

Últimos desarrollos en la excavación de túneles mediante Perforación y Voladura

El método de perforación y voladura es la forma principal de acometer las grandes excavaciones en roca que se demandan tanto en minería como en el campo de las obras públicas. Así, la existencia de gran parte de las infraestructuras de nuestro país está ligada al empleo de los explosivos: muchas de las obras de presas, centrales hidroeléctricas, carreteras, autopistas, líneas férreas, líneas de alta velocidad, etc. se han podido llevar a cabo de una forma económicamente viable gracias a este método de excavación. Los últimos avances tecnológicos hacen que sea un método aún más económico, versátil y productivo; especialmente en la excavación de túneles, donde la evolución de equipos y productos ha tenido una

Durante estos más de cien años que ya han transcurrido desde que Nobel revolucionara con sus patentes el mundo de la minería y la obra pública, los fabricantes de equipos y productos que intervienen en el ciclo de producción han ido incluyendo constantes mejoras tecnológicas en sus productos. De este modo, el método de excavación mediante perforación y voladura ha experimentado una evolución tal, que hace que hoy en día se parezca muy poco a lo que fue en sus orígenes. Lo que en su día empezó siendo una operación manual de barrenado y una manipulación de explosivos que se hacía a menudo de forma arriesgada, se ha convertido hoy en un método que ofrece unos equipos hidráulicos de perforación muy precisos, capaces de ofrecer ritmos de trabajo inimaginables hace

pocos años. A su vez, los fabricantes de explosivos ofrecen hoy productos totalmente seguros en su manipulación, precisos y fiables en su empleo; todo ello sin renunciar a las mejores prestaciones que demandan los usuarios para poder ejecutar con éxito su voladura. En resumen, este método ha ido evolucionando con el paso de los años ofreciendo soluciones técnicamente cada vez mejores para poder llevar a cabo la excavación con unos costes que hacen la obra viable.

El mundo de las obras subterráneas no ha quedado al margen de estos desarrollos tecnológicos. Especialmente en la última década, el método de perforación y voladura para la excavación de túneles ha experimentado un salto cualitativo. Si bien el método operativo permanece conceptualmente igual, las tecno-

Palabra clave: ECONOMÍA, EXPLOSIVOS, INFRAESTRUCTURAS, PERFORACIÓN, ROCA, TECNOLOGÍA, TÚNELES, VOLADURA

Benjamín CEBRIÁN ROMO,
Ingeniero de Minas. UEE Europa.

Javier MUÑOZ GARCÍA,
Ingeniero de Minas. UEE Europa.

logías de aplicación han cambiado sustancialmente. Sus efectos se traducen principalmente en incremento de seguridad, velocidad de ciclo y avance por ciclo.

Sistemas de perforación

La actual maquinaria para perforación en labores de avance (jumbos), incorpora lo último en tecnología. Se trata de máquinas que son capaces de trabajar de una forma totalmente automatizada. El esquema de perforación (posición de cada emboquille, profundidad y dirección de perforación) se introduce mediante soporte informático en la computadora del jumbo. Con la información que registran continuamente numerosos sensores montados en los brazos del jumbo, la computado-



■ Jumbo de perforación de 4 brazos (Atlas Copco).



■ Cabina de un Jumbo robotizado (Atlas Copco)

ra se encarga de posicionar automáticamente los brazos de perforación en el sitio correcto, con el ángulo correcto y de perforar la profundidad de barreno programada.

Estos modernos equipos se encargan también de gestionar y controlar las variables críticas de la perforación: velocidad de rotación, empuje, etc. en función del tipo de material que se está perforando; optimizando los avances que se obtienen. Esto se traduce también en un mejor rendimiento económico de la operación al minimizar el desgaste de las brocas. En estas perforadoras automatizadas, el operador se convierte en un controlador de la operación que, desde las pantallas de su cabina, supervisa que todo se desarrolla con normalidad.

En resumen, la última generación de jumbos permite realizar perforaciones de gran calidad, es decir, con mínimos errores de desviación y posición de barrenos, y de una forma automatizada al 100%, por lo que los tiempos muertos se ven reducidos y, por tanto, los tiempos completos de perforación. El aumento de potencia en los actuales martillos hidráulicos y las constantes mejoras que incorporan los útiles de perforación (brocas, barras, manguitos, etc.) han contribuido también a reducir enormemente estos tiempos de perforación.

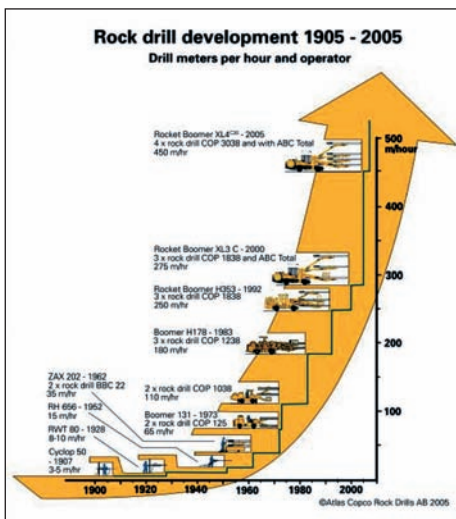
Los jumbos modernos están diseñados además para que el operario realice su trabajo de una manera totalmente confortable, aislado del ruido exterior y en una cabina climatizada.

Sistemas de voladura

Los fabricantes de explosivos y sistemas de iniciación también han contribuido de manera decisiva a este salto cualitativo con sus últimos desarrollos.

Explosivos

UEE fabrica en España toda la serie de productos que el contratista de una obra puede demandar en función de sus necesidades. Así, en cuanto a explosivos encartuchados para voladura en interior, ofrece desde la dinamita



Evolución de los sistemas y velocidades de perforación (Atlas Copco).

Goma 2 ECO, hasta el **Riogel EP** (hidrogel de alta energía); todos ellos con unos excelentes humos de voladura que permiten reducir el tiempo de ventilación tras la pega.

Gradior

El último explosivo desarrollado por UEE se denomina **Gradior** y se trata de un hidrogel a granel de alta energía, especialmente diseñado para voladuras de avance en túneles de gran sección. Es un producto sensibilizado con microesferas, por lo que no es susceptible de sufrir *muerte por presión* (posible insensibilización del explosivo debida a la compresión que éste sufre al detonar un barreno contiguo); es un explosivo tremendamente seguro en su manipulación e insensible al detonador. Como propiedades principales del **Gradior**, a modo de resumen, se pueden citar:

- Densidad:1,20 g/cc
- REBS:154%
- VOD (32 mm)4.500 m/s
- VOD (52 mm)5.300 m/s
- Volumen de gases:988 l/kg
- Humos de voladura:Clase A (excelentes)
- Resistencia al agua:Buena

Modo de iniciación: Multiplicador de Pentolita/
Cartucho cebo

Su elevada velocidad de detonación (o velocidad de la reacción de transformación de la masa explosiva en gases a alta presión y temperatura) hace que transmita su energía a las paredes del barreno en un tiempo muy reducido, lo que le confiere una elevada potencia explosiva.

Su condición de explosivo a granel le permite ocupar todo el volumen de barreno y, por tanto, aprovechar al máximo estas propiedades, ya que al no existir una cámara de aire entre el explosivo y la pared del barreno que amortigüe la onda de presión, la presión de barreno efectiva es la propia presión de detonación del explosivo.

Todo esto, unido a un elevado volumen de gases, hace del **Gradior** un explosivo que provoca una muy buena fragmentación del material volado.

Una fragmentación fina facilita la carga del material volado y optimiza el llenado de los camiones, reduciéndose de este modo el tiempo de la operación de desescombros.

Dado que se trata de un explosivo de densidad elevada y que ocupa todo el volumen de barreno, para ajustar el consumo específico de explosivo a las necesidades de la roca a volar, es posible reducir el diámetro de perforación (en túneles a gran sección, de 51 mm a 45 mm, por ejemplo) sin tener que variar el esquema de perforación. En este sentido, también puede llegar a reducirse el número de barrenos totales de la pega entre un 5 ó un 10%, en función de la dureza del material a volar. Todo esto se traduce en una reducción del tiempo empleado en perforar la pega.

La forma de cargar el **Gradior** en los barrenos es mediante camión bombeador. UEE dispone de este tipo de unidades que van dotadas con bombas de producto capaces de trabajar a velocidades de 50 kg/minuto. Disponen además de un modo automático de carga que permite preseleccionar la cantidad exacta de **Gradior** que se va a cargar en cada barreno.



■ Unidades cargadoras de Gradior para túneles de gran sección y longitud (UEE).

Estos camiones operan de una forma totalmente autónoma al disponer de grúa para la carga de los barrenos de la parte alta del túnel y pueden operar hasta con cuatro mangueras de carga, por lo que la operación de carga del explosivo se lleva a cabo con gran rapidez.

Sistemas de Iniciación

Sistema Primadet

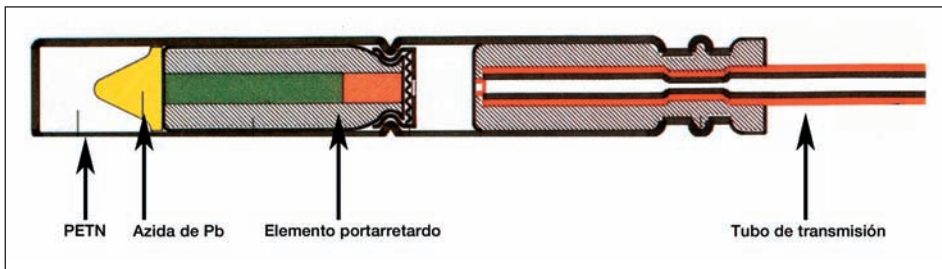
Desde hace unos años, el grupo *UEE* ofrece, además de los tradicionales detonadores eléctricos *Riodet*, el sistema de iniciación no eléctrico **Primadet** que permite trabajar con total seguridad ante riesgos como descargas de electricidad estática de los trabajadores, corrientes erráticas, corrientes inducidas o la proximidad de una tormenta eléctrica.

El alma del sistema **Primadet** es su tubo de transmisión (*shock tube*). Se trata de un tubo hueco de plástico de 3 mm de diámetro exterior. En las paredes interiores del tubo hay una fina película de *HMX-AI* que se encarga de transmitir una onda de choque de baja velocidad (2.000 m/s) por su interior. Este tubo tiene unas propiedades mecánicas que le permiten soportar duras condiciones de trabajo en obra. Es capaz de soportar tracciones de 20 kg y estiramientos del 300% sin perder sus características; además, está fabricado en un plástico tremendamente resistente al roce y a la abrasión, por lo que dañarlo al retacar un barreno, por ejemplo, es imposible salvo que se haga expresamente.

Los detonadores **Primadet** se activan gracias a la onda de choque de baja velocidad que viaja a través del interior de su tubo de transmisión y que al llegar en forma de dardo al interior de la cápsula metálica del detonador, inicia la combustión de la pasta de retardo y ésta, después, inicia la detonación de la carga primaria de *Azida de Pb* y la carga base de *PETN*.

La iniciación del tubo de transmisión (y por tanto, la activación del detonador **Primadet**) se puede efectuar de diversas maneras:

- **Detonación:** cordón detonante (3 g/m ó 6 g/m); detonador óctuple o conectadores tipo *EZTL*.
- **Mediante pistolas de disparo especiales:**



■ Esquema de detonador no eléctrico **Primadet** (*UEE*).

tipo *Surefire*; *UEE-Start*, etc. A parte de la seguridad y fiabilidad que aporta el sistema **Primadet**, cabe destacar su versatilidad y la rapidez con la que se efectúan las conexiones.

Todas estas ventajas le convierten en el sistema de iniciación preferido hoy en día por los usuarios.

La manera de emplear el sistema **Primadet** en pegas de avance en galería o túnel es como se explica a continuación.

En cada barreno se introduce un cartucho o multiplicador conveniente cebado con un detonador **Primadet**. El número (tiempo de salida) de detonador que se selecciona para cada barreno depende, obviamente, de que se trate de un barreno de cuele, de destroza, etc. para ello el usuario puede seleccionar entre 46 tiempos diferentes en las gamas *Primadet MS* (microrretardo) ó *LP* (retardo).

Para poder iniciar los tubos de transmisión que salen de los barrenos, se deben conectar a unas líneas de cordón detonante. Hay dos formas de hacer esta operación:

- Mediante el conector *J* (*J-hook*) que incorporan todos los detonadores. Se unen a una línea maestra de cordón detonante que se hace pasar por toda la sección, de tal modo que todos los tubos tengan acceso a ella.
- Mediante conectores tipo *Bunch Conector* que permiten la conexión de los tubos de transmisión en madejas a diferentes líneas de cordón detonante.

Esta línea de cordón detonante se puede iniciar con un detonador **Primadet** acoplado a una línea de tubo de transmisión de gran lon-

gitud y que ejerce las funciones de línea de tiro. De este modo se puede dar fuego a toda la pega de un modo totalmente no eléctrico desde el exterior del túnel.

Detonadores Unitronic

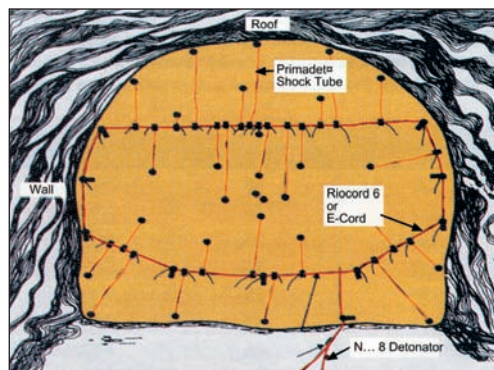
La última solución propuesta por *UEE* a sus clientes la constituye el detonador electrónico **Unitronic**.

Se trata de un detonador de aspecto convencional, sin embargo, en su interior alberga un sistema electrónico que le confiere unas propiedades no alcanzables con otros sistemas de iniciación.

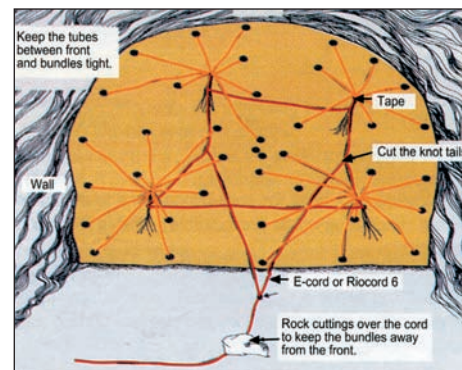
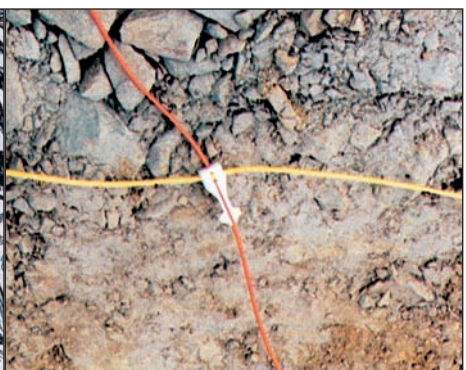
En este tipo de detonadores, el tiempo de disparo no se consigue gracias a un portarretardo de pasta pirotécnica, como ocurre en los demás tipos de detonadores. Ahora, un microchip alojado en el interior de la cápsula de aluminio es el encargado de que el detonador se dispare al transcurrir el tiempo de retardo deseado.

Los tiempos de disparo de los detonadores se programan manualmente gracias a una consola especial. Primero se introduce, mediante el teclado numérico de la misma, el tiempo de disparo en milisegundos que deseamos para el detonador. Tras esto, hacemos pasar sobre el código de barras del detonador, el lector que lleva incorporada la consola. Como el código de barras es único para cada detonador, la consola relaciona inequívocamente cada tiempo programado con cada detonador, y almacena esta información en su memoria.

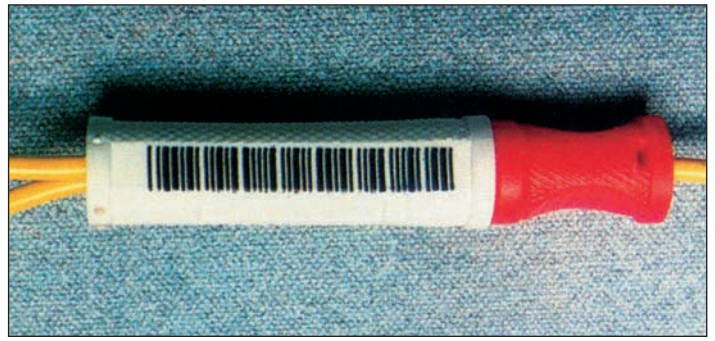
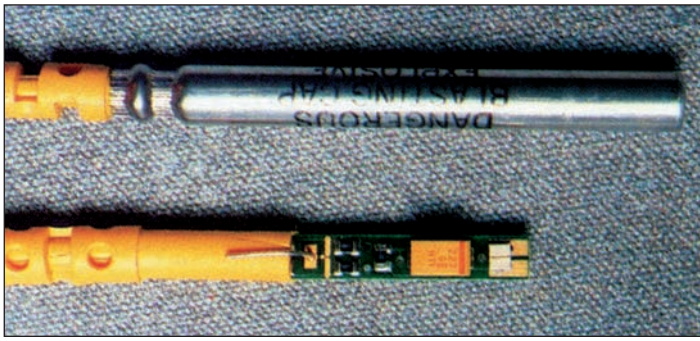
Una vez que todos los detonadores están programados y ya se han introducido en los barrenos, se procede a conectarlos entre sí



■ Conexión del tubo de transmisión a la línea de cordón detonante mediante *J-hooks*. A la derecha detalle de conexión.



■ Conexión de tubos de transmisión en madejas con *Bunch Conectores*.



■ **Detonador electrónico Unitronic.** Componentes internos y sistema codificado para programación mediante lector de código de barras (UEE).

mediante unos cómodos conectores de clavija y rosca. Del mismo modo, se conecta la pega con la línea especial de disparo.

Antes de proceder al disparo, el sistema permite verificar la continuidad y el buen estado de las conexiones.

El paso siguiente es acoplar la consola de programación a la maleta de disparo (explosor *Blasta 110*), para que ésta pueda enviar electrónicamente la información del retardo al microchip de cada detonador y activar después los detonadores para su disparo.

El sistema **Unitronic** permite programar tiempos comprendidos entre 1 y 25.000 ms con incrementos de 1 ms y un error de disparo depreciable: 0,1%.

Las principales ventajas que aporta el sistema **Unitronic** son:

- Facilidad de manejo.
- Permite programar tiempos exactos y sin depender de series de retardos predeterminadas.
- Permite hacer correcciones sobre las programaciones anteriores antes de efectuar el disparo de la pega.
- Aumenta los márgenes de seguridad frente a alteraciones de origen eléctrico.
- Permite verificar el estado de la línea y las conexiones antes del disparo.
- Permite realizar el disparo mediante explosores especiales, con mecanismos de seguridad mejorados respecto a los sistemas tradicionales.
- Total versatilidad a la hora de diseñar un esquema de disparo.
- En voladuras de avance en túnel con gran número de barrenos, permite limitar la carga operante (carga total de explosivo que detona en un periodo de tiempo igual o inferior a 8 ms) a la correspondiente a un solo barreno, reduciendo notablemente el nivel de vibraciones producido.
- Excelentes resultados obtenidos en el contorno de la galería al no existir dispersión de tiempos. Se reduce drásticamente la sobreexcavación.
- Facilita la logística de los detonadores al existir un tipo único de detonador para obtener todos los tiempos de la pega.
- Mejora la fragmentación obtenida al poder asegurar un esquema de disparo sin dispersiones en los retardos.



Unitronic es la solución para la excavación de túneles en entornos habitados con fuertes limitaciones de vibraciones.

Las vibraciones generadas por voladura están limitadas en España por la Norma UNE 22.381.93. Esta marca unos valores máximos admisibles del valor pico de la velocidad de partícula en mm/s y de la frecuencia en Hz, según sea el tipo de estructura a proteger (edificios históricos, viviendas, edificios industriales, etc.).

Con el sistema **Unitronic**, la reducción de la carga operante se puede efectuar sin necesidad de reducir la longitud de pase de la pega, ya que se puede programar la voladura para que no se repita la detonación de ningún barreno.

Además de usar **Unitronic** en la totalidad de la voladura; existe la posibilidad de hacer



■ **Explosor Blasta 110.**

■ **Proceso de programación de detonador Unitronic.**

una *voladura de iniciación mixta*, usando un detonador **Unitronic** como iniciador de la pega no eléctrica (cebada toda con sistema **Prima-det**, salvo el contorno), y disparando los barrenos del recorte de la excavación también con detonadores **Unitronic** programados para su salida en último lugar. De esta manera aprovechamos su precisión en la calidad de acabado de la galería.

Mejoras en el resto del proceso operativo

Por último, cabe mencionar avances igualmente notables en los productos y tecnología empleadas en las demás etapas que conforman el ciclo, como son los desarrollos en los equipos de carga (palas cargadoras, excavadoras) que se traducen en mejores rendimien-



■ **Brazo robotizado de gunitado tras desescombro (Putzmeister).**

tos horarios y eficiencia energética (menor emisión de humos, menores consumos); mejoras incluidas en los equipos de gunitado robotizados, con mayores caudales de bombeo, mejor calidad del gunitado, mayores velocidades de etapa y comodidad y eficiencia de operación.

Existencia de sistemas robotizados de instalación de bulones; y la posibilidad además de realizar las perforaciones para el bulonado con el propio jumbo de perforación.

Conclusiones

El método de perforación y voladura es enormemente versátil, pudiendo ajustar la longitud de pase a la calidad del terreno que se excava sin necesidad de parar nunca el avance de la excavación. No tiene limitaciones en cuanto a la longitud del túnel a excavar (existen precedentes de túneles de más de 16 km excavados mediante este método). La maquinaria y productos necesarios tienen plazos de entrega casi inmediatos y no precisan de grandes infraestructuras para poder ser puestos en marcha.

Permite además la operación simultánea en las dos bocas del túnel, lo cual reduce a la mitad el tiempo de ejecución de la excavación;



Jumbo perforando la malla para bulonado (Atlas Copco).

pudiendo compartir también ciertos equipos para ambos frentes.

La versatilidad natural de este método de excavación, unido a los avances tecnológicos mencionados, hacen que, suponiendo unas condiciones mediocres de calidad del material a excavar (permitiendo unos avances medios de 3 m por voladura), se estén excavando en nuestro país túneles con unos avances medios de 180 m por mes y boca; es decir, 360 metros totales por mes. Teniendo en cuenta que en muchos casos las condiciones del terreno

permiten pases más largos en cada pega (más de 5 m), los avances que se pueden obtener son bastante superiores, como de hecho ocurre en muchas de las obras en ejecución en este momento.

Las posibilidades del método, en definitiva, son cada vez mayores y lo convierten casi siempre en la opción más productiva y rentable a la hora de llevar a cabo la excavación de un túnel.

En resumen, el método de perforación y voladura para excavación de túneles ha incorporado en la última década avances significativos en todos los equipos activos en el ciclo. Estas mejoras se traducen en menores tiempos parciales y totales, mayores avances por ciclo, mayor seguridad y comodidad en la operación y mejor economía por metro excavado.

Las realidades tecnológicas que han permitido esto son principalmente el desarrollo de

Información:

UEE - UNIÓN ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS, S.A.
Avda. del Partenón, 16 - 1ª planta. 28042 Madrid
Tel.: 91 722 01 00
Fax: 91 722 01 85
Pág. Web: www.uee.es



del Grupo
TopCret



Davor Gligo Construcciones, S.L.

PROYECCIÓN DE HORMIGÓN VÍA HÚMEDA

CONTENCIÓN DE TALUDES
TÚNELES
TABIQUES
PISCINAS
REFUERZOS ESTRUCTURALES
REPARACIONES ESTRUCTURALES

Ahorre tiempo ◆ **Reduzca costes**



C/Gran Vía 235 bjos. 1º B
Premia de Mar 08330 Barcelona

e-mail: davorgligo@telefonica.net
Mov 657 822 710

Tel (34) 93 274 1208
Fax (34) 93 274 1209