

Reseña histórica sobre los explosivos

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.

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...

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

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.

Un 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; aún 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, un zona aislada, en el mismo lago, rodeada de colinas.

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.

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 naciendo 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.

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.

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

controlarse 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 es clara: 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".

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.

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 reemplazaría 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.

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.

Fernando García Bastante. ETSI Minas de Vigo