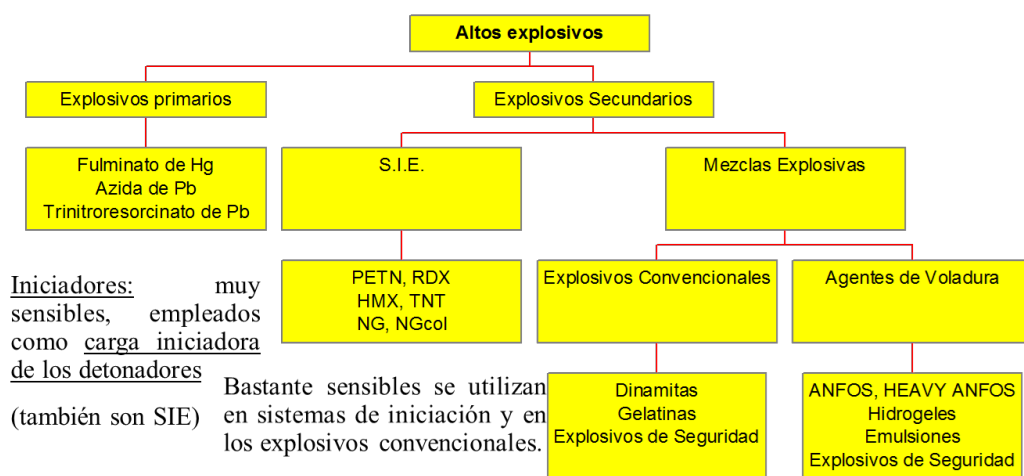
## 2. Clasificación

---

Los altos explosivos, atendiendo a su sensibilidad relativa, se subdividen en explosivos primarios o iniciadores y explosivos secundarios. Dentro de este último grupo están las ya definidas sustancias intrínsecamente explosivas y las mezclas explosivas o explosivos industriales. Las primeras se utilizan en los sistemas de iniciación-como carga base de los detonadores, o el núcleo del cordón detonante o la composición de los multiplicadores- y en la formulación de algunas mezclas explosivas denominadas como explosivos convencionales – las dinamitas y las gomas o gelatinas. El otro subgrupo, dentro de las mezclas explosivas, son los agentes de voladura que a su vez pueden subdividirse en anfos, hidrogeles y emulsiones.

Los explosivos de seguridad introducidos en el capítulo anterior pertenecen, en función de su composición, bien a los explosivos convencionales bien a los agentes explosivos (hidrogeles o emulsiones).

Otra familia dentro de los altos explosivos son los denominados explosivos terciarios que son sustancias oxidantes, por ejemplo, el nitrato amónico, muy difíciles de iniciarlas en el régimen de detonación pero que pueden alcanzar dicho régimen si están confinadas y/o en grandes cantidades; además, la presencia de algún combustible las sensibiliza convirtiéndolas en explosivos secundarios.



Iniciadores: muy sensibles, empleados como carga iniciadora de los detonadores

(también son SIE) Bastante sensibles se utilizan en sistemas de iniciación y en los explosivos convencionales.

Su composición tipo es :



Estos son los que se utilizan para volar en minería y obra civil

Los convencionales al llevar en su composición SIE son bastante sensibles; los agentes son los de manejo y uso más seguro

## Clasificación

### Clasificación de los altos explosivos

## 3. Explosivos primarios

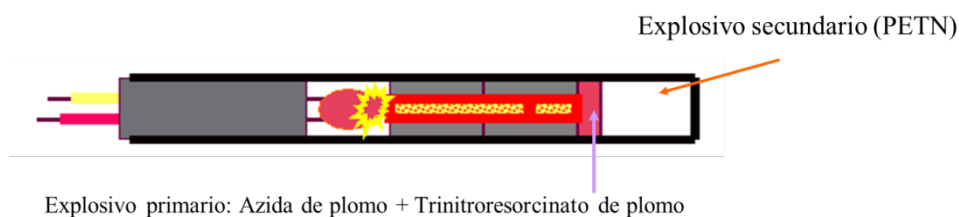
Suelen ser sales de metales pesados, algunos como la azida de plomo, son sustancias endotérmicas en las que la reacción que soporta la detonación es la de descomposición del explosivo en los elementos que lo forman.

Sus características generales son:

- Pequeña masa crítica y diámetro crítico: se produce el tránsito deflagración-detonación con cantidades muy reducidas, y el diámetro crítico es inferior al mm
- Elevada sensibilidad no deseada: sensibilidad a todo tipo de estímulos

Su interés estriba en su uso, en pequeñas cantidades, como carga iniciadora o primaria de los detonadores o de los relés de retardo.

En los detonadores se utiliza azida de plomo a la que se le añade trinitroresorcinato de plomo para mejorar la sensibilidad a la llama de la composición iniciadora. El primario se inicia a partir de una composición pirotécnica e inicia, a su vez, a la carga base constituida por un explosivo secundario. La detonación del secundario, seguidamente, iniciará a un cartucho de explosivo o a un cordón detonante o a un multiplicador.



**Uso del primario como carga iniciadora de la pentrita en un detonador**

## 4. Explosivos Secundarios: SIE

---

Este apartado hace referencia a derivados nitrados de aromáticos, de alcoholes o de aminas. Su composición es del tipo  $C_xH_yO_zN_m$  –aunque pueden contener otros elementos además de CHON- por lo que son sustancias intrínsecamente explosivas.

Las características generales son:

- Son *menos* sensibles que los primarios y tienen una masa crítica superior; el diámetro crítico ronda entre los 5 y 10 mm, y requieren un aporte energético *relativamente* fuerte para su detonación
- A presión atmosférica y sin confinamiento arden
- Con respecto a los explosivos industriales presentan:
  - Alta densidad (1.6-1.8 g/cc)
  - Alto calor de explosión (1000-1500 kcal/kg)
  - Elevada velocidad de detonación (7-9 Km/s)

Su interés en la voladura de rocas deriva de que algunos de ellos entran en la composición de:

- Los accesorios de voladura: multiplicadores, cordón detonante, carga base de los detonadores o el recubrimiento interno de los tubos de choque
- Algunas mezclas explosivas: dinamitas, gelatinas, hidrogeles de 1ª generación

Los más importantes en el ámbito civil son los siguientes:

Explosivo	Interés (usos)
Trilita/TNT o trinitrotolueno	Flegmatizante (multiplicadores)
Hexógeno/RDX o ciclonita	Rompedor (multiplicadores)
Pentrita/PETN	Rompedor (multiplicadores, cordón detonante, carga base detonadores)
Octógeno/HMX	Rompedor (tubos de choque)
Nitroglicerina/NG, Nitroglicol/NGcol (El NGcol disminuye el punto de cristalización de la NG)	Características explosivas, consistencia y resistencia al agua (dinamitas y gelatinas)
Nitrocelulosa/NC	Gelatiniza la NG/NGcol (dinamitas y gelatinas)

**Explosivos SIE secundarios utilizados en voladuras**

## 5. Explosivos secundarios: Mezclas explosivas

La naturaleza de los explosivos presentados hasta el momento hace que su uso esté limitado a los accesorios de la voladura y como parte en la formulación de algunos de los explosivos industriales. Su alta sensibilidad no deseada, su toxicidad y su elevado precio son factores más que determinantes como para desaconsejar su uso directo en la carga de barrenos.

Además, el balance de oxígeno de casi todas las SIE no está equilibrado por lo que se pueden obtener explosivos con buenas características explosivas añadiendo en la composición, en proporciones adecuadas, oxidantes y combustibles comunes bastante más baratos.

Esto es importante desde el punto de vista ingenieril ya que interesa, además de la baja sensibilidad subsónica y baja toxicidad, que los explosivos industriales tengan una buena relación precio por unidad de potencia.

También se ha de tener en cuenta que según las condiciones particulares de su empleo va a interesar que tengan una serie de propiedades específicas: consistencia, resistencia al agua, mayor o menor potencia o poder rompedor..., y, por tanto, que exista una variedad comercial que cubra un amplio espectro de necesidades.

Las mezclas explosivas se dividen en:

- *Explosivos convencionales*: se caracterizan por llevar en su composición alguna SIE: NG, NGcol, NC y/o TNT
- *Agentes de voladura*: son mezclas, dispersiones o emulsiones de unas sustancias oxidantes y otras combustibles que si no están sensibilizadas no son sensibles al detonador nº 8

A su vez los *explosivos convencionales* se subdividen en dinamitas y gelatinas y los *agentes de voladura* en anfos, hidrogeles y emulsiones.

### **Explosivos convencionales: dinamitas**

Las dinamitas surgen en 1867 cuando Alfred Nobel se da cuenta que la nitroglicerina es retenida por la tierra de diatomeas manteniendo sus características explosivas y siendo el manejo de este producto más seguro –denominado dinamita de base inerte- que la del explosivo puro en estado líquido. Además, podía ser iniciado de forma fiable con un detonador –Nobel también pionero en la tecnología de la iniciación de los explosivos con la introducción de este elemento-.

Posteriormente se sustituye el guhr por mezclas de oxidantes (nitrato sódico, amónico...) y combustibles (carbón vegetal, serrín...) dando origen a las dinamitas de base activa. Aunque el poder de retención de NG disminuye, la potencia del explosivo aumenta debido a la reacción entre el nitrato y el combustible.

Las dinamitas actuales incorporan nitroglicol para disminuir el punto de congelación de la nitroglicerina y algún producto impermeabilizante para proteger el producto de la humedad: aun así su resistencia al agua es mala. Contienen hasta un 15% de NG (NGcol) con un pequeño porcentaje de NC para retenerla cuando el contenido en NG es elevado. También dentro de esta familia están las ligamitas, dinamitas a las que se aporta una pequeña cantidad de trilita más insensible.

Son sensibles al detonador nº 8 y se comercializan en diámetros de 26 mm y 32 mm encartuchadas en papel parafinado.

Con energías específicas entre (80-90) tm, su uso se limita a voladuras de rocas blandas de interior (sales) o carga de columna en barrenos de pequeño calibre y sin presencia de agua.

EXPLOSIVO	Velocidad Detonación (m/s)	Densidad (g/cc)	Qv (MJ)	Vg (l)	Diámetros (mm)
<b>Ligamita 1 (Tipo A)</b>	<b>4300 (32 mm)</b>	<b>1,15</b>	<b>4,0</b>	<b>901</b>	<b>32</b>
<b>Amonita 2I (Tipo B)</b>	<b>4100 (32 mm)</b>	<b>1,10</b>	<b>3,6</b>	<b>911</b>	<b>26-32</b>

**Ejemplos de dinamitas**

## Explosivos convencionales: gelatinas

Estos explosivos surgen en 1875 cuando se descubre que la nitrocelulosa (NC) de alta viscosidad se disuelve en NG obteniendo un producto de consistencia plástica que retiene la NG. Además, como la NG tiene un BO positivo y la NC negativo, si se mezcla en las proporciones adecuadas (93/7, % en peso) se obtiene un producto equilibrado (BO = 0) de mayor potencia: la goma pura o nitrogelatina.

Posteriormente se introducen en la mezcla oxidantes (nitrato amónico las denominadas gelatinas especiales) y combustibles en proporciones de hasta un 75%. De esta forma se abarata el producto manteniendo la consistencia plástica. También incorporan productos impermeabilizantes para mejorar la resistencia al agua y NGcol para disminuir el punto de congelación.

Son explosivos de excelente resistencia al agua y bajo contenido en gases tóxicos en los humos de la voladura. Sensibles al nº8, se comercializan encartuchados en papel parafinado (pequeños diámetros) o en plástico flexible.

Sus altas densidades, potencias, energías específicas (100 – 110 t.m) y velocidades de detonación los hacen apropiados como carga de fondo de rocas de resistencia media a muy alta en todo tipo de voladuras de pequeño y mediano calibre, o como cartucho cebo para los agentes de voladura.

EXPLOSIVO (TIPO A)	Velocidad	Densidad (g/cc)	Qv (MJ)	Vg (l)	Diámetros (mm)
	Detonación (m/s)				
Riodin	6000 (60 mm)	1,45	4,1	895	26-100
Eurodyn 2000	6200	1,40			25-80
Riodin Plus	5500 (32mm)	1,50	3,9	832	26-50
Riodin Plus MD	6200 (60 mm)	1,45	4,7	878	60-90

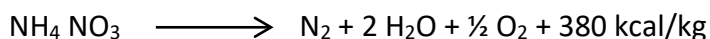
### Ejemplos de gomas (gelatinas)

Los principales Inconvenientes de los explosivos convencionales derivan de la presencia en su composición de SIE (toxicidad y elevada sensibilidad no deseada). También experimentan el envejecimiento por difusión de las burbujas de aire, introducidas en el amasado del producto durante su fabricación, disminuyendo sus características explosivas si están almacenadas durante largos periodos de tiempo -se puede aportar algún sensibilizante adicional al producto.

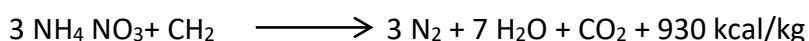


### **Agentes de voladura: ANFOS**

Son mezclas de nitrato amónico (NA) con aceite combustible (FO). El NA es un sólido cristalino pseudo-explosivo de muy baja sensibilidad siendo la reacción teórica de descomposición:



La adición de combustible incrementa su sensibilidad, así como la energía liberada en la reacción (94.5/5.5 NA/FO):



El NA para uso explosivo se presenta en forma de esferas porosas o prills (0.8-3.5 mm) -lo que favorece el contacto con el combustible- con una densidad aparente en torno a 0.8 g/cc.

Debido a la elevada higroscopicidad de la sal hay que añadir agentes protectores de la humedad al nitrato amónico -con un 9% de agua el producto se desensibiliza fallando la iniciación-. Un inconveniente añadido es que el NA presenta una transición cristalina con aumento importante de volumen a 32 °C, rompiéndose los cristales y la capa protectora y ocurriendo el fenómeno de endurecimiento –formación de terrones duros debido a la disolución de la sal por la humedad y posterior enfriamiento y precipitación de la sal-. Si bien pueden añadirse agentes modificadores del hábito cristalino para reducir este fenómeno, en los almacenes, locales de fabricación y polvorines la Tª ha de ser inferior a los 32 °C.

La aparición tras la voladura de humos naranjas -indicando la producción de óxidos de nitrógeno tóxicos- o negros – indicando la producción de carbono- revela algún defecto en su utilización, fabricación o almacenamiento.

El ANFO es insensible al detonador nº8, sensible al cordón de 12 g/m y tiene un diámetro crítico en torno a 45 mm. Su velocidad de detonación varía desde unos 2500 m/s hasta unos 4500 m/s, dependiendo del diámetro del barreno.

Es un producto de baja sensibilidad a los estímulos accidentales, barato, adecuado para las grandes voladuras de rocas blandas o, muy habitualmente, como carga de columna en prácticamente todo tipo de voladuras. Se utiliza en barrenos sin agua o, en el caso de humedad, introducido en fundas plásticas.

El ANFO se comercializa encartuchado (en calibres desde 2" hasta 5") o a granel; en este último caso bien en sacos de 25 kg bien en camiones –estos están dotados de un sistema neumático de carga (soplante) o con un sistema Auger (tornillo sinfín) lo que permite velocidades de carga de centenares de kg por minuto.

EXPLOSIVO (TIPO B)	Vel. Detonación (m/s)	Densidad (g/cc)	Qv (MJ)	Vg (l)	Diámetro (mm)
<b>Nagolita</b>	<b>4000 (100 mm)</b>	<b>0,8</b>	<b>3,9</b>	<b>978</b>	<b>50-125</b>
<b>EXAN</b>	<b>2400-4800</b>	<b>0,8</b>			<b>55-85</b>



**Camión de carga, cargadora neumática y prills de nitrato amónico**

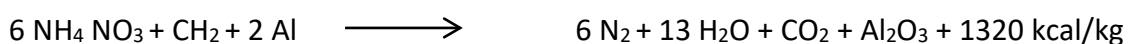
Del ANFO se han derivado una serie de productos ampliando el abanico de posibilidades de utilización.

### ANFO LIGERO

En voladuras de contorno con barrenos de gran diámetro se le pueden añadir aditivos reductores de densidad (perlitas de poliestireno, por ejemplo) que además reducen la velocidad de detonación, de manera que el poder rompedor del explosivo disminuye –la presión y la energía puesta en barreno- dañando o fracturando en menor medida al macizo rocoso remanente lo cual es interesante en muchas ocasiones.

### ALANFO

Se añade al ANFO polvo de aluminio (5% – 15%) con un aumento de la energía desprendida (ejemplos de estos productos son el ALNAFO -4.9 MJ- y EXAN A).





### ANFO DENSO o HEAVY ANFO

Se pueden mejorar las propiedades explosivas del ANFO mezclándolo con una emulsión explosiva con lo que se obtiene un producto con mayor densidad de carga, mayor energía por unidad de volumen y una resistencia al agua mejorada que va a depender del contenido en emulsión

### ANFO en presencia de piritas

En explotaciones subterráneas de cobre y en explotaciones de carbón el ANFO puede reaccionar con desprendimiento de calor suficiente para afectar a los sistemas de iniciación –fusión de los multiplicadores o de la cubierta plástica del cordón detonante-.

En estas circunstancias se le añade al ANFO un agente inhibidor de la reacción (ejemplo comercial es la Naurita).

### **Agentes de voladura: hidrogeles**

Los slurries o hidrogeles surgen a finales de los cincuenta cuando el Dr. Cook introduce agua en las mezclas explosivas con el fin de lograr una gran intimidad entre los oxidantes y combustibles, y añade sensibilizantes y aditivos (espesantes y gelificantes) para controlar la reología, y alcanzar la consistencia y resistencia al agua deseada.

Un hidrogel explosivo es una dispersión en la que:

- la fase continua está formada por una solución acuosa, principalmente, de NA
- la fase dispersa está formada por combustibles y el resto de oxidantes sólidos que no han podido disolverse en la solución

La fase combustible ha ido evolucionando a lo largo del tiempo dando origen a tres familias de hidrogeles:

#### Hidrogeles de 1ª generación

Sensibilizados con S.I.E.: TNT, PENT o RDX, son bombeables con diámetro crítico elevado (en torno a 3")

#### Hidrogeles de 2ª generación

Sensibilizados con aluminio grado pintura, incorporan micro-esferas o burbujas de gas o aire para mejorar su sensibilidad

#### Hidrogeles de 3ª generación

Sensibilizados con una solución de nitrato de monometilamina (NMMA) - el NMMA es una sal explosiva de muy baja sensibilidad con balance de oxígeno negativo- Pueden incluir Al grado pintura, micro-esferas o burbujas de gas o aire para mejorar la sensibilidad – su

diámetro crítico puede ser de tan solo 18 mm- y Al atomizado para incrementar la potencia explosiva-.

Los hidrogeles de 2ª y 3ª generación tienen gran sensibilidad selectiva siendo muy seguros en su fabricación, manejo y transporte; el contenido en gases nocivos en los humos de la voladura es bajo (en realidad depende de la formulación); pueden fabricarse para que admitan carga a granel o bombeo; su resistencia al agua es excelente y tienen larga vida de almacenamiento.

Los encartuchados suelen ser sensibles al detonador nº 8, los bombeables o vertibles deben iniciarse con un multiplicador o con un cartucho cebo debiéndose solicitar al fabricante su diámetro crítico.

Son aptos para la carga de fondo en rocas de blandas a duras dependiendo de la formulación. También se emplean como carga de columna y como carga de las voladuras de contorno – el Riogur es un ejemplo de explosivo para voladuras de contorno-.



Hidrogeles	Vel. Detonación (m/s)	Densidad (g/cc)	Qv (MJ)	Vg (l)	Diámetros (mm)
Riogel Troner	5000 (65 mm)	1.25	3.5	886	32-110
Riogel Troner Plus	5500 (85 mm)	1.30	4.3	886	32-90
RioFlex -	4500 – 5000	1,0-1.2	3.1	960	Contenedores -
RioFlex 8000	4300-5300	1.0-1.2	3.3	963	Bidones 22 l
Riogur F CD	7200	1.18	3.5	938	17-32
*RioFlex T	5200 (50 mm)	1.22	3.2	988	Bidón 22 l
RioFlex U	4400 (50 mm)	1.1	2.8	1006	Cisternas
*RioMax	4300 (45 mm)	1.15	3.9	921	32-40
Riogur R	3900 (32 mm)	1.15	3.5	932	18-25
* Baja producción de humos tóxicos		La serie RioFlex tiene diámetro mínimo entre 70mm y 114mm			

**Ejemplos de hidrogeles**

### **Agentes de voladura: Emulsiones**

Esta familia de explosivos surge a mediados de los 60 como consecuencia del desarrollo de la investigación sobre la introducción de agua en las composiciones explosivas - favoreciendo el contacto entre las sustancias reaccionantes- y sobre su sensibilización con sustancias que actúen como puntos calientes.

Las emulsiones explosivas son dispersiones estables de dos fases líquidas inmiscibles entre sí, una continua, formada por combustibles (fuel oil, ceras, parafinas...) y una dispersa formada por una solución oxidante (NA).

Para sensibilizar la emulsión se le añaden micro-esferas de vidrio o plástico. El aluminio lo sensibiliza menos empleándose el atomizado para incrementar la energía del producto a costa de disminuir la velocidad de detonación.

Las características generales de las emulsiones son su gran sensibilidad selectiva, su buena resistencia al agua –al recubrir la fase grasa a la fase acuosa- y la baja producción de humos tóxicos (dependiente de la formulación); además tienen una alta velocidad de detonación. Se fabrican bien encartuchados (sensibles al nº 8) bien bombeables.

Emulsiones	Vel. Detonación (m/s)	Densidad (g/cc)	Qv (MJ)	Vg (l)	Diámetros (mm)
Riomex E20 (E24)	5400 (65 mm)	1,20	3.0 (3.8)	914 (864)	26-85
*Riomex E26 (E28)	5400 (65 mm)	1,20	4.1 (4.4)	840 (821)	26-85
Senatex Ultrex	5850	1,25	3.9		28-85
<i>*Baja producción de humos tóxicos</i>					

#### Ejemplos de emulsiones

Las emulsiones pueden mezclarse con ANFO en cualquier proporción -ANFO PESADO o Heavy ANFO. De esta manera la emulsión rellena los huecos entre los gránulos del ANFO

aumentando la densidad del producto y si la proporción de emulsión es elevada (aproximadamente por encima del 50%) la emulsión recubre los prills de ANFO protegiéndoles del agua. Este producto admite carga mecanizada mediante tornillo sinfín o mediante bombeo en función de la proporción de la mezcla emulsión/ANFO.



Ejemplo de Heavy ANFO es la serie EMUNEX 6000-8000 para diámetros a partir de (127 – 76) mm con densidades entre 1.10 y 1.25 g/cc y las siguientes características:

- Velocidades de detonación entre (4600-5800) m/s
- Q<sub>v</sub> entre (3.1-2.9) MJ/kg
- V<sub>g</sub> entre (1009-1017) l/kg

Se emplean para la voladura de rocas blandas o medias o como carga de columna en las duras. Los bombeables se emplean para grandes voladuras.



## Explosivos de seguridad

Estos explosivos entran dentro de alguna de las categorías de las mezclas explosivas señaladas anteriormente.

Los explosivos de seguridad pueden dividirse en:

- Eq. S. (equivalentes a los enfundados): son mezclas explosivas que incluyen en la pasta explosiva agentes inhibidores (sales: ClNa, ClK...). Son explosivos tipo II.
- Explosivos de intercambio iónico: constituidos por un pequeño porcentaje de NG (<10%), combustible y el par salino nitrato sódico/cloruro amónico que al reaccionar produce cloruro sódico naciente, de gran poder refrigerante, y nitrato amónico. La energía liberada en la reacción de descomposición de la NG provoca la reacción del par salino. En caso de deflagración –por ejemplo debido a la humedad dado que su resistencia al agua es mala- el cloruro amónico actúa como refrigerante. Son explosivos tipo III o IV.

Explosivo de seguridad	Vel. Detonación (m/s)	Densidad (g/cc)	Qv (MJ)	Vg (l)	Diámetros (mm)
Riodin9 (tipo II)	5200 (60 mm)	1,65	2.7	515	26-32
Permigel 1 (tipo II)	3500 (65 mm)	1,15	2.7	801	29
Expl. Seg. 20SR (III)	1900	1,20	2.3	579	26-32

### Ejemplos de explosivos de seguridad

Para el funcionamiento correcto de los explosivos de seguridad es necesario asegurar el régimen de detonación:

- Los cartuchos deben formar una fila continua en el barreno
- Cada barreno debe estar atacado correctamente
- Los cartuchos deben estar protegidos contra la humedad ya que produce la aglomeración de las sales disminuyendo su aptitud a la detonación

En cuanto a las condiciones de utilización de los explosivos de seguridad:

- Cebado en fondo, sistema eléctrico (detonadores de cobre) y equipos de seguridad antigrisú
- Carga limitada en función del tipo de explosivo y labor
- Diámetro de cartucho entre 26-36 mm
- No está permitida la carga mecanizada
- El % de grisú ha de ser inferior al 1% en el momento de la carga y en el disparo

- Se retacará con material inhibidor un tercio del barreno sin necesidad de que se superen 40 cm
- No se cargan barrenos que puedan detonar al aire, ni si se percibe en algún barreno algún soplo de gas

### **Pólvora Negra**

La pólvora negra es una mezcla deflagrante de nitrato potásico, carbón vegetal y azufre en proporciones variables, siendo habitual la proporción 75/15/10 en peso

Sus características son:  $Q_v = 660 \text{ kcal/kg}$  y  $V_g = 280 \text{ l/kg}$ ; es sensible al impacto, a la fricción, a las chispas y a las descargas electrostáticas.



La velocidad de combustión depende de la densidad de grano y del confinamiento:

- la pólvora de mina en estado confinado arde a 500 m/s
- la utilizada para llenado de mechas se propaga a una velocidad de 0.5 m/min

Actualmente su uso minero se limita a la extracción de las rocas ornamentales como ya se señaló anteriormente –habitualmente en los tiros del levante que se dan en la extracción de bloques del granito ornamental-.