

UNIVERSIDAD DE VIGO

# ***Explosivos y Voladuras***

---

**Fernando García Bastante**

**Junio-2021**

# Explosivos y Voladuras

---

*Este documento constituye una introducción o antesala de la Tecnología e Ingeniería de los Explosivos. Consecuentemente presenta algunos de los conceptos, técnicas y principios básicos que serán requeridos para el desarrollo profesional en este ámbito.*

*Parte de la información técnica recogida en estos apuntes proviene de catálogos de fabricantes (MAXAM -antiguamente UEE- y ORICA) siendo responsabilidad del ingeniero competente en voladuras obtener de las empresas proveedoras la información más actual y veraz sobre las características técnicas y normas específicas de uso y seguridad de los explosivos y accesorios que vaya a consumir.*

*El documento está estructurado en cuatro bloques: un bloque introductorio, uno relativo a la ciencia y tecnología de los explosivos y accesorios de voladura, otro relativo a la ingeniería de los explosivos y, finalmente, uno dedicado a la seguridad y reglamentación.*

## Índice General

Tema 1. Minería y explosivos

Tema 2. Conceptos básicos sobre materiales energéticos

Tema 3. Ensayos de caracterización de los explosivos

Tema 4. Explosivos

Tema 5. Sistemas de Iniciación

Tema 6. Mecanismos de fracturación del macizo rocoso por acción del explosivo

Tema 7. Diseño de voladuras en banco. Aplicación de la teoría de Langefors al cálculo de voladuras en banco

Tema 8. Voladuras en túnel

Tema 9. Técnicas de voladuras de contorno

Tema 10. Vibraciones y onda aérea

Tema 11. Seguridad y reglamentación

La información presentada en este documento pretende facilitar el aprendizaje sobre esta materia al alumnado, considerando los siguientes objetivos generales planteados:

- Visión de la voladura como otro proceso más de los que integra el laboreo de minas, con un objetivo común: el suministro de material en las cantidades y calidades establecidas al mínimo coste unitario o máximo beneficio
- Conocimiento y comprensión del significado de la explosión, de los tipos de explosiones, del fenómeno de la detonación y sus características, de la naturaleza de los explosivos y de los principios más básicos que rigen el fenómeno de la detonación
- Comprensión del significado de las características de los explosivos tanto de las teóricas como de las determinadas experimentalmente
- Conocimiento de las diferentes familias de explosivos utilizados en minería y obra pública: su composición y características, los usos, manipulación y presentación comercial
- Conocimiento de los accesorios de voladura: su constitución, funcionamiento, características, usos, manipulación y presentación comercial
- Comprensión de los diferentes mecanismos de fragmentación de la roca por acción del explosivo
- Capacitación para el cálculo y diseño de voladuras
- Capacitación para la estimación, valoración y control de los resultados y de las afecciones que pudieran ocasionar las mismas
- Conocimiento de la reglamentación sobre los explosivos, especialmente en la referente a la seguridad en su uso y manejo

# ***Tema 1. Minería y Explosivos***

---

## *Índice del Tema:*

PREFACIO: LOS EXPLOSIVOS Y SU RELACIÓN CON LA EXPLOTACIÓN DE LAS MINAS A TRAVÉS DEL TIEMPO

1. EL INTERÉS DE LOS EXPLOSIVOS EN MINERÍA

2. LOS COSTES Y EL GRADO DE FRAGMENTACIÓN

3. INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

## **Los explosivos y su relación con la explotación de las minas a través del tiempo**

---

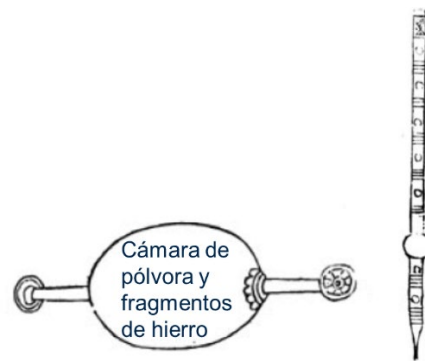
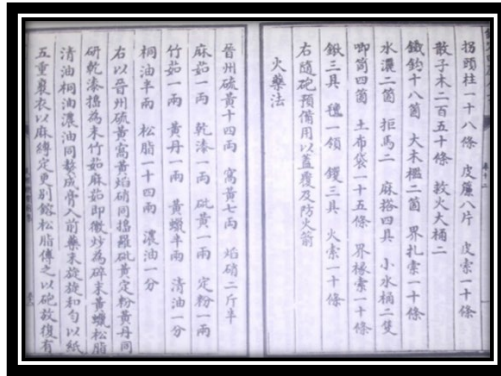
El uso de la energía química contenida en el explosivo como medio eficiente de fragmentación ha sido contrastado a lo largo de los siglos, desde que se introdujo, allá por el s. XVII, la pólvora negra como herramienta habitual de arranque en minería e ingeniería civil. Mas el camino trazado desde entonces fue muy duro, estando jalonado de cruces que nos recuerdan la multitud de vidas sacrificadas en aras de su avance y desarrollo tecnológico.

### **La aparición de la pólvora negra**

Teniendo en cuenta las enormes contribuciones que supuso al desarrollo de la civilización, la utilización de la pólvora negra en la ingeniería –no militar – puede ser considerada como una de las principales innovaciones tecnológicas de todos los tiempos, al ejercer un papel vital tanto en minería como en obra pública.

Su origen, tanto desde el punto de vista espacial como temporal, es bastante incierto. La tesis más aceptada es que fue en China, en el siglo IX durante la dinastía Tang, donde los alquimistas, buscando el elixir de la inmortalidad, fabrican la pólvora negra a partir de una mezcla de nitrato potásico, azufre y carbón vegetal.

Se utiliza, en primera instancia, para la creación de fuegos de artificio –el arte de los espectáculos ha generado pasión en China desde sus más remotos orígenes – y pasarían varios siglos hasta que se le diese, por primera vez, un uso militar en la defensa de los ataques a China por parte de los mongoles de Asia central. La importancia de la pólvora en aquella época es tal que la producción de nitrato y azufre queda bajo control del estado y se prohíbe su comercio con los extranjeros.



(izda.) Tseng Kung (1040), primer escrito en donde aparece la composición y fabricación de la pólvora negra. (centro) Bomba rayo de la Dinastía Song. (dcha.) Flecha incendiaria de la Dinastía Tang

A Europa llega en el siglo XIII de la mano del monje franciscano Roger Bacon que, a su vez se cree, la descubre a partir de escritos árabes. Un siglo después se emplea en occidente como propulsante en las armas de fuego y, a partir de aquí hasta finales del siglo XIX, la pólvora aparece como elemento principal de la guerra entre los hombres, que se sirven de ella bien como explosivo destructor: granadas, bombas, cohetes..., bien como propulsante: mosquetes, cañones, pistolas...

*Epistola de secretis operibus Artis et Naturae, et de nullitate Magiae* (ca. 1250)  
(Carta sobre el funcionamiento secreto del arte y la naturaleza, y de la nulidad de la Magia)

*Sed tamen sal petrae LURU VOPO VIR CAN VTRIET  
sulphuris; et sic facies tonitruum et coruscationem, si  
sias artificium - Cap. XI*

Escrito de Roger Bacon que revela de forma críptica la composición de la pólvora negra: R VII PART V NOV  
CORUL V ET: tome 7 partes de nitrato 5 de carbón y 5 de azufre

El primer registro que se tiene de su uso en minería data de febrero de 1627, en los "Proceedings of the Schemnitz Mine Tribunal". En él, el tirolés Caspar Weindl describe una voladura en la mina de "Banská Stiavnica" –en alemán Schemnitz – en lo que es hoy la República de Eslovaquia (antiguamente formaba parte de Hungría).

Rápidamente la técnica se extendió a Austria y Alemania; desde allí a Inglaterra, y a finales de siglo, la voladura era ya una técnica habitual en casi toda Europa. En ingeniería civil, el primer gran proyecto que utilizó la técnica de voladura fue la construcción del "Canal du Midi", en Languedoc (Francia), de 240 km de longitud, iniciado en 1666 y terminado en 1681.

Hasta entonces los métodos de arranque de la roca dura eran de una productividad muy baja: bien se utilizaba el calor del fuego para producir tensiones de origen térmico en la roca, resquebrajándola, y enfriándola posteriormente con agua (método que se utilizó ya desde antes de Cristo hasta el siglo XVIII); bien se perforaban barrenos en la roca y se introducían en ellos cilindros rajados que actuaban a modo de cuña, tal como se utiliza hoy en día para el desquite en la minería del granito ornamental; o bien se introducía cal viva

en los barrenos, se añadía agua y se taponaban los mismos, con la esperanza de que el incremento de volumen y los vapores producidos fragmentasen la roca.

El uso de la pólvora mejoró la productividad del arranque, mas el proceso era bastante laborioso -la perforación de un barreno de medio metro, con maza y barra de mina, suponía varias horas de trabajo - y peligroso, por la dificultad de la ignición de aquélla.

Una vez introducida la pólvora en el barreno, se metía en el mismo una aguja de metal hasta el fondo y se retacaba con tierra para contener a los gases que se producirían tras la ignición. La aguja se extraía cuidadosamente y el hueco que quedaba se rellenaba con pólvora de grano fino hasta la parte superior del barreno. Éste se prendía, bien directamente, bien con alguna mecha casera y muy primitiva, y el minero corría a ponerse a salvo. Lógicamente, el número de personas que morían por ignición prematura o investigando las causas del fallo de la misma era muy elevado.

Es sorprendente que ya a finales del siglo XVII el ingeniero militar francés Sebastien Le Prestre de Vauban estableciese la primera relación de cálculo de voladuras, ligando linealmente la cantidad de explosivo a emplear con el volumen de roca a arrancar, y relativamente poco después, en 1725, el profesor Bernard Forest de Belidor incluyese en el cálculo de la carga el término correspondiente a la superficie de dicho volumen arrancado.

Con el paso del tiempo se fueron variando las proporciones de los ingredientes de la pólvora, se mejoró las calidades de lo mismos y el proceso de fabricación. También hubo intentos de sustituir el nitrato potásico por clorato potásico (Berthollet, 1788), mas la gran cantidad de accidentes producidos por su facilidad de ignición hizo que el camino iniciado por Berthollet recorriese corta distancia.

Pasaron dos siglos hasta que en 1831 Willam Bickford inventó la mecha de seguridad, reduciéndose drásticamente el número de accidentes causados por la deficiente ignición de la pólvora negra. Mas laboreo y explosivo siempre formaron una pareja de difícil y peligrosa relación hasta bien entrado el siglo XX.



Una década antes del invento de Bickford, la pólvora comenzó a utilizarse en la minería del carbón, en las labores de avance en capa. Las ventajas de uso rápidamente se invirtieron, por una parte, debido a la cantidad de humos nocivos que se producían en unas galerías pobremente ventiladas, y por otra, que tuvo consecuencias más dramáticas, debido al gran riesgo de ignición del grisú y del polvo de carbón.

La lámpara de seguridad inventada unos años antes (1816) por Sir Humphry Davy no impidió que el número de muertos en la minería del carbón creciese debido a los accidentes provocados por el uso de la pólvora. El aumento de productividad en la mina se cobraba un alto precio.

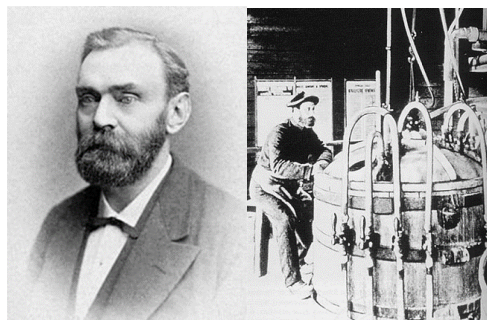
La mecha rápida aparece a mediados del siglo XIX, en Francia, creándose también los conectores necesarios para enlazar el ramal maestro con las líneas que alimentaban a los barrenos.

### **El surgimiento de los explosivos rompedores y del detonador**

El último tercio del siglo XIX introdujo grandes avances tecnológicos en minería: el detonador, los explosivos rompedores, la perforación neumática y el nacimiento de los explosivos de seguridad; a la vez supuso el principio del fin de la utilización de la pólvora negra a gran escala.

Efectivamente, a principio de los años sesenta el sueco Alfred Nobel estuvo experimentando con la nitroglicerina, descubierta en 1842 por el italiano Ascanio Sobrero, en un pequeño taller en Suecia. El gran riesgo que entrañaba su fabricación y manejo, y la dificultad de su iniciación de manera controlada representaban graves inconvenientes, frente a la ventaja del gran poder rompedor de la misma en comparación con el de la pólvora negra.

Nobel mejoró el proceso de fabricación; aun así, tuvo que vivir la destrucción accidental de varios de sus establecimientos. De efectos dramáticos para su familia fue la explosión del pequeño laboratorio de Heleneborg (Estocolmo), en 1864, que mató a su hermano pequeño, Emil. Como consecuencia de la explosión se le prohibió fabricar nitroglicerina en la ciudad de Estocolmo, por lo que Alfred inició su producción en una barcaza situada en el lago Mälaren, no demasiado lejos de la ciudad. Al año siguiente se le permitió construir la primera planta de producción industrial de nitroglicerina en Vinterviken, una zona aislada, en el mismo lago, rodeada de colinas.



**Alfred Nobel y nitradora Nobel**

Mas el hecho fundamental que dio comienzo a la era de la nitroglicerina, y poco después a la del resto de explosivos rompedores, fue la invención del detonador que Nobel patentó el mismo año del trágico suceso ocurrido a su hermano. Inicialmente consistía en un cilindro hueco de madera que contenía pólvora negra y que se iniciaba con una mecha. La onda de presión que se generaba era suficiente para iniciar de forma bastante fiable a la nitroglicerina.

Tan sólo tres años después Nobel sustituye la pólvora negra por el fulminato de mercurio - explosivo iniciador fabricado por primera vez en el siglo XVII por el sueco-alemán Baron Johann Kunkel y, posteriormente, descubierto de nuevo en 1799 por el inglés Edward Howard – y lo introduce en una cápsula de cobre. El fulminato bien solo, bien mezclado (con clorato de potasio, nitrato de potasio o pólvora) se utilizó en los detonadores hasta principios del siglo XX.

En 1867 Nobel patenta el segundo de sus grandes descubrimientos: la dinamita; Nobel se dio cuenta que podía embeber la nitroglicerina en un material inerte y barato, la tierra de diatomeas o kieselguhr, obteniendo un producto de consistencia pastosa, de manejo mucho más seguro que la nitroglicerina y que se iniciaba de forma fiable con su detonador. Aunque su potencia explosiva era menor que la de la nitroglicerina, seguía siendo un explosivo mucho más rompedor que la pólvora.



**Dinamitas y gomas**

A pesar de los grandes impedimentos que ejercieron los fabricantes de pólvora, la dinamita se introdujo rápidamente en Europa y América. En sólo diez años se construyeron fábricas en trece países y las ventas se multiplicaron por cincuenta. Era un camino sin retorno.

Rápidamente se sustituye el material inerte por mezclas de oxidantes (nitrato potásico, sódico o de bario...) y combustibles (carbón vegetal, azufre, parafinas, serrín...) patentándose una gran variedad de productos de diferentes características, con la particularidad de que todos ellos ofrecían poca resistencia al agua y a la humedad, que mermaban sus propiedades explosivas.

Este problema se agravó con la introducción del nitrato amónico como oxidante en 1867, por los químicos suecos Ohlsson y Norrbin -el nitrato amónico disminuye significativamente el precio del producto y su sensibilidad, pero a costa de dar más higroscopicidad al



explosivo - Nobel compró los derechos de patente haciendo las dinamitas extras o especiales.

En 1871 se introduce otra gran innovación en minería: Simon Ingersoll patenta una perforadora que funciona con vapor. La mecanización de la labor termina con el duro trabajo de la perforación manual, y la productividad de la operación aumenta drásticamente en las décadas siguientes.

Poco después Nobel (1875) patenta la gelatina explosiva, producto plástico más potente incluso que la propia nitroglicerina. Al equilibrar el balance de oxígeno de la misma mediante la aportación de una pequeña cantidad de nitrocelulosa –otro explosivo rompedor fabricado en 1846 paralelamente por Christian Schönbein y por Rudolf Böttger – Nobel obtuvo un explosivo mucho más potente, con la ventaja de que ofrecía una gran resistencia al agua y a la humedad, además de que no exudaba nitroglicerina tal como ocurría con las dinamitas.

También en ese mismo año, 1875, Julius Smith y Perry Gardiner, de forma independiente, crean un detonador de puente eléctrico que funciona a baja tensión. Con la patente del explosor que crea Julius Smith da comienzo a la era de la iniciación eléctrica.

Rápidamente, y al igual que había ocurrido con las dinamitas, se introduce en la formulación de las gelatinas, oxidantes y combustibles abaratando el producto. En 1879 Nobel patenta las gelatinas especiales, gelatinas que en su composición llevan nitrato amónico, abaratando aún más el explosivo a costa de reducir su resistencia al agua y humedad. El problema se resuelve en 1884 recubriendo el nitrato con ceras que lo impermeabilizan. Nobel antes de su muerte, a finales del siglo XIX, había registrado más de 400 patentes en todo el mundo.

El otro gran problema que se abordó en el periodo de finales del siglo XIX, fue el de la inflamación accidental del grisú y del polvo de carbón en las minas subterráneas. En 1888 la Comisión Francesa del Grisú publicó un informe que sostenía que la inflamación del grisú dependía exclusivamente de la temperatura de detonación del explosivo. Fruto de este trabajo fue que la reglamentación francesa de 1890 estableció unas temperaturas máximas de explosión de 1500°C y de 1900°C para los explosivos capa y roca, respectivamente.

En 1897 se construye la primera galería de ensayos (en Woolwich), en la que se simulan diferentes situaciones de atmósfera explosiva. Dos años después, en Gran Bretaña, aparece la primera lista oficial de explosivos permitidos.

Aunque alguno de ellos eran simplemente pólvoras a las que se le añadían aditivos que rebajaban la temperatura de explosión, así como sus propiedades explosivas, rápidamente se extendieron formulaciones constituidas por nitrato amónico, algún combustible y una

pequeña cantidad de nitroglicerina como sensibilizante. Estos explosivos superaban los ensayos de seguridad y eran más potentes que los anteriores.

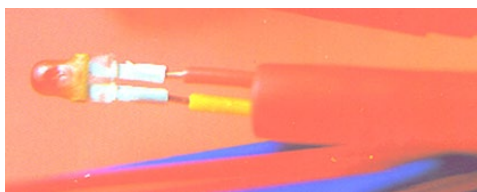
Una vez plantada la semilla, el desarrollo de los explosivos de seguridad seguiría en las décadas siguientes, conforme se fue comprendiendo los mecanismos que originaban la inflamación del grisú y del polvo de carbón.

Además de los explosivos ya mencionados, nitroglicerina y nitrocelulosa, en el último tercio del siglo XIX aparecen en escena otros explosivos que se utilizarían posteriormente en los accesorios de voladura: el trinitrotolueno (Wilbrand, 1863), la azida de plomo (Curtius, 1891), la pentrita (Alemania, 1894) y el hexógeno o ciclonita (Henning, 1899).

También surgen los explosivos a base de oxígeno líquido que se obtienen sumergiendo en aquél material combustible (saquitos de papel permeable que contienen algún combustible: serrín, carbón, naftalina, etc.); y las chedditas, explosivos a base de cloratos y percloratos muy peligrosos en su fabricación y manejo. Estos explosivos desaparecen en los cincuenta con el nacimiento de los agentes de voladura.

El primer tercio del siglo XX contribuyó bastante al desarrollo tecnológico, que en materia de explosivos y sus aplicaciones en ingeniería se había iniciado en las décadas anteriores.

A principio de siglo se fabrica en Alemania la cerilla eléctrica, y se normaliza el ensayo para comparar la potencia entre diferentes explosivos ideado por Isidoro Trauzl; en los años veinte se comienza a sustituir el fulminato de mercurio por azida de plomo, que ahora actuará como carga iniciadora de una carga base (v.g. pentrita) que, a su vez, será la encargada de iniciar la columna explosiva. También en esos años se introduce el detonador de retardo.



**Detalle del inflamador de un detonador eléctrico**

Por otra parte, en 1907 se fabrica en Francia el cordón detonante, constituido inicialmente por un tubo de plomo relleno de trilita que serían remplazados, a finales de los años treinta, el tubo por una serie de recubrimientos plásticos y textiles, y el explosivo por pentrita. A comienzos de los cincuenta se introducen los conectores de retardo para cordón detonante.

En el campo de los explosivos de seguridad aparecen los cartuchos con envuelta de material inhibidor o enfundados (creados por el belga Lemaire).

A mediados de los cuarenta, con la aparición de los detonadores de micro-retardo, se desata la revolución. La posibilidad de encender grandes series de barrenos, secuenciados en cortos intervalos de tiempo, permitió un gran control sobre las vibraciones, las proyecciones y la fragmentación de la roca. En voladuras de hileras múltiples, el barrenado y la carga podían hacerse a mayor escala, lo que, con una mecanización adecuada, aumentaba considerablemente la productividad.

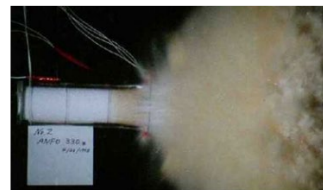
### **El nacimiento de los agentes de voladura**

La revolución iniciada en los cuarenta continúa en los cincuenta con los agentes de voladura. Si bien ya existía en el siglo anterior alguna patente de mezclas explosivas en cuya formulación sólo se introducía nitrato amónico más combustibles, no fue hasta que se comenzó a fabricar el nitrato en forma de gránulos porosos cuando se inicia su utilización masiva, propiciada además por el aumento en los diámetros de perforación en minería a cielo abierto.

En 1955 el americano Robert W. Acre crea la akremita, una mezcla de nitrato amónico en forma de *“prills”* porosos, con combustibles sólidos; poco después se sustituyen estos últimos por fuel-oil, naciendo el ANFO; y ya en 1956 se emplean los camiones de carga a granel de explosivo. Se mejoraba la productividad de las labores a la vez que se abarataba la voladura.



Prills de NA



Cartucho de ANFO

La otra cara de la moneda mostraba que el producto tenía una baja densidad y velocidad de detonación, además de ser higroscópico con una resistencia al agua nula. Aún así, a finales de los cincuenta el ANFO había conseguido apoderarse de la mitad del mercado de los explosivos industriales en los Estados Unidos.

También hubo una gran evolución de los explosivos de seguridad. En el Reino Unido se crean, en 1949, los explosivos *“equivalentes a los enfundados”* (J. Taylor), en los que el material inhibidor se introduce en la pasta explosiva mejorando la seguridad frente al grisú y al polvo de carbón.

Un año después en Alemania el Dr. Ahrens introduce los explosivos de intercambio iónico, compuestos por una pequeña cantidad de sensibilizante: nitroglicerina, el combustible:

celulosa, y un par salino cuya reacción produce el oxidante y el inhibidor, que al estar en estado naciente tiene un efecto refrigerante muchísimo mayor que las sales contenidas en los otros explosivos de seguridad. Estos explosivos superan las pruebas más exigentes de las galerías de ensayo.

En esos años comienzan a postularse las teorías que intentan explicar los mecanismos de rotura de la roca por acción de la voladura. Obert y Duvall (1949), Hino (1956) y Rinehart (1958) proponen a las ondas tractivas, que se producen al reflejarse en la cara libre las ondas directas, como las causantes principales de las misma.

En 1956 C. W. Livingston publica sus ideas acerca del cálculo de la carga y de su distancia óptima a la superficie libre, en el caso de cargas concentradas. Éstas dieron lugar a lo que se ha venido a denominar como teoría de la voladura en cráter o teoría de Livingston, que posteriormente ha sido desarrollada por otros autores como Bauer (1961) y Lang (1976).

Pero el desarrollo de los agentes de voladura no se había detenido. En 1956 el profesor Melvin Cook de la Universidad de Utah, basándose en la teoría de los puntos calientes, experimenta con mezclas de nitrato amónico, agua, goma guar y aluminio, este último como sensibilizante, obteniendo un explosivo de alta densidad y velocidad de detonación, y resistente al agua. Es decir, superaba todos los inconvenientes que presentaba el ANFO, y además era un producto de muy baja sensibilidad a estímulos subsónicos. Nacen los hidrogeles explosivos o "*slurries*".

En un principio sustituye el aluminio, debido a la peligrosidad que causa su gran afinidad por el oxígeno, por otro sensibilizante, la trilita. En los sesenta se construyen camiones que mezclan el producto "*in situ*", en los barrenos. Por entonces el Dr. Cook logra recubrir el aluminio con productos hidrófugos y en 1964 incorpora microburbujas de gas para sensibilizar el producto en pequeños calibres. Posteriormente se ensayan nuevas formulaciones en las que se introducen sales orgánicas como nuevo elemento sensibilizante, fabricándose productos sensibles al detonador número 8 en calibres de hasta 22 mm. La consistencia de estos productos se puede regular existiendo hidrogeles encartuchables, vertibles o bombeables.

A la par que se crean explosivos no sensibles al detonador nº 8, surge la necesidad de crear sistemas de iniciación apropiados para los mismos, creándose los multiplicadores, que son cilindros explosivos, fabricados bien a partir de trilita y pentrita, bien a partir de trilita y hexógeno.

La aparición de los explosivos rompedores en el último tercio del s. XIX había supuesto un enorme incremento en la productividad de los trabajos así como una mayor afección sobre el macizo rocoso, debido a las potentes características explosivas de las recién aparecidas

dinamitas y gomas, que originaban una presión en el barreno dos órdenes de magnitud mayor que la producida por la pólvora.

Durante varias décadas no hubo especial preocupación por las alteraciones que provocaba el uso de explosivo sobre el macizo rocoso; mas bien se aceptaba que el daño producido (en un sentido amplio del término) era debido a la debilidad inherente de la roca frente a la potencia devastadora que liberaba el explosivo, y que tan útil resultaba para conseguir el objetivo de fragmentar a bajo coste y con una elevada productividad. Mas a principios de los años cincuenta una serie de investigadores (Langefors, Kihlström, Lundborg, Holmes...), con una enorme visión ingenieril, se plantearon la posibilidad de controlar la alteración que provocaba el explosivo sobre el macizo rocoso, ya que en determinadas circunstancias esto suponía un considerable ahorro de costes a la par que un aumento en la seguridad de los trabajadores.

Todo ello derivó en la aparición de una serie de técnicas de voladuras que, desde entonces, han ido desarrollándose y cobrando mayor importancia, dado el continuo crecimiento en los diámetros de perforación empleados y, por tanto, en la cantidad de explosivo que se dispara y afecta al macizo rocoso en cada voladura. Habían nacido las técnicas de voladura de contorno.

En 1963 se publica *“Técnica Moderna de Voladura de Rocas”* del sueco Ulf Langefors – Langefors nombró a Björn Kihlström coautor del libro en reconocimiento de su colaboración en los aspectos prácticos del mismo –. En el libro expone su teoría de cálculo de la carga en banqueo y en voladuras en túnel, además de recoger otros temas tan importantes como son: las vibraciones del terreno y las voladuras de recorte y precorte. También propone como mecanismos fundamentales del proceso de fragmentación de la roca, a la acción que producen los gases resultantes de la explosión y, en menor medida, a la que produce la onda de choque que se propaga por el macizo.

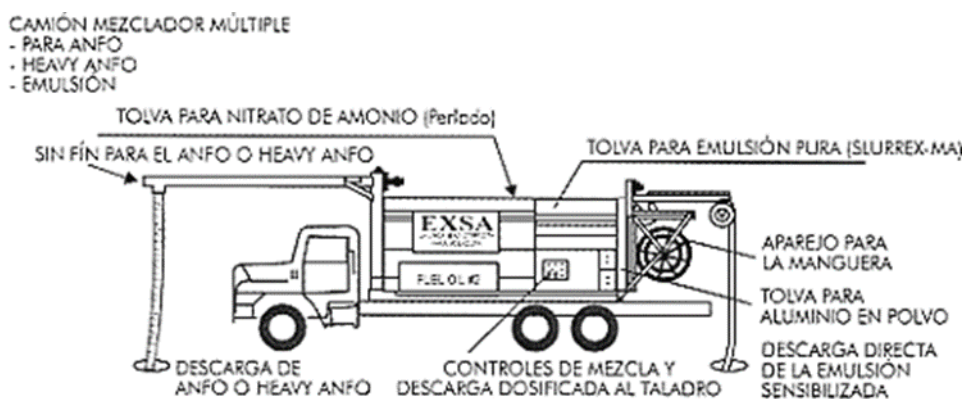
Mientras tanto, el desarrollo de los agentes de voladura continuó, culminando en 1968 cuando la Atlas Powder Company introduce las emulsiones explosivas. Éstas fueron creadas inicialmente por Richard Egly y Albert Neckar en 1964, mezclando una solución de nitrato amónico, aceite y un emulgente, mas su vida era muy corta. En 1968 H. F. Bluhm consigue formar una emulsión estable a partir de una solución en caliente de nitrato amónico y sódico, aceite mineral y el emulgente. Estas emulsiones son muy resistentes al agua, y para hacerlas detonables en diámetros pequeños (<75 mm) introduce microburbujas de gas, bien con una mezcladora especial, bien por gasificación química o bien, en vez de burbujas, introduce microesferas huecas de vidrio.

Las ventajas de estas emulsiones frente a los hidrogeles son claras: no hay necesidad de añadir ni las gomas ni elementos sensibilizantes. Las burbujas de aire que quedan atrapadas

en la emulsión son suficientes para sensibilizar el producto, que se inicia con un multiplicador.

En 1973 C. G. Wade patenta una emulsión sensible al detonador nº 8, en la que introduce iones de metales pesados que actúan como catalizadores de la reacción. Posteriormente se obtienen emulsiones sensibles regulando de forma precisa el contenido de agua y gas. Además, al producto se le puede incorporar aluminio para aumentar su potencia.

Dependiendo de su composición, la emulsión puede fabricarse con diferentes consistencias, diferentes densidades, diferentes potencias...; su resistencia al agua es excelente, son más baratas que los hidrogeles, se pueden mezclar con el ANFO en todas las proporciones (R. B. Clay, 1978), lo que permite una carga selectiva en los barrenos, apareciendo en los años ochenta camiones que hacen la mezcla "in situ".



**Esquema de un camión de carga de anfo/emulsión/heavy anfo**

Las emulsiones constituyen hoy en día la familia con mayor proyección futura debido a sus excelentes características como explosivo industrial.

A la vez que surgieron las emulsiones se introdujo otra novedad tecnológica: el sistema de iniciación no eléctrico mediante tubo de choque (sistema NONEL). Sus orígenes se remontan a mediados de los sesenta cuando el Doctor P. A. Persson entra a trabajar como director del Laboratorio de Detónica de la empresa Nitro Nobel AB (Nitro Nobel's Detonics Laboratory), y del Laboratorio Sueco de Investigación de la Detónica (Swedish Detonic Research Laboratory).

Por aquel entonces, el presidente de la compañía, el visionario Ulf Langefors, tenía la convicción de que el futuro de los sistemas de iniciación pasaba por la creación de un sistema no eléctrico, para eliminar sus riesgos inherentes; el propio Langefors sugería la posibilidad de crear una mecha con una minúscula cantidad de explosivo que pudiera iniciar a la pasta pirotécnica de retardo del detonador, pero que no iniciase ni afectase al explosivo a su paso por el barreno.



**NONEL**

De las investigaciones realizadas en el laboratorio, y casi por casualidad, se descubrió que se podía transmitir la detonación por el interior de un tubo de pequeño diámetro, al que se le había recubierto su superficie interna con una pequeña cantidad de pentrita en polvo, que posteriormente se remplazaría por una mezcla de octógeno (HMX) y aluminio. A finales de los sesenta Persson patenta el sistema, comercializándose a principios de los setenta.

Desde entonces el perfeccionamiento del sistema en términos de seguridad, fiabilidad, versatilidad y facilidad de uso, ha sido tan importante que en la actualidad es el sistema de iniciación predominante, habiendo resistido a la acometida de otros sistemas tan competitivos como son: el Hercudet, el Magnadet, o el cordón de bajo gramaje para el sistema Deckmaster.

En los años ochenta investigadores de la Universidad de Maryland proponen una nueva teoría acerca de los mecanismos de rotura de la roca: la teoría de los núcleos, según la cual las discontinuidades presentes en el macizo actúan como núcleos de formación, desarrollo y extensión de las fracturas. La activación del proceso en dichos núcleos se realizaría, en primera instancia, por interacción entre las ondas longitudinales y transversales, y tras su reflexión en la cara libre, por interacción entre el nuevo sistema de ondas que se genera. D. Barker (1978), S. Winzer (1983), L. Margolin (1983) o S. McHugh (1983) son algunos de los investigadores que han trabajado en esta línea.

### **Las innovaciones de finales del siglo XX**

El desarrollo de los sistemas de iniciación continúa con la aparición de los detonadores electrónicos, en los 90, en sus dos vertientes: iniciados bien con energía eléctrica o bien mediante tubo de choque. La precisión en los tiempos de salida, que es su principal ventaja, frente a su elevado



coste, que es su principal inconveniente, debería proveer un menor coste global minero para que su implantación sea efectiva. Sin ninguna duda, el equilibrio se alcanzará en esta década.

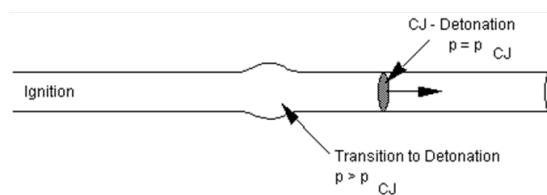
Otra innovación interesante, en la que se trabaja desde los años ochenta, supone la eliminación del explosivo primario del detonador, sustituyéndolo por cargas de pentrita de diferentes propiedades, de manera que la fabricación y el uso y manejo del mismo sea mucho más seguro. La casa Nitro Nobel introdujo en el mercado el primer detonador NPED (Non-Primary Explosive Detonator) en 1993, y es de prever que en un futuro se integre esta innovación en los detonadores electrónicos. Actualmente, algunos fabricantes ya comercializan esta tecnología en algunos de sus detonadores eléctricos.

No queremos olvidarnos citar algunos de los avances tecnológicos acaecidos en otras disciplinas, que han contribuido y seguirán haciéndolo en el futuro, a mejorar la eficiencia del proceso de fragmentación mediante voladura: los ordenadores y las aplicaciones informáticas, la monitorización de la perforación, el perfilado láser del frente, los sistemas de posicionamiento global o la captura y tratamiento digital de imágenes, ocupan lugares destacados en la lista.

### El saber científico sobre el fenómeno de la detonación

El reconocimiento del fenómeno de la detonación surge a finales del s. XIX de los estudios de propagación de llamas en mezclas gaseosas (Mallard, Le Chatelier, Berthelot, Vieille...) en los que se observan que, en función del modo de iniciación se producían, dos regímenes diferentes de propagación de la reacción. Calentando la mezcla con una resistencia se producía la deflagración de la misma propagándose a velocidades del orden de unos metros por segundo. Iniciando la mezcla con una pequeña carga explosiva explosiva se producía la detonación propagándose a una velocidad del orden de km/s.

Shuster (1893) sugirió que la detonación era sostenida por una onda de choque que avanza por el explosivo, seguida por una zona de reacción química exotérmica que a su vez sostiene la onda de choque. Basándose en esta sugerencia, Chapman (1899) y Jouguet (1905) desarrollan la teoría hidrodinámica de la detonación estacionaria unidimensional, en la que se supone que la liberación de energía es instantánea, reacción completa y la velocidad de detonación es la mínima posible de las que permiten las leyes de conservación.



Reconocimiento del fenómeno

$$\rho_o D = \rho_1 (D - W)$$

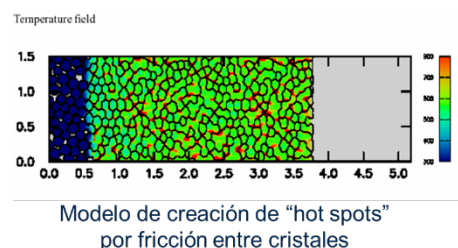
$$P_1 - P_o = \rho_o DW$$

$$e_o + \frac{D^2}{2} + \frac{P_o}{\rho_o} = e_1 + \frac{(D - W)^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_1}$$

Teoría C-J (≈1900)

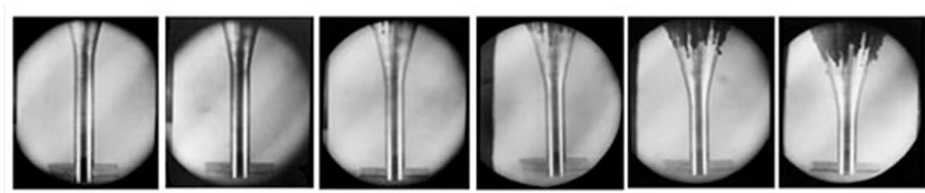
### Desarrollo de la teoría de la detonación a partir del estudio de propagación de llamas

En los años cuarenta surge la teoría ZND [Yakov B. Zeldovich (1914–1987), John Von Neumann (1903–1957), Werner Döring (1911–2006)] que introduce una velocidad de reacción finita y el grado de reacción ..., y en los cincuenta se propone la teoría de los puntos calientes para explicar el mecanismo de propagación de la detonación (germen del desarrollo de los hidrogeles y emulsiones).

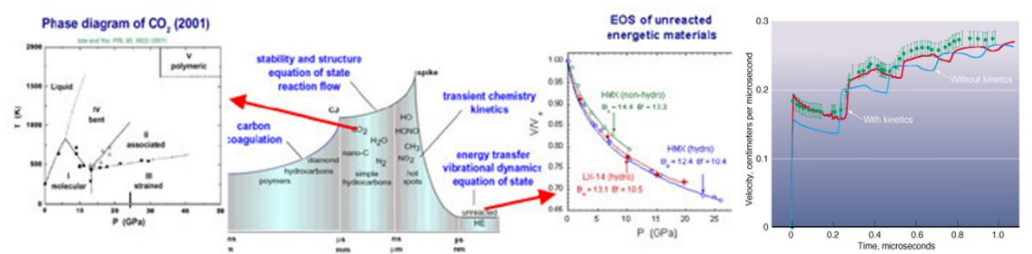




El esfuerzo en las últimas décadas ha ido en el desarrollo de modelos de comportamiento de gases a alta presión y temperatura (EoS), y de los mecanismos de reacción, así como experimentación y modelación para la obtención de datos termodinámicos y la comparación de los resultados teóricos con los reales. Actualmente se trabaja con modelos teóricos, numéricos y experimentales tanto en el campo de la detónica como en el de las aplicaciones militares y civiles de los explosivos.

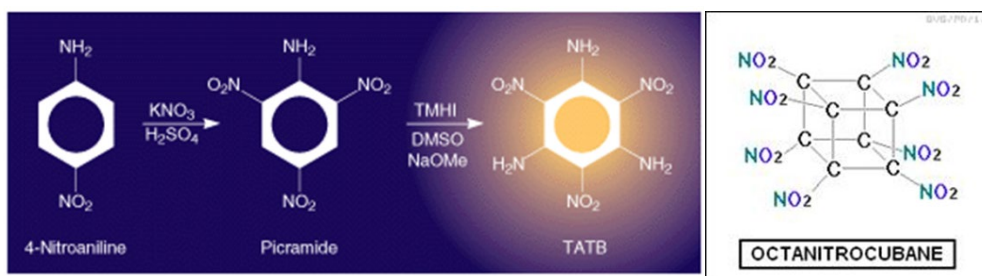


### Detonación en cilindro para determinar los parámetros de la EOS



Mecanismos y cinética de las reacciones, transiciones de fase, ecuaciones de estado...

... y se prosigue en la búsqueda de explosivos y composiciones explosivas más insensibles..., y de mayor densidad y energía.



**Molécula del TATB (insensible) y del Octanitrocubano (alta densidad de energía)**

De igual manera, en el campo de los explosivos industriales se investigan formulaciones que presenten:

- Baja sensibilidad no deseada, Elevada energía y Elevada densidad
- Flexibilidad en la puesta en barreno y Alta mecanización y velocidad de carga
- Mayor resistencia al agua/presión hidrostática
- Bajo coste, Mayor vida y Menor afección ambiental

# 1. El interés de los explosivos en minería

---

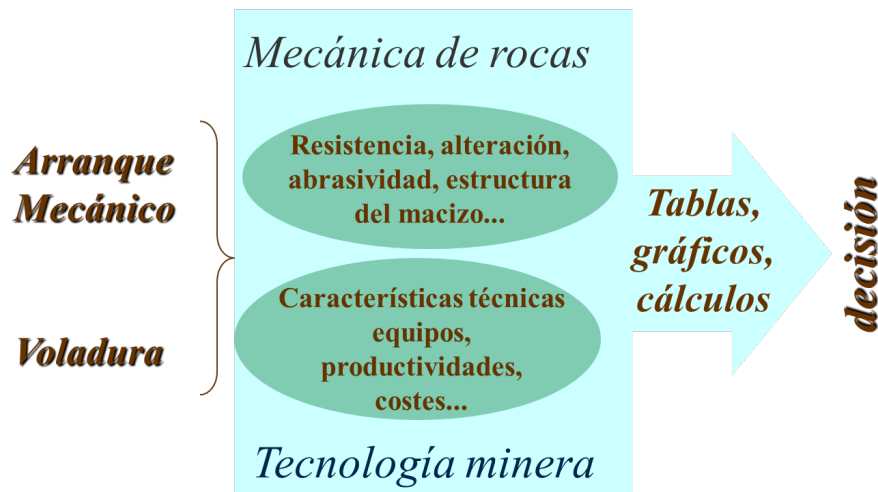
La minería consiste en la puesta en práctica del conocimiento –entendido este en su acepción más general: ciencia, técnica, tecnología, ingeniería, experiencia, creatividad...- para descubrir, extraer y concentrar o preparar los minerales y rocas para su posterior puesta en el mercado.

Desde el inicio de labores de búsqueda e investigación de yacimientos hasta alcanzar la comercialización final de los concentrados (incluyendo en este término cualquier material que, por sus características físico-químicas y económicas, haya sido discriminado del resto), las rocas y minerales deben ser sometidos a una serie de procesos: carga, transporte, trituración primaria y tratamiento o elaboración, para el enriquecimiento de sus leyes (o de otras características que le dan valor).

El interés en el uso de los explosivos surge, entonces, por la necesidad primordial de arrancar y fragmentar la roca in situ para abastecer a los procesos a los que va a ser sometida, de forma conveniente (v.g. distribución granulométrica, perfil del material fragmentado, daño en los taludes y selectividad mineral) y a un coste competitivo. El proceso de arranque afecta al resto de labores que se efectúan aguas abajo (carga, transporte...) por lo que debe analizarse de forma conjunta con el resto de procesos que conformarán el laboreo de minas.

El ingeniero/a o técnico/a de minas tendrá como objetivo lograr la máxima eficiencia del conjunto de procesos a los que van a ser sometidos los materiales, cumpliendo los requerimientos operacionales (ritmos, leyes o calidades), para obtener así el mínimo coste unitario del sistema o el máximo beneficio de la operación, respetando las restricciones ambientales y de seguridad.

La perforación y voladura se presenta como una alternativa al arranque mecánico (excavadoras, minadores, tractores...), que hay que valorar, siendo en muchas circunstancias la única viable técnica y económicamente. En la selección de una u otra alternativa habrá que apoyarse tanto en la tecnología minera (equipos, potencia, masa, par, capacidad...) como en la mecánica de rocas (resistencia a compresión, tracción y cortantes, fracturación in situ, abrasividad de la roca...) ... y el sentido común (economía).



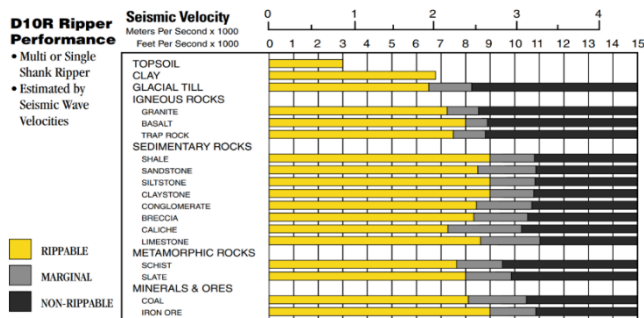
#### La primera decisión en el arranque: arranque mecánico o perforación y voladura

Existen una variedad de clasificaciones que pueden servir como guías preliminares en la decisión. Por ejemplo, la de HAGAN Y GIBSON (1983) tiene en cuenta únicamente la velocidad de propagación de las ondas P en el material. En general, dicha propiedad esta correlacionada con algunas características geo-mecánicas del macizo: macizos densos, de elevada resistencia y poco fracturados darán velocidades de las ondas P elevadas.

Velocidad ondas P (m/s)	Características de la excavación
<1500	Excavable por mototraillas, grandes dragalinas, excavadoras...
1500-2000	Excavación difícil, ripado fácil
2000-2500	Ripado costoso (prevoladuras)
2500-3000	Bajo consumo específico
>4500	Alto consumo específico

Los fabricantes de equipos también ofrecen información al respecto. Por ejemplo, en la siguiente ilustración se da el rango de trabajo de un tractor D10, en la que además de las características del equipo y de la velocidad de las ondas P se tiene en cuenta el tipo de material a ripar. Diferentes materiales tendrán diferente resistencia y diferente abrasividad. Esta última propiedad es muy importante desde la perspectiva de viabilidad económica: a mayor abrasividad de la roca mayor desgaste de los útiles de corte (picas, dientes, puntas), lo que implica mayores costes y menores rendimientos.

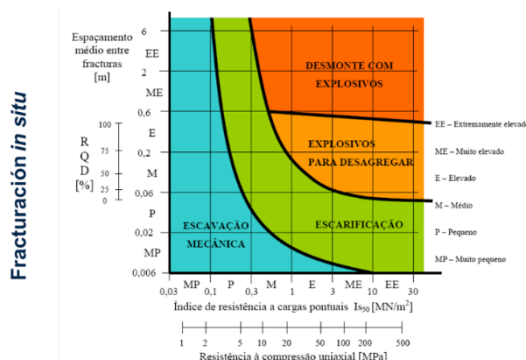
También distingue una zona de ripabilidad marginal: aunque técnicamente el equipo pueda trabajar bajo dichas condiciones, el coste será muy elevado. Por otra parte, no hay que olvidarse que los criterios e intereses de los fabricantes no tienen por qué ser coincidentes con los de las explotaciones mineras.



Rango de trabajo de un D10R según el fabricante

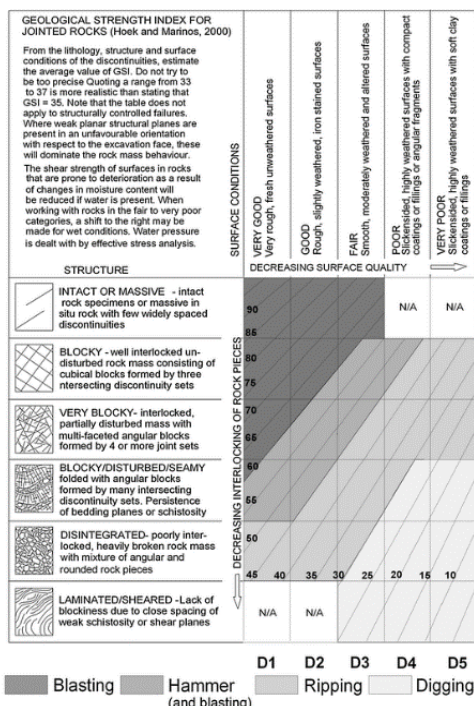
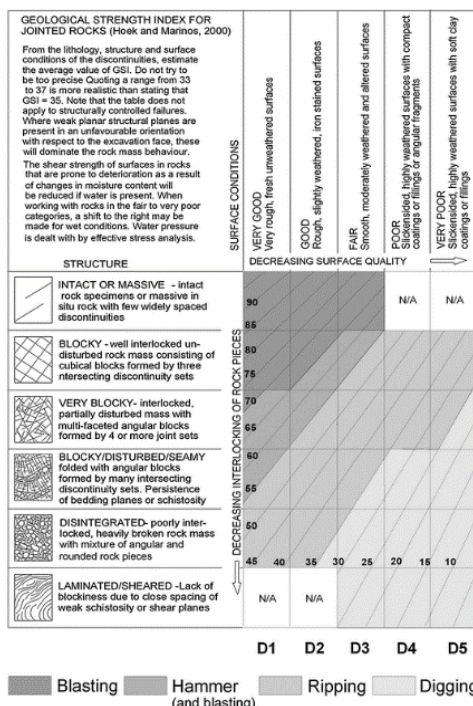


A la derecha se presenta la clasificación de Franklin, de los años 70; limitada pero interesante ya que tiene en cuenta la resistencia a compresión simple de la roca y su grado de fracturación in situ. Lo que viene a decir es que en los macizos rocosos masivos hay que volar, pero si están densamente fracturados cabe plantearse el ripado.



Resistencia de la roca

Finalmente se presenta la clasificación de Tsiambaos y Saroglou que tiene en cuenta el valor del parámetro geo-mecánico GSI, y distingue entre rocas con resistencia inferior y superior a 70 MPa. En general, unos (70-80) MPa es el límite de ripabilidad de rocas (con baja abrasividad) a no ser que el grado de fracturación in situ de la misma sea elevado.



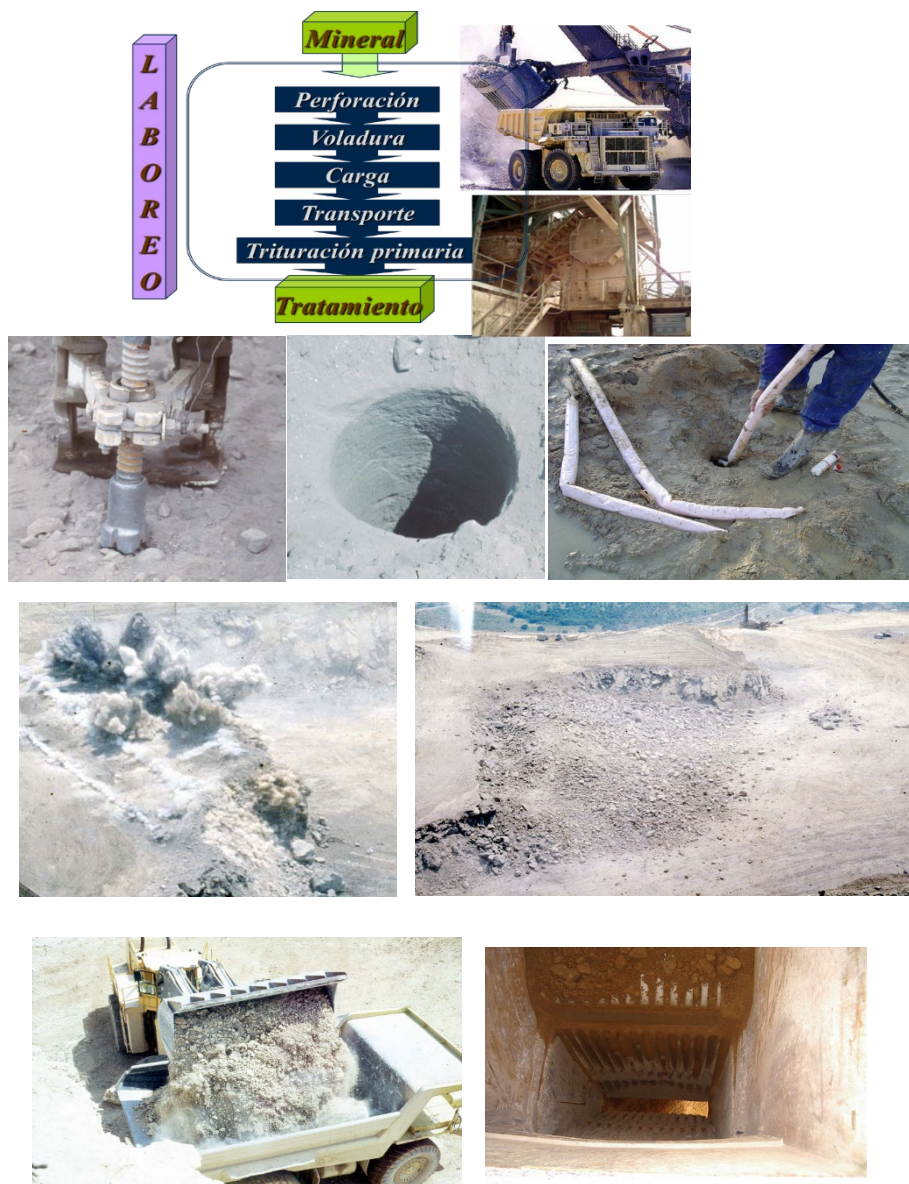
Clasificación de Tsiambaos y Saroglou (izda. para resistencias hasta 70MPa y dcha. > 70MPa)



## 2. Los costes y el grado de fragmentación

El Laboreo de Minas está constituido por una serie de procesos interdependientes de manera que los procesos aguas arriba afectan a la productividad y coste de los que están aguas abajo. Así se puede distinguir:

- Arranque
  - mecánico
  - perforación y voladura: esta última incluye la carga del explosivo, su conexión con el sistema de iniciación y el disparo de la pega
- Carga, transporte del material volado y trituración primaria, así como otros procesos habituales como son: el saneo y sostenimiento, y el taqueo



Procesos en el laboreo de minas

MacKenzie, en los años 60, realizó un análisis de cómo el grado de fragmentación obtenido por la voladura afectaba a los costes unitarios de los procesos del laboreo. El grado de fragmentación hace referencia a la curva granulométrica del material volado y, así, mayor grado de fragmentación significa tamaños de fragmentos más pequeños: por ejemplo, un D80 menor o una menor proporción de bolos. En el análisis, cualitativo, sitúese en un caso base y razone cómo variará el coste unitario de cada proceso, con respecto a dicho caso base, si se aumenta el grado de fragmentación.

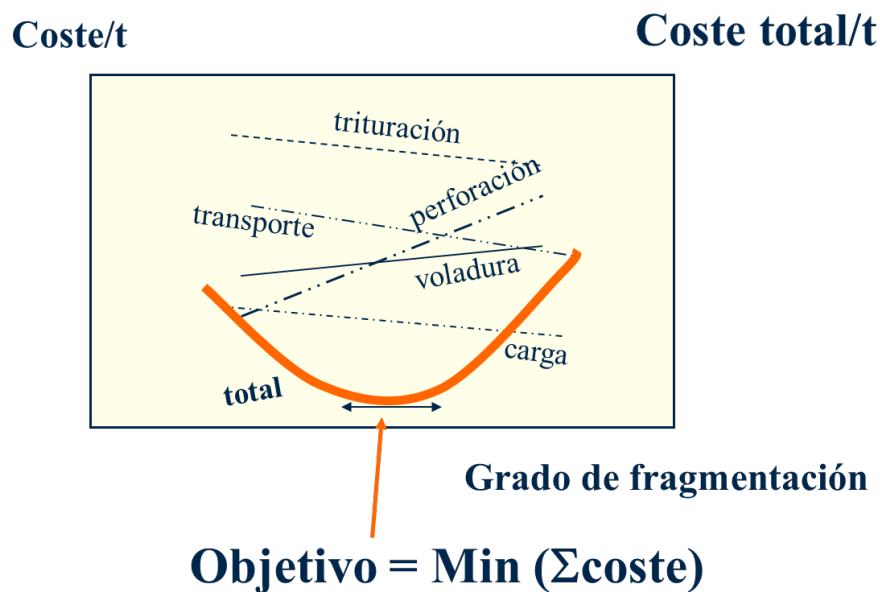
Por ejemplo, un aumento del grado de fragmentación, implica un mayor paso previo a la trituración primaria por los pre-cribadores lo que implica un menor coste operativo (€/t o €/m<sup>3</sup>) de energía y una mayor productividad (t/h, t/año), lo que repercute de nuevo en la economía, en la trituración primaria. El coste unitario de mantenimiento será menor por el menor consumo de las placas de desgaste o revestimientos de la trituradora o molino. También la eficiencia aumenta ya que habrá menos tiempos muertos por atascos por bolos, lo que de nuevo repercute en la productividad y en los costes. En definitiva, dentro de ciertos límites, los costes unitarios de trituración primaria disminuirán con el aumento del grado de fragmentación.

Otro tanto se puede decir sobre los costes de carga. A mayor grado de fragmentación mayor productividad (menor tiempo de ciclo) y mayor eficiencia: menos tiempos muertos en manejo de bolos, que de nuevo repercute en la productividad y, todo ello, en el coste unitario de carga. También será menor el coste de mantenimiento: mayor vida media de los dientes, o del cazo de la pala o de la cuba de la excavadora. Y lo mismo ocurre con el coste unitario de transporte: a mayor grado de fragmentación menores tiempos muertos en machacadora y en la carga - por menor proporción de bolos- y menos tiempos de ciclo (carga más rápida) y, entonces, mayor productividad, etc.

En cuanto al coste de la voladura, supuesto que la misma esta adecuadamente diseñada, un mayor grado de fragmentación pasa por un mayor consumo específico de explosivo (cantidad de explosivo utilizado para volar un metro cúbico o una tonelada de roca), o por el empleo de explosivo más denso y/o potente que será más caro. En definitiva, esta componente del coste ha de aumentar con el aumento en el grado de fragmentación. Por otra parte, el coste unitario del taqueo de bolos disminuirá con el aumento del grado de fragmentación.

Finalmente, en cuanto al coste unitario de perforación pueden darse varias alternativas. Puede mantenerse la perforación específica (metros perforados para volar un metro cúbico o una tonelada de roca) y, por tanto, el coste unitario de perforación, eso sí, a costa de utilizar un explosivo más potente para aumentar la fragmentación (aumenta el coste unitario de voladura como se expuso anteriormente). También puede incrementarse la

perforación específica y, por tanto, el coste unitario, empleando una malla de perforación más cerrada (se aumenta el consumo específico de explosivo y los metros perforados). Finalmente, pudiera darse el caso de que se aumente el grado de fragmentación incluso disminuyendo la perforación específica, bien a costa de incrementar el diámetro de perforación bien a costa de utilizar un explosivo sensiblemente más potente. En estos casos, podría darse la circunstancia de que el coste unitario de perforación disminuyese y, aun así, aumentase el grado de perforación.



**El objetivo minero tiene una visión global del conjunto de procesos implicados en el laboreo**

En definitiva, el objetivo a cumplir será el minimizar el sumatorio de costes unitarios del conjunto de procesos implicados y, para ello, es necesario analizar las interrelaciones existentes entre los mismos. Esta tarea es compleja ya requiere el control exhaustivo, de forma continuada, de los costes y productividades de los procesos. Además, la naturaleza cambiante de los precios (mano de obra, energía, combustibles...), así como de las características geo-mecánicas del macizo rocoso dificultan esta labor.

El objetivo no debe interpretarse como un mero valor ideal matemático que, a efectos prácticos, es imposible de conocer. Se trata de encontrar el rango de parámetros operativos que sitúe el coste total en la zona, más o menos amplia, de mínima pendiente de los costes.

Un paso más: la inclusión de los costes de trituración y molienda de planta en el proceso de optimización de costes. Varios investigadores que han puesto de manifiesto que con la voladura se reduce el índice de bond del mineral, debido al aumento de micro-fisuras en el interior de los fragmentos del material volado. Esta circunstancia favorece el aumento de productividad, así como la disminución de costes energéticos.

El índice de bond ( $W_i$ ) da una medida de la energía específica (kWh/st) necesaria para triturar un material desde un tamaño infinito ( $D_{80}$  muy grande) a un tamaño de 100 micrómetros ( $d_{80}$ ). Tradicionalmente se ha empleado como unidad de masa la tonelada corta: 1st son unos 907 kg. Note que, para una relación de reducción dada

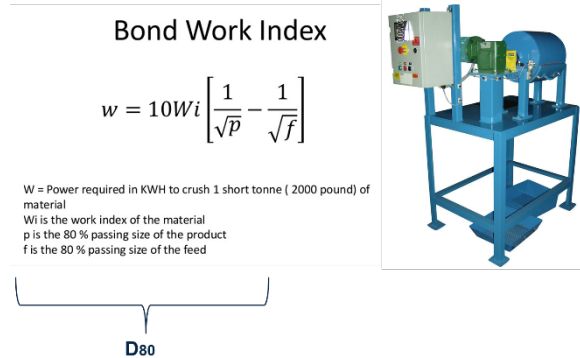
( $D_{80}/d_{80}$ ), el consumo energético es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del  $D_{80}$  de la alimentación: consume más energía por tonelada la molienda que la trituración secundaria, y esta última que la trituración primaria.

Una última consideración relativa al objetivo de maximizar beneficio frente a minimizar costes. En ocasiones los ingresos ( $i$ ) originados por la comercialización del material que ha sido sometido a los diferentes procesos de enriquecimiento son afectados directamente por la voladura, por ejemplo, por la dilución o falta de selectividad del mineral debido al empleo de grandes bancos o, simplemente, por el grado de fragmentación obtenido. Por ejemplo, la producción de finos en explotaciones de áridos merma los ingresos - finos, en este contexto hace referencia a un material de pequeña granulometría de difícil puesta en mercado y de escaso valor; o en las explotaciones de cuarzo de grado metalúrgico en las que los tamaños menores a cierto umbral deben comercializarse como áridos con un valor considerablemente inferior al del metalúrgico.

En esos casos se tiene que:

$$\min(\text{coste}_{\text{total}}) \neq \max(\text{Beneficio}) = \max(i - \text{coste}_{\text{total}})$$

...luego la función a considerar en la optimización será la del beneficio.





### 3. Introducción a los procesos de perforación y voladura

---

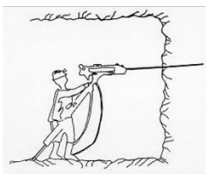
En este epígrafe se va a mostrar brevemente una visión general de los procesos de perforación y voladura, incorporando algunos conceptos que interesa conocer antes del progreso de la materia.

Sucintamente, de lo que se trata es de distribuir el explosivo en barrenos practicados en el macizo para que, una vez iniciados, liberen su energía química fragmentando la roca.



#### La perforación de los barrenos

Tras el replanteamiento de la posición de los emboquilles de los barrenos (el marcado de los puntos del terreno en los que se situará la broca de perforación), estos se perforan, generalmente, con carros mecánicos -diésel-hidráulicos o electrohidráulicos- o, en algunos casos de diámetros pequeños, con perforación manual.



#### Perforación manual y mecanizada

Para diámetros pequeños y medianos (hasta 6") se utiliza perforación roto-percutiva (empuje, giro y golpeo de la sarta de perforación bien con martillo en cabeza - hasta unas 5" -, bien con martillo en fondo: de 4" a 10"), mientras que para grandes diámetros (desde 6" hasta unas 22") se emplea la perforación rotativa con trépano (empuje y giro).



#### Brocas y trépanos

La perforación en labores de interior utiliza los mismos principios que en el caso de a cielo abierto con la particularidad de que los equipos tienen un diseño apropiado para trabajar en espacios limitados, y los diámetros de trabajo son menores. Así, para el avance de galerías se emplean jumbos de uno o más brazos de perforación, y para realizar los barrenos de producción, por ejemplo, en la explotación de subniveles, se emplean simbas que perforan con tubos que la máquina va acoplando según avanza la perforación. En ambos casos la perforación es roto-percutiva.



#### **Equipos de perforación de interior**

Es muy importante que el equipo perfora con la inclinación y profundidad correctas con respecto al talud a volar. Una mala perforación dará unos malos resultados de la voladura.

Una vez completada la perforación ya están dispuestos los barrenos para la fase siguiente la carga de los explosivos. Una buena práctica es limpiar previamente los barrenos y comprobar, por lo menos, la profundidad de cada uno de ellos.



#### **Barreno individual y barrenos de voladura**

## Los explosivos

Se comercializan diferentes familias de explosivos, y en diferentes formatos (los datos son aproximados):

- 1- Encartuchados en papel parafinado (calibre < 2") o en plástico flexible (hasta  $\approx 8''$ )
  - a. Gomas (hasta unas 4") y dinamitas (en pequeño calibre y en desuso)
  - b. Hidrogeles y emulsiones (hasta unas 8") en papel plástico flexible (también en papel parafinado en bajo calibre para túneles y en plástico rígido para voladuras de contorno en túneles)
  - c. Anfo (hasta 5") en plástico flexible

[Una carga explosiva se dice que está desacoplada cuando su diámetro o calibre es menor que el diámetro del barreno en el cual se introduce la misma. Este será el caso de los explosivos encartuchados ya que para que los cartuchos entren en el barreno su calibre o diámetro ( $d_c$ ) debe ser menor que el del barreno ( $d$ ). Se denomina **factor de acoplamiento** ( $f_a$ ) a la relación entre el diámetro de la carga (calibre) y el diámetro del barreno ( $f_a = d_c/d < 1$ ).]



- 2- En sacos y bidones

Son agentes de voladura (anfo, hidrogeles, emulsiones y derivados) vertibles directamente en barreno rellenando completamente la sección del mismo ( $f_a = 1$ ) o, en ocasiones, enfundados in situ ( $f_a < 1$ ).



**Anfo (dcha. enfundado in situ)**



### 3- Graneles elaborados transportados en camión

Agentes de voladura que se cargan desde camiones (mediante soplante/auger) que transportan el producto totalmente elaborado. Se emplean en grandes voladuras permitiendo velocidades de carga de cientos de kilogramos por minuto. La carga desde camión también permite enfundar el explosivo in situ ( $f_a < 1$ ) en caso de que sea necesario.

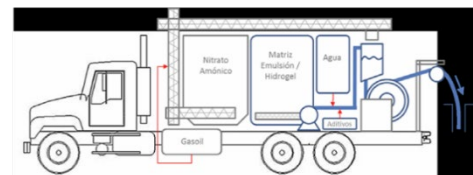


### 4- MEMUs: Unidades Móviles de Fabricación de Explosivos

La última actualización del reglamento de explosivos (R.D. 130/2017) introdujo en España las MEMUs que permiten *fabricar* la mezcla explosiva, incluyendo su sensibilización, in situ.



Tipos de producto obtenidos en un MEMU para mezclas de emulsión y anfo.				
Emulsión Matriz	Emulsión explosiva	Anfo 100%	Emulsión 60% + Anfo 40%	Emulsión 80% + Anfo 20%
				



## Los sistemas de iniciación

Para que el explosivo libere su energía química es necesario iniciarlo. **Iniciar** un explosivo es aportar al mismo un estímulo externo para hacerlo reaccionar (si la iniciación es ex profeso) en el régimen deseado (detonación en el caso de los altos explosivos).

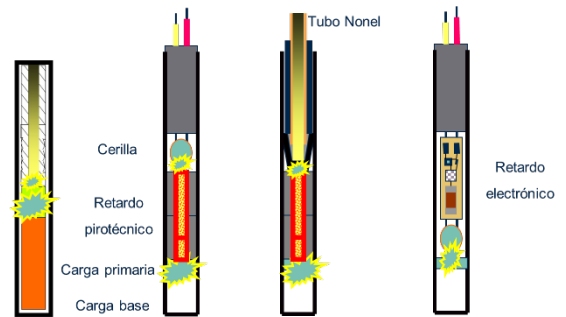
La **sensibilidad** de un explosivo es su aptitud a ser iniciado con mayor o menor facilidad (energía) y dependerá del tipo de estímulo. Se distingue entre:

- La sensibilidad deseada: es la sensibilidad del explosivo frente a estímulos supersónicos (onda de choque)
- La sensibilidad no deseada: es su sensibilidad frente a estímulos subsónicos (choque, fricción o calor)

La **cadena o tren de fuego** hace referencia al sistema constituido por diferentes elementos y dispositivos (detonadores/cordones/cables/tubos...) encaminados a provocar de forma controlada la iniciación del explosivo cargado en los barrenos en el régimen de detonación siendo el detonador el elemento omnipresente.

Para iniciar la columna de carga explosiva tiene que haberse introducido previamente en el barreno un cartucho-cebo o cebo – un cartucho en el que está insertado un detonador- ...

...o algún otro cebo; por ejemplo: un cartucho iniciado con cordón detonante, o un multiplicador que a su vez podrá ser iniciado con un detonador o con cordón detonante.



#### Diferentes sistemas de iniciación (nonel, cordón detonante y multiplicador)

Los detonadores deben ser a su vez iniciados:

- Ordinario
  - Con una mecha
- Eléctrico y Electrónico
  - Con un explosor apropiado



- Nonel
  - Con un detonador eléctrico
  - Con cordón de bajo gramaje y este con un detonador
  - Con un iniciador de tubo





El sistema de iniciación más avanzado es el electrónico que permite establecer los tiempos de salida de cada barreno con una precisión inalcanzable para los detonadores de retardo pirotécnico, así como el disparo a control remoto.

### La carga de explosivo

Es muy aconsejable monitorizar la dirección, inclinación y profundidad de los barrenos antes de proceder a la carga del explosivo.

Antes de iniciar la carga, debe organizarse todo el material (explosivo y accesorios) en la zona de trabajo para facilitar la labor. Los artilleros y sus ayudantes son los encargados de esta labor.

Habitualmente se ceba en el fondo del barreno para que los gases actúen mejor contra la roca; y a continuación se carga el resto de explosivo en el barreno.

En el caso de carga desde camión el procedimiento conceptualmente es el mismo, siendo controlado el proceso de carga por el operario y los ayudantes.

Una vez cargado el barreno se procederá al retacado.



El **retacado** consiste en rellenar y taponar con material granular— aunque muy habitualmente se emplea el propio detritus de la perforación—, la parte superior del barreno que va sin carga explosiva. Así, los gases quedan durante mayor tiempo confinados en el barreno, trabajando mejor sobre el macizo, a la vez

que se reduce la onda aérea y el riesgo de proyecciones de material.

### **Conexión de la línea de fuego**

Consiste en engarzar los elementos del sistema de iniciación entre sí [detonadores/cordones que salen de los barrenos y conectores de retardo/cordones/cable de la línea maestra] para que se transmita la señal a toda la pega desde el punto de inicio una vez efectuado el disparo con el explosor/iniciador.



**Conexión con el sistema none1**

### **Disparo de la voladura**

Tras las debidas comprobaciones del circuito de voladura y tomadas las medidas de seguridad oportunas, el artillero dispara (inicia), desde un lugar seguro, la pega.

Tras el disparo se comprueba que han salido todos los tiros correctamente y se realiza una evaluación preliminar de los resultados. Hay que procurar que la producción de bolos sea la menor posible dado que disminuyen la productividad y aumentan el coste unitario del arranque. Bolos son aquellos fragmentos de roca que, por su gran tamaño, no son adecuados para las labores de carga, transporte o trituración primaria.

