

# Tema 3. Ensayos de Caracterización de los Explosivos

---

## Índice del Tema:

1. INTRODUCCIÓN: POTENCIA Y PODER ROMPEDOR DE LOS EXPLOSIVOS

2. PROPIEDADES TEÓRICAS DE LA DETONACIÓN

MÉTODO DE KAMLET-JACOBS

3. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS

CAPACIDAD DE ARRANQUE (POTENCIA)

CAPACIDAD DE FRAGMENTACIÓN (PODER ROMPEDOR)

FIABILIDAD

SEGURIDAD

4. SEGURIDAD EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA DEL CARBÓN

GRISÚ, POLVO DE CARBÓN Y CONDICIONES DE UTILIZACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD

## 1. Introducción

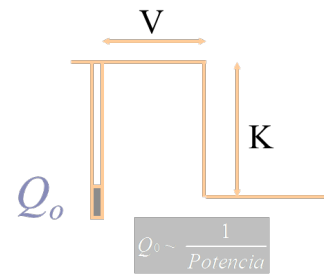
---

En este tema se exponen las principales características de los explosivos, su significado e interés y se describen, de forma sucinta, algunos de los ensayos utilizados para su determinación. La introducción del epígrafe correspondiente a las propiedades teóricas de la detonación tiene como finalidad aclarar la procedencia y significado de conceptos importantes tales como el de balance de oxígeno o el calor y la presión de detonación. Se ha escogido la metodología de Kamlet-Jacobs por su sencillez – aunque limitada en sus estimaciones- para su determinación.

Dada la importancia de la aplicación de los conceptos de potencia y poder rompedor de un explosivo en el campo de las voladuras es conveniente previamente resaltarlos.

## Potencia de un explosivo

La potencia de un explosivo mide la mayor o menor capacidad que éste tiene de realizar trabajo y, desde un punto de vista ingenieril, es una propiedad que indica la cantidad relativa requerida del mismo para arrancar un  $m^3$  o una tonelada de roca (definida una geometría de la voladura y un tipo de roca).



Así, la cantidad mínima de explosivo ( $Q_0$ ) requerida para volar un banco con piedra  $V$  –distancia entre el barreno y

Potencia  $\sim$  Calor de detonación/explosión ( $Q$  MJ/kg) y Volumen de Gases en condiciones normales ( $V$  l/kg)

la cara libre del banco- depende linealmente del inverso de esta propiedad (cuanto menos potente es el explosivo más kilogramos de explosivo se necesitan para romper el mismo banco).

Son varios los parámetros teóricos utilizados para definirla, siendo los más usuales:

- Potencia absoluta en peso (AWS): es el calor de explosión o calor de reacción a volumen constante ( $Q_v$ ) que a su vez es EL calor liberado supuesto que los productos de la reacción se encuentran a la densidad inicial. Se calcula como la diferencia entre las energías estándar de formación de los productos y los reactivos.
- Potencia relativa en peso (RWS): es el ratio entre el AWS del explosivo y el AWS de un explosivo patrón. Habitualmente el patrón es el ANFO.
- Potencia según Langefors: es 5/6 de la RWS más 1/6 de la relación entre el volumen de gases en condiciones normales producido por un kilogramo de explosivo y el volumen de gases producido por el explosivo patrón. Como patrón se utiliza una antigua goma sueca (5 MJ y 850 litros,  $Q_v$  y volumen de gases, respectivamente).

La potencia referida por unidad de peso puede referirse a potencia por unidad de volumen sin más que multiplicar/dividir aquella por la densidad del explosivo/densidad del patrón.

Otro parámetro interesante es **la energía específica** que es igual al producto  $nRT$ . En donde  $n$  es el número de moles gaseosos en los productos (por kilogramo de explosivo) y  $T$  es la temperatura de explosión; por lo tanto, está relacionado con la energía térmica de los gases de la explosión.

Un parámetro teórico que suelen reflejar los catálogos de los fabricantes de explosivos es la **REE o energía efectiva** de los gases para desarrollar trabajo hasta que su presión cae a 100 MPa. Se suele utilizar como patrón el ANFO ( $REE_{\text{anfo}}=100\%$ ).

Este parámetro está relacionado con la máxima **energía disponible** para realizar trabajo o **energía útil teórica (Wu)** cuyo valor viene determinado por las siguientes expresiones:

$$Wu \approx \int_{v_{cj}}^{v_f} P dv - \frac{1}{2} w^2 \approx Q - \int_{T_o}^{T_f} C dT$$

Siendo  $P = P(v)$  la variación de la presión a lo largo de la expansión isentrópica de los gases de la detonación;  $v_{cj}$  es el volumen específico de los gases en el estado de detonación y  $v_f$  su volumen final tras la expansión contra la atmósfera;  $w$  es la velocidad inicial de los mismos,  $Q$  es el calor de detonación,  $T_o$  la temperatura ambiente y  $T_f$  la temperatura de los gases tras la expansión;  $C$  es el calor específico de los gases.

Según estas ecuaciones la máxima energía disponible es igual:

- A la diferencia de energía interna de los productos gaseosos entre el estado ( $P_{cj}, v_{cj}$ ) y el estado final (1 atm,  $v_f$ ) una vez descontado el empleado en comunicar la energía cinética a los gases (función hidrodinámica de la energía)
- Al calor de reacción menos la energía remanente que queda en los gases tras la expansión (función termodinámica de la energía)

De lo expuesto se deduce que dos explosivos con el mismo  $Q$  no tienen por qué desarrollar el mismo trabajo útil, sino que dependerá de la composición de los productos de la reacción.

La REE es, entonces, la energía útil que desarrollan los gases hasta que su presión cae a 100 MPa –algunos autores proponen utilizar la energía liberada hasta que el volumen específico de los gases alcanza 10-15 veces su volumen inicial ( $v_o$ ) que es el rango estimado de expansión durante el cual los gases realizan trabajo contra el macizo rocoso: corresponde al área comprendida entre la isentrópica y las tres rectas dibujadas en la figura siguiente.

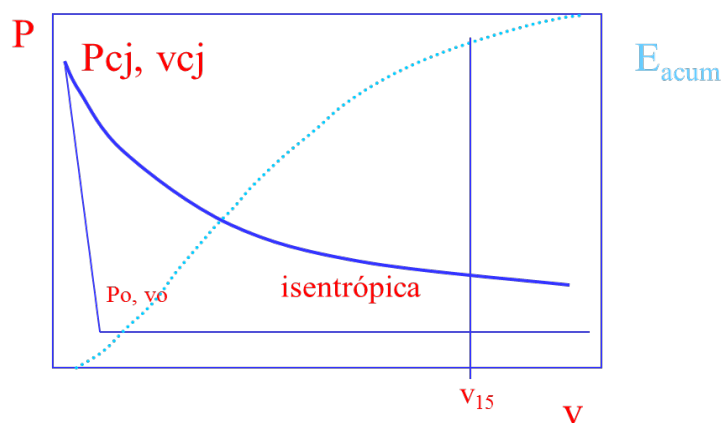
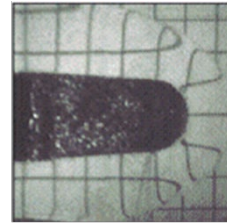


Gráfico ilustrativo de la energía disponible tras la expansión hasta 15  $V_o$

## Poder rompedor de un explosivo

El poder rompedor es una propiedad que indica la capacidad de fragmentar en mayor o menor grado la roca y está relacionada con la forma en que se libera y transmite la energía:

- En los primeros instantes en forma de onda choque de muy breve duración: Energía de Choque que caracteriza al poder rompedor.
- Posteriormente por la acción de empuje continuado de los gases contra el medio externo: Energía de Burbuja.



Poder Rompedor  $\sim$  densidad, velocidad  
detonación  $\sim$  Presión  
de detonación y  $Q_v$

Aunque en realidad el grado de fragmentación depende también de las propiedades del macizo rocoso generalmente se hace referencia a:

- Explosivos con gran efecto rompedor indicando que tienen una  $P_{cj}$  elevada (gomas)
- Explosivos que tienen gran energía de burbuja como aquellos que producen un volumen elevado de gases (anfós)

Aunque la potencia y poder rompedor se pueden determinar a partir de modelos teóricos se deben contrastar los resultados con ensayos que tratan de reproducir dichas propiedades, si bien desde un punto de vista práctico.

Por otra parte existen otras características referidas a la fiabilidad y seguridad de los explosivos que deben ser determinados experimentalmente.

En los epígrafes siguientes se mostrará en primer lugar un método sencillo para estimar los parámetros de la detonación y, posteriormente, algunos de los ensayos realizados para estimar las características más relevantes de los explosivos desde el punto de vista de la ingeniería de voladuras.

## 2. Propiedades teóricas de la detonación

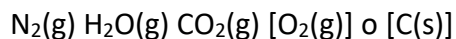
La determinación de las propiedades teóricas de la detonación de un explosivo es complicada, mas existen algunas metodologías que permiten realizar estimaciones de forma sencilla bajo algunos supuestos. Con el objetivo de consolidar los conceptos  $Q$ ,  $P$ ,  $D$  y  $V$  (calor, presión y velocidad de detonación, y volumen de gases en condiciones normales) e introducir uno nuevo (el balance de oxígeno: BO) se ilustra el Método de Kamlet y Jacobs.

La metodología es válida para explosivos densos ( $>1\text{g/cc}$ ) de composición tipo:  $C_xH_yO_zN_m$ . Aplicándola se obtiene una buena aproximación de la presión de detonación (no tan buena de la  $D$  y la  $Q$  suele sobre-estimarla).

## Método de Kamlet y Jacobs

Los pasos del método se describen a continuación:

1- Se parte de la siguiente jerarquía de formación de productos:



Esto es: se pasa todo el nitrógeno a  $\text{N}_2$ , el hidrógeno a agua, si queda oxígeno el carbono pasa a  $\text{CO}_2$  hasta que se agote bien el C bien el oxígeno:

- Si sobró oxígeno éste queda como  $\text{O}_2$  siendo entonces el balance de oxígeno positivo (pasaron los combustibles al estado de máxima oxidación)
- Si en cambio no hubo suficiente oxígeno para pasar todo el carbono a  $\text{CO}_2$  entonces parte del carbono queda como C siendo el balance de oxígeno negativo (queda parte del combustible sin oxidar)

2- A partir de la composición del explosivo se determinan los moles de cada uno de los productos, el volumen de gases en condiciones normales (1 atm, 298K), así como su masa molecular media (M)

3- El calor de detonación queda definido como la diferencia entre las entalpías estándar de formación de los productos y los reactivos a 298K

4- La D y la P se determinan a partir de los parámetros anteriores y de las ecuaciones siguientes:

- $P \text{ (GPa)} = 7.614 \times 10^{-4} \times \rho_o^2 \times \Phi$  (la densidad del explosivo,  $\rho_o$ , en g/cc)
- $D \text{ (m/s)} = 22.328 \times \text{raíz}(\Phi) \times (1+1.3\rho_o)$  (n, nº de moles de gas, en mol/kg)
- $\Phi = n \times \text{raíz}(M) \times \text{raíz}(Q)$  (el calor de detonación, Q, en KJ/kg)
- $M = m_g/n$  ( $m_g$ , masa de los gases, en g/kg)

De acuerdo con el procedimiento expuesto las composiciones explosivas pueden ser tanto excedentarias como deficitarias en oxígeno –balance de oxígeno (BO) positivo o negativo- Los explosivos industriales se formulan con composiciones equilibradas (balance de oxígeno cercano a cero) dado que:

- Son más energéticas (los combustibles pasan al máximo estado de oxidación)
- Originan menos gases nocivos: cuanto mayor es el BO mayor es la proporción de  $\text{NO}_x$  en los gases, mientras que con BO negativo lo que aumenta es la producción de CO

Aunque en la realidad siempre se van a producir ciertas cantidades de CO y de óxidos de nitrógeno, las formulaciones cercanas al balance de oxígeno suelen dar humos menos nocivos (con menor proporción de CO +  $\text{NO}_x$ ).

Por otra parte, es habitual encontrar referencias de variables termodinámicas ( $T$ ,  $P$ , calor de explosión...) en el estado de explosión -ya anticipado anteriormente- en vez de en el estado de detonación. El estado de explosión es aquél obtenido supuesto que los productos de la detonación tienen una densidad igual a la densidad inicial del explosivo.

### 3. Determinación experimental de las características de los explosivos

---

En ingeniería se deben contrastar los resultados teóricos con la realidad y por ello se realizan ensayos que tratan de reproducir algunas características de los explosivos, si bien desde un punto de vista más pragmático. Por ejemplo: no resulta tan interesante contrastar el calor de reacción teórico con el medido en bomba calorimétrica como evaluar el trabajo realizado por una muestra de explosivo cuando trabaja contra algún medio deformándolo o impulsándolo.

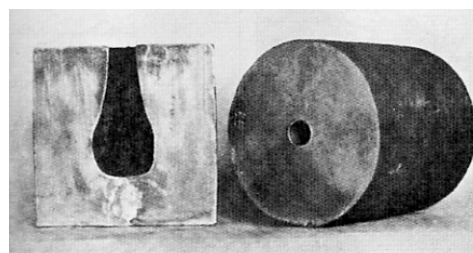
Por otra parte, existen otras características, referidas a la fiabilidad y seguridad de los explosivos, que no pueden ser reproducidas adecuadamente con modelos teóricos por lo que su determinación es casi exclusivamente experimental.

Para concluir el capítulo y dada su relevancia se incluye un apartado sobre la seguridad de los explosivos en la minería subterránea del carbón.

#### Capacidad de arranque o Potencia

Para estimar experimentalmente esta importante característica de un explosivo, en los ensayos se determina alguna medida de su energía utilizable en base al trabajo de expansión que realiza sobre algún medio externo. Son varios los ensayos enfocados al respecto –desde el denominado Traulz, y sus variantes, hasta el ensayo de detonación bajo agua- cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

El **método Traulz** fue el primer ensayo oficial para determinar la potencia y consiste en detonar una pequeña muestra de explosivo (10 g) situada en el interior de un bloque cilíndrico de plomo –se retaca con arena graduada y se inicia con un detonador número 8-, y posteriormente medir el



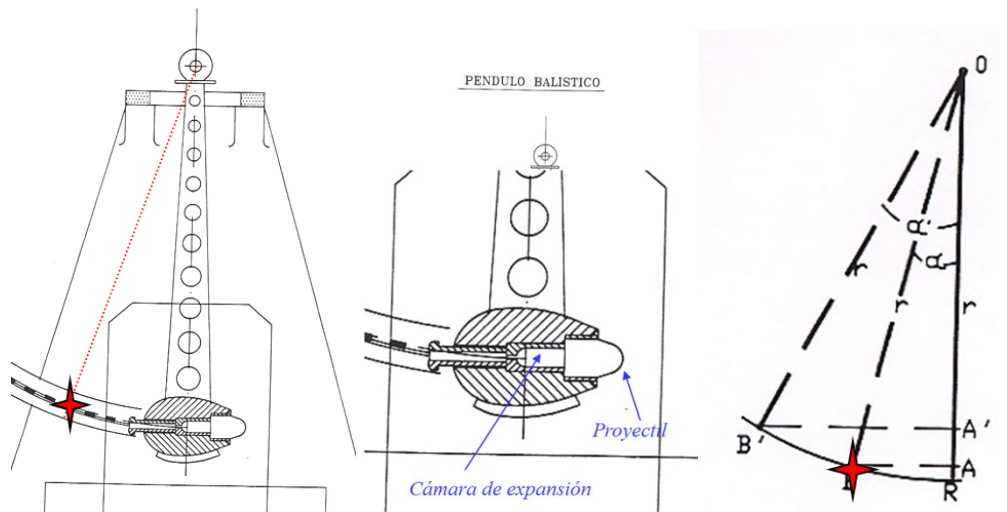
ensanchamiento producido, denominado traulz real. Para evitar los errores derivados de las diferentes propiedades mecánicas del cilindro se introdujo el índice traulz en el cual se compara el traulz del explosivo a ensayar con el obtenido con cilindros de plomo de la misma colada de un explosivo patrón, la goma pura.

El inconveniente del método es que cuanto más potente es el explosivo menor es el espesor de la pared contra la que trabajan los gases en las últimas fases de ensanchamiento favoreciendo por tanto a los explosivos más potentes. El CUP (coeficiente de utilización práctica) se ideó como variante para solventar dicho inconveniente buscando la cantidad

de explosivo a ensayar que producía el mismo trauzl que 15 g de ácido pícrico; mas esto encarecía mucho el ensayo además de que la superficie de contacto entre el explosivo y el bloque puede variar fuertemente de un explosivo a otro y, por tanto, la forma en que trabajan los gases contra el cilindro.

En el ensayo del **péndulo balístico** se compara el trabajo que realiza una muestra del explosivo a ensayar (10 g) actuando como propulsante de un proyectil, con el realizado por una misma cantidad de goma pura que actúa como patrón.

El equipo consiste en un mortero de acero suspendido en un cuadro rígido de placas de aluminio. En el interior del mortero se sitúa la carga explosiva iniciada con un nº 8. Los gases actúan sobre el proyectil empujándolo, y por el principio de acción y reacción, el péndulo se mueve en sentido contrario, elevándose y registrándose el ángulo de elevación con respecto a la vertical.



Esquema del ensayo del péndulo balístico

La potencia relativa en peso con respecto a la goma pura  $RWS_g$  queda definida como el ratio:  $RA/RA'$ , siendo éstas las alturas de elevación alcanzadas con el explosivo y con la goma pura, respectivamente.

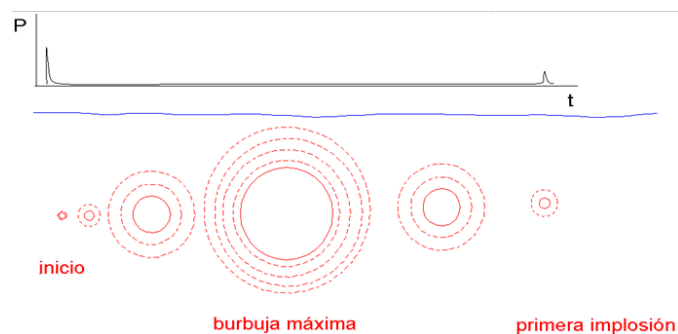
Los resultados de este ensayo están correlacionados con la energía específica según la siguiente expresión:  $RWS_g (\%) = 0.745 \times \text{Energía Específica (t m)}$

Explosivo	Péndulo (%)
Goma pura	100
Gelatina especial	88
ANFO	80
Ligamita	79
Riogel	75
Emulsión	65
Explosivo de seguridad	49

Sus principales inconvenientes son la pequeña cantidad de muestra ensayada, al igual que en el trauzl, que afecta a los explosivos más insensibles y de mayor masa crítica, y la gran expansión de los gases dentro de la cámara antes de comenzar a transmitir su energía comparada con la magnitud de la expansión habitual que ocurre dentro de un barreno.



El ensayo de **detonación bajo el agua** consiste en detonar una masa de explosivo bajo el agua y registrar en un osciloscopio el pulso de presión producido a una determinada distancia. La energía de choque es proporcional a la integral del pulso de presión –elevado al cuadrado- a lo largo del tiempo. La de burbuja lo es al periodo al cubo de la primera implosión. En efecto los gases inicialmente se expanden hasta que la presión se iguala a la del agua y, tras superar la inercia inicial, se contraen hasta que de nuevo su presión vuelve a superar la presión del agua produciéndose la implosión. Esta energía de burbuja se correlaciona linealmente con la máxima energía disponible, concepto expuesto anteriormente.



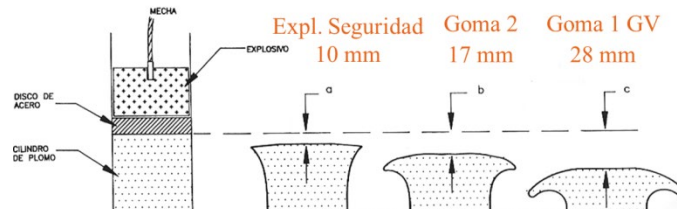
**Esquema del registro obtenido en el ensayo de detonación bajo el agua**

Aunque las cantidades de explosivo a ensayar son mayores que en los anteriores ensayos (del orden del kilogramo) en este método se está midiendo la repuesta en un medio con un comportamiento mecánico muy diferente del que tiene un macizo rocoso.

### Capacidad de fragmentación o poder rompedor

En estos ensayos se mide el efecto de aplastamiento que produce la onda de choque sobre algún medio como por ejemplo en el ensayo del **Método Hess**.

Se carga en un recipiente de zinc 40 g de explosivo sin retacar, se sitúa el recipiente sobre un disco de acero, a su vez situado sobre un cilindro de plomo, y se inicia con un número 8. Se mide el aplastamiento del cilindro.

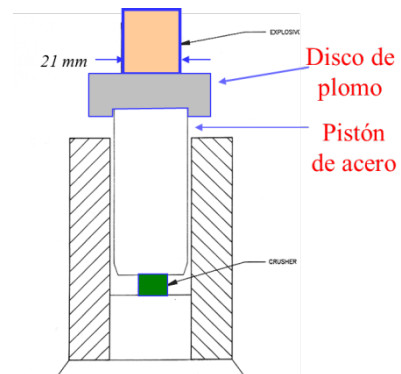


**Esquema del Método Hess**

En el ejemplo ilustrado, siendo la antigua Goma 2 más potente que la GV esta última tiene mayor poder rompedor debido a su mayor velocidad de detonación. Recuerde que el poder

rompedor depende de la presión de detonación y de la energía del explosivo y, a su vez, la primera depende de la densidad y de la velocidad de detonación del mismo.

Otra variante es el **método Kast**. En este caso se carga un tubo de zinc con el explosivo a ensayar hasta una altura de 80 mm. Encima se coloca un comprimido de pícrico de 20 mm de altura y se inicia con un número 8. El tubo de zinc está situado sobre un disco de plomo que actuará sobre un pistón de acero aplastando una pastilla de cobre o crusher. Como patrón se utiliza el pícrico que debe dar 1 mm de aplastamiento, en caso contrario los resultados se corrigen con ayuda de unas tablas.

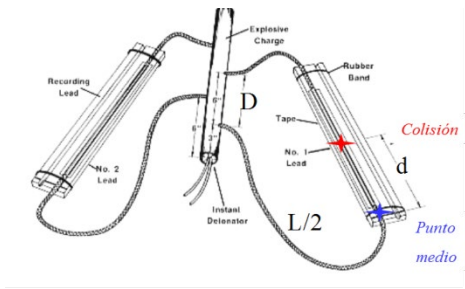


Cambiando de tercio, note que la respuesta del cilindro (aplastamiento) va a depender del material con que está construido y, ciertamente, en la práctica no se suele volar plomo ni cobre, sino roca. Aun así, se puede deducir que, en materiales rocosos densos y competentes, donde hay una buena transferencia de la energía de choque del explosivo a la roca, se favorece la rotura por la acción impulsiva de la onda mientras que en macizos rocosos blandos o fracturados el efecto de empuje de los gases suele ser más interesante.

La **velocidad de detonación** tiene una gran influencia en la presión de detonación dado que su valor es indicativo de la velocidad de liberación de la energía. En los explosivos, sobre todo en los industriales, depende en gran medida de:

- Diámetro de la carga: al expandirse los gases durante la reacción, la presión disminuye y con ello la energía que soporta la onda de choque existiendo para cada explosivo un **diámetro crítico** por debajo del cual no es posible la detonación estable
- Confinamiento: retrasa la expansión y con ello las pérdidas aumentando la velocidad de detonación
- La densidad del explosivo: la velocidad aumenta con la densidad, pero en aquellos explosivos que dependen de las burbujas de gas o aire como generadores de hot-spots se llega a un punto en que la velocidad cae e incluso se insensibiliza el explosivo
- Otros factores como el envejecimiento del explosivo, que causa su deterioro o la pérdida de las micro-burbujas de aire o gas, o la energía de iniciación

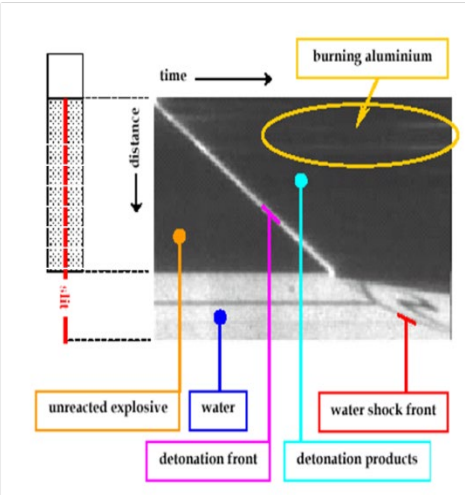
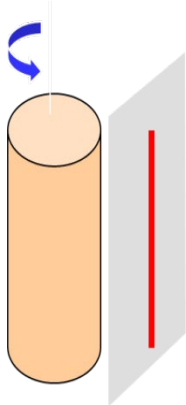
Existen diferentes ensayos para determinarla, desde el primigenio método **D'Autrache** (figura de la derecha), que de forma ingeniosa utilizaba la velocidad conocida de un cordón detonante para la determinación de la velocidad del explosivo ensayado, hasta las técnicas actuales que permiten medirla de forma continua en el propio barreno.



Por ejemplo, uno de los métodos de **medida continua en barreno** consiste en introducir una sonda en el mismo y conectarla a un dispositivo que mantiene la intensidad en la sonda constante. Un osciloscopio registra la variación de potencial de la sonda con respecto al tiempo. Al iniciar el barreno la resistencia de la sonda disminuye según avanza el frente de la detonación al ir cortocircuitándose la sonda. Dado que la intensidad se mantiene constante la variación de potencial es proporcional a la de la resistencia y ésta a su vez a la velocidad de detonación.

Velocidad (km/s)	
En el caso de los industriales el rango de variación es elevado	
Fulm. mercurio	5.4
Azida de plomo	5.6
Trinitroresorc. plomo	5.2
PETN	8.4
RDX	8.4
TNT	6.9
Nitroglicerina	7.6
Nitrocelulosa	7.3
Gomas	5.0
Dinamitas	3.0
Hidrogel	4.5
ANFO	4.0
HEAVY ANFO	4.5

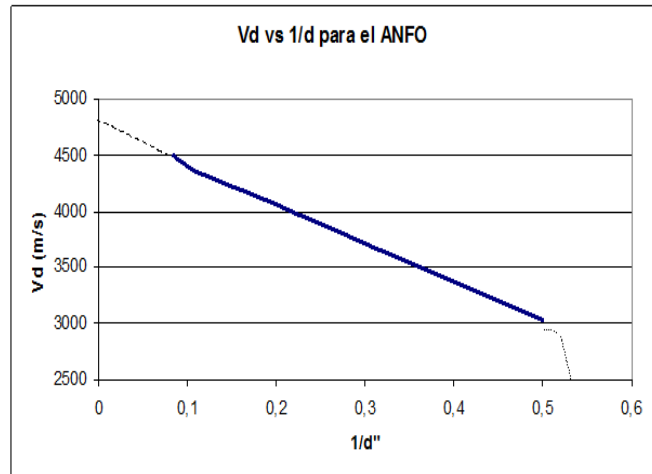
También se mide la velocidad con el **cronógrafo óptico**. Básicamente es una cámara con una película en un tambor que gira a altas revoluciones en la que queda grabada la detonación al dejar pasar la imagen a través de una ranura. De este modo se obtiene en la película una representación bidimensional de la detonación, siendo una dimensión espacial y la otra temporal.



Fotografía bidimensional (1-s, 1-t) de la detonación

También se utiliza el **contador electrónico de tiempo** consistente en dos sensores o captadores, introducidos en el explosivo a una distancia predefinida, que inician y cierran un contador de tiempo al paso de la onda de choque.

En general, los cálculos teóricos determinan **la velocidad denominada ideal**, esto es, bajo la hipótesis de reacción completa y sin pérdidas por expansión. Dicha velocidad de detonación ideal se puede obtener a partir de los datos obtenidos experimentalmente con diferentes calibres extrapolando para una carga de diámetro infinito tal como se ilustra en la figura de la derecha. Los



resultados teóricos concuerdan bastante bien con los obtenidos experimentalmente.

### Fiabilidad

Bajo este término se engloba una serie de ensayos muy importantes desde el punto de vista del correcto funcionamiento del explosivo:

#### Coeficiente de autoexcitación

*Se determina la máxima distancia a la que un cartucho cebado hace explotar por simpatía a otro no cebado colocado en línea según el eje de ambos. Depende del calibre y del confinamiento. Se realiza al aire, sobre placa o en tubo. Las gomas e hidrogeles presentan, dentro de los explosivos industriales, los mayores coeficientes -en torno a unos diez centímetros al aire-. En el extremo opuesto está el anfo, que requiere continuidad de la carga. Esta característica es importante en la carga de barrenos en macizos fracturados en los que puede desprenderse material interrumpiendo la continuidad de la misma.*

#### Sensibilidad a la iniciación o sensibilidad deseada

*Se trata de encontrar el detonador de mínima potencia capaz de iniciar un cartucho de explosivo. Casi todos los explosivos encartuchados son sensibles al detonador estándar de potencia óctuple (nº 8). **El fabricante debe facilitar el modo adecuado de iniciación de cada uno de sus productos.***

#### Diámetro crítico

*Se determina el calibre mínimo que permite el régimen de detonación estable. Depende del confinamiento. De nuevo en términos generales Gomas, Riogeles y Emulsiones encartuchadas del orden de 1"; el ANFO del orden de 2".*

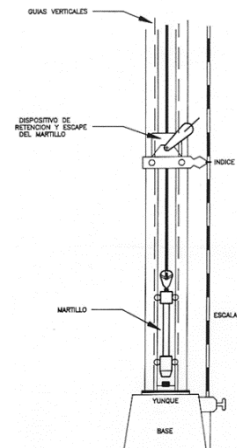
## Resistencia al agua

Se trata de determinar si el explosivo es capaz de detonar después de estar inmerso en agua durante diferentes intervalos de tiempo (en España se hace el ensayo tras una inmersión de 5 horas). En general, Gomas, Riogeles y Emulsiones tienen buena resistencia al agua; la de las Dinamitas, en cambio, va de regular a mala y la del ANFO nula.

## Seguridad

Esta característica es muy importante desde el proceso de fabricación hasta la colocación en el barreno ya que determina la seguridad relativa en su manejo frente a estímulos accidentales. En los ensayos se determina la sensibilidad de los explosivos a estímulos subsónicos o, lo que se denomina como, sensibilidad no deseada o sensibilidad al:

- Choque: se determina la energía de iniciación de una pequeña muestra de explosivo por choque con un martillo que se deja caer desde diferentes alturas
- Fricción: se determina si hay reacción cuando se somete la muestra a fricción bajo peso
- Calor: se determina la temperatura de auto-inflamación del explosivo introduciendo una pequeña muestra en un baño caliente al que se le va incrementando la temperatura



En la figura se representa *la tendencia general* de sensibilidad no deseada de las diferentes familias de explosivos: recalando los términos “*tendencia general*”, dado que la sensibilidad varía mucho dependiendo del tipo de estímulo e incluso, con un mismo estímulo, dentro de una misma familia.

Otro ensayo a destacar es el de sensibilidad del explosivo ante una descarga eléctrica y también se incluye en este apartado **la toxicidad de los humos** de la voladura -muy importante en obra subterránea-.

CLASIFICACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE  $(CO+NO_x)$

- CLASE A:  $V < 22.7$  l/kg
- CLASE B:  $22.7 < V < 46.7$  l/kg
- CLASE C:  $V > 46.7$  l/kg

Aunque los explosivos industriales están formulados con balances de oxígeno cercano a cero siempre se producen algunas cantidades de CO y NO<sub>x</sub> peligrosos en el caso de labores subterráneas mal ventiladas. En los ensayos se determina el contenido en gases tóxicos que resultan de la detonación del explosivo. Se mide, en una galería de ensayo, la concentración de los distintos gases producidos tras la detonación de un cartucho de medidas estandarizadas.

## 4. Seguridad en minería subterránea del carbón

---

En minería subterránea de carbón la posibilidad de formación de atmósferas explosivas (grisú y/o polvo de carbón) exige adoptar una serie de medidas especiales de seguridad tanto en los equipos utilizados en el laboreo como en el uso de los explosivos.

Así, se prescribe el uso de detonadores de casquillo de cobre, el cebado en fondo de barreno, retacado con material inhibidor..., y se establece una serie de condiciones para el disparo en función de la clase de labor y la tipología del explosivo.

La clasificación de las labores se realiza en función de la presencia de grisú/carbón en la misma, y la de los tipos de explosivos en función de que superen o no una serie de ensayos normalizados que tratan de reflejar las distintas condiciones de salida del disparo en presencia de grisú/carbón.

Dichos ensayos son progresivamente más restrictivos de manera que un explosivo que supere los necesarios para clasificarse como tipo IV se considera más seguro que otro clasificado como tipo III, y así hasta llegar al tipo I que engloba a todos los explosivos que no tienen ningún grado de seguridad -en lo referente a inflamación de atmósferas explosiva-. Los explosivos tipo II, tipo III y tipo IV constituyen los denominados explosivos de seguridad.

Los ensayos se realizan en galerías consistentes en:

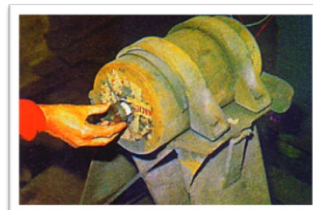
- Cámara de explosión: Cilindro de acero cerrado por uno de los extremos y abierto por el otro dotado de ventilación, válvulas, medidor de concentración de metano...
- Cámara de expansión: Cilindro de acero contiguo separado por una lámina de papel o plástico
- Túnel de expansión: Túnel abierto de hormigón armado en donde se conduce y permite la expansión final de los gases

En la cámara de explosión se efectúan diferentes ensayos:

- Mortero largo: simula el bocazo con diferentes longitudes de carga y distintas condiciones de atmósfera explosiva
- Mortero corto: simula diferentes condiciones de retacado en atmósfera grisúosa taponando el mortero con diferentes espesores de placa de acero
- Carga suspendida: simula detonación al aire en atmósfera con polvo en suspensión y metano
- Tiro en esquina: simula el choque de la onda y de los gases contra una pared en este caso un cuadrante del mortero es abierto

A partir de la superación correlativa de los diferentes ensayos un explosivo de seguridad se clasifica en alguno de los siguientes tipos –se indica sucintamente los ensayos que deben superar:

Seguridad capa	Seguridad reforzada	
Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Mortero corto más placa, con el 9 % de metano	Mortero corto más placa con el 9 % de metano	Además de los ensayos para Tipo III debe superar el ensayo de Mortero de esquina
Mortero largo más polvo de carbón	Carga suspendida con polvo de carbón suspendido y 3 % de metano	
Mortero largo con el 9 % de metano	Mortero largo más polvo de carbón suspendido	
	Mortero largo con el 9 % de metano	



Galería de ensayos, mortero largo y mortero corto

### ***Grisú, polvo de carbón y condiciones de utilización de los explosivos de seguridad***

La probabilidad de ocurrencia de inflamación en un tajo va a depender de las características de éste relativas a la posibilidad de formación de la atmósfera explosiva y su naturaleza – presencia de carbón y/o grisú, clase de labor...- así como del explosivo y de las condiciones de su utilización, que definirán la probabilidad de fuente ignición. Por tanto, es pertinente ahondar más en el conocimiento de estos factores.

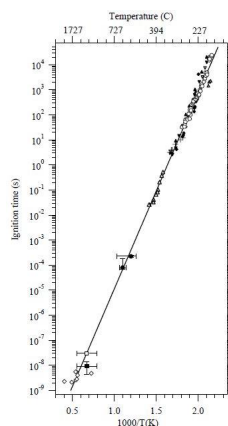


El **grisú** es una mezcla de metano y aire en proporciones variables que suele ir acompañada de etano, anhídrido sulfúrico... El metano al ser más ligero que el aire se acumula en las partes altas de los tajos y galerías, pudiéndose ser el desprendimiento: continuado y uniforme en todo el frente o a través de fallas y grietas o, finalmente, súbito, proyectando grandes cantidades de carbón.

Con proporciones entre el 5%-16% de metano la atmósfera es susceptible de inflamarse:



Según la teoría térmica de Mallard y Le Chatelier, para inflamar el grisú es necesario mantenerlo por encima de su temperatura de inflamación durante cierto periodo de inducción (10s a 650°C). Este fenómeno es conocido como retardo a la inflamación. A temperaturas mayores el tiempo de inducción disminuye (por ejemplo, a 1000°C es 1s). Este fenómeno ocurre, en general, en todos los explosivos. Vea, en el gráfico de la derecha, cómo varía el tiempo de ignición en función de la temperatura de la muestra (HMX en la figura).



Como en la detonación la expansión de los gases es muy rápida y la temperatura cae bruscamente, en 1890 la comisión francesa del grisú estableció como explosivos de seguridad roca y de seguridad capa a aquellos cuya temperatura de detonación fuese inferior a 1900°C y 1500°C, respectivamente. Dichos explosivos estaban compuestos de NA (Tª explosión de 1350°C) incluyendo como sensibilizante un pequeño porcentaje de NG.

Pero paralelamente se comprobó que con Tª inferiores a 1500°C se podía iniciar la atmósfera lo que llevó a establecer la teoría de la carga límite según la cual la onda de choque comprime y calienta adiabáticamente la atmósfera aumentando la presión en la dirección axial del barreno y sentido de detonación proporcionalmente al número de cartuchos o carga explosiva.

Mas se observó que existían otros factores causantes de la inflamación de la atmósfera como son: las reacciones entre los gases calientes de la voladura -por lo que se propuso taponar las bocas de los barrenos con material inerte que refrigerase la T de los gases a 600°C- o el choque de los gases con las paredes de las galerías cercanas que puede ocasionar reacciones secundarias activando la inflamación -se propuso entonces envolver el cartucho con una envuelta de seguridad compuesta de materias inhibitoras (bicarbonato sódico, cloruro sódico...).

Para explicar la diversidad de fenómenos que provocan la inflamación del grisú, Audibert propuso que la descomposición del metano se propaga por intermedio de gérmenes



(átomos y radicales libres) de manera que si hay una concentración suficiente de los mismos se puede iniciar y propagar la inflamación a toda la masa gaseosa.

Su origen es diverso: temperatura del frente de detonación y de los gases en expansión, onda de choque, reacciones secundarias, plasma de explosión, llama, partículas incandescentes, chispas eléctricas...

Estos pueden desaparecer si la expansión es muy rápida, o pueden agotarse si la expansión es muy lenta, siendo peligrosa la situación intermedia. También pueden activarse cuando la masa gaseosa choca contra una superficie fuera del barreno.

De esto se deduce la importancia de que cada barreno esté bien obturado con su retacado correspondiente y se complete la reacción con el paso de la onda de choque, o sea, que el régimen de descomposición sea de detonación.

Por otra parte, se pueden añadir inhibidores en la masa explosiva que absorban parte de la energía química a costa de su calor específico; ésta es la base de los explosivos de seguridad.

El **golpe de polvo** es la combustión de una suspensión de polvo de carbón con un aumento de la presión que produce el levantamiento de más polvo, con lo que combustión se propaga hasta grandes distancias. Puede ser provocada por una llamarada o por la inflamación de grisú.

Dos teorías explican este fenómeno:

- Los granos de carbón por delante del frente de la llama sufren una destilación de sus componentes orgánicos volátiles mezclándose con el aire y propagándose la combustión a través de esta mezcla inflamable
- Los granos en el frente se oxidan desprendiendo el calor necesario para acelerar y mantener la reacción de combustión

Según estas teorías la facilidad de inflamación dependerá del contenido en volátiles del carbón -crece con el porcentaje en volátiles hasta llegar al 26% en que no hay aumento-, de la granulometría del carbón y del contenido en estériles y la humedad.

De todo lo anterior se deduce que el trabajo en labores inclinadas, la presencia de fracturas y fallas en el tajo, o de carbón en el frente o en las inmediaciones son factores que favorecen la posibilidad de formación de atmósferas explosivas. Habría que añadir también la utilización de ventilación secundaria, así como del retardo en la voladura.

A este último respecto cabe señalar que el riesgo de formación aumenta con la duración de la pega, existiendo un valor límite por debajo del cual el peligro es nulo. El valor límite es mayor con cebado anterior que con cebado posterior, mas debido al riesgo de

descabezamiento la ley prescribe el uso de cebado posterior –en el culote del barreno- para evitar explosión al aire.

Finalmente se presenta, de manera resumida, la clasificación de minas, cuarteles y labores subterráneas del RGNBSM instando a su consulta para la completa definición de las categorías. También se incluye el cuadro de condiciones de disparo en función del tipo de labor.

#### Clasificación de minas, cuarteles y labores subterráneas

- Con gases inflamables
  - 1ª categoría: no se presenta ni grisú ni gases inflamables
  - 2ª categoría: se presentan en cantidad reducida
  - 3ª categoría: se pueden desprender cantidades importantes
  - 4ª categoría: se pueden desprender de forma súbita y masiva originando el arrastre violento de mineral o roca
- Con polvos explosivos
  - Aquellas minas de carbón cuando el contenido en volátiles supera el 12% y 16% dependiendo de si está clasificada como grisú o no

En minas o cuarteles con categorías 2ª o 3ª, o con polvos explosivos, las labores se clasifican en:

- 1ª clase: ni el frente ni los barrenos cortan carbón y la concentración hasta los 100 m al frente es inferior al 0.5%. No deben existir acumulaciones de polvo o carbón ni fuentes de estos en los 30 metros desde el frente, y la superficie de carbón descubierta en este tramo ha de ser inferior al 10% del total
- 2ª clase: cuando el carbón en el frente no supera el 10% de la superficie y el nº de barrenos que cortan carbón es inferior al 20%
- 3ª clase: cuando se superan los valores anteriores en labores mixtas
- 4ª, 5ª y 6ª clase: labores en capa recorridas por ventilación principal, no recorridas por ventilación principal y en fondo de saco, respectivamente

## Condiciones de disparo

Clases de labor a las que es aplicable						Características del disparo					
1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	Modalidad	Tipo de explosivo	Carga máxima <sup>(1)</sup>	Duración <sup>(2)</sup>	Intervalo <sup>(3)</sup>	Observaciones
Si	No	No	No	No	No	A	I				
Si	Si	No	No	No	No	B	II	2 kg	5 s		No pueden cargarse barrenos que hayan cortado carbón
Si	Si	Si	No	No	No	C	II	1 kg	125 ms	125 ms	
Si	Si	Si	Si	No	No	D	II	0,5 kg	125 ms	125 ms	
Si	Si	Si	Si	No	No	E	III	2 kg	5 s		Si V≥0,5 m/s
Si	Si	Si	Si	No	No	E	IV	2,5 kg	5 s		Si V≥0,5 m/s
Si	Si	Si	Si	No	No	E	III	2 kg	0,5 s	125 ms	Si V<0,5 m/s
Si	Si	Si	Si	No	No	E	IV	2,5 kg	0,5 s	125 ms	Si V<0,5 m/s
Si	Si	Si	Si	Si	No	F	III	2 kg	0,5 s	125 ms	
Si	Si	Si	Si	Si	No	F	IV	2,5	0,5 s	125 ms	
Si	Si	Si	Si	Si	Si	G	III	1,5 kg	125 ms	125 ms	
Si	Si	Si	Si	Si	Si	G	IV	2 kg	125 ms	125 ms	

(1) Carga máxima por barreno.

(2) Duración máxima de la pega.

(3) Intervalo de tiempo máximo entre dos barrenos capaces de influirse