

La Ingeniería De Túneles: Conceptos Y Situación Actual en el Perú



Ronny Johan Bejar Rojas - rbejar@pucp.pe
Joel Arturo Mendoza Loayza - joel.mendoza@pucp.pe
Alumnos PUCP

La ingeniería de túneles es una rama de la Ingeniería Civil que fue desarrollada desde la Prehistoria. En el principio, los túneles se excavaban con ayuda del fuego y se utilizaban como refugio. Ya en la Edad Antigua, estos servían como rutas de escape o vías secretas para llegar a lugares rituales o catacumbas, y además se utilizaron para el riego y el desagüe. En el Renacimiento, luego de un periodo de escasa innovación en cuanto a la ingeniería de túneles, se retomó el diseño y la construcción de este tipo de obras, en particular para la distribución de agua. Luego de la Revolución industrial y la creación de los ferrocarriles, los túneles empezaron a ser construidos para facilitar el tránsito de estos, pues permitían sortear obstáculos y reducir la distancia que se debía recorrer para llegar de un punto a otro (Alonso, 2002). Es en esta etapa que se tuvo que mejorar los procesos de construcción de túneles, debido a las distintas condiciones de terreno a las que se enfrentaban (un ejemplo es la construcción del túnel bajo el río Támesis en Londres) y la longitud de túnel que se debía excavar como en el caso de la construcción del túnel del San Gotardo, el cual tiene 52 km (Navarro et al., 2011a). Por último, el auge del uso del automóvil generó la necesidad de implementar túneles en las carreteras, lo cual también promovió la mejora de los métodos constructivos.

A lo largo de la Historia, el uso de túneles con diversos propósitos (hidráulico, de transporte) se ha intensificado en todo el mundo. Por ende, actualmente, como parte de la formación básica de cualquier ingeniero civil, es necesario comprender los conceptos en que se basa la construcción de este tipo de infraestructura. Los factores que contribuyeron al desarrollo de la ingeniería de túneles fueron los avances en distintas disciplinas de la Geotecnia y su aplicación a la ingeniería práctica. En lo que se refiere a la mecánica de suelos, en el siglo XVII se construyó el túnel bajo el río Támesis, en un terreno constituido mayormente por estratos arcillosos característicos de la zona. Debido a las propiedades del suelo, fue necesario utilizar un método constructivo distinto, el cual se denominó "escudo". No fue sino hasta el siglo XX cuando Terzaghi estudió el arqueo de los suelos, lo cual resultó en una teoría fundamental para el entendimiento de los efectos de las presiones que genera el terreno debido a excavaciones profundas, vital para la construcción de túneles.

Terzaghi incluso planteó, durante la construcción de un túnel en Chicago, la expresión de factor de seguridad en el frente de excavación, la cual, después de reformulaciones hechas por varios investigadores alrededor del mundo, como Broms (1967) y Tamez (1982), es crucial en la práctica actual de determinar el proceso constructivo ideal para un túnel según el tipo de suelo y para verificar si el método utilizado es el correcto (Tamez, 1997). En cuanto a la mecánica de rocas, desde los fines del siglo XIX se han realizado esfuerzos orientados a entender el comportamiento y características de los macizos rocosos.

Por ejemplo, en 1879, Ritter desarrolló el primer enfoque empírico para el sostenimiento de túneles a partir de cavernas y obras subterráneas existentes. Muchos años más tarde, Karl Terzaghi elaboró una clasificación de rocas para el sostenimiento con elementos metálicos (cimbras). Esta categorización tenía 9 tipos de roca: dura y masiva, dura pero estratificada, masiva ligeramente fisurada, medianamente fractura en bloques abiertos, muy fracturada en bloques y fracturas abiertas, totalmente triturada, roca comprimida a profundidad moderada, roca comprimida a gran profundidad y roca expansiva. En los siguientes años varios personajes estudiaron aspectos relacionados a tiempo de auto sostenimiento, parámetros de resistencia y calidad de macizo rocoso. Autores como Barton (1974), Bieniawsky (1973), Hoek (1994) introdujeron conceptos como el Índice de Calidad Tunelera (Q), la Clasificación Geomecánica o la Valoración del Macizo Rocosos (RMR), y el Índice de Resistencia Geológica (GSI), respectivamente.

Una vez obtenido el comportamiento del suelo y decidido el procedimiento de excavación, se procede a escoger el modo de sostenimiento, para lo cual existen varias opciones. En primer lugar se encuentra el túnel autosoportable, el cual no necesita ningún sostenimiento adicional, común en las cavernas y túneles en roca de buena calidad. En segundo lugar, desde el descubrimiento del material, se puede utilizar el concreto lanzado como medio de sostenimiento. Actualmente, el desarrollo de prefabricados ha ocasionado el auge de las dovelas. Usualmente, también se usa anclajes en el terreno para mejorar las propiedades del medio alrededor del túnel y ayudar al sostenimiento. Es común el uso de revestimientos mixtos, que combinan dovelas y concreto lanzado, o acero con concreto lanzado, para mejorar las respuestas del revestimiento frente al cambio de presiones del terreno. Hasta mediados del siglo XX, la excavación de túneles se realizaba manualmente; sin embargo, hoy los métodos de excavación más utilizados son la perforación y la voladura, mediante mator puntual (rozadoras), y máquinas tuneladoras como TBM (Tunnel Boring Machine) y EPBs (Earth Pressure Balance).

El ciclo básico de la excavación mediante perforación y voladura consta de los siguientes procesos: replanteo del esquema de tiro, perforación de taladros, carga con explosivos, voladura y ventilación, evacuación de desmonte, y saneo del frente, bóveda y hastiales. Generalmente, para obras de longitudes reducidas se utiliza este sistema, por la baja inversión que requiere en comparación de las excavaciones con tuneladoras y rozadoras. Además, a diferencia de los demás métodos, el sistema es aplicable a rocas poco resistentes y a rocas muy duras. Los taladros son ejecutados con una Jumbo, que además de perforar el frente puede utilizarse para ejecutar los taladros para el sostenimiento. Estas máquinas, al estar montadas en un chasis con neumáticos, poseen la capacidad de desplazarse libremente. Sin embargo, las voladuras no son muy recomendables en obras urbanas por las vibraciones que transmiten a las edificaciones e infraestructura cercanas por el excesivo ruido que generan y por el lanzamiento de fragmentos de roca a gran velocidad, lo cual puede afectar a las instalaciones del túnel; por la generación de gases y polvo, que requiere de tiempos muertos de ventilación; y la degradación de la calidad de roca (Dinis da Gama, 1999). En el Perú se empleó el método en algunos proyectos como en el Túnel Vial Punta Olímpica (Áncash) y en el Túnel Veneno del proyecto Irrigación Olmos (Lambayeque).

Las rozadoras comenzaron a utilizarse en obras subterráneas entre los años 60 y 70, como respuesta a la necesidad de obtener mayor eficacia en la construcción de túneles, realizar distintas geometrías de sección y economizar en las excavaciones de roca dura, entre otras (Gehring et al, 1999). Actualmente, estas máquinas son utilizadas para excavar roca medianamente blanda y en obras de longitudes cortas, menores a 2 km. Los trabajos se llevan a cabo utilizando elementos de corte acoplados a una cabeza giratoria que va montada en un brazo articulado. Este sistema es recomendable, ya que permite realizar excavaciones parciales, es decir, fracciones de sección completa.

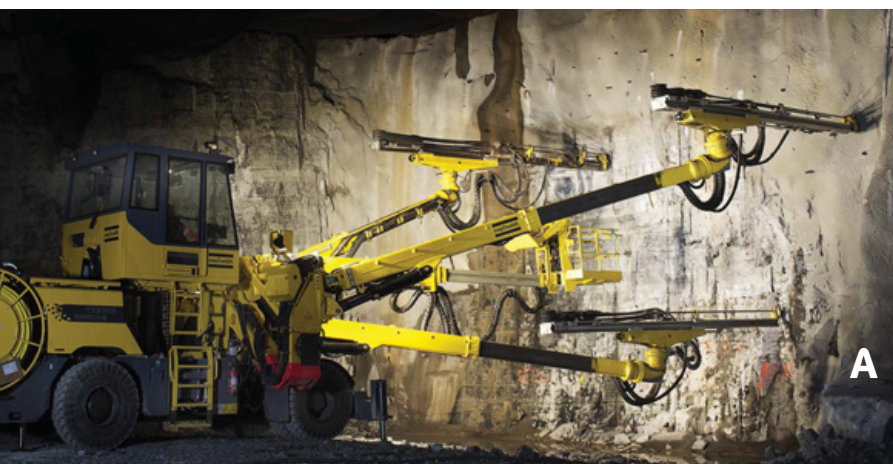


FIG. A . JUMBO, MÁQUINA PERFORADORA

FIG. B . PORTAL TÚNEL





TBM (Tunnel Boring Machine) empezaron a utilizarse a partir de 1954, después de que se demostró que era posible excavar mecánicamente en roca dura.

Además, el costo es menor en relación al uso de tuneladoras, la sobre excavación es mínima y se evitan las vibraciones generadas por el uso de explosivos. Algunos proyectos en los que se empleó este tipo de equipos son el Metro de Bilbao (España), la Autopista de Döggingen (Alemania) y el Nuevo Túnel Ferroviario del Sur en Sydney (Australia) (Gehring et al, 1999).

Las TBMs empezaron a utilizarse a partir de 1954, después de que se demostró que era posible excavar mecánicamente en roca dura. Estas máquinas poseen un cabezal de corte conformado por discos que realizan la excavación mediante rotación y aplicación de empujes contra el terreno. Por otro lado, para suelos blandos se utiliza las EPBs, debido a su accionar diferente (rotación y aplicación de fuerzas cortantes mediante uñas). Hoy en día, se calcula que en el mundo más del 40% de proyectos de túneles en roca dura se ejecutan con TBM's. No obstante, estos equipos también son utilizados en suelos duros, especialmente en proyectos de metros en las grandes ciudades. Los beneficios de este método son que tiene mayor rendimiento, mayor facilidad de automatización y menores requerimientos de ventilación, y que deja una superficie más lisa, deteriora menos la roca y ofrece mejores condiciones de seguridad (Navarro et al, 2011) (Mendaña, 2011).

Entre las principales desventajas que presenta se encuentran el alto costo de las tuneladoras, los radios de curvaturas elevados, la imposibilidad de ejecutar cavernas o galerías de reconocimientos, y el hecho de que la pendiente del túnel debe ser tal que permita el desplazamiento de trenes que evacúen los escombros. Algunos ejemplos de túneles en el Perú en los que se haya empleado TBMs son el Proyecto Trasvase Olmos (Lambayeque) y el túnel de aducción del Proyecto Hidroeléctrico de Yuncan (Cerro de Pasco). El New Austrian Tunneling Method (NATM), la filosofía con mayor utilidad en la actualidad para la construcción de túneles en roca, indica que la roca debe ser utilizada como elemento auto resistente de las cargas que se originan durante la excavación; para lograrlo, su resistencia debe conservarse: debe ser dañada lo menos posible. A continuación, para evitar pérdidas de presión por confinamiento en las paredes del túnel se debe aplicar un primer sostenimiento. El tiempo de instalación de este debe ser el

adecuado con el objetivo de reducir las deformaciones. Asimismo, las longitudes de túnel sin revestimiento deben ser mínimas y la medición de convergencias (deformaciones) debe de ser continua (Navarro et al, 2011).

Como se mencionó, los túneles inicialmente fueron usados para transportar y drenar agua, como canales. En la actualidad, el uso de los túneles es muy común en los proyectos hidroeléctricos, para la conducción del agua desde el embalse hacia la chimenea de equilibrio y tubería forzada para luego llegar a la central hidroeléctrica. En muchos proyectos en el Perú, se observa este uso de los túneles: en la central hidroeléctrica de Santa Teresa, Chaglla, Yuncan, entre otras. Existen muchos casos de túneles construidos en la Antigüedad que se usaron para la conducción de agua, como los que Eupalinos de Megara edificó en Grecia (530 a.C.), y otros realizados durante la Edad Moderna, como el túnel de la Mina Darocado, construido en 1555. (Alonso, 2002). Otro gran uso para los túneles es el drenaje de agua de entornos urbanos, como los usados en Ciudad de México. El primero en ser construido fue el Túnel Emisor Central, que se empezó a edificar en 1974. Este túnel tuvo gran importancia, ya que durante varios años fue el gran desagüe del Distrito Federal. Conforme aumentó la densidad poblacional de la capital mexicana, además del problema de asentamiento en diversas tuberías de desagües, se proyectó la construcción de nuevos túneles para los desagües de la ciudad, los cuales aún están en construcción en la actualidad. Estos son el Túnel Emisor Oriente (TEO) y el Túnel Emisor Poniente (TEP), túneles de gran envergadura, con alrededor de 60 km de longitud. (El Universal, 2013).

Al igual que en la especialidad de Hidráulica, la construcción de túneles en los distintos campos de la Ingeniería de Transportes fue muy importantes. Se piensa que el primer túnel vial fue construido en 2015 a.C. en Babilonia, y su funcionalidad era el tránsito directo del rey desde el templo hasta el palacio (Romaña, 1999). A lo largo de la Historia se han construido muchos más, pues, a pesar de requerir gran inversión monetaria y de tiempo, estos son la mejor solución cuando se tienen que realizar grandes cortes de taludes para continuar con el trazado de carreteras y vías.

Permiten reducir los tiempos de viaje, disminuyen los impactos visual y ambiental, e inducen a un flujo continuo de tráfico. Estos túneles requieren de instalaciones auxiliares como iluminación, ventilación y servicios contra incendios para garantizar la seguridad de sus usuarios.

Por otro lado, con el surgimiento del ferrocarril en el siglo XIX se impulsó la construcción de túneles metropolitanos. Fue así que en 1863 se inauguró el Metro de Londres (Inglaterra). En los siguientes años, se construyeron líneas de metro subterráneo en las ciudades principales de países como Estados Unidos, Francia, Alemania, Grecia, España y Argentina.

Hoy en día "lo valioso del suelo en una gran ciudad, ya no solo a nivel residencial sino de equipamientos, ocio, etc., hace que se lleve al ámbito subterráneo aquellas actividades o servicios que chocan con los usos prioritarios de la superficie" (Trabada, 2011). Por lo tanto, los proyectos de metros, en su gran mayoría, tienden a ser por debajo de la superficie. Este tipo de proyectos es de gran complejidad, debido a la dificultad de sostenimiento de las excavaciones por el tipo de terreno (aluvial y coluvial) en el que se asientan las ciudades. Los asentamientos generados en las edificaciones deberían ser mínimas, lo cual no siempre es así. Del mismo modo, su complejidad es evidente por las interferencias con redes de servicio y suministro, además del hecho de que generan ruido y vibraciones, y en algunos casos podrían afectar el patrimonio histórico y paisajístico.

Si bien es cierto que en el Perú, en los últimos años, se han desarrollado algunos proyectos de túneles hidráulicos y viales, en comparación con otros países de Hispanoamérica aún hace falta realizar mejoras sustanciales. En el año 2009, Colombia, un país con una geografía y una geología parecida a las nuestras, tenía 25 km de túneles viales y en los próximos años se ha proyectado superar los 80 km, lo cual la convierte en una potencia latinoamericana cuando de la construcción de túneles carreteros se trata. Perú, entre túneles construidos y en construcción en los últimos 10 años, no supera los 5 km de túneles dedicados al transporte. Por otro lado, en el estado de São Paulo (Brasil), existen proyectos para ampliar 65 km de la red de líneas de metro entre los años 2012 y 2017, en su gran mayoría subterráneamente. En el caso de Lima, aún no se cuenta ni con medio metro de túnel metropolitano.

Algunos proyectos o aspiraciones de obras subterráneas en el país son la construcción de más líneas del Metro de Lima, y 15 km de túnel vial en la región Cusco, para unir las provincias de La Convención y Cusco. Asimismo, todas las carreteras del oriente con dirección la costa peruana tienen que atravesar la cordillera de los Andes, por lo que alcanzan alturas que superan los 3500 msnm y recorren laderas muy accidentadas. En estas carreteras podrían ubicarse puntos estratégicos para el trazado de ejes de

túneles, con el objetivo de reducir el número de víctimas por accidentes y tiempos de viajes.

Por lo expuesto anteriormente y por la necesidad de mayor infraestructura subterránea en nuestro país, una de las maneras de incentivar el interés en este tipo de proyectos en los estudiantes de Ingeniería Civil, podría ser incluir en el currículo cursos como Ingeniería de Túneles o Diseño de Obras Subterráneas, a nivel de pregrado. Como se conoce, este tipo de cursos exige cierto conocimiento de mecánica de suelos y rocas, así como de los distintos tipos de sostenimiento y procedimientos constructivos anteriormente mencionados. Actualmente, en las principales universidades del país, no existen este tipo de cursos; por ende, no se tiene un conocimiento técnico claro sobre este tipo de estructuras. Es por ello que el conocimiento adquirido, únicamente, se debe a la experiencia nacional e internacional de ingenieros que trabajaron en la construcción de túneles (sostenimiento y proceso constructivo).

Por consiguiente, al no existir profesionales especializados, no se plantean grandes proyectos de túneles a nivel nacional como sucede en los casos de Colombia y Brasil, lo que lleva a plantear las siguientes preguntas: si se implementan cursos relacionados a la Ingeniería de Túneles en los planes de estudios, ¿surgirán los especialistas necesarios para diseñar estas estructuras? ¿Será suficiente para que estos sean considerados como una posible solución a ciertas carencias del país?



BIBLIOGRAFÍA:

- A evolução das obras do metrô/ CPTM. (2012). Revisado el 5 de abril, 2015. De <http://www.terra.com.br/noticias/infograficos/metro-novas-estacoes/>
- Alonso, E. (2002). Apuntes de la asignatura de Túneles. Teoría 1ª Parte. UPC, ETSECCPB.
- Asociación Colombiana de Túneles y Obras Subterráneas. (Octubre de 2009). Túneles para el sector de la infraestructura. *Infraestructura & Desarrollo*, 32, 12-14.
- Dávila, H. (Octubre 2009). Vías y túneles van de la mano. *Infraestructura & Desarrollo*, 32, 15-16.
- Diniz da Gama, C. (1999). Evaluación de los daños al macizo rocoso provocados por las voladuras en túneles. En C. López (Ed.), *Ingeo TÚNELES* (1st ed., Vol. 2, pp. 231-249). Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A.
- El Universal. (2013). Túnel Emisor Oriente, la obra más grande del mundo. 10 de abril de 2015, de El Universal. Sitio web: <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad-metropoli/2013/tunel-oriente-grande-obra-940174.html>
- Fernández, E., & Fernández, C. (2011). Excavación con Tuneladoras. En C. López (Ed.), *Manual de túneles y obras subterráneas* (1st ed., Vol. 1, pp. 567-616). Madrid: E.T.S.T Minas-Universidad Politécnica de Madrid.
- Gehring, K. (1999). Rozadoras para la excavación de túneles. Principios de operación, aplicaciones y necesidades operativas. En C. López (Ed.), *Ingeo TÚNELES* (1st ed., Vol. 2, pp. 109-141). Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A.
- López, C., & García, P. (2011a). Excavación con Rozadoras. En C. López (Ed.), *Manual de túneles y obras subterráneas* (1st ed., Vol. 1, pp. 525-566). Madrid: E.T.S.T Minas-Universidad Politécnica de Madrid.