excavación de túneles en sección **total** y perforación en **roca**

G. VIÉ, ingeniero de minas

579 - 15

sinopsis

Cada día es mayor el número y la importancia de los túneles que se realizan tanto en el sector de las obras públicas (autopistas, abastecimientos de agua...) como en los demás campos de la ingeniería.

El autor pasa revista a la nueva maquinaria que actualmente se utiliza en la excavación de túneles a plena sección, examinando las características de diversos tipos de jumbos, perforadoras de tornillo helicoidal, «tunnelers», y su adecuación a los diferentes terrenos. Se describen algunas realizaciones en las que han intervenido estas máquinas, analizando los resultados por ellas obtenidos.

Finalmente, el artículo se ocupa de los modernos supermartillos rompedores hidráulicos empleados en la perforación en roca.

El número de grandes túneles y de vastas excavaciones subterráneas aumenta a medida que crece la aglomeración de las superficies habitadas.

Si bien los ferrocarriles han alcanzado aproximadamente su extensión máxima, en cambio los metropolitanos extienden cada vez más sus redes a través del subsuelo de las grandes urbes; también las autopistas franquean en túnel los obstáculos más incómodos cuando el hacerlo en trinchera implicaría excesivos movimientos de tierra; la realización de las grandes obras de equipamiento hidroeléctrico, de irrigación y de abastecimiento de aguas de los grandes centros urbanos impone la necesidad de abrir galerías que, con mayor o menor sección, se extienden a lo largo de kilómetros. Finalmente, también se recurre a grandes galerías en la explotación de las riquezas minerales.

Los túneles de carretera constituyen el sector más primordial de las obras de media o gran sección (superiores a 50 m²), no siendo raras las aperturas de 90 y 130 m²; la importancia de los trabajos de ingeniería civil subterránea irá creciendo en los próximos años.

La rapidez de ejecución es de capital importancia en este tipo de obras. Los empujes del terreno se controlan tanto más cómodamente cuanto más acelerado es el avance. La mecanización de la obra se estudia, por tanto, con vistas a este objetivo, en función de la sección a excavar.

La perforación a plena sección representa, sin discusión, la forma de trabajo más económica, empleándose una entibación metálica, lo más ceñida posible a la forma del perfil, cuando el simple bulonado se juzga insuficiente para esperar el revestimiento definitivo de hormigón.

El costo por unidad de longitud de túnel de las obras de ingeniería civil puede variar, para una misma sección transversal, dentro de amplios límites, según sea la naturaleza geológica y, por tanto, el comportamiento de las formaciones atravesadas. El precio de coste en terrenos detestables, que exigen una consolidación previa, inyección o congelación, puede resultar varias veces superior que en terrenos excelentes, que no necesiten ninguna entibación.

La perforación en roca representa generalmente, en condiciones normales, el 70 % del coste total de la obra de ingeniería civil. De ahí la importancia que se concede al conocimiento de la mecánica de las rocas y a la elección de la maquinaria a utilizar en obra (jumbos, aparatos de recogida y evacuación...).

La naturaleza del terreno es determinante a la hora de seleccionar los métodos de trabajo más apropiados, elegir la entibación más adecuada y limitar las sacudidas de las voladuras de arranque y los asientos superficiales bajo las aglomeraciones urbanas.

No debe ser subestimada la probable evolución de las presiones del terreno si hay que mantener durante un período bastante largo el desequilibrio debido a la obra.

Para acelerar el ciclo de las voladuras se utilizan los supermartillos sobre jumbos, perforando un esquema de tiro con «burn cut» (tapón canadiense); este último consigue una mejora de avance por voladura, reduciendo al mismo tiempo el número de taladros y el consumo de explosivo por m de avance.

Hay que hacer observar en este caso el paralelismo de los taladros periféricos con relación a los taladros no cargados del tapón, siendo, casi siempre, la distancia entre ejes inferior a 150 mm.

Los demás agujeros son igualmente paralelos al eje de la galería, excepto los más exteriores que delimitan el perfil, obligatoriamente divergentes a causa del gálbo del perforador.

A veces, y en determinadas circunstancias, los taladros de corona y de paramento se han ejecutado, a pesar de la posición incómoda del minero para mantener correctamente su martillo y poder regular su empuje, con martillo manual sobre empujador.

Los supermartillos sobre jumbo son adecuados para la perforación de los gruesos agujeros del tapón y de los que les rodean; las barrenas tienen el grosor suficiente para poder resistir los correspondientes esfuerzos, siendo obligado, en consecuencia, el empleo de brocas de gran diámetro.

Ahora bien, dicho diámetro puede llegar a ser excesivamente grande, ya que para conseguir un perfil correcto y una buena fragmentación no se puede descender de un número mínimo de taladros, por lo menos en secciones inferiores a 15 m².

Por otra parte, el gran número de movimientos necesarios a los brazos del jumbo para «golpear» la totalidad de la sección del túnel puede perjudicar la precisión del paralelismo, originando un exceso en la excavación, con el consiguiente y costoso incremento en la cantidad de hormigón del posterior revestimiento.

Por todo ello se tiende a conservar, en pequeñas secciones, martillos relativamente ligeros, con barrenas hexagonales de $\varnothing$ 22 ó 25 mm para los agujeros de tapón periféricos y los agujeros exteriores de $\varnothing$ 32 a 39, no utilizando más que en grandes secciones martillos de barra redonda o hexagonal de $\varnothing$ 32 para los taladros cargados de $\varnothing$ 48 a 64 mm; se busca, asimismo, la disminución

En perforación, pequeña sección. Martillo T-28 sobre empujador. Ofrece una gran potencia de impacto. Perfora en $\varnothing$ 38 mm con barras hexagonales de $\varnothing$ 22 mm y en $\varnothing$ 48 mm con barras de $\varnothing$ 25 mm. Consumo de aire, 4,2 m³/minuto. Peso, 28 kg.

del tiempo de perforación mediante la multiplicación de los puntos de perforación, es decir, del número de brazos ligeros, dejando la perforación de los agujeros centrales de gran diámetro a un martillo más poderoso, con boca y barrenas apropiadas para un agujero superior a $\varnothing$ 70 milímetros.

En una sección de 18 m², en granito, se han horadado un agujero de $\varnothing$ 102 mm y 56 agujeros de 3,05 m y $\varnothing$ 32 ó 34 mm, con un jumbo de 5 brazos ligeros y un brazo central para el tapón. La perforación, siguiendo dicho esquema, sólo ha durado 48 minutos.

El agujero central de $\varnothing$ 102 mm ha sido ejecutado en 31 minutos, plazo inferior al tiempo global precedente.

En secciones iguales o superiores a 18 m², y según el tipo de roca, el número de taladros puede disminuirse aumentando su diámetro. La densidad de los taladros es función inversa del incremento de la sección de la galería.

Durante la excavación de una galería de derivación de 11,2 a 11,5 m² de sección, en Italia, a través de una formación muy compacta de gneis, se efectuaron unos ensayos de perforación con simples martillos sobre soportes, comparando los resultados con los que, normalmente, se obtienen con un jumbo sobre carretón de 5 brazos ligeros y un brazo central.

Los resultados se confrontan en el siguiente cuadro:

	Perforación ligera	Jumbo Pantofore	Variación
Número de taladros de $\varnothing$ 32 mm	60	55	— 8 % +
Número de taladros de $\varnothing$ 76 mm	2	3	+ 50 % +
Profundidad de los taladros (m)	1,40	1,95	+ 32 % +
Longitud media de avance (m)	1,20	1,90	+ 58 % +
Longitud de avance Profundidad perforadora =	85 %	97 %	+ 14 % +
Metros de mina por m de avance:			
$\varnothing$ 32 mm	70	54,6	— 19 % +
$\varnothing$ 76 mm	2,5	3,1	+ 25 %
Tiempo total de perforación (minutos)	70	55	— 20 % +
Tiempo de perforación por m lineal de galería (minutos)	58	29	— 50 % +
Número de mineros por puesto	8	4	— 50 % +

El avance logrado por el jumbo habría podido ser mucho más importante si se hubieran adaptado a los brazos del aparato unas correderas de recorrido superior. Los taladros habrían sido más largos en cada ciclo, y las correderas en vez de soportar martillos TK-25, de un peso demasiado débil (30 kg), habrían contado con martillos LC, capaces de proporcionar una velocidad de perforación superior en un 50 %.

La capacidad del jumbo experimental quedaba frenada por el volumen máximo a arrancar en cada voladura, al ser el tren de evacuación de una capacidad netamente insuficiente para poder retirar al exterior, en un solo viaje, la totalidad de los escombros. Este incidente pone una vez más de relieve, las pérdidas ocasionadas por la falta de previsión en una concepción del trabajo calculada muy estrechamente.

En la excavación de una galería de 34 m², a través de unas calizas cretácicas con numerosas fallas rellenas de material arcilloso, se ha utilizado un jumbo «Pantofore»

de 8 brazos ligeros y un brazo central para agujero de tapón de $\varnothing$ 102 mm.

Esta galería formaba parte de la obra «Canal de Provenza», que abastece de agua a Marsella y sus suburbios satélites.

El personal empleado durante la perforación no ha sobrepasado las 6 personas, incluido el jefe de puesto.

Cada voladura incluía 79 taladros de $\varnothing$ 32 mm y 3,10 m de longitud, y un taladro de $\varnothing$ 102 mm y de la misma longitud.

El avance por voladura era de 2,85 m a plena sección. La perforación en sí no ha requerido más de 1 hora y 20 minutos como media.

El avance medio, en estas condiciones, fue de 13 m/día. El avance mensual medio ha sido superior a 300 m durante 5 meses consecutivos.

El ajuste del perfil, con relación a la línea teórica fue notable, ya que la diferencia no pasó de 780 m³ sobre los 73.000 m³ excavados.

El desglose detallado de tiempos ha sido el siguiente:

	Minutos
Colocación del jumbo	5
Perforación (martillos TK-25)	80
Colocación de explosivos, retirada del jumbo y tiro.	50
Evacuación de humos, introducción de la paia, etc.	15
Retirada de escombros con pala CONWAY 100. I.	
colocación de los vagones de carga con cambio	
de agujas californiano	150
Retirada de la pala y prolongación de la vía	15
	<hr/> 315,

es decir, 5 horas y 1/4 por ciclo.

Habiéndose mantenido así siempre la empresa contratista por debajo del perfil teórico excavado, las reducciones en el hormigonado y en el plazo de ejecución han sido espectaculares. El examen del cliché ofreciendo los diversos perfiles da una idea exacta de la conformidad de la sección bruta de perforación.

Otra observación interesante es que la pala CONWAY 100. I y el convoy de vagones de evacuación de los escombros circulaban a través del jumbo de 8 + 1 brazos, dada la gran altura libre central del pórtico de dicho jumbo.

En esta misma obra del Canal de Provenza se abrió en 1967, a través de caliza y calizas margosas, una galería, de 7.800 m de longitud y 7 m² de sección excavada real, mediante un jumbo «Pantofore» ligero de 3 brazos más brazo central. El gálibo había sido estudiado «al centímetro» para poderlo utilizar en secciones excavadas comprendidas entre 5,5 y 12 m².

En un mes se realizaron 294 tiros, representando un avance total de 625 m.

El esquema de tiro preveía 33 agujeros de $\varnothing$ 38 mm, y un agujero de tapón de $\varnothing$ 127 mm no cargado.

Los tres brazos ligeros tenían incorporado un martillo perforador LC-40; el brazo central estaba provisto de un martillo TA-40. El tapón era de taladros paralelos, de 2,30 m de profundidad.

Jumbo Pantofore de 3 brazos, montado sobre chasis automotor con neumáticos.

La organización del trabajo preveía 3 turnos, con relevos en el mismo frente de trabajo, sin interrupción de éste, y 6 a 7 días por semana.

Se ha podido realizar una voladura cada 132 minutos, es decir, 10,9 voladuras, de 2,14 m cada una, por día, o sea, una media de 23,32 m/día.

En 1968 el mismo jumbo, en una sección idéntica, ha logrado una progresión mensual de 727 m, lo que constituye un récord en su clase.

En ciertas explotaciones mineras, en particular en las de potasa, sal gema y minerales de dureza media, en las que la mecanización representaba un objetivo primordial,

se han utilizado diversos tipos de perforadoras para la ejecución de agujeros de gran diámetro, 420 y 550 mm, y hasta 7,7 m de profundidad.

Una de estas máquinas es la perforadora de tornillo helicoidal SALZGITTER, que asegura de 55 a 60 m de perforación y una autonomía de 3.500 m.

Su motor Diesel de 51 CV, con refrigeración por aire, asegura la translación del aparato, así como el accionamiento del mecanismo de perforación, por intermedio de un árbol de cardan y del engranaje distribuidor.

Pero, normalmente, el mecanismo de perforación está alimentado por bombas hidráulicas (circuito de aceite), siendo las cilíndricas hidráulicas de caudal regulable.

Perforadora Salzgitter GB 420/500 para perforación enteramente mecanizada de agujero de tapón de gran diámetro.

Perforadora Salzgitter BW-41:
Perforación de taladros de mina.

Un mando de la caja de velocidades acciona las bombas mediante transmisión de correas trapezoidales.

El mecanismo de perforación lleva un reductor de engraje helicoidal y dos motores hidrostáticos.

El mecanismo de avance (0 a 2,6 m/minuto, empuje máximo de 500 kp bajo 100 kp/cm²) consiste en un cilindro hidráulico, alojado en el marco de la corredera de perforación, que actúa sobre el mecanismo de perforación por intermedio de una transmisión de cadenas.

La broca de perforación, de 420 y 500 mm de diámetro, puede alcanzar una velocidad de 60 r.p.m.; el par de rotación de la broca llega a los 560 m · kp bajo 200 kp/cm².

Las bombas hidráulicas y los cilindros pueden acoplarse por manguito elástico a un motor eléctrico de 37 kW que gira a 3.000 r.p.m.

Un tambor con anillo colector séxtuple va dispuesto sobre el chasis para el enrollamiento y desenrollamiento del cable de transporte de fuerza durante el desplazamiento de la perforadora (capacidad: 150 m de cable).

La perforadora Salzgitter BW-41 tiene sensiblemente estas mismas características, con la diferencia de que opera con diámetros de 36 y 45 mm, y penetraciones de hasta 7 m.

Su principal interés reside en la facilidad de regulación de las velocidades de avance y rotación de la barra, lo que permite una oportuna adaptación a las diferentes na-

turalidad de las capas geológicas atravesadas. Cuando éstas son francamente margocalcáreas o arcillosas (como en la excavación del túnel carretero en doble galería del Gran Sasso, perteneciente a la gran arteria de circulación Roma-l'Aquila-Villa Vamano), y existen además otras dificultades que complican las sujeciones (régimen ideológico particular, escapes de gas combustible por expansión de las capas), puede ser necesario renunciar a la perforación clásica y a los tiros con explosivo, ejecutando la excavación por medio de una máquina de cabeza fresadora.

La longitud de este túnel es de 10.170 m. Las dos galerías, de dos vías cada una y una distancia entre ejes de 50 a 100 m, están enlazadas de tarde en tarde por galerías de unión transversales y diagonales; estas últimas deben facilitar, en caso de necesidad, la desviación del tráfico de una a otra galería.

La sección de cada tubo es de 80 m².

Los dos «tunnelers» utilizados han sido concebidos por la firma «Lawrence Co.», filial de Ingersoll, y construidos en los talleres Seattle (USA). Son, de hecho, «mineros continuos». El brazo que sustenta la cabeza fresadora va montado sobre un chasis-pórtico que deja por debajo el suficiente espacio para las maniobras de carga y evacuación de los escombros.

Se han tenido en cuenta las particulares exigencias del trazado. Las dimensiones son: 9 m de altura, 9 m de anchura y 21 m de longitud. El conjunto es automotor, con cuatro ruedas de 2,40 m de diámetro provistas de gruesos

neumáticos que soportan el peso considerable de la máquina, del orden de las 180 toneladas.

El movimiento se realiza con transmisión hidráulica.

La parte esencial del tunneler es una cabeza de corte rotativa que recibe una potencia de unos 200 CV. El brazo que la soporta es telescópico, alcanzando 12 m de extensión total. Los movimientos del brazo, de mando hidráulico, permiten cubrir toda la superficie del frente de ataque (sección excavada 80 m²).

El arranque horario normal ha sido previsto entre 40 y 100 m³, es decir, el avance puede ser del orden de 0,50 a 1 m/hora a plena sección, dependiendo de la naturaleza y el comportamiento de las capas atravesadas.

La excavación de las dos galerías paralelas se ejecuta simultáneamente. El revestimiento de hormigón proyectado sobre bóveda y paramentos se efectúa utilizando plataformas telescópicas.

* * *

La perforación en roca, bien en obra subterránea o a cielo abierto, ha experimentado grandes mejoras en los últimos

años, gracias a la aparición de supermartillos hidráulicos de un tipo que recuerdan al martillo rompedor tradicional. Entre ellos podemos citar el martillo HOBGOBLIN, de 345 kg, construido por Ingersoll, y el BRH-500 y 501, de 500 kg, de la firma Montabert.

Los supermartillos son adaptables al extremo del brazo de una pala. Utilizan las muy altas presiones del circuito hidráulico del chasis para transmitir la energía almacenada a un pistón que, a su vez, no golpea directamente sobre el útil, sino que comprime un volumen de nitrógeno que lanza violentamente una masa metálica corrediza hacia la cabeza del útil.

Exceptuando el pistón, la masa metálica del martillo y la válvula, que se desplazan en un baño de aceite, ninguna otra pieza entra en movimiento. Es de notar la ausencia de elementos delicados, tales como levas, engranajes o resortes.

La potencia y la cadencia de golpeteo son variables. En la máquina HOBGOBLIN un circuito hidráulico, por el que fluyen 190 litros/minuto a 140 kp/cm², permite desarrollar 600 golpes/minuto, proporcionando cada uno un trabajo de 150 kp · m.

Máquina «Soft Rock» Tunneler SRT-40: Excavación en sección llena de 80 m² por cabeza de fresadora, en servicio, en doble ejemplar, para la realización de las dos galerías paralelas de San Rocco, por debajo del macizo del Gran Sasso (Apeninos). Se puede apreciar en segundo plano, en punteado, la pala recogedora de escombros, que puede circular por debajo de la máquina perforadora.

M. Martillo.
HP. Flexible de presión alta.
BP. Flexible de presión baja.
D. Distribuidor.
C. Válvula de descarga.
P. Bomba.
R. Depósito de aceite hidráulico.
E. Cambiador de temperatura.

Montaje de una perforadora en roca BRH-500 sobre el brazo de una pala mecánica. El martillo para roca ocupa el sitio de la cuchara; los mandos siguen los mismos.

Super martillo «rompe rocas» hidráulico tipo BRH-501, montado sobre dispositivo amortiguador. El puntero que corresponde al perforador de un «rompe-hormigón» clásico es de acero tratado de 114 mm de diámetro.

Esquema del principio de funcionamiento de un martillo para roca.

La cadencia de golpeteo puede modificarse haciendo variar el régimen del motor del vehículo portador, por aumento o disminución del caudal de la bomba hidráulica.

Asimismo, la potencia de golpeteo puede reducirse disminuyendo la presión del aceite del circuito. Siempre es posible, por tanto, encontrar la mejor relación cadencia/potencia según sea el trabajo a efectuar.

El martillo perforador BRH-501 posee un nuevo sistema de fijación, que elimina las vibraciones, en el soporte del aparato portador.

Rompe-roca hidráulico Montabert
BRH-500 trabajando en una cantera.

Un dispositivo ajusta la presión a un valor óptimo de regulación, eliminando en particular las variaciones de presión que, en tiempo frío, se producen debidas a las diferencias de viscosidad del aceite.

Estos martillos perforadores, montados sobre jumbo, podrían ejecutar excavaciones en roca blanda o de dureza media, en trabajos subterráneos, bajo una aglomeración donde la excavación con explosivos esté prohibida.

El mando hidráulico suprime el compresor y todos los ruidos desagradables imputables a la compresión y expansión del aire comprimido.

Fotografía HENRY RUTTER

résumé

Creusement de galeries à pleine section et déroctages

G. Vié, ingénieur des mines

L'importance et le nombre de tunnels creusés tant dans le secteur des travaux publics (autoroutes, ravitaillements en eau...) que dans les autres domaines du génie civil croissent chaque jour.

L'auteur passe en revue les nouveaux engins utilisés actuellement pour le creusement de tunnels à pleine section, et examine les caractéristiques de divers types de jumbos, perforateurs avec fleurets, «tunnelers», et leur adaptation aux différents terrains. L'auteur décrit quelques travaux réalisés à l'aide de ces engins et analyse les résultats obtenus.

Finalement, il parle des modernes super-marteaux hydrauliques employés au déroctage.

summary

Full section excavation of tunnels and rock drilling

G. Vié, mining engineer

There is a continuous increase in the size and importance of tunnels made in connection with public works, such as motor roads, and water supply systems, and also in other fields of engineering.

The author reviews the new machinery now being used to excavate full section tunnels. He studies the various types of Jumbo machinery, helicoidal screw drilling equipment, Tunnelers, and similar devices, and their suitability in various types of rock. A description is given of projects where such equipment has been utilized, and the results are evaluated.

Finally, the article deals with modern type hydraulic breaking super hammers, used in rock drilling.

zusammenfassung

Tunnelvollaushub und Felsbohrung

G. Vié, Bergbauingenieur

Sowohl im öffentlichen Bauwesen (Autobahnen, Wasserleitungen u.s.w.) als auch auf den übrigen Gebieten des Ingenieurwesens werden die Tunnel immer zahlreicher und gewinnen immer mehr an Bedeutung.

Der Autor bespricht die neuen Maschinen, die heute beim Vollaushub von Tunneln eingesetzt werden, und untersucht die Eigenschaften der verschiedenen Typen von «Jumbos», Schraubenbohrer und «Tunnelers» auf ihre Verwendungsfähigkeit bei verschiedenen Böden hin. Er beschreibt verschiedenen Bauarbeiten, die mit diesen Maschinen durchgeführt wurden, und analysiert die dabei erzielten Resultate.

Abschliessend beschäftigt sich der Artikel mit den modernen hydraulischen Aufbruchhämmer, die bei der Felsbohrung eingesetzt werden.