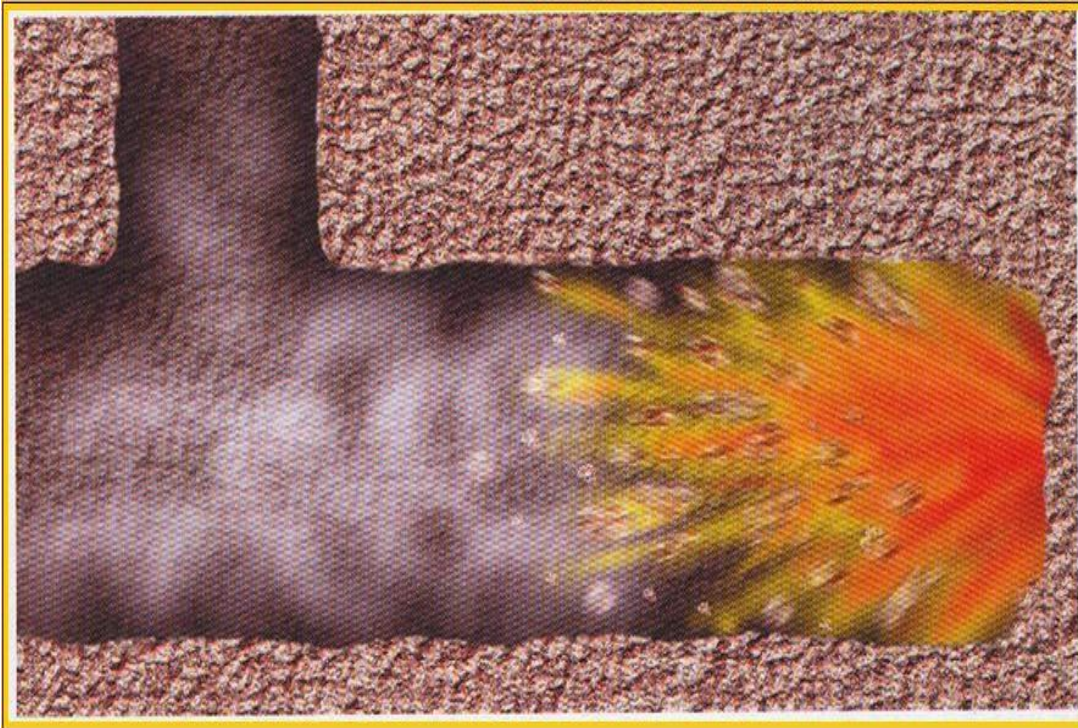


4. FUNDAMENTOS SOBRE EXPLOSIVOS Y LA TEORÍA DE LA DETONACIÓN

- **4.1. Tipos de reacción en función de la cinética química**
 - 4.1.1. *Combustión*
 - 4.1.2. *Deflagración*
 - 4.1.3. *Detonación*
- **4.2. Mecanismo de la detonación**



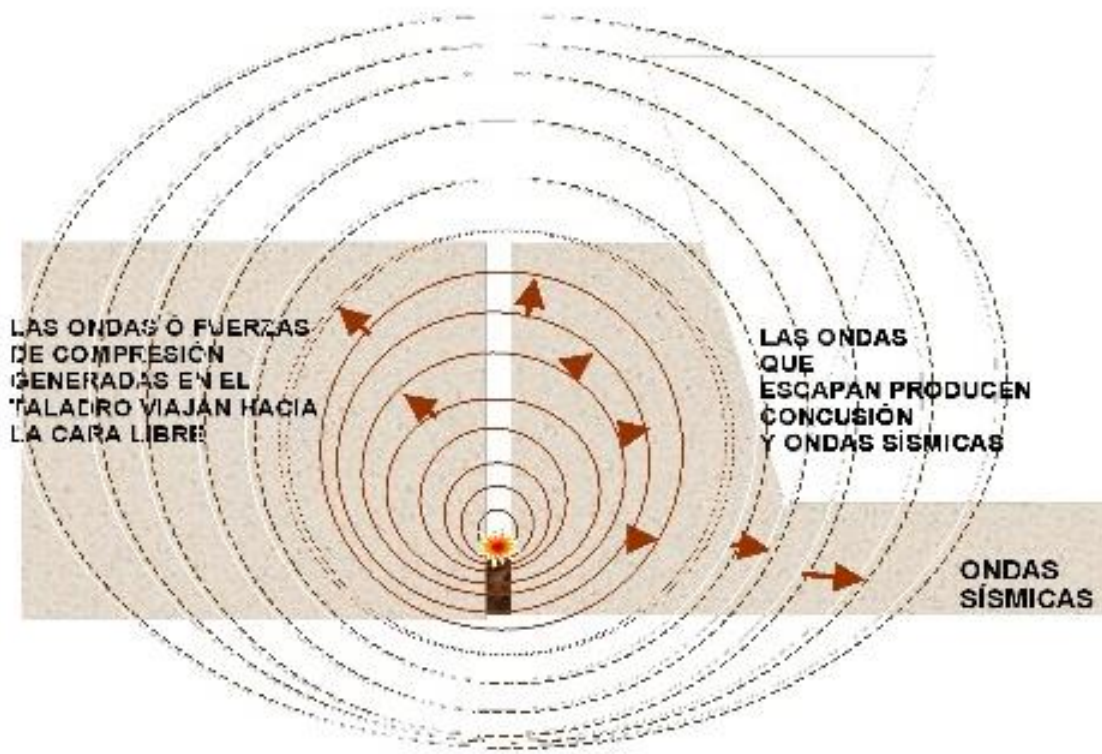
4.1. Tipos de reacción en función de la cinética química



- 4.1.1. *Combustión*
- Puede definirse como tal a toda **reacción química** capaz de desprender calor pudiendo o no, ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento.

- 4.1.2. *Deflagración*
- Es un **proceso exotérmico** en el que la transmisión de la reacción de descomposición se basa principalmente en la conductividad térmica.
- La deflagración es sinónimo de una combustión rápida.





- 4.1.3. *Detonación*
- Es un proceso **físico-químico** caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva (que se traduce en presión sobre el área circundante).

4.2. Mecanismo de la detonación

- **Detonador:** crea la onda de choque iniciadora (1). La onda avanza a alta velocidad originando la **reacción de la masa**, inicialmente en un punto, el que se amplía hasta ocupar el diámetro total del explosivo, donde este adquiere su velocidad máxima de detonación.
- Por detrás del frente de choque (FC) se forma la zona de reacción (ZR) limitada por el plano de Chapman – Jouget (PCJ) con la máxima temperatura y presión de detonación; donde la masa explosiva se descompone para originar la zona de explosión (ZE) que le sigue (con temperatura y presión de explosión, muy elevadas).



Explosivo rompedor (secundario)

Explosivo iniciador (primario) – detonador

5. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPLOSIVOS

- **5.1. Potencia explosiva**
- **5.2. Poder rompedor**
 - *5.2.1. Velocidad de detonación*
 - *5.2.2. Ensayos de laboratorio*
 - *5.2.3. Ensayos de campo*
- **5.3. Densidad**
- **5.4. Diámetro crítico**
- **5.5. Masa crítica**
- **5.6. Resistencia al agua**
- **5.7. Calidad de los humos**
- **5.8. Toxicidad**
- **5.9. Sensibilidad**
 - *5.9.1. Sensibilidad al detonador*
 - *5.9.2. Sensibilidad a la onda explosiva*
 - *5.9.3. Sensibilidad al choque y al rozamiento*
- **5.10. Estabilidad química**
- **5.11. Calor de explosión**
- **5.12. Balance de oxígeno**
- **5.13. Ensayos específicos de los explosivos de seguridad**
 - *5.13.1. Mortero largo*
 - *5.13.2. Mortero corto con o sin placa*
 - *5.13.3. Cargas suspendidas*
 - *5.13.4. Mortero de esquina*
 - *5.13.5. Clasificación de los explosivos de seguridad*

5.1. Potencia explosiva



- Es la medida del “**contenido de energía**” del explosivo y del trabajo que puede efectuar.
- (P. Trauzl) Norma ITINTEC 311.191

5.2. Poder rompedor (Brisance)

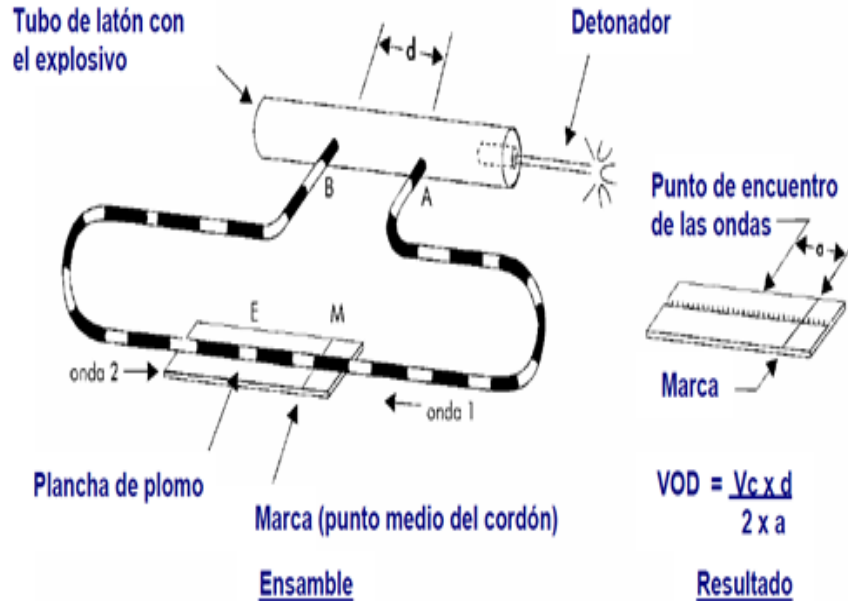
Es el efecto “demoledor” o “tritador” que aplica el explosivo sobre la roca para iniciar su rompimiento. Como factor dinámico de trabajo es consecuencia de la onda de choque y está vinculado a la densidad y a la velocidad de detonación que muchas veces se utiliza como base comparativa.

(P. Hess) Norma ITINTEC 311.193



PRUEBA D'AUTRICHE (VELOCIDAD DE DETONACION)

Norma ITINTEC 311.192



La distancia "a", normalmente es mayor cuanto más lenta es la velocidad de detonación del explosivo.

• 5.2.1. Velocidad de detonación

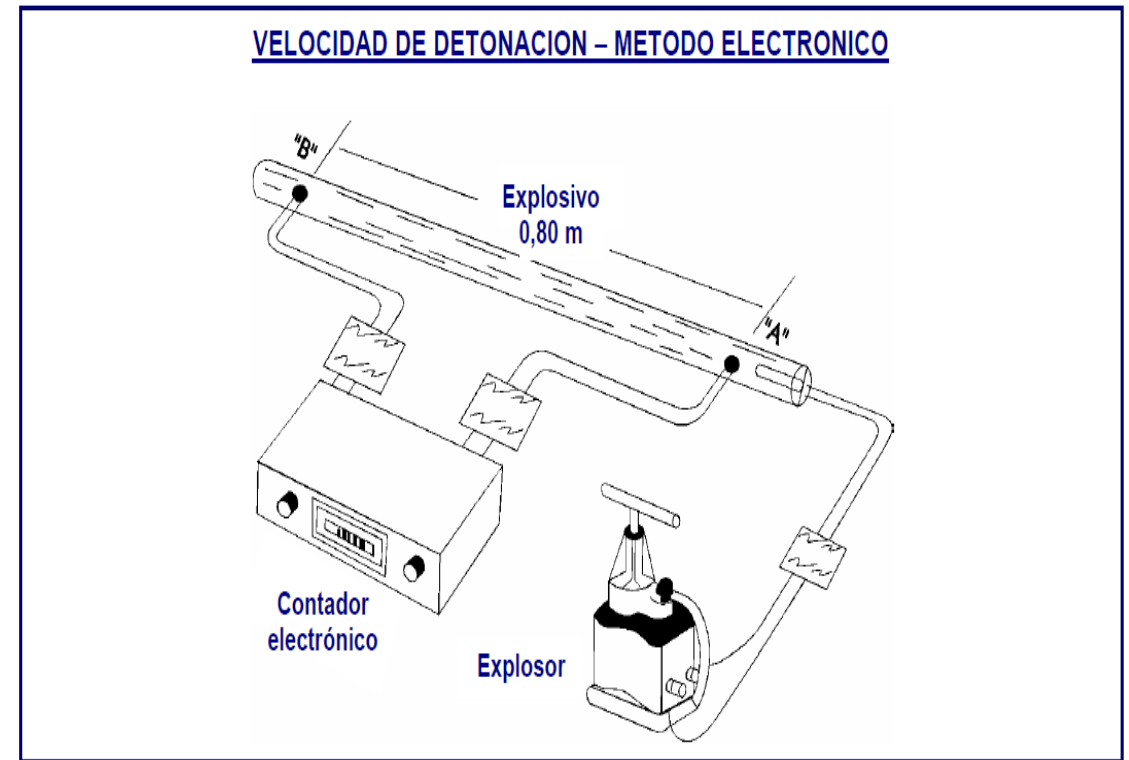
Es la **velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo**, y por tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. Es también la velocidad con que viaja la onda a lo largo de una columna explosiva, sea al aire libre o en confinamiento dentro de un taladro de voladura.

Los factores que la afectan son:

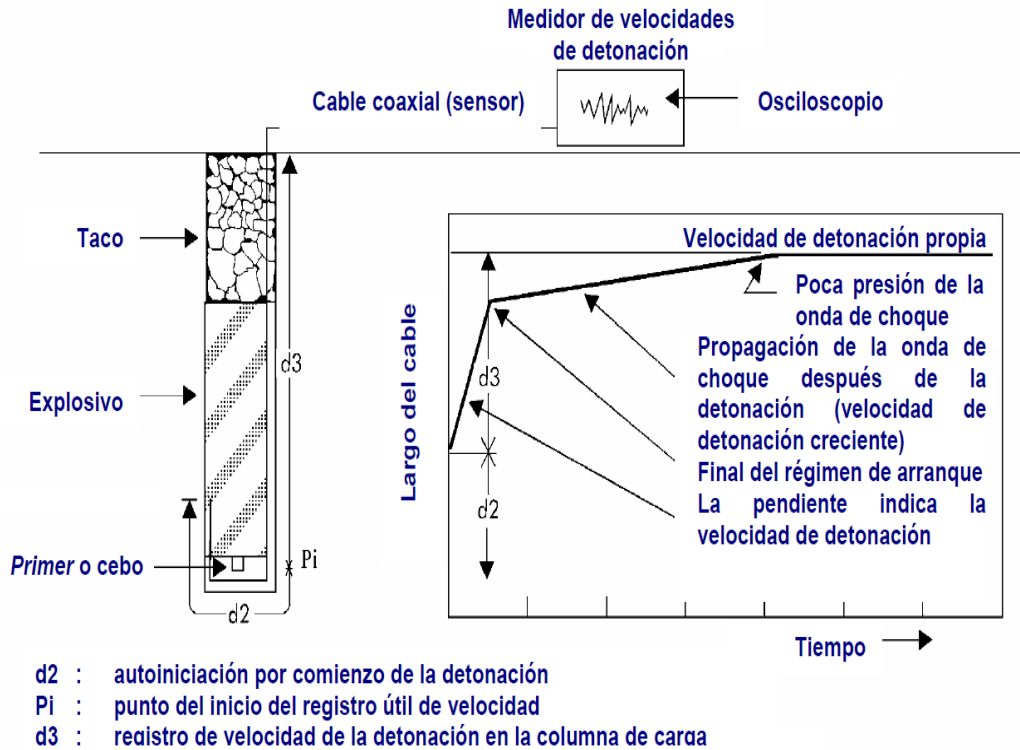
- la densidad de la carga
- el diámetro
- el confinamiento
- la iniciación
- el envejecimiento.

- 5.2.2. *Ensayos de laboratorio*

Los ensayos de laboratorio se basan en la toma de una muestra cilíndrica de explosivo



MODERNO METODO DE MEDICION DE VELOCIDAD DE DETONACION



5.2.3. Ensayos de campo

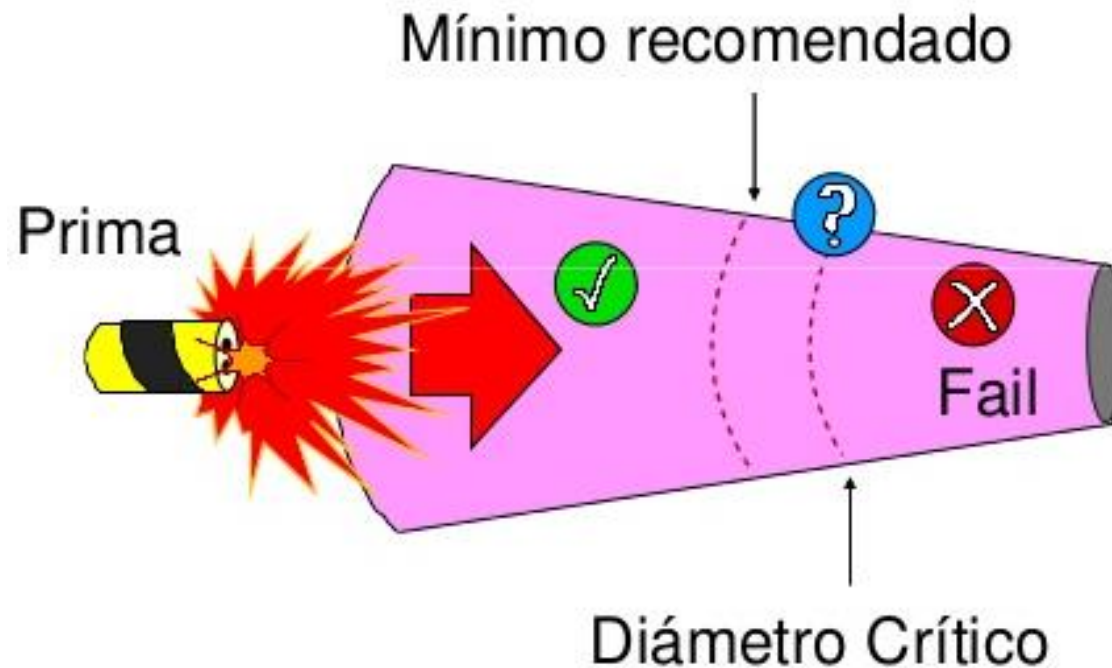
Existen otros métodos en desarrollo, con sensores de alambre o de fibra óptica como el Electric Probe Method, para lectura directa de la velocidad de detonación de la carga en el propio taladro de voladura.

5.3. Densidad

- Es la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo, expresada en g/cm³. Prácticamente expresa la masa en gramos de una sustancia contenida en un volumen de 1 cm³.
- En los explosivos tiene influencia determinante sobre la velocidad de detonación y la sensibilidad.
- La densidad propia o “de masa” de los explosivos varía entre 0,8 a 1,6 g/cm³ en relación con la unidad (agua a 4 °C y 1 atm).



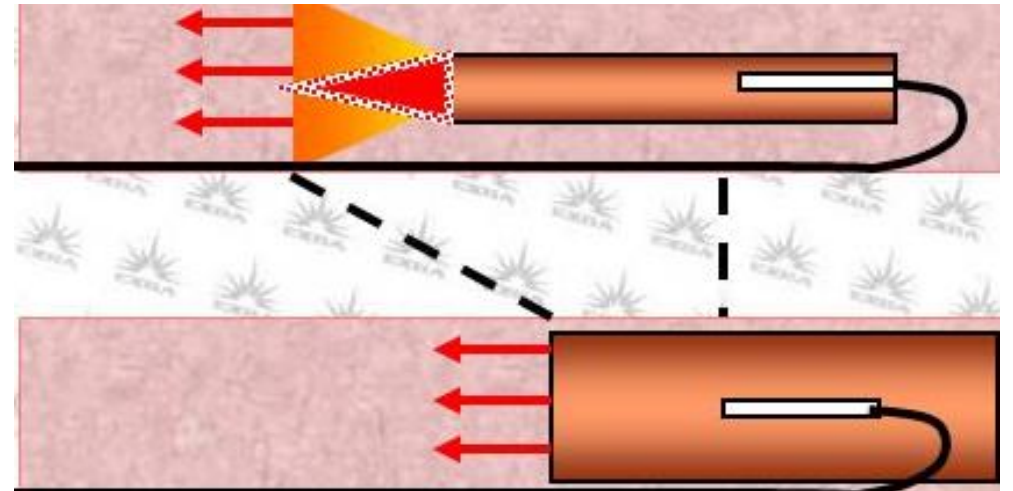
5.4. Diámetro crítico



- Las cargas explosivas cilíndricas tienen un diámetro particular por **debajo del cual la onda de detonación no se propaga**, o sólo lo hace con una velocidad muy por debajo a la de régimen. A dicha dimensión se la denomina “diámetro crítico”, la que por ejemplo en algunos hidrogeles sensibles es del orden de 1 pulgada (2,54 cm) y en slurries de 3 pulgadas (7,5 cm) lo que es necesario conocer previamente.
- Los principales factores que influyen en la determinación del
- diámetro crítico son:
 - - Tamaño de las partículas.
 - - Reactividad de sus componentes.
 - - Densidad.
 - - Confinamiento.

5.5. Masa crítica

- Es la mínima cantidad de explosivo que se necesita para que se produzca la detonación por efecto de una llama.



5.6. Resistencia al agua



- Es la habilidad para resistir una prolongada exposición al agua sin perder sus características, es decir su capacidad para rechazar la penetración del agua. La unidad de medida empleada es la de “horas”.
- Los explosivos de fase continua como las dinamitas plásticas, los slurries, las emulsiones o las cargas iniciadoras coladas (carga primers) son resistentes al agua debido a que prácticamente no tienen poros a través de los cuales podría filtrarse el agua.

5.7. Calidad de los humos

- La detonación de todo explosivo comercial produce polvo, vapor de agua (H₂O), óxidos de nitrógeno (NO-NO₂) óxidos de carbono (CO-CO₂) y eventualmente gases sulfurosos (H₂S, SO₃ y AlO₂) si contenía azufre o aluminio. Entre los gases inocuos generados hay siempre **cierto porcentaje de productos irritantes tóxicos o letales llamados en conjunto "humos"**, como el monóxido de carbono y el bióxido de nitrógeno. De acuerdo a la proporción contenida de estos gases tóxicos se ha establecido escalas de clasificación por grado de toxicidad para la exposición del personal trabajador después del disparo, teniendo como ejemplo a la siguiente del USBM (Buró de Minas de USA):

- Cuya equivalencia métrica según el ISO es:

CATEGORÍA	VOLUMEN DE GASES NOCIVOS (CO, NO ₂)
1 ^{ra}	de 0 a 4,53 dm ³
2 ^{da}	de 4.53 a 9,34 dm ³
3 ^{ra}	de 9,34 a 18,96 dm ³

Según el Instituto de Salud Ocupacional, los límites permisibles para exposición normal de 8 horas en labores subterráneas son:

GAS	VALORES PERMITIDOS
Monóxido de carbono (CO)	50 ppm
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	5 ppm
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,5 %

5.8. Toxicidad

- Los gases tóxicos no son permanentes en la nube de humos y polvo formada por la explosión, sino que se generan inicialmente en determinado volumen y se mantienen como tóxicos durante un determinado tiempo, para después disiparse haciéndose inocuos, según la disponibilidad de oxígeno libre en el ambiente, así CO pasa a CO₂ y NO a NO₂, menos letales.
- Es en este período de **tiempo “activo”** en el que se tiene que evitar el contacto con el personal en las labores subterráneas.
- La presencia de concentración de estos gases además de su persistencia a permanecer en ambientes confinados depende de varios factores:



- 1. De la formulación del explosivo y su balance de oxígeno en la detonación.
- 2. De una eficiente iniciación con un cebo potente y adecuado para llegar a la detonación lo más rápidamente posible.
- 3. Del tipo y confinamiento de la labor, labores subterráneas ciegas con ventilación deficiente, labores ventiladas mediante chimeneas, ductos o extractores de aire y labores en superficie. De las condiciones del frente de trabajo; tipo de roca, flujo mínimo de aire, humedad, vehículos motorizados en trabajo, etc.
- En términos generales, las condiciones ambientales tienen mayor incidencia en la permanencia de estos gases en las labores después del disparo que la composición propia del explosivo.

5.9. Sensibilidad

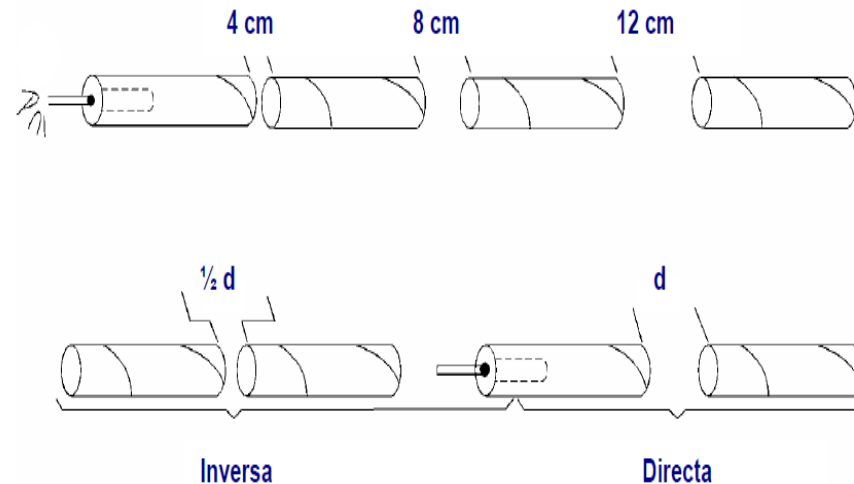
- Es una medida de la **facilidad con la que se puede iniciar una reacción explosiva fortuita o no prevista**. El que un explosivo sea más o menos sensible depende de su composición molecular, densidad, confinamiento, tratamiento recibido, tamaño y distorsión de sus cristales, incremento de temperatura y otros factores.
- Al efecto mecánico (stress), como impacto y fricción.
- A la temperatura ambiente (calor).
- A la chispa eléctrica y al fuego.
- A la humedad prolongada.
- A la carga iniciadora (detonador o cebo), a las balas y otros medios.

- 5.9.1. *Sensibilidad al detonador*
- Es la capacidad o aptitud que presenta todo explosivo para ser **iniciado por un fulminante**, un cebo o un cordón que se denomina “mínimo primer”.
- Los explosivos deben ser suficientemente sensitivos para ser detonados por un iniciador adecuado. Esta capacidad varía según el tipo de producto. Así, por ejemplo los fulminantes o detonadores se emplean para la mayoría de dinamitas mientras que los agentes de voladura usualmente no arrancan con ellos, requiriendo de un booster o multiplicador de mayor presión y velocidad.



PRUEBA DE TRANSMISION O DETONACION POR SIMPATIA

Ejemplo: distancias arbitrarias



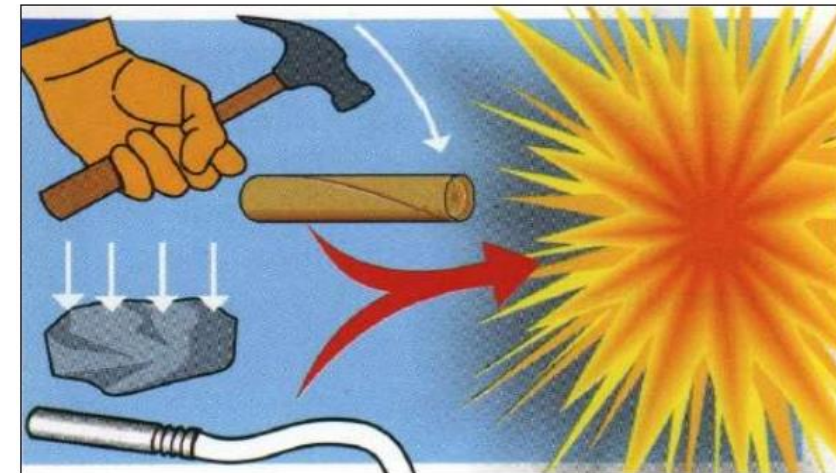
- *5.9.2. Sensibilidad a la onda explosiva*
- Al ser detonado un cartucho, éste puede inducir la detonación de otro cartucho vecino por “**simpatía**”. En las dinamitas sensibles esta transmisión de la detonación puede representar una distancia de muchos centímetros.
- El primer cartucho se prepara con un detonador N° 6. Este cartucho inicial cebado se acomoda bien al principio del canal, asegurándolo para que no se mueva; a continuación se colocan los demás cartuchos ubicándolos a distancias establecidas (ejemplo 8, 10, 12, 14, 16 cm, etc.), bien alineados.

- 5.9.3. *Sensibilidad al choque y al rozamiento*
- Muchos explosivos pueden **detonar fácilmente por efecto de impacto o fricción**. Por seguridad es importante conocer su grado de sensibilidad a estímulos subsónicos, especialmente durante su transporte y manipuleo.
- Como referencia aproximada del grado de sensibilidad con pesa de 2 kg, el fulminato de mercurio detona con una altura de caída de 1 a 2 cm, la nitroglicerina con 4 a 5 cm, la dinamita con 15 a 30 cm, y los explosivos amonicales con caídas de 40 a 50 cm.

FRICCIÓN



GOLPE O IMPACTO



5.10. Estabilidad química



- La estabilidad química de un explosivo es su aptitud para mantenerse químicamente inalterado con el paso del tiempo. La estabilidad está garantizada si las condiciones de almacenamiento y el periodo de almacenamiento son los adecuados y correctos.
- Debe distinguirse la “estabilidad física”, importante para el comportamiento del explosivo en el medio ambiente que lo rodea y para su propio manipuleo, de la “estabilidad química”.

5.11. Calor de explosión

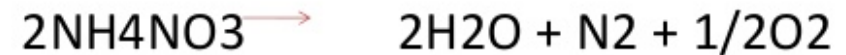
- Expresada en calorías por gramo de explosivo, suponiendo principalmente la producción de agua, nitrógeno, gas carbónico y alúmina en cuanto el explosivo tuviera aluminio.
- Es un valor teórico, el cual da una indicación sobre el potencial energético de un explosivo, siendo claramente entendido que sólo una parte de este potencial sirve durante la voladura; el resto se pierde.



5.12. Balance de oxígeno

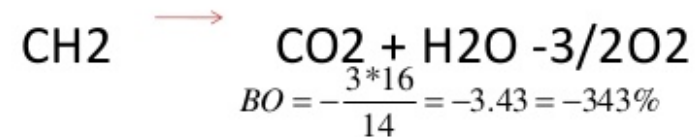
- Expresado en gramos de oxígeno por 100 g de explosivo, es importante en la formulación de la mezcla explosiva para **asegurar una completa combustión con la máxima potencia y mínima producción de gases tóxicos.**
- En el cálculo para explosivos a emplearse en trabajos subterráneos mal ventilados debe incluirse la envoltura de papel o de plástico.

- Balance de ingredientes de explosivos
Nitrato de sodio:



$$BO = +\frac{16}{80} = +0.2 = +20\%$$

Petróleo:



5.13. Ensayos específicos de los explosivos de seguridad

- Los explosivos que se utilizan específicamente en la minería del carbón necesitan estar catalogados como de seguridad. Esta catalogación y clasificación se realiza atendiendo a unas pruebas y criterios concretos que se explican a continuación.
- El metano que se desprende del carbón.



Mortero largo
Mortero corto con o sin placa
Cargas suspendidas
Mortero de esquina

6. SUSTANCIAS EXPLOSIVAS

- 6.1. Sustancias explosivas
- 6.2. Sustancias explosivas utilizadas como iniciadores
- 6.3. Sustancias explosivas secundarias
- 6.4. Sustancias no explosivas susceptibles de detonar



6.1. Sustancias explosivas

- son sustancias químicas **susceptibles de reaccionar violentamente** al disociarse sus moléculas y reagruparse posteriormente en formas más estables. Se pueden establecer tres categorías:
- S. E., primarias o iniciadores.
- S. E., secundarias
- S. no E., susceptibles a detonar



6.2. Sustancias explosivas utilizadas como iniciadores



- Los detonantes se dividen en primarios y secundarios, según su aplicación.
- Los primarios por su alta energía y sensibilidad, se emplean como iniciadores para detonar a los secundarios.
- Entre ellos podemos mencionar a los compuestos para detonadores y reforzadores (pentrita, azida de plomo, fulminatos, etc.).

6.3. Sustancias explosivas secundarias

- Los secundarios **son los que efectúan el arranque y rotura de las rocas**, son menos sensibles que los primarios pero desarrollan mayor trabajo útil, por lo que también se les denomina como “**rompedores**”. Comprenden dos grupos: de uso civil (industriales) y explosivos de uso militar.
- Los altos explosivos sensibles comprenden a:
 - 1. Dinamitas.
 - 2. Explosivos permisibles o de seguridad para minería de carbón.
 - 3. Explosivos hidrogel y emulsión sensibilizados.
 - 4. Explosivos especiales.

6.4. Sustancias no explosivas susceptibles de detonar



- Los agentes de voladura no sensibles comprenden dos grupos:
- a) Agentes de voladura acuosos (water gels) son:
 - 1. Hidrogeles o slurries.
 - 2. Emulsiones.
 - 3. Agentes mixtos (emulsión/ANFO o ANFOs pesados).
- b) Agentes de voladura NCN granulares, secos. ANFO y similares.

7. EXPLOSIVOS INDUSTRIALES

- **7.1. Dinamita**
 - 7.1.1. *Dinamita pulverulenta*
 - 7.1.2. *Dinamita semigelatinosa*
 - 7.1.3. *Dinamita gelatinosa*
- **7.2. Anfo**
- **7.3. Hidrogeles**
- **7.4. Emulsiones**
- **7.5. Explosivos para la minería de carbón. Explosivos de seguridad**
- **7.6. Pólvora negra**



7.1. Dinamita



- 7.1.1. *Dinamita pulverulenta*
- Exadit 45, Exadit 60 y Exadit 65 con densidades de 1,00 a 1,05 g/cm³ y velocidades de 3 400 a 3 600 m/s), de consistencia granular fina, adecuada para rocas friables, blandas, en taladros secos.

- 7.1.2. *Dinamita Semigelatinosa*
- Semexsa 45, Semexsa 60, Semexsa 65 y Semexsa 80 (con densidades de 1,08 a 1,2 g/cm³ y velocidades de 3 500 a 4 500 m/s), de consistencia granular o pulverulenta, adecuada para rocas semiduras y húmedas.





7.1.3. Dinamita gelatinosa

Gelatina Especial 75 y 75 BN;
Gelatina Especial 90 y 90 BN;
Gelignita y Gelatina Explosiva (con densidades de $1,3$ a $1,5 \text{ g/cm}^3$ y velocidades de $5\,000$ a $6\,500 \text{ m/s}$) de consistencia plástica, elevado poder triturador para **rocas duras y gran resistencia al agua** para trabajos subacuáticos.

7.2. Anfo

- En su generalidad se componen de nitrato de amonio sensibilizado por un agregado orgánico, líquido o sólido generalmente no explosivo. El nitrato debe ser perlado y suficientemente poroso para garantizar la absorción y retención del agregado combustible.
- El ejemplo más típico es el ANFO convencional (94,4% nitrato de amonio - 5,6% fuel oil N° 2) con 2 500 a 3 000 m/s de velocidad y 45 kbar de presión.



7.3. Hidrogeles



- Los hidrogeles exentos de materia explosiva propia en su composición no reaccionan con el fulminante y se califican como “agentes de voladura hidrogel, slurries o papillas explosivas”, requiriendo de un cebo reforzado o primer-booster para arrancar a su régimen de detonación de velocidad estable.
- Sus cualidades principales son: alta velocidad de detonación y alta densidad que les dan enorme poder rompedor y elevada resistencia al agua, por lo que resultan excelentes sustitutos del ANFO, para voladura de rocas tenaces y de taladros inundados, incluso con agua dinámica.

7.4. Emulsiones

- En forma similar, los agentes de voladura emulsión carecen de un elemento explosivo en su composición por lo que también requieren ser detonadas con un cebo reforzador de alta presión de detonación. Su aplicación también está dirigida a taladros de mediano a gran diámetro en tajos abiertos, como carga de fondo de alta densidad o como carga de columna (total o espaciada) en taladros con agua, o perforados en roca muy competente.



7.5. Explosivos para la minería de carbón



- Especialmente preparados para uso de minas de carbón con ambiente inflamable, su principal característica es la baja temperatura de explosión, la que se obtiene con la adición de componentes o aditivos inhibidores de llama, como algunos cloruros.
- En los de “seguridad reforzada o de intercambio iónico” se consigue rebajar la temperatura de explosión con ingredientes que al reaccionar en el momento de la detonación forman el inhibidor, con mayor poder refrigerante.

7.6. Pólvora negra

- La pólvora negra, se incluye dentro de este apartado de explosivos por razón de su uso en cantería de bloques y pizarras para ornamentación. Sin embargo, conviene aclarar que **no es un explosivo** propiamente dicho, puesto que nunca llega a detonar, sino que deflagra únicamente.

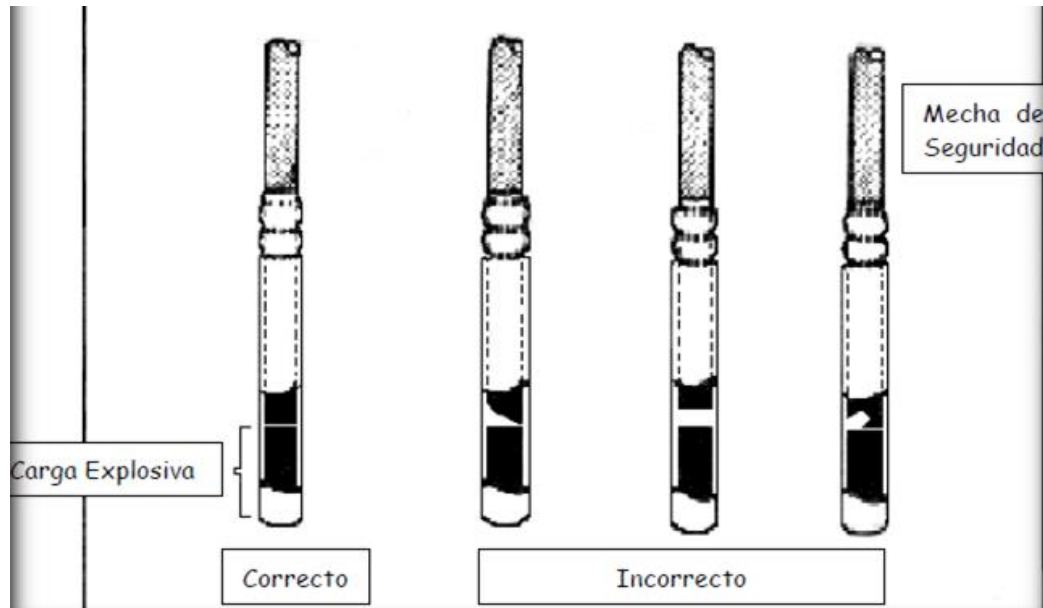
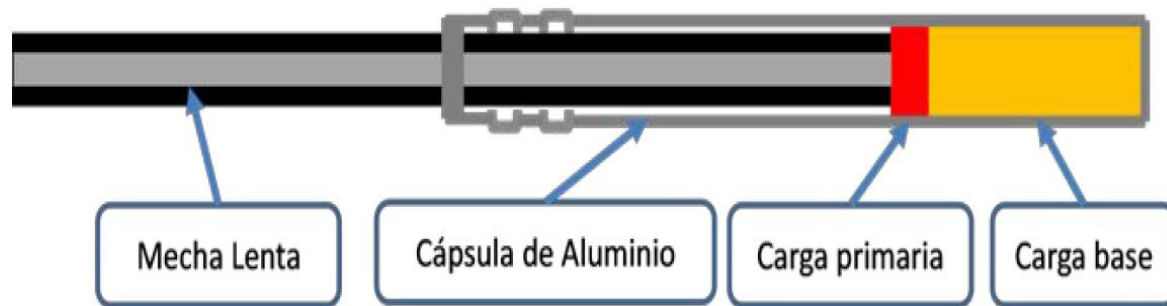


8. ACCESORIOS DE VOLADURA

- **8.1. Sistemas de iniciación**
 - 8.1.1. *Detonadores ordinarios*
 - 8.1.2. *Detonadores eléctricos*
 - 8.1.3. *Detonadores no eléctricos*
 - 8.1.4. *Detonadores electrónicos*
- **8.2. Cordón detonante**
- **8.3. Relé de micro retardo**
- **8.4. Multiplicadores**
- **8.5. Mecha lenta**
- **8.6. Otros accesorios no explosivos**
 - 8.6.1. *Explosores eléctricos*
 - 8.6.2. *Ohmetros*
 - 8.6.3. *Sistemas de iniciación no eléctrica*



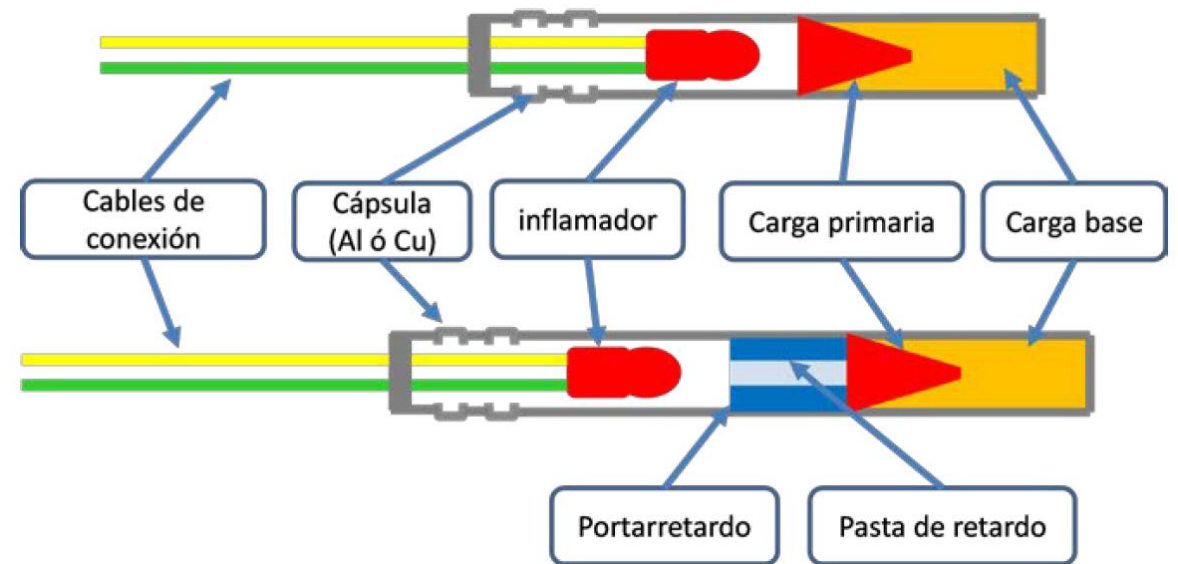
8.1. Sistemas de iniciación

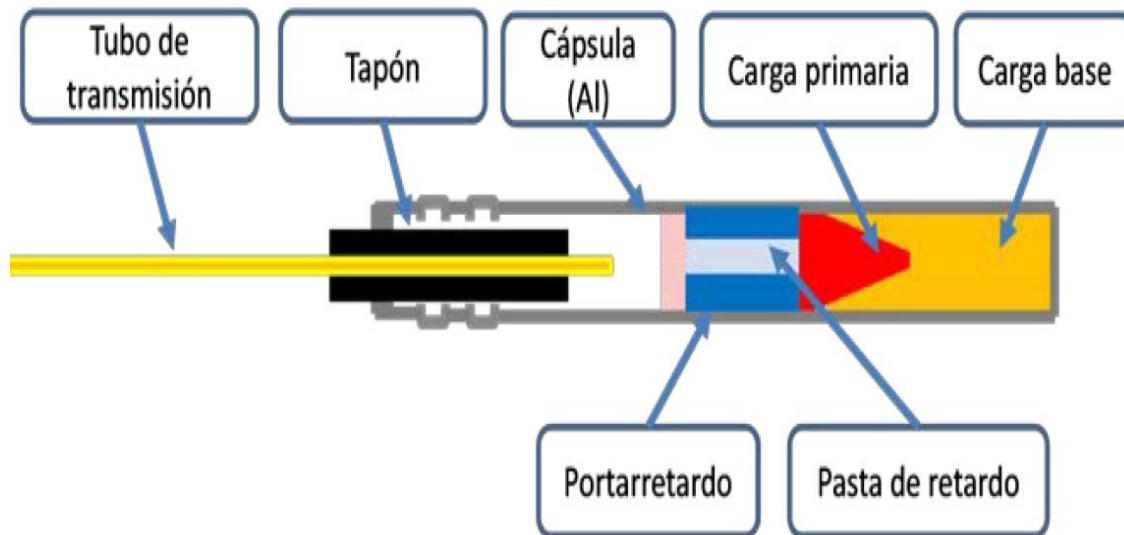


- 8.1.1. *Detonadores ordinarios*
- Son aquellos que se inician mediante mecha lenta. La mecha se introduce en el extremo abierto de una cápsula de aluminio que aloja la carga explosiva del detonador y se encapsula mediante maquinas especiales, de modo que se evite que la mecha se salga durante su manipulación.

8.1.2. Detonadores eléctricos

- El detonador eléctrico emplea la **energía eléctrica para su iniciación**. El detonador eléctrico posee un inflamador pirotécnico (denominado comúnmente “cerilla”), a través del cual circula la corriente eléctrica, que provoca la iniciación de la carga explosiva.
- El inflamador o cerilla es una pequeña resistencia recubierta de pasta explosiva. Esta resistencia llamada también puente de incandescencia, va conectada a los hilos de conexión y, a través de ellos, recibe la corriente eléctrica.





- 8.1.3. *Detonadores no eléctricos*
- Los detonadores no eléctricos se caracterizan porque no interviene ningún tipo de corriente eléctrica en su iniciación. La parte explosiva es común a los detonadores eléctricos, pero en lugar de un inflamador pirotécnico la carga porta retardo se **inicia por medio de una onda de choque de baja energía** que se transmite a través de un tubo de transmisión.

- *8.1.4. Detonadores electrónicos*
- Los detonadores electrónicos son la última evolución de los sistemas de iniciación para voladuras, pero todavía el uso de este tipo de sistema está centrado en ciertas aplicaciones donde se buscan unos resultados específicos.
- pirotecnia.



8.2. Cordón detonante



- El cordón detonante es una carga explosiva linear flexible que tiene un núcleo de alto explosivo, usualmente pentrita o PETN, forrado, con hilos de diferentes materiales según el propósito de uso del cordón y recubierto con material protector plástico, como PVC, nylon, teflón y otros, que le permiten flexibilidad, facilidad de atar, resistencia a humedad, abrasión y ruptura por tracción.

8.3. Relé de micro retardo

- Los retardos (delays) para voladura secuencial con cordón detonante son de varios tipos y se interponen en la línea de modo que la onda que viene con una velocidad constante (digamos de 7 000 m/s), se retrasa un tiempo determinado al pasar por el elemento de retardo perdiendo velocidad, para continuar por el tramo siguiente de cordón nuevamente con la velocidad de 7 000 m/s.
- Los más corrientes usados tienen retardo de 5; 9; 17; 25; 35; 50 y 100 ms, que pueden ampliarse intercalando diferentes retardos en la misma línea sumando sus tiempos.



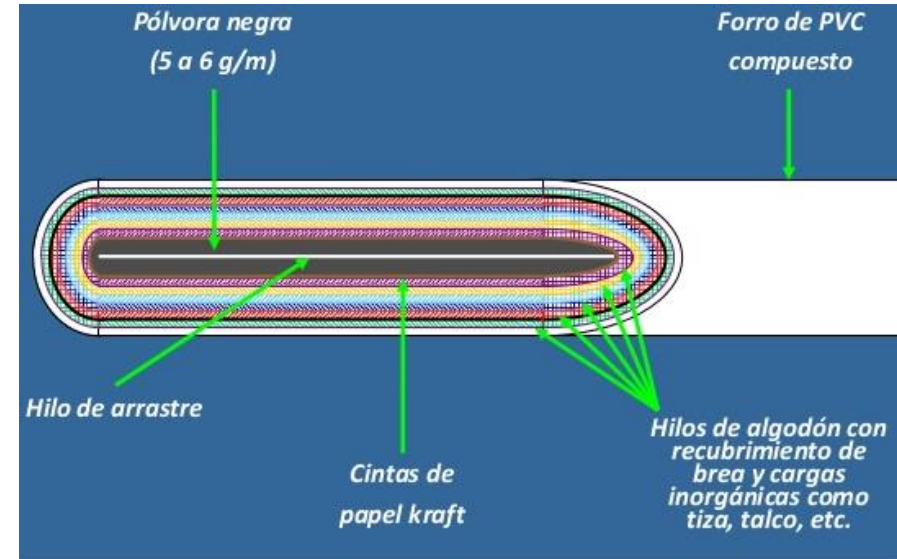
8.4. Multiplicadores



- Los multiplicadores **(boosters)** **son iniciadores de voladura** que se utilizan para iniciar explosivos de baja sensibilidad, como pueden ser anfo, hidrogeles o emulsiones, tanto si se emplean en modalidad de encartuchados o a granel.

8.5. Mecha lenta

- Accesorio lineal flexible con núcleo de pólvora negra forrado con material textil y cobertura plástica impermeable, que transmite por su interior a una llama controlada denominada “dardo”.
- Normalmente recomendada para **iniciar cargas simples**. Es aún muy empleada en la pequeña y mediana minería subterránea y en obras de ingeniería, por su menor costo y por ser factible de utilizar por personal poco entrenado.



8.6. Otros accesorios no explosivos



- 8.6.1. *Explosores eléctricos*
- (**blasting machines**) Su capacidad o potencia debe ser mayor a la resistencia total del circuito encendido en por lo menos un amperio para garantizar el disparo completo.
- Puede ser de tipo:
 - Dínamo eléctrico
 - Condensador

- 8.6.2. *Ohmetros*
- Un óhmetro es un aparato destinado a **medir resistencias**. Es imprescindible en voladuras eléctricas, pues permite al artillero comprobar y medir el circuito de voladura, investigar defectos de continuidad en detonadores, medir aislamientos, derivaciones, etc.





- 8.6.3. *Sistemas de iniciación no eléctrica*
- Las voladuras con detonadores no eléctricos es necesario iniciarlas con sistemas de iniciación diferente a los explosores eléctricos. En estos casos, se necesita proporcionar la energía al extremo de un tubo de transmisión de modo que se asegure que se inicia correctamente. Esta energía puede obtenerse por diferentes medios: una chispa eléctrica o una pequeña energía que proporciona un pistón de caza.

[illegible]

কোমলক: কলকাতা