

Influencia de la perforación en los resultados de una voladura en banco y su impacto en los costes

El concepto de *perforación* realizada en una voladura, consiste en la operación de llevar a cabo varias penetraciones cilíndricas en la superficie del macizo a volar, llamadas *barrenos* que tendrán una distribución y un ángulo de inclinación diseñados con el fin de producir el arranque, fragmentación y desplazamiento de parte del macizo rocoso. Estos barrenos alojarán las cargas explosivas que serán detonadas con una secuencia de disparo pensada para obtener un tamaño de *pedra* medio o fragmentación óptimos con mínimas proyecciones y vibraciones.

Si ésta fase del ciclo productivo no se realiza atendiendo a unos criterios de calidad y siguiendo el diseño de la *voladura*, los resultados no serán los esperados, teniendo como consecuencia: por un lado, la obtención de tamaños de roca no deseados que encarecen el proceso de carga, transporte y triturado, aumento de *repies* (taqueos o uso de martillos neumáticos); y por otro, el aumento de las posibilidades de accidente al existir mayor riesgo de proyecciones.

Perforación rotoperkusiva

De los distintos métodos de perforación existentes la *perforación rotoperkusiva de banqueo a cielo abierto*, es decir, voladuras con un frente libre, es el más extendido en la realización de barrenos en casi todos los tipos de rocas.

El funcionamiento básico de los equipos de perforación rotoperkusivos se basa en cuatro acciones principales (Fig. 1):

- **Percusión:** los impactos producidos por el golpeo del pistón originan unas ondas de choque que se transmiten a la boca a través del varillaje (en el *martillo en cabeza*) o directamente sobre ella (en el *martillo en fondo*).
- **Rotación:** con este movimiento se hace girar la boca para que los impactos se

En este artículo se expone como el contar con equipos técnicos y humanos adecuados a las necesidades de la perforación, invertir más tiempo en la perforación de los barrenos y obtener datos de las desviaciones de los taladros antes de proceder a la carga del explosivo, representa un beneficio económico, entendido como una disminución de los costes globales del proceso de arranque, carga, transporte y tratamiento del material.

Palabras clave: BARRENO, BORETRAK, EMBOQUILLE, INCLINÓMETRO, MARTILLO, REPIE, VARILLAJE.



Diego SÁNCHEZ ÁLVAREZ (*), Ing. Ind.
Diego LUCIO IBÁÑEZ(*), Ing. Minas.
Fernando ARQUERO BERLANGA (*), Ing. T. Minas
(*) Dpto. Técnico de MOVITEX, S.L.U.

produzcan sobre la roca en distintas posiciones.

- **Empuje:** para mantener en contacto el útil de perforación con la roca se ejerce un empuje sobre la sarta de perforación. De otra forma la onda de choque se reflejaría a través del varillaje produciendo fatiga y vibraciones indeseables en el equipo.
- **Barrido:** el fluido de barrido permite extraer el *destritus* del fondo del barreno a través del espacio anular existente entre el varillaje y las paredes del barreno.

Si cualquiera de estos parámetros no son los adecuados al tipo de roca el rendimiento de la operación disminuirá considerablemente y aumentará la desviación y los desgastes de los útiles.

¿Martillo en cabeza o en fondo?

La elección entre un equipo de perforación de martillo en cabeza o en fondo dependerá entre otros factores del tipo de roca a perforar y de las características de la perforación a realizar.

El *martillo en cabeza* puede ser neumático o hidráulico, dependiendo de si el fluido que desplaza el pistón es aire o aceite hidráulico.

Las perforadoras con *martillo en cabeza neumático* no se suelen utilizar para diámetros mayores de 90 mm y profundidades de barreno que superen los 20 m, debido a las pérdi-

das energéticas en la transmisión de la onda de choque a través del varillaje y por la desviación de los barrenos; por otro lado, estos equipos son simples, baratos de adquirir y mantener y con una fiabilidad alta.

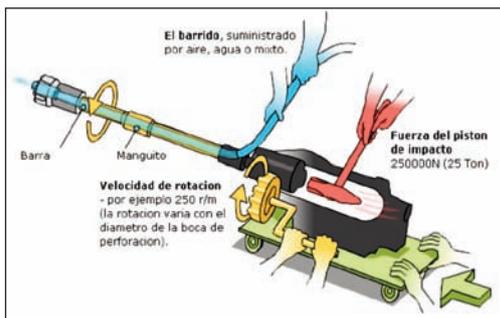
Los equipos de *martillo en cabeza hidráulico* difieren de los anteriores principalmente en que el fluido que gobierna el motor de rotación y el que produce el movimiento alternativo del pistón, es aceite. Éstas perforadoras tienen un consumo energético menor que las anteriores, poseen mayor capacidad de perforación y son más automatizables. Por el contrario, su precio es mayor y su mantenimiento más complejo requiriéndose una mayor formación del equipo mecánico.

Con los equipos de *martillo en fondo* (Fig. 2) se puede perforar en un rango de diámetros de [89 – 250] mm, a mayor profundidad que los equipos con martillo en cabeza y con una desviación mucho inferior; si bien, la productividad disminuye respecto al martillo en cabeza.

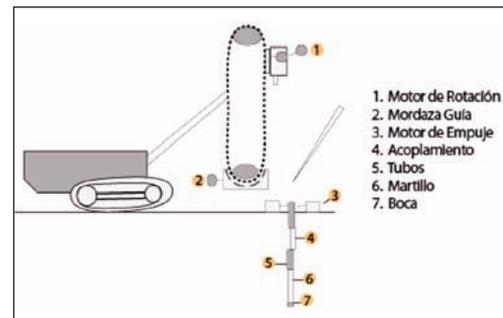
La presión de aire es la variable más influyente en la velocidad de penetración en este tipo de equipos, perforando en agua debe disponerse de un compresor capaz de desalojarla, de lo contrario el peso de la columna (contrapresión) disminuirá el rendimiento.

Ventajas del martillo en fondo

- La velocidad de penetración permanece constante, no disminuyendo con la profundidad, como pasa con la perforación de martillo en cabeza.
- Menor desgaste de boca debido a una limpieza del fondo del barreno más eficaz.
- Mayor vida útil del varillaje.
- Buena limpieza de las paredes del barreno, lo que facilita la carga del explosivo.
- Desviaciones muy inferiores a las de los equipos con martillo en cabeza.
- Menor nivel de ruido en la zona de trabajo.



■ [Figura 1].- Perforación rotoperkusiva.



■ [Fig. 2].- Perforadora de martillo en fondo.

Inconvenientes

- Productividad menor a la de los equipos de martillo en cabeza.
- No sirven para diámetros pequeños ya que al estar el martillo ubicado en el fondo, debe tener unas dimensiones mínimas para garantizar su eficacia.
- Existe riesgo de pérdida del martillo por un atasco o colapso de las paredes del barreno, siendo el martillo un elemento de considerable costo económico.
- Son necesarios compresores de alto rendimiento.

Una alternativa existente a la perforación de martillo en fondo o perforación de martillo en cabeza, es la opción que ofrecen algunas marcas, comercializando un nuevo diseño de equipos de perforación que consisten en un híbrido de martillo en fondo y de martillo en cabeza. Su nombre comercial es **Coprod** y combinan características de los dos tipos de martillo. Las perforadoras que llevan incorporadas este sistema, son como las tradicionales de martillo en cabeza pero la percusión y rotación se realiza por separado. El varillaje transmite la onda de choque del martillo, que se encuentra en superficie, hasta la boca y conduce el aire de barrido. Un motor de giro, también en superficie, transmite la rotación directamente sobre una tubería exterior unida al varillaje mediante guías y cuyas funciones son proporcionar mayor peso y rigidez a la perforación y reducir el espacio anular con respecto a los equipos tradicionales de martillo en cabeza, reduciendo la demanda de aire para evacuar el *destritus*.

Las ventajas de éste sistema con respecto a los tradicionales martillos en cabeza son:

- Posibilidad de perforar a mayor diámetro con menor desviación.
- Reducción del desgaste en juntas y maniguitos.
- Mayor productividad y menor riesgo de atascos.

Ventajas respecto al martillo en fondo:

- Mayor productividad.
- No se necesita un compresor de alto rendimiento.
- Menor consumo de combustible

Por lo tanto, a la hora de escoger el equipo de perforación más apropiado para el trabajo a realizar habrá que tener en cuenta: el diámetro de perforación, altura de banco, ritmo de perforación, tolerancia en las desviaciones, resistencia a la compresión simple de la roca, junto con otras propiedades físicas de la roca como: dureza, abrasividad, plasticidad, elasticidad, textura, estructura (esquistosidad, juntas, diaclasas, fallas, etc.)

Otros criterios de selección del equipo de

perforación son los económicos, de mantenimiento y servicio.

Ejecución de la perforación

Una vez que se ha elegido el equipo de perforación, establecida la malla de la voladura y se conoce la geología del material, se pasa a la fase operativa de la perforación, en la cual aún habiendo acertado en los pasos anteriores se pueden comprometer los resultados.

En primer lugar, cabe destacar la importancia del *perforista*, el tener experiencia previa en el manejo de la máquina, en el material a perforar e incluso en la propia explotación garantiza una perforación de calidad.

Posicionamiento y alineación de los barrenos

Antes de comenzar con la perforación, el perforista debe conocer detalladamente la orientación e inclinación de cada barreno. La máquina se debe posicionar correctamente, estando lo más nivelada posible, siendo muy importante que el terreno esté lo más horizontal que se pueda, libre de baches y piedras sueltas con el fin de que la perforadora pueda realizar su posicionamiento con la mayor estabilidad. Algunas perforadoras tienen entre sus características la existencia de un apoyo hidráulico trasero, este apoyo llamado *pata trasera* es muy útil a la hora de dar estabilidad a la máquina y evitar que haya pequeños desplazamientos durante la perforación, por lo cual es muy recomendable que se utilice a la hora de perforar.

Existen en el mercado distintos aparatos electrónicos de posicionamiento del emboquille de los barrenos llamados, de una forma general, *inclinómetros*. Estos aparatos permiten el poder referenciar los barrenos de una misma fila a una referencia externa, con el fin de que en base a esta referencia, se realicen los barrenos de esa fila paralelos en todos sus ejes de dirección, de forma que la separación entre barrenos de la misma fila y de filas paralelas que existe en la superficie de la voladura, sea la misma en el fondo de la voladura, obteniendo así un tamaño medio de piedra lo más regular posible y cumpliendo con el objetivo del diseño de la voladura. A la vez, estos aparatos reducen considerablemente el tiempo de posicionamiento de la perforadora a la hora de realizar los distintos barrenos, aumentando la productividad de la ejecución de la perforación y disminuyendo costes al existir menos tiempo de posicionamiento entre barreno y barreno.

Por otro lado, existen otros métodos más rudimentarios de posicionamiento de la máquina a la hora de realizar la perforación, estos métodos requieren más tiempo de posicionamiento a la hora de colocar la perforadora o son menos precisos, con lo cual hacen que

sean menos aconsejables que los inclinómetros electrónicos incorporados a la perforadora. En la actualidad la mayoría de las perforadoras, se venden con este aparato incorporado a la electrónica de la máquina, existiendo en algunas marcas y modelos concretos *software* que permite el posicionamiento de la máquina vía GPS y el tratamiento informático de los datos de posicionamiento y perforación, antes y después de la ejecución de la misma.

Emboquille

Lo ideal es que desde el primer metro la roca no esté disgregada ni meteorizada sino que sea roca sana, esto no siempre será posible por lo que durante el emboquille se deberá emplear el máximo barrido para evitar la caída de *destritus*.

Si la máquina se orienta mal y se comienza el barreno emboquillando con una cierta desviación, ésta irá aumentando con la profundidad.

Velocidad de perforación

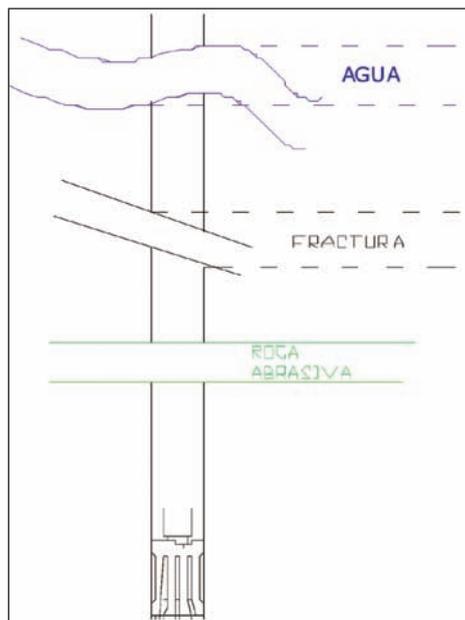
La velocidad media real de perforación dependerá del equipo de perforación, del operador y de la geología/litología del macizo a perforar.

Cuando se perfora con *martillo en fondo*, la velocidad de perforación prácticamente permanece constante con la profundidad, pues la sarta de perforación no constituye el medio físico de transmisión de la energía de percusión ya que sólo se utilizan para canalizar el aire de accionamiento y efectuar la rotación.

Del operador dependen los tiempos de desplazamiento entre barrenos, posicionamiento y orientación así como los cambios de barras, factores que influyen de manera significativa en la productividad del equipo.

Al atravesar distintos estratos, zonas de transición, etc., es necesario que el operador varíe la rotación o el empuje para controlar la posible desviación producida al pasar de una zona más dura y resistente a otra más blanda o débil donde la sarta de perforación tiende a *fugarse*.

A modo de ejemplo (**Fig. 3**), en el caso de que se esté perforando una roca blanda, como puede ser yeso, el empuje puede ser alto y la rotación también. En cambio, al atravesar una zona de transición de material cargada de agua se deberá disminuir el empuje para evitar las desviaciones, la presión de soplado no debe ser alta para no dañar las paredes del barreno y, si es necesario, se deberá subir y bajar el varillaje varias veces para dejar las paredes del barreno limpias de lodo en esa zona. Si encontramos una fractura rellena de arcilla no se debe utilizar un empuje elevado para evitar el pandeo de la sarta. Al perforar en una capa más abrasiva que el material predominante, una alta rotación provocará un desgaste excesivo sin incrementar la velocidad de perforación.



[Figura 3].- Transiciones de material en un barreno.

Tipos de errores de perforación

Al perforar se pueden cometer los siguientes errores:

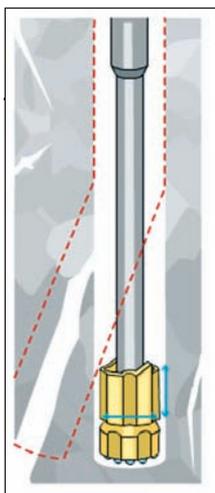
a) De profundidad. La falta de metros lineales de perforación a la hora de realizar el barreno provoca la aparición de repies y mala fragmentación en la voladura, por esto es fundamental el asegurarse durante la perforación del barreno el realizar los metros lineales diseñados para el mismo, mas una sobreperforación que nos ayudará a que no aparezcan los mencionados repies y absorberá posibles erosiones internas del barreno, las cuales provocan el desprendimiento de material en el interior del mismo y la consecuente pérdida de metros lineales perforados.

b) De inclinación y/o dirección. A la hora de realizar el *emboquille* del barreno, debemos asegurarnos que este se realiza en el lugar marcado y con los grados de inclinación diseñados para la realización de la voladura. De la misma importancia es el que todos los barrenos estén orientados a un mismo punto, de forma que sean paralelos entre sí, estos nos ayudará a mantener la malla diseñada en la voladura, tanto en la superficie del macizo a volar como en el fondo del mismo. De gran ayuda son los aparatos electrónicos mencionados que ayudan a realizar el posicionamiento del barreno y darle al mismo los grados de inclinación deseados.

c) De marcado y emboquille. Se debe marcar con pintura, nunca con piedras o cualquier objeto que se pueda desplazar, y para medir la orientación de los emboquilles es aconsejable usar cinta, láser o niveles ópticos.

c) De desviación. A modo de ejemplo, por cada grado que nos desviemos el pie del barre-

no se desplazará 1,8 cm/m perforado. Para evitarlo se pueden utilizar tubos guías, bocas retráctiles (Fig 4), reducir el avance y si es posible reducir la altura de banco e inclinaciones que se puedan ver afectadas por la fuerza de la gravedad. Cuando se perfora en materiales con esquistosidad la dirección de perforación más estable es perpendicularmente a los planos de esquistosidad, si no es posible es aconsejable perforar en paralelo a la esquistosidad.



[Figura 4].- Boca retráctil.

Estos errores conllevan el aumento de las proyecciones debido a que la piedra de los barrenos de la primera fila se puede ver reducida originando un riesgo para la seguridad, la reducción de la vida útil del varillaje, concentración de carga en barrenos contiguos deflagrando y reduciendo así el rendimiento del explosivo, aparición de repiés y baches dificultando la carga de la voladura y aumentando los costes de la carga y transporte (picado de repiés con martillo hidráulico y menor disponibilidad de equipos por averías).

Métodos de medición de desviación de barrenos

Así, el conocer la *desviación de los barrenos* es fundamental para evitar resultados indeseables de la voladura, perforando de nuevo aquellos cuya desviación sea excesiva para

conseguir la fragmentación prevista, o realizando barrenos de apoyo, evitando la aparición de sobretamaños y proyecciones.

Actualmente hay varios sistemas de medición de desviaciones:

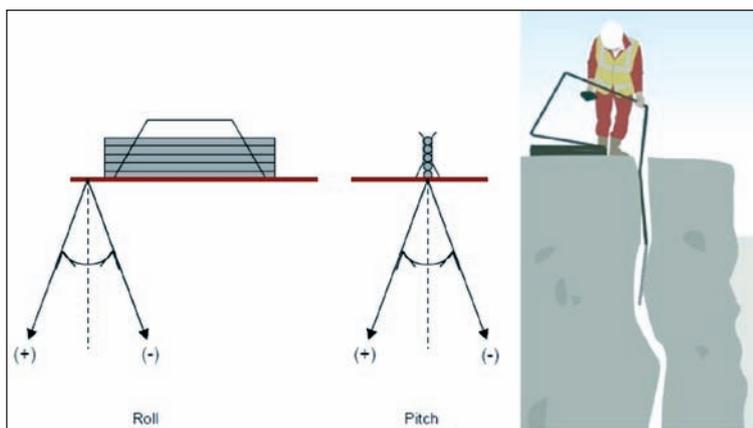
- Sistema de brújula magnética-clinómetro.
- Clinómetro químico de ácido.
- Girocompás.
- Sistema de dos inclinómetros.

Nos centraremos en éste último por ser el más extendido en voladuras de banco.

El sistema de dos inclinómetros cuyo nombre comercial es **Boretrak**, consta de una cabeza de medida, o sonda, que contiene los dos clinómetros que miden las desviaciones de ésta según dos planos perpendiculares entre sí. Un juego de barras de fibra de carbono articuladas por ambos extremos y un portabarras (*Rodded Boretrak*, Fig. 5), también la sonda puede estar unida a un cable (*Cabled Boretrak*), mucho más ligero y portátil que el anterior, aunque tiene el inconveniente con respecto al primero de que ante la presencia de barro o lodo en el barreno la sonda puede no bajar hasta el fondo, dándonos una lectura incorrecta de la profundidad.

Por último, incluye una unidad de control o *CDU* que permite la entrada de datos (fecha, hora, nº de barreno, profundidad, etc.), se comunica con la sonda a través de un cable o bien mediante un sistema transmisor de señal. Los datos almacenados en la *CDU* se descargan posteriormente al ordenador y con el *software* apropiado se pueden visualizar los resultados de las mediciones numérica y gráficamente.

En conclusión, una mala realización de la perforación de la voladura, conlleva un aumento de los gastos del ciclo productivo como se ha descrito anteriormente; por lo cual, para una optimización de la ejecución de la voladura, conviene prestar la máxima atención a la ejecución de: la limpieza y nivelación del banco a volar, señalización de una forma precisa de los barrenos a perforar, orientación de los distintos barrenos de forma que se respete el án-



[Figura 5].- Rodded Boretrak.

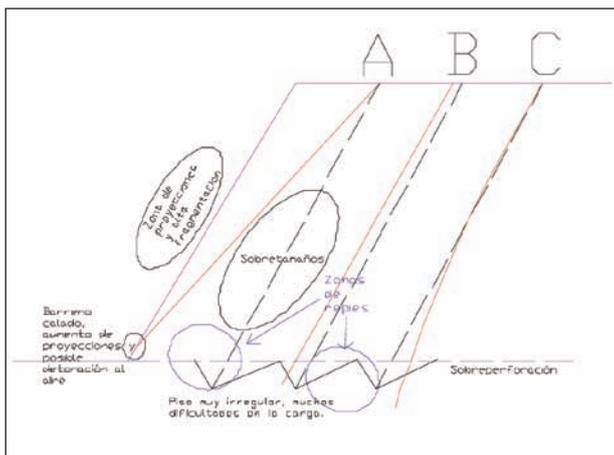
gulo de diseño de la voladura y los barrenos sean paralelos entre sí y, por último, el respetar la longitud del diseño de los barrenos y su sobreperforación.

En la **Fig. 6** se observan tres ejemplos de barrenos con distintos errores de perforación. El barreno real está representado en rojo y la trayectoria ideal en línea negra discontinua.

Cualquiera de los errores anteriores hacen que se produzcan unos resultados no deseados con respecto al arranque de la piedra, produciendo aumentos en los costos de trituración o de taqueo, a la vez que una mala realización de la carga y transporte, reportando estas situaciones aumento de los costos del ciclo productivo y retraso en los tiempos de producción.

Con respecto al uso del explosivo, estas situaciones de mala perforación provocan una distribución incontrolada del mismo en la voladura, dándose pérdidas de rendimiento efectivo del explosivo, aumentando el riesgo de proyecciones y de vibraciones.

Por todo lo anterior, se pone de manifiesto la conveniencia de realizar la perforación de la



■ [Figura 6].- Errores más comunes.

voladura prestando la mayor atención posible a su perfecta ejecución, con el fin de evitar un aumento de costos sobre el diseño teórico de la voladura y posibles situaciones críticas producidas por proyecciones. A la vez, para evitar esto es conveniente la utilización de aparatos de medida de inclinación, posición y longitud de los barrenos ejecutados antes de la realización de la carga de la voladura, con el fin de

verificar el trabajo realizado y poder corregir posibles desviaciones producidas.

Bibliografía

- ATLAS COPCO, S.A.E.(1988), **Manual de Perforación**. Madrid.
- LANGEFORS, U., AND KIHLLSTROM, B. (1973), **Voladura de Rocas**.
- LÓPEZ JIMENO, C., LÓPEZ JIMENO, E. Y GARCÍA BERMÚDEZ, P. (2003). **Manual de Perforación y voladura en rocas**. Madrid.



Movitex

☎ : 916 449 360

movitex@movitex.es
www.movitex.es