EXCAVACIONES SUBTERRANEAS CON MAQUINAS TUNELADORAS

G. Vié, Ingeniero de Minas

811-7

La reducción del coste de excavación de una galería mediante la utilización de una máquina tuneladora es evidente y, de ahí, la constante búsqueda de mejoras técnicas y condiciones de uso.

Se designan, normalmente, con el nombre de tuneladoras a las máquinas de este tipo empleadas en obras públicas, mientras que se denominan «minadores continuos» cuando se utilizan en las minas.

El empleo, por primera vez de estas máquinas, en explotación minera, data de 1957 y no pareció a primera vista que fuesen a sustituir a los métodos

tradicionales. Sin embargo, los rápidos progresos realizados modificaron estas conclusiones. Las ventajas se percibieron rápidamente: menor sacudida de los terrenos, mejor salvaguarda de la estabilidad de las instalaciones de superficie, supresión de bulonaje, entibaciones metálicas o gunitadas.

En obras públicas, los técnicos sacaron rápidamente el mejor provecho de lo anterior, abandonando cuando fue posible el avance con perforación mecánica y con explosivos.

Hay que distinguir las máquinas que excavan a sección total de las denominadas de ataque puntual.

Las primeras son muy pesadas, pudiendo llegar a superar las 400 toneladas, por lo que su empleo no está justificado más que para la excavación de galerías de gran longitud.

Todas las máquinas de este tipo van equipadas de un modo prácticamente similar. En ellas, un empuje global importante distribuido en cada herramienta de corte (muela), a razón de más de diez

Minador continuo de ataque puntual tipo HELIMINER JEFFREY.

Esquema de las fases sucesivas de avance de una tuneladora de ataque puntual: 1) elevación de la cabeza perforadora; 2) excavación del frente de arranque; 3) excavación descendente; 4) excavación de retiro.

Excavadora EICKHOFF de ataque puntual.

Tuneladora LAWRENCE tipo Altkirk Hardrock.

toneladas por muela, hace estallar la roca del frente de corte.

Para ayudar a las muelas de corte en su trabajo surgió una innovación: chorros de agua a muy alta presión que también actúan sobre la cabeza de perforación (water jetting).

Es indudable que de la adopción de este medio complementario para desintegrar la roca derivan los recientes progresos registrados en excavación mecánica continua. La transmisión de potencia por el chorro de agua es 1.500 veces más elevada que por muela de corte.

Estos chorros salen por orificios muy pequeños, de 1/10 a 1 mm de $\varnothing$ y presiones que oscilan entre 40 y 400 $\frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$. A veces se complementan con la acción de soluciones químicas reblandecedoras.

Con este método hidromecánico de corte se ha logrado cortar una placa de acero dulce, de 13 milímetros de espesor, a una velocidad superior a 10 cm/minuto que puede, incluso, ser aumentada si se utiliza un abrasivo poco costoso mezclado con el agua que pasa a través de los chorros.

En la República Federal de Alemania, hacia 1980, se realizaron ensayos para estudiar las posibilidades de empleo de máquinas de sección total a formaciones arenosas de explotaciones mineras de carbón.

En el disco o cabeza de corte se incorporaban chorros de agua a alta presión combinados con las muelas. De este modo se conseguía reducir la fuerza necesaria para desintegrar la roca y, de ahí, se dedujo la posibilidad de construir máquinas más ligeras y, por lo tanto, de mejor movilidad. De esta manera, la máquina tuneladora puede emplearse para la excavación de tramos cortos, ya que una máquina muy pesada sólo se justifica si se trata de largos avances.

Una de las primeras aplicaciones fue una máquina de 2,60 metros de diámetro y 94 chorros cortantes alimentados por bomba de alta presión.

Los chorros de alta presión han sido también utilizados para el derribo de obras de hormigón armado y para la ejecución de barrenos horizontales. Se ha conseguido taladrar hasta 15 m de profundidad, pero con dificultad para la evacuación de escombros.

Una firma alemana imaginó una máquina con chorros oscilantes para materiales blandos, como la hulla, sin intervención de ningún mecanismo pesado, pero con presión de chorros de 7.000 N/m² y velocidad de salida de orden de 400 m/segundo situándose las toberas de inyección a pocos cm

del frente. Los reducidos caudales de agua quedan compensados por las fuertes presiones. Las tuberías son de corindón y su taladro al diámetro requerido se obtiene por electrocorrosión. Gracias a los mismos la energía almacenada en forma de presión se transforma en energía cinética. El agua inyectada bajo una presión de 350 KN/m^2 puede llevar, al salir de la tobera, una velocidad de aproximadamente 840 m/seg , aunque la resistencia opuesta por el aire ambiente puede frenar de una manera considerable esta velocidad por lo que el chorro, para ser efectivo, debe encontrarse casi en contacto con el macizo (o presa) que se quiera cortar. Se puede tomar, como ejemplo, una distancia máxima de 50 veces el $\varnothing$ de la tobera para evitar esta pérdida de energía.

El chorro de alta presión realiza un ataque puntual, no es, en suma, más que una herramienta para la realización de rozas en la superficie de un macizo. Debe, por tanto, asociarse a un efecto puramente mecánico como el ejercido por las muelas de corte de una máquina tuneladora.

Hay que señalar también el poder erosivo de la cavitación, principio hidráulico conocido (microchorro), así como los chorros impulsados con caudal discontinuo, presión del impacto comprendida entre 1.000 y 2.000 KN/m^2 y diámetro de tobera de 1 cm , que pueden producir un golpe de ariete.

La mejor eficacia de un chorro de alta presión se obtiene aproximando lo más posible la tobera del frente de corte a la roca que se va a atacar. Este acercamiento del orden del centímetro y el desplazamiento del chorro a razón de 1 m/minuto dan como resultado un verdadero corte de sierra, cuya profundidad es función de la presión del agua a la salida de la tobera y de la dureza de la roca en cuestión.

Una misma tobera puede tener dos orificios con dos chorros convergentes o que se entrecrucen y, por tanto, inclinados respecto al eje de la herramienta, animada a su vez de un movimiento de rotación; según el efecto que se espere producir en la roca estos chorros pueden ser también divergentes.

La transmisión por chorros de energías elevadas, ayuda enormemente a las herramientas mecánicas en su penetración, fragilizando la roca y creando en la misma comienzos de rotura en la proximidad inmediata de las muelas de corte (herramientas de disco o de rodillos).

Unos chorros, convenientemente orientados a ambos lados de alguna de estas herramientas, inician un recorte alrededor de la misma. La muela termina la demolición por cizalladura en lugar de hacerlo por efecto de compresión. Por consiguiente, el empuje puede reducirse; la máquina, alige-

Tuneladora continua de ataque puntual.

Tuneladora ROBBINS de gran diámetro de ataque.

Esquema del minador continuo tipo UNIBO.

rada, justifica su empleo en la excavación de galerías de menor longitud, del orden de 1.500 a 2.000 cm en lugar de un mínimo de 4 km para una máquina tuneladora tradicional. Entre las máquinas simplificadas está la representada por el esquema UNIBO, en el que el plato de perforación se sustituye por cuatro brazos que llevan, cada uno de ellos, una o dos muelas de disco. Estos brazos se articulan alrededor del eje de rotación y al oscilar en planos que pasan por el eje, barren toda la sección de la galería. Si los rendimientos de arranque son insuficientes lo que se puede hacer, a condición de no perjudicar la rigidez del conjunto, es incrementar la velocidad de rotación, fijada en 20 ó 30 revoluciones por minuto.

Una empresa francesa de Obras Públicas construyó para una serie de excavaciones (La Crouzille de 3 m de Ø, Oslo de 3 m de Ø. Grandmaison de 3,60 m de Ø Damas de 2,5 y 5,50 de Ø), un modelo de máquina tuneladora inspirado en la misma concepción. Esta máquina lleva articulados sobre la cabeza giratoria tres brazos de barrido que oscilan en planos que pasan por el eje de la galería. El movimiento de oscilación se obtiene gracias a un gato central único, unido por bielas a los tres brazos. Las herramientas montadas en el extremo de los brazos describen espirales crecientes o decrecientes. A cada herramienta se asigna una zona diferente del frente, o sea, existen tres zonas concéntricas.

El diámetro de perforación es de 3 a 4 m para una máquina de potencia total instalada de 550 CV y de 5 a 7 m para una de 1.500 CV y velocidad de rotación que oscila entre 3 y 40 revoluciones/minuto. El primer tipo se caracteriza por un escaso peso relativo (50 toneladas) y el segundo es de 90 toneladas.

Las máquinas de ataque puntual se prefieren, a veces, a las máquinas continuas que excavan a sección total, sobre todo en explotación minera. Existen diferentes modelos según cada constructor y los usos a los que se destinan.

Un ejemplo de empleo de máquinas de este tipo se dio con motivo de la excavación de túneles para el Metropolitano de Marsella, con un diámetro de 8,10 m para la doble vía o dos secciones circulares de 5,10 m cada una. Los terrenos eran malos en su conjunto y la excavación, en sección total, no se podía hacer debido a los riesgos que corrían los edificios de la superficie, incluso con la práctica de cimentación inyectada previamente. En este caso la perforación se realizó en la media sección superior, con máquinas de ataque puntual, tipo Westphalia o Alpine. La semisección inferior, si los terrenos no requerían un entubamiento más o menos inmediato de la parte superior, se rompía mecánicamente y, en caso contrario, manualmente. La entubación era de tipo tradicional, por cimbras metálicas y revestimiento. Se

consiguieron unos rendimientos de 6,4 m/día en 20 m² de sección, con trabajos en dos turnos.

Las máquinas de ataque tienen, como dispositivo de apoyo y de empuje, unas orugas cuyo frotamiento sobre el suelo, así como el peso de la máquina, permiten ejercer el empuje máximo de que son capaces.

Las máquinas más pesadas son las más adecuadas para el ataque de los terrenos duros, sobre todo si unos gatos contribuyen a su estabilidad. Este empuje sigue siendo de todos modos relativamente reducido por falta de adherencia de las orugas, cuando el suelo está húmedo o arcilloso. Sigue siendo proporcional al paso de la máquina que varía por ejemplo entre 10 y 110, según los modelos (potencia entre 65 y 460 kw). El chasis es automotriz y el conjunto se propulsa a la velocidad de 2 a 20 m/minuto.

El brazo móvil, en los planos vertical y horizontal, lleva en un extremo una cabeza de perforación o pesa de arranque sobre la que se han fijado picos de material duro. Estas cabezas con axiles o radiales y el cambio de un pico a otro, en la galería, se hace en muy poco tiempo.

Las vibraciones a las que se somete la máquina durante el ataque frontal son tanto más acusadas cuanto menos pesa la máquina y más dura es la roca.

La tendencia actual es utilizar dos motores para cada máquina: uno de ellos, sobre el chasis, arrastra el grupo hidráulico de mando de las orugas, el movimiento de los brazos y el transportador de evacuación de escombros; el otro, fijado sobre el brazo, arrastra directamente la cabeza pesada, pudiendo ser el eje de rotación de la misma paralelo o perpendicular al brazo.

Los picos se pueden disponer en espiral sobre la cabeza, para proyectar mejor los escombros sobre un tablero de recogida. Las velocidades de corte varían entre 1 y 3 m/segundo.

A pesar del empeño de numerosos constructores en hallar la solución mejor, hasta ahora ninguna es enteramente satisfactoria, debido a la diversidad geológica de los terrenos. La elección debe hacerse, por tanto, con todas las precauciones posibles. Las secciones cortadas en galería son rectangulares o trapezoidales, de dimensiones variables entre 8 y 22 cm². En las máquinas de ataque puntual las herramientas de corte son, más o menos, puestas rápidamente fuera de servicio por la abrasión.

Unos chorros de agua de alta presión, orientados hacia su zona de acción, participan en la fragmentación de la roca, al mismo tiempo que facilitan el desprendimiento y la evacuación de los escombros.

El esfuerzo de corte es un 50 % menor cuando no interviene un chorro de alta presión. A igualdad de esfuerzos sobre el pico, el rendimiento es mucho mejor con inyección a alta presión.

Un gran avance podría ser un pico que desempeñase a su vez la función de inyectar con un caudal débil y presión elevada. Se podría adoptar en roca blanda un caudal de 70 litros/minuto por tobera a una presión de 70 KN/cm². Este sistema tendría la ventaja de suprimir el polvo y aumentar la visibilidad alrededor de la máquina, con lo que se consigue un ambiente menos penoso para el conductor de la máquina, que se traduce en una mejora del rendimiento pero, en cambio, esta técnica de presiones hidráulicas elevadas se encuentra con dificultades de resistencia en los flexibles de alimentación y en las juntas fijas o giratorias.

El rendimiento de una máquina tuneladora se define por la velocidad de avance y la de desgaste de las herramientas. La velocidad diaria de avance, que constituye el factor determinante de la rentabilidad de una excavación, es el producto de la velocidad de penetración en m/hora por el grado de utilización en horas de trabajo por turno.

La resistencia proporcionada a la perforación mecánica continua, mediante inyección de agua a alta presión, no se ha generalizado aún ya que la velocidad de esta técnica y, sobre todo, las sujeciones que trae consigo no han invitado a los constructores a adoptar sus materiales a la misma. La mayor parte de las máquinas tuneladoras que trabajan en la actualidad en las diversas partes del mundo siguen siendo de tipo clásico, aunque la experiencia diaria ha conseguido, sin embargo, hacer a las máquinas con inyectoros modificaciones en el sentido de un incremento de su eficacia y una mejor adaptación a los terrenos más duros o más malos.

El peso y las dimensiones de una máquina que excava a sección total requieren, por lo general, el fraccionamiento del conjunto con el fin de facilitar el mantenimiento y la colocación en el punto de ataque.

Las máquinas tuneladoras pueden ejecutar galerías ascendentes o descendentes (poco inclinadas hasta el 55 % e incluso pozos verticales, aunque éstos con una concepción de máquina apropiada).

Para ciertos avances sin inyección de alta presión se recurre al rociado muy cerca de los discos y niveles de corte de las cabezas de arranque. Este rociado sólo se hace con la presión necesaria para realizar una dispersión conveniente y evitar la obstrucción de las toberas por los restos del terreno.

Disco de ataque del terreno en avance (disposición de las moletas).

Vista de la parte posterior de la tuneladora ALKIRK.

Este agua no participa en la disgregación de la roca.

Esta práctica tiene interés en el sentido que facilita la refrigeración de la máquina, en especial de las partes giratorias que efectúan el trabajo de excavación propiamente dicho. En este caso, el consumo de agua puede ser de, aproximadamente, 300 l/minuto.

Para la inyección se montan unos sobrealimentadores en la máquina, pero para luchar solamente contra el empotramiento en terrenos secos, las bombas actuales desarrollan una potencia del orden de los 4 KN/m².

* * *