

ANEJO 1: OBRAS SUBTERRANEAS DESTACABLES

En este anejo se describen en detalle algunas de las obras que por su innovación, volumen, singularidad o simplemente cercanía merecen un desarrollo descriptivo que sirve para conocer la tendencia de las obras subterráneas que utilizan tuneladora en su ejecución.

1. TÚNEL DE HSUEHSHAN

El túnel de Sheishan forma parte de los trabajos de la línea ferroviaria Taipei-Ilan y se localiza al nor-este de Taiwán, uniendo las poblaciones de Toucheng y Pinglin. Tiene una longitud de 12,9 Km. y consta de dos túneles idénticos, como se muestra en la fotografía 1 de 12,9 m de longitud con un diámetro de perforación de 11,8 m y una sección típica de 109 m². La distancia entre los ejes de las galerías va de 40 m, en las zonas más cercanas a las bocas, hasta los 60 metros en las zonas de máxima cobertura de tierras; el gradiente del trazado es de 1,254% ascendente. Previamente a la construcción del túnel se excavó una galería de reconocimiento de 4,8 m de diámetro situada 5 m por debajo del punto medio entre los ejes de ambos túneles.



Fotografía 1.- Túnel de Hsuehshan

Debido a la longitud del túnel se han proyectado 28 conexiones a pie entre las dos galerías y 12 estaciones de ventilación con 3 tubos verticales que van desde la parte central entre las dos galerías hasta la superficie. La excavación del túnel se proyecta desde la boca este para reducir al mínimo la afección sobre el acuífero Feitsui que abastece el área Metropolitana de Taipei.

Geológicamente, la zona se compone de materiales sedimentarios, de edad terciaria, ligeramente metamórficos y altamente fracturados con gran presencia de fallas que contienen areniscas de alta dureza (Areniscas de Szeleng) y abrasividad en la parte este y areniscas y limolitas endurecidas en la parte oeste. El túnel pasa a través de seis grandes fallas así como numerosas zonas de cizalla entre ellas; además es conocida la intensa facturación de las areniscas de Szeleng. Éstas, además, pueden convertirse en una buena reserva de aguas subterráneas que se convierten en un obstáculo para la excavación, provocando importantes filtraciones instantáneas a medida que se excava. El caudal de infiltración máximo registrado es de 750 l/s.

Para la elección del método de excavación, se tuvieron en cuenta diversos factores:

- Los 10 Km. al oeste del túnel se encuentran dentro de la cuenca del Acuífero de Fetsui que abastece el área Metropolitana de Taipei y se recomienda minimizar las actividades de excavación en esta zona.
- En el caso de adoptar un método de excavación tradicional, sería necesario la construcción de un túnel de acceso de unos 2 Km. de longitud en la parte central para la evacuación de los materiales y el agua así como para poder garantizar una correcta ventilación.
- Con un método de excavación tradicional se calcula que la duración de la obra habría sido de aproximadamente 20 años.
- Una parte de la longitud de 10 Km. se consideraba favorable para la ejecución de la obra mediante el uso de tuneladora. Los aproximadamente 3 Km. restantes se podían construir también mediante este método si se tomaban las medidas necesarias.
- La excavación mecánica de los túneles de cierta longitud, implica siempre una mayor facilidad en la programación de los trabajos y actualmente, se considera que son estos métodos a los que se tiende. La adopción de este método se consideró un primer paso para la adquisición de experiencia en estas técnicas en Taiwán.

Se utilizaron dos tuneladoras diferentes para realizar la galería de reconocimiento y el túnel definitivo. La tuneladora utilizada para la ejecución de la galería fue una tuneladora de doble escudo con un diámetro de 4.8 m fabricada por la casa Robbins que consta de 34 cortadores. La tuneladora utilizada para la excavación definitiva, incorpora, en cambio, 80 cortadores y es de doble escudo presentando un diámetro de 11,8 m. Ésta última ha sido fabricada por la casa alemana Wirth. El sostenimiento primario aplicado consiste en dovelas de hormigón prefabricadas de 18 cm. para el caso de la galería de reconocimiento y de 35 cm. Para el túnel definitivo. Este hormigón presenta resistencias a compresión de 350 Kg./cm². En el caso del túnel definitivo, también se proyectó un revestimiento de hormigón de 30 cm. de grueso con una membrana impermeable.

En un principio, la finalización del túnel, que comenzó en 1991, estaba prevista para 1997 pero una serie de problemas surgidos durante el proceso de excavación han provocado que su conclusión haya llegado 7 años después. A continuación se describen algunos de los factores que han influido en esta distorsión tan grave del plazo:

- Debido a la alta densidad de fracturación de las Areniscas de Szeleng además de un mala disposición del sostenimiento de refuerzo, las vibraciones durante la perforación además de la insuficiente capacidad de perforación de la máquina, la excavación se encontraba bloqueada la mayor parte del tiempo lo que conllevaba que no se pudiese llegar a la distancia de perforación propuesta inicialmente. Para solucionar este problema se incorporó una nueva máquina perforadora con una mayor resistencia a torsión y capacidad de empuje.
- La necesidad de construcción de túneles de desviación para poder limpiar el frente y liberar así los cortadores en las zonas altamente fracturadas donde la

tuneladora estuvo bloqueada. La construcción de todos estos túneles de desviación (*bypass*) ha retrasado considerablemente el final de las obras.

- Se localizaron algunas zonas en el macizo rocoso que acumulaban grandes bolsas de agua a mucha presión debido a la actuación como barreras de unidades arcillosas. Para poder excavar en estas zonas se ha adoptó un sistema de actuaciones combinando la excavación mecánica con métodos de excavación tradicionales.
- Debido a la alta abrasividad y dureza de las Areniscas de Szeleng, los cortadores se consumían más rápidamente de lo previsto y los frecuentes cambios de cortadores que conllevaban hicieron que la ejecución de la obra se alargase.
- En diversas ocasiones los comportamientos mecánicos irregulares de la tuneladora provocaron importantes demoras en el proceso de excavación. Estas irregularidades se iban solucionando a medida que se conocían las causas.

2. TÚNEL D'ABDALAJIS

La obra pertenece al trazado de la línea del AVE entre Córdoba y Málaga, diseñada con el objetivo de conducir el turismo de la Costa del Sol y descongestionar el aeropuerto de Málaga. La excavación se encuentra situada en la población de Alora, a 40 Km. al nor-este de Málaga y constará de dos túneles idénticos paralelos de 7,1 Km. de longitud.

El cliente de la obra es el GIF (*Gestión de Infraestructuras Ferroviarias*), responsable de la construcción y administración de la infraestructura, hecho que incluye el mantenimiento de la línea ferroviaria, la circulación de los convoys y la seguridad a las instalaciones. Se han constituido dos empresas para llevar a cabo las dos excavaciones; la *UTE Abdalajis* i la *UTE Abdalajis Oeste*. La primera de ellas está formada por Dragados (50%), TECSA (30%), SELI (10%) i Jaeger (10%) y se encargan de la construcción del túnel Este con un contrato de 117,5 m€. La *UTE Abdalajis Oeste*, formada por SACYR y su compañía asociada en Portugal Somague SGPS, se encargan de la construcción del túnel oeste con un precio de contrato de 122,8 m€. Se potencia de esta manera un cierto sentido competitivo entre los dos grupos, utilizando tuneladoras idénticas con prácticamente la misma fecha de inicio para ambas excavaciones como se puede ver en la fotografía 2.



Fotografía 2.- *Boca sur de los túneles con las tuneladoras en su fase inicial.*

Los túneles atraviesan la *Sierra del Valle* de Abdalajis, dentro el parque nacional de *El Chorro*. Las montañas están constituidas fundamentalmente por limonitas pero las excavaciones atraviesan también margas, cuarcitas, conglomerados y areniscas. Las resistencias a compresión esperadas para las limonitas y areniscas se encuentran entre 84 i 100 MPa. Además, se cruzan también más de veinte zonas con planos de falla o áreas fracturadas, por lo que se ha optado por una tuneladora de doble escudo. Por lo referente a la presión hidrostática, se estima que en el punto de máxima cobertura, unos 600 m. por debajo de la superficie, presentará presiones de más de 20 bar.

Las oficinas técnicas y de administración se encuentran situadas en la boca sur, por lo que se comienza la excavación en esta boca (fotografía 3). Fue necesario realizar trabajos extraordinarios debido a las inestabilidades generadas por las abundantes lluvias que hicieron a su vez que el riesgo de deslizamientos fuese más elevado y el sostenimiento mediante paraguas, previsto inicialmente, no fuese suficiente.



Fotografía 3.- Vista detallada de las tuneladoras en su fase inicial y de la boca sur.

En lo referente a la tuneladora, las especificaciones del contrato hablaban de una tuneladora de un solo escudo pero fue la *UTE Abdalajis* quien propuso una máquina de doble escudo, consideración que fue aceptada por el cliente e incluida en las especificaciones del segundo túnel. Esta UTE escogió una tuneladora Mitsubishi diseñada por Robbins mientras que la *UTE Abdalajis Oeste* encargó una máquina idéntica. La casa Mitsubishi acordó con la empresa Duro Felguera la fabricación de las tuneladoras en el estado español bajo la supervisión de sus técnicos tanto en la fabricación como en el montaje a en la obra de la tuneladora. Las tuneladoras, que constan de seis secciones, disponen de un diámetro de corte de 10 metros, con 64 cortadores de 432 mm. y cinco cortadores de gálibo que permiten un margen de 20 cm. de ampliación del diámetro de perforación. La distancia media entre cortadores es de 82mm y el empuje máximo recomendado para cada cortador es de 267 kN. Según Robbins, el avance máximo previsto es de 3,75 m/h, con un máximo de 6 m/h.

Los sistemas de guía para las dos máquinas están referenciados al sistema de coordenadas global ZED 261, y se gestionan mediante una estación total (Leica TPS 1100 Series). El principio de la guía se basa en un haz de láser emitido por la estación total, un inclinómetro dual (dos ejes) y un conjunto de puntos que definen el eje del túnel en un sistema 3D llamado DTA (*Designed Tunnel Axis*). El sistema puede ser interrogado en cualquier momento sobre los ángulos verticales y horizontales

asociados al láser y es capaz de calcular la posición y altura de la máquina relativa al eje del túnel del proyecto.

El sostenimiento consiste en una dovela prefabricada de hormigón constituida por 7 segmentos que se transportan al frente con un sistema de raíles. Puede verse en la fotografía 4 la zona de acopio de dovelas. En el túnel oeste, la planta de SACYR se ha construido a 15 Km. de la zona mientras que en el caso de Dragados, se ha subcontratado a la empresa Drace, ubicada en Algeciras, a unos 200 Km. de la zona.



Fotografía 4.- Vista de la zona de acopio de dovelas

Los sistemas de transporte de runa escogidos por ambas UTEs han sido similares, con capacidad de evacuar 1500 toneladas de material cada hora.

Los rendimientos en el inicio de la excavación fueron bastante buenos, llegando a excavar hasta a 1,5 Km. en 6 meses, pero a partir del P.K. 806+500 comienzan a bajar a causa, fundamentalmente, de la aparición de importantes intrusiones de metano, provocando que la tuneladora tuviese que adaptarse a estas condiciones, que hacen que la presión en el frente llegue a ser de hasta 11 bar. empeorando la seguridad. Debido a las paradas y arrancadas de la máquina la eficiencia de los cortadores disminuye considerablemente.

3. TÚNELES DE GUADARRAMA

Los túneles de Guadarrama forman parte de las infraestructuras correspondientes a la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid con un trazado que va desde el término municipal de Miraflores de la Sierra hasta cerca de Segovia. Constan de 56,754 Km. de longitud repartidos en dos túneles paralelos de 28,377 Km. Cada uno, con una separación entre ejes de 30 m. Estos túneles se encuentran conectados entre sí por galerías de emergencia situadas cada 250 m, que se perforan durante el proceso de construcción cada 1000 m.

La perforación de los túneles comienza en fechas diferentes en cada uno de los frentes. El primero comienza el 28 de septiembre de 2002, el 6 de enero de 2003 comienza el segundo, el 4 de diciembre de 2002 el tercero y el cuarto se inicia el 9 de octubre de 2002. El importe de adjudicación de la obra entera, es decir para los cuatro frentes, es de 1.128.833.191,38 €, cofinanciado en un 73,3% por el Fondo de Cohesión de la Unión Europea.

Desde el lado de Madrid, los túneles arrancan desde una cota de 998 m y llegan a una cota máxima de 1200 m con una pendiente del 1,5% y a partir de este punto, bajan con

una pendiente del 0,9% hasta una cota de 1114 m en su salida en Segovia. El recubrimiento máximo, bajo el pico de Peñalara, es de 992 m. El macizo de Guadarrama es una zona protegida por lo que quedaron descartados los ataques intermedios y se tuvo que ejecutar una excavación con tuneladora.

En lo que a la geología se refiere, el macizo se compone fundamentalmente de rocas ígneas y metamórficas, predominantemente gneis seguidos de granitos. Geotécnicamente, el macizo se considera de calidad aceptable, a pesar de que las fallas localizadas a lo largo del trazado tienen un efecto directo sobre el túnel, especialmente en las zonas con más sobrecarga en los extremos, donde también existen una serie de fracturas e intercalaciones de diques intrusivos.

Se escogieron cuatro tuneladoras (dos por cada tubo) construidas especialmente en función de las características del trazado y la geología de la zona. Las tuneladoras lograron unos rendimientos medios que rondan los 16 m/día y se han llegado a rendimientos de hasta 1000 m/mes. El diámetro de las tuneladoras es de nueve metros y medio y el cabezal perforador consta de 60 discos de acero de 17 pulgadas que actúan con una fuerza de 27 toneladas sobre la superficie a perforar. El material es recogido mediante 12 entradas y, mediante el movimiento giratorio, el escombros es transportado hacia arriba donde cae en la parte posterior del cabezal perforador, que lo deposita en la cinta transportadora. En la fotografía 5, mostrada a continuación, se puede ver la cinta transportadora de escombros.



Fotografía 5.- *Cinta transportadora de escombros.*

A medida que se excava se coloca el sostenimiento, que consiste en anillos de 7 dovelas prefabricadas de hormigón armado que incorporan una capa impermeabilizante que impide la entrada de agua de la montaña al túnel. Estas dovelas son construidas en las plantas existentes en las bocas. Para su fabricación se utiliza como áridos material proveniente de los escombros extraídos en la excavación. Después de la colocación de las dovelas, el diámetro queda en 8,5 m. La tuneladora perfora 1,67 m en 30 min. y mientras el escudo actúa como revestimiento provisional se coloca, en su parte posterior, el anillo de dovelas que será el revestimiento definitivo. Además, mientras se coloca el sostenimiento la máquina puede seguir avanzando gracias a la individualización de las dos partes que la forman. Una vez colocado el revestimiento, avanza la parte posterior de la máquina mediante el *regripping*. A pesar de todo los *Grippers* necesitan que la roca circundante actúe como soporte para que el escudo delantero se pueda abrir paso y este tipo de procesos individualizados entre el

escudo y el resto de la tuneladora sólo es posible en zonas geológicamente sencillas. En caso contrario, toda la máquina avanza como si se tratase de un escudo simple.

4. METRO DE TURÍN

Se trata de la primera fase de la Línea 1 del metro de Turín (gestionada por la *Metropolitana Automatica VAL di Torino*) entre las estaciones de *Collegno* y *Torino Puorta Nova*; el coste del proyecto es de 700 billones de liras (31 mUS\$) El cliente es la *SATTI (Società Torinese Trasporti Intercomunali Torino)*. Se trata de un tramo de línea de 9,6 Km. que funcionará bajo tierra en su totalidad y que comprende 15 estaciones de las cuales dos tendrán conexión con los ferrocarriles estatales.

La geología de la zona se distribuye en tres litologías diferentes en los 150 metros de profundidad por los que llega a discurrir el trazado del túnel:

- En la parte más superficial encontramos una unidad de entre 25 i 50 m de potencia de depósitos cuaternarios de origen fluvial-glacial formados por gravas, arenas y bolos en una matriz limosa.
- Depósitos del pleistoceno de origen lacustre y fluvio-lacustre compuestos de una matriz limo-arcillosa que engloba niveles arenosos y de graves.
- Depósitos marinos del Plioceno que constan de limos y arcillas, limos arenosos y arenas de tonalidad gris-azulada con fósiles.

El túnel estará perforado en excavación subterránea mayoritariamente, excepto en la parte inicial, donde se excava a cielo abierto. En los tramos subterráneos presentan diversas morfologías en línea recta o trazado curvas de radios grandes y pasan por debajo de líneas ferroviarias y algunos edificios importantes.

El túnel se realiza pues prácticamente en su totalidad en excavación a sección completa con tres tuneladoras. Cada máquina tiene un diámetro de 7.82 m y una longitud de 80 m. Los diez primeros metros están constituidos por el escudo, que engloba un cabezal de excavación (fotografía 6) que puede llegar a velocidades de avance de hasta 10 ó 12 m/día.



Fotografía 6.- Cabezal de excavación

La posición correcta de la tuneladora respecto del eje del túnel se verifica mediante un sistema vía satélite.

El escudo arrastra la infraestructura donde se sitúa la cinta transportadora para evacuar el material de excavación, así como el material de sostenimiento primario que se coloca al paso de esta.

5. LÍNEA 9 BARCELONA

La Línea 9 del Metro de Barcelona se comienza a construirse en junio de 2002 con un presupuesto inicial que ronda los 1700 millones de euros destinados a la excavación. La longitud de la línea será de 47 Km. y constará de 48 estaciones, las cuales podrán ser elevadas sobre un viaducto, construidas a cielo abierto, excavadas así como con diseños especiales. Gracias a esta nueva línea, se establecerá una comunicación con el metro al sur de la ciudad, pasando por el Prat de Llobregat y Hospitalet. Además, se mejoraran las comunicaciones con la red de transportes metropolitanos de las zonas residenciales al norte de la ciudad, como por ejemplo Santa Coloma.

Gran parte del trazado se excavará a sección completa con tuneladora. De los 38,3 Km. totales excavados con este método, 26,4 se construirán con un diámetro de 11,95 m y 11,9 con un diámetro de 9,4 m. También se excavará en mina así como a cielo abierto. El resto de la línea transcurrirá por un viaducto.

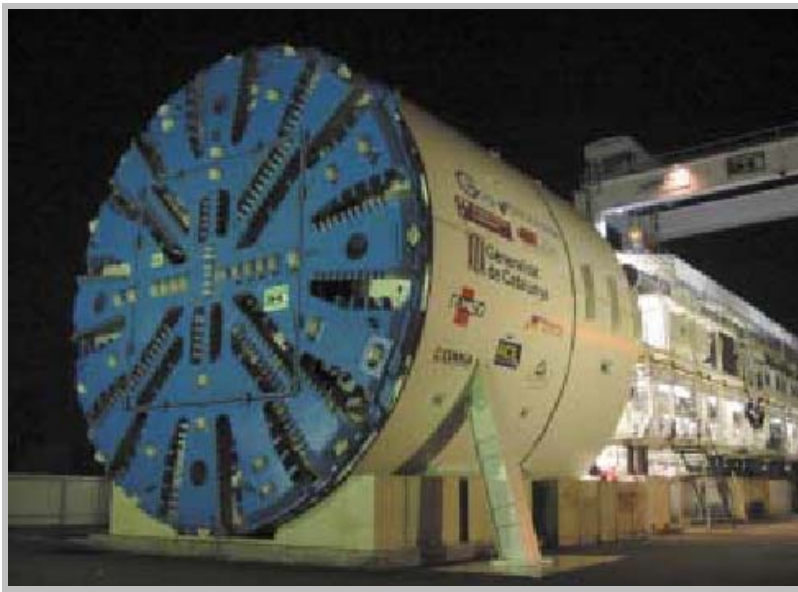
En lo referente a la geología de la zona, encontramos una gran heterogeneidad a lo largo del trazado. En la zona norte, a partir de la estación de Sagrera, nos encontramos con un substrato Micénico, formado por conglomerados de gravas con matriz arcillosa sobreconsolidada con paleocanales de edad cuaternaria. Estos materiales micénicos suelen estar envueltos por materiales graníticos. Después de pasar por una falla de superficie rugosa, se atraviesa el río Besós y se entra a la zona de su delta que se encuentra algunos metros sobre el nivel del mar. El Delta del Besós está formado por depósitos cuaternarios con capas limosas relativamente impermeables entre capas permeables o muy permeables, en determinadas zonas se encuentran zonas de gravas y arenas o de sauló, que conllevan una permeabilidad aún más elevada. La zona entre Gornal y Zona Universitaria, comienza dentro de la zona del delta del Llobregat, formada por capas estratificadas horizontalmente que pasan de gravas y arenas a arenas y limos y arcillas, para continuar por la zona de la formación del mioceno. En ambas zonas, se pueden encontrar intercalaciones de limolitas del Plioceno, y nos encontramos siempre por debajo del nivel freático, que puede llegar a cotas de altura considerable.

La excavación de la línea 9 será realizada fundamentalmente por tres grandes partes contratadas además de otras más pequeñas para obras menores. Se distinguen en primer lugar cuatro secciones en el trazado:

- Sección I: Del Aeropuerto al Parque Logístico (9,8 Km.)
- Sección II: De Zona Franca a Zona Universitaria (12,3 Km.)
- Sección III: De Zona Universitaria a la Sagrera (9,4 Km.)
- Sección IV: De la Sagrera a Badalona y Santa Coloma.

A lo largo de la Sección I se excavará un túnel doble 8,4 m de diámetro, con un diámetro de excavación de 9,4 m.

El segundo tramo comprende una parte importante de la Sección II y la totalidad de las secciones III i IV. Se excavará con un diámetro de 11,95 m y quedarán una galería de 10,9 m de diámetro. El tramo se repartirá en dos contratos con dos UTE diferentes. El primer de ellos comprende la parte excavada en materiales blandos situados dentro de la Sección II y la Sección IV y será excavada por la UTE Gorg, formada por Dragados, NESCO, COMSA, ACS y Sorigue, con un presupuesto de 350 millones de dólares. La segunda UTE, llamada UTE Línea 9 y formada por las empresas FCC, Copcisa, OHL, Ferrovial-Agroman y Copcisa, excavará con un presupuesto de 350 millones de dólares la parte restante de los tramos, excavados en suelos y roca.



Fotografía 7.- *Tuneladora UTE Gorg*

La primera tuneladora, mostrada en la fotografía 7, perteneciente a la UTE Gorg y construida por Herrenknecht, tiene 12.06 m y una longitud total de 140 m. Puede ejercer un empuje de 120 MN y una torsión de 38 MN. El escudo, que trabaja como presión de tierras, incorpora 42 discos cortadores y una serie de dientes de rozamiento. La tuneladora comienza su excavación en la estación de Gorg que la lleva, tras 4 Km., a la Sagrera donde tras ser transportada y montada de nuevo a la estación de Zona Franca excava 8 Km. en suelo hasta la estación de Zona Universitaria. Esta tuneladora de doble escudo puede excavar con el frente abierto en zonas con materiales rocosos y en modo cerrado en zonas con materiales de tipo suelo.

La segunda tuneladora, que se puede ver en la fotografía 8, construida por Wirth y NFM, se instala en la estación de Can Zam y excavará la sección de alineamiento, para ser desmontada y montada de nuevo en la estación de Zona Universitaria para excavar después hasta la estación de la Sagrera un tramo de 9,5 km. Esta tuneladora prevé unas velocidades de avance que rondan los 80 mm/min. Esta tuneladora presenta características muy similares a la anterior, con un diámetro de corte de 11,95 m, un empuje de 90 MN y una torsión de 29 MN. El escudo, incorpora 69 discos de corte y es de tipo dual, puede excavar en modo cerrado con presión de tierras o en abierto, en el caso de excavar en roca.



Fotografía 8.- Tuneladora UTE Línea 9

6. METRO DE VALENCIA (VENEZUELA)

Se trata de un tramo de la línea 1 del metro de Valencia (Venezuela) de 5 Km. de longitud. El cliente de la obra es la *Compañía Anónima Metro de Valencia (Valmetro)* de la cual el Ayuntamiento de la ciudad es el máximo accionista. La empresa encargada de la construcción es *Ghella Sogene C.A.* El sistema de transporte previsto es un metro ligero construido en vía exclusiva subterránea o elevada en función de las condiciones topográficas y demográficas existentes. El tramo en cuestión contempla la construcción de siete estaciones además de la estación *Monumental* ya construida.

La geología de la zona, que se encuentra en el llano del lago de Valencia, está constituida fundamentalmente por sedimentos cuaternarios de granulometría de fina a media que forman intercalaciones de arcillas y arcillas limosas con lentejones de arenas que van de arcillas a limosas y, esporádicamente, de arenas limpias. El nivel freático de los acuíferos superficiales existentes, que son recargados constantemente con las lluvias, se encuentra a profundidades de entre 3 y 8 metros. Geotécnicamente hablando, se ha considerado que el tipo de terreno presenta capacidades de sostenimiento propio limitadas o nulas y se descartaron posibles problemas de comportamiento pegajoso del terreno (*sticky behaviour*).

El sistema de excavación proyectado originalmente era el de un cajón ejecutado mediante la técnica de trinchera abierta, consistente en una excavación a cielo abierto para proceder al armado y vaciado de los muros laterales así como la posterior ejecución de la losa superior cerrando así el cajón. Se construía una estructura de 9 m de ancho y 4,7 m de altura; a partir de dos cuadrillas de trabajadores se preveía la construcción de 6 m lineales de muro diarios y 42 m de losa de suelo semanales. El grueso de los muros del túnel varía entre 55 y 80 cm. mientras que para la losa superior los gruesos varían entre 60 y 110 cm. En 6,5 meses se construyeron 1215 m. de túnel.

Es en este punto que se decidió cambiar el método de construcción, pasando a una excavación mecánica del túnel mediante la utilización de una máquina tuneladora. En el año 2002 fue adquirido un equipo de un solo escudo de 9,525 m. de diámetro, 130 m. de longitud y 1121 toneladas de peso. El equipo está diseñado para la excavación en terreno mixto a profundidades que oscilan entre los 7 y 15 metros, fabricado por la

casa Lovat. El rendimiento previsto para la tuneladora era de entre 15 i 20 m. diarios de túnel acabado. Se puede ver a continuación (fotografía 9) la máquina en cuestión.



Fotografía 9.- Escudo para terreno mixto.

El cabezal cortador de la tuneladora está preparado para trabajar con el frente cerrado y está equipada con un tornillo sin fin para la extracción del material. El frente incorpora también algunas oberturas regulables en función de las condiciones del terreno además de la posición respecto del nivel freático. El frente de la tuneladora incorpora 228 dientes de rastrillo y 88 escarificadores; adicionalmente se pueden añadir discos cortantes intercambiables para poder romper los bolos que eventualmente puedan aparecer en la obra a pesar de que no está previsto de encontrarlos.

El confinamiento del terreno se garantiza mediante el escudo de acero y en el frente por la presión ejercida por el cabezal de la tuneladora. La presión en la cola de la tuneladora se consigue mediante la inyección a presión de una mezcla de cemento que se ejecuta, al mismo tiempo que se avanza, a través de cada anillo de tal manera que se rellena el espacio vacío anular existente entre la parte externa del anillo de revestimiento y el perfil de excavación consiguiendo a su vez el confinamiento total del anillo de revestimiento.

El tramo a construir constaba de 4 Km. de longitud con un diámetro interior de 8,442 m y un diámetro exterior de 9,242 m. En cuanto al sostenimiento aplicado, se trata de dovelas de hormigón armado de 0,4 m de grueso y 1,5 m de longitud y su configuración era de 6 piezas además de otra de cierre para cada anillo del túnel.

En el primer tramo excavado con tuneladora, el control de las deformaciones no han resultado totalmente satisfactorios, registrándose unos asentamientos máximos del orden de los 9 cm. y generales del orden de 3 cm. por encima del eje del túnel. Se observó que estos asentamientos se iniciaban con el paso del frente, se incrementaban durante los 2-3 días posteriores a su paso y se estabilizaban a posteriori. Eso denota un buen control de la presión del frente, pero un mal control en la cola en el proceso de las inyecciones de relleno anular. En el segundo tramo, los resultados conseguidos mejoran respecto del primero, con unos asentamientos máximos del orden de los 6 cm., con valores frecuentes cercanos a los 2 cm. coincidiendo con el eje de la vía. En ningún caso existen estructuras superficiales o sub-superficiales que hayan sufrido

daños, incluyendo un gaseoducto de 30 cm. de diámetro transversal a la excavación y que se encontraba a una distancia de 3 m. de la clave del túnel.

7. METRO DE MILÁN

La ampliación de la línea 1 del metro de Milán comprende un tramo de 2,1 Km. que se divide en dos tramos; un primer tramo en territorio de Pero (1,1 Km.) y el otro en Rho (1 Km.). El tramo interfiere con un área intensamente urbanizada, con edificios residenciales así como de otras tipologías y también con la autopista de Milán a Turín. La excavación consiste en dos galerías de sentido simple, utilizando un escudo mecanizado de 6,60 m de diámetro.

La geología de la zona se compone fundamentalmente de una unidad de origen fluvio-glaciar caracterizada por un depósito de entre 50 y 60 m. de potencia que consta de gravas y arenas en una matriz limosa y donde se pueden encontrar, localmente, lentejones de arcillas. El substrato se encuentra a 250 m. de profundidad. En la fase de proyecto, fue llevada a cabo una campaña de reconocimientos con ensayos in situ y de laboratorio; la estratigrafía que se deduce de estas campañas evidencia la existencia de este depósito importante de gravas y arenas con continuidad interrumpida puntualmente por otros depósitos de materiales más finos (arenas limosas y limos). El nivel freático fue considerado a partir de una estimación en base a datos registrados y guardados con anterioridad y observaciones en 6 pozos existentes en la zona; se realizó una estimación del nivel a una altura entre 136 y 140 metros sobre el nivel del mar, presentando oscilaciones no del todo regulares con una tendencia al aumento en los últimos 3 años. Por otro lado, el valor de la permeabilidad se encuentra entre $2 \cdot 10^{-3}$ y $1 \cdot 10^{-2}$ cm. /s. El trazado se excava bajo una cobertura de tierras de entre 10 y 20 metros y con el nivel freático situado entre 0 y 12 metros sobre el eje del trazado.

El tramo excavado con tuneladora consta de una longitud de 1120 m. se comienza a excavar el 9 de febrero y se finaliza el 10 de septiembre de 2004 con un avance medio de 5 m/día, con un avance máximo diario de 16 m/día. No obstante, debido a problemas en el frente, se produjeron muchas paradas y si no se tienen en cuenta éstas, las velocidades de avance son de 10 m/día hasta la estación de Pero y cercana a los 14 m/día a partir de esta estación.

El escudo incorpora un sistema de registro continuo de los parámetros operacionales de la máquina, y éstos se han utilizado para encontrar correlaciones con el comportamiento tenso-deformacional del material excavado. Además es posible verificar, gracias a las correlaciones y sabiendo que la velocidad de avance es mayor en la parte final de la excavación del trazado, que la velocidad de avance va ligada especialmente a las condiciones de puesta a punto de la máquina y de los parámetros bajo los que opera y no tanto de las condiciones de contorno del terreno. En lo referente a los valores de los parámetros dinámicos (empuje y torsión) del escudo, éstos van más ligados a la cobertura de terreno sobre el eje de excavación.

8. METRO DE NÁPOLES

La extensión del metro de Nápoles transcurre por debajo del centro histórico de la ciudad, por lo que, se ha tenido muy en cuenta la exigencia de reducir al mínimo los asentamientos a nivel de los cimientos de los edificios. Una de las dificultades que

también se tuvo en cuenta es la de hacer frente a presiones hidrostáticas que deberán ser soportadas por los cortadores y que están próximas alrededor de 3 bars.

Se excavan dos túneles de una sola vía en sección completa mediante dos tuneladoras idénticas con un diámetro exterior de 6,74 m. Estas tuneladoras trabajan con presión de tierras pero también puede trabajar en modo abierto con presión de aire comprimido. Las dos tuneladoras excavarán a una distancia mínima entre ellas que ronda los 1000 m, por lo que una de las dos comienza la excavación más tarde.

En cuanto a la geología de la zona, cabe destacar en primer lugar la presencia de una primera capa de finos a 10 m. por debajo de la superficie formada por materiales antrópicos de la época romana. Por debajo de estos 10 primeros metros, encontramos una superposición de depósitos volcánicos formando una estructura caótica con una matriz de poca coherencia en la parte superior y cimentada a más profundidad, donde forma el *Neapolitan yellow tuff*. Esta formación de *tuff*, aporta una componente de dificultad y peligrosidad a la excavación debido a su estructura con numerosas grietas de orientación vertical, resultando una permeabilidad 100 veces más grande. En los primeros 900 m, donde el *tuff* se encuentra a más profundidad, el túnel se excava en una arena mono-granular de tamaño fino. El problema añadido especialmente en este primer tramo reside en el hecho de encontrarnos por debajo del nivel freático.

Para caracterizar geotécnicamente los materiales se han realizado ensayos in situ y al laboratorio sobre muestras de diferentes materiales. Se han realizado análisis de resistencia al corte, triaxiales en condiciones drenadas, determinación de porosidad y peso específico sobre muestras del *tuff* y otros ensayos in situ, como la permeabilidad de Lugeon. Además, conociendo el comportamiento de tipo elástico que presenta el *tuff* en las condiciones de tensión propias de la profundidad a la que se encuentra el túnel, se ha determinado el módulo elástico que se encuentra con valores entre los 1500 y 2000 MPa. El comportamiento de la arena se ha analizado mediante ensayos triaxiales, que han dado valores destacables del ángulo de fricción, alrededor de 40°.

La longitud total de los dos túneles excavados, es de 4000 m. y no se incluyen los 550 m. de excavación que comprenden las 5 estaciones. La primera parte de excavación, que se realiza en arenas y por debajo del nivel freático, se realizará teniendo en cuenta que el frente no presenta ningún tipo de estabilidad mientras que en la segunda parte el *tuff* hace que se tenga una cierta estabilidad en el frente, a pesar de todo se deberá tener en cuenta que las fracturas verticales pueden provocar importantes entradas de agua. Teniendo en cuenta estos condicionantes además de los parámetros del suelo, se opta por un escudo de presión de tierras con inyecciones de lechada de hormigón.

En cuanto a la cabeza de corte, en un principio se optó por no colocar discos de corte, dados los valores reducidos de la resistencia al corte de los materiales. Este hecho generó algunos problemas al encontrarse la máquina con arenas consolidadas previamente con jet grouting. En la segunda tuneladora, se incorporaron algunos discos además de los dientes de corte para evitar este hecho.

Como sostenimiento primario, se utilizan anillos de hormigón armado formados por 6 segmentos y una clave de 300 mm. de grueso. Estos anillos se colocan cada 1,20 m y se transportan mediante una vía. También mediante una vía, con una serie de trenes de 4 vagones como a máximo con 18 m³ de carga cada uno, se transporta el material de excavación.

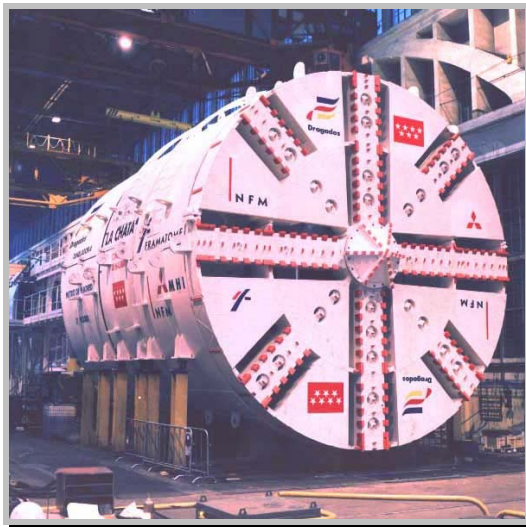
Como aspectos de diseño a tener en cuenta, se han considerado diversos factores. El primero de ellos es la predicción de los asentamientos en superficie y los posibles daños sobre las infraestructuras de la zona por lo que se han utilizado métodos empíricos de interacción que determinaban los valores de la influencia sobre las estructuras del túnel y entre las dos galerías excavadas. Se han tenido en cuenta en las condiciones de diseño, unas pérdidas de volumen del 0,5% y en el caso de condiciones accidentales, una pérdidas de volumen aproximadamente del 2%, considerando la no necesidad de protecciones sobre los edificios con los que el túnel presentará interacción. Para futuras previsiones durante el proceso de excavación se ha llevado a cabo todo un sistema de medida de parámetros como son el valor de la presión de tierras en el frente del túnel, el peso de suelo excavado en cada avance y los volúmenes además de la presión de la lechada inyectada. Finalmente, también se han previsto todo un sistema de lecturas mediante instrumentación del terreno, compuesta por extenso-inclinómetros, extensímetros incrementales, piezómetros, extensímetros dentro de los anillos de hormigón y vigilancia topográfica sobre puntos determinados. Con la instrumentación se quieren controlar parámetros como los asentamientos en superficie, las tensiones del suelo, los desplazamientos de los edificios, los niveles piezométricos de la zona y las tensiones soportadas por el sostenimiento.

En los primeros 1000 m., se han observado algunos fenómenos que han aportado información sobre las condiciones de excavación. Los asentamientos se encuentran alrededor de 10-12 mm. y no más de 15-18 mm., siendo coherente con los aspectos de diseño considerados. Los datos de excavación muestran que el hormigón inyectado se encontraba por encima de la cantidad estimada en el diseño, alrededor de un 20-40%. Los datos de producción registrados muestran que en los primeros dos meses, la velocidad de excavación no sobrepasaba los 50 m/mes montando diariamente 3 ó 4 anillos. La producción comienza a aumentar pasando de tiempos de 35 minutos al principio a 22 min. Velocidad estabilizada para la excavación de cada avance. El tiempo de montaje de un anillo pasa de 66 minutos en un inicio a 43 minutos a velocidad estabilizada y se montan así entre 8 y 10 anillos diariamente, con un máximo de 14 anillos en un día. El rendimiento mensual es de 190 a 250 m.

9. METROSUR MADRID

En los últimos años, desde 1996 se han realizado y se continúan realizando diversas ampliaciones del Metro de Madrid. La más importante ha sido el proyecto MetroSur, que es el anillo que enlaza diversas poblaciones al sur de la ciudad y el resto de las líneas a partir de la ampliación de la línea 10. La comunidad de Madrid, a través de la empresa pública Mitra, es el cliente de las obras.

Para la excavación del primer plan iniciada en el año 1996, se utilizaron 4 máquinas gemelas dos a dos con diámetro 9,40 m. que continuaron posteriormente con la ampliación del segundo plan. Para la construcción de los tramos VII a IX del segundo plan se construyó una máquina tuneladora específica dado que estos tramos constituyen la parte más problemática del terreno. Se puede ver a continuación (fotografía 10) una imagen de una de las tuneladoras en cuestión.



Fotografía 10.- *Tuneladora Mitsubishi*

La gran problemática de la excavación derivaba del hecho que geológicamente, la excavación se realizaba en formaciones mixtas de yesos macizos y suelos blandos con yesos, que requieren un estudio especial para comprobar la posibilidad de excavación mediante escudo.

Cal destacar también que la mayor parte del trazado discurría en gran parte por debajo de calles y avenidas a pesar de que en algunos casos fue necesario pasar bajo algunos edificios. Cabe destacar también que el trazado del túnel pasa dos veces bajo la carretera de Toledo N-401 así como el ferrocarril Madrid-Badajoz.

Las máquinas diseñadas para la excavación del primer plan se proyectaron para trabajar en suelos típicos de series detríticas superiores e intermedias del subsuelo de Madrid. Se había considerado, no obstante, la posible presencia de obres de fábrica así como la aparición de capas de areniscas o roca calcárea de dureza media por lo que se implementaron cortadores de suelos (dientes y puntas) añadiendo cortadores propios de roca de disco simple o doble.

En las zonas este y sur-este del proyecto, donde se debían excavar los tramos más problemáticos del proyecto, existen formaciones evaporíticas con yesos de los niveles del Terciario Inferior. Según la experiencia de que se dispone, la excavación en este tipo de materiales da importantes problemas de rendimiento, debidos a la combinación de las dos características mecánicas típicas de las rocas de yeso con resistencia a compresión de tipo medio, a lo que debemos sumar su tenacidad que viene derivada de su estructura fibrosa.

Los reconocimientos efectuados en diversas campañas de sondeos describían la presencia de capas de yesos potentes y formaciones de areniscas duras de potencia decimétrica. A partir de pozos de reconocimiento se concluye que el subsuelo estaba compuesto de diversas capas de suelos arcillosos, arcillas con yesos y yesos masivos. Además, en uno de los pozos se registraron caudales de entrada de alrededor de 10 l/s que aparentemente correspondían a aguas subterráneas aisladas.

Después de conocer los resultados de la campaña de sondeos se decidió establecer contactos con expertos de la Universidad de Turín, otros participantes en obras

realizadas en el área metropolitana de Madrid y geólogos expertos de Herrenknecht, fabricante de escudos escogido por el contratista Ferrovial-Agromán. La única experiencia positiva fue aportada por estos últimos, que se llevaron muestras a sus laboratorios para definir los parámetros básicos de los yesos de las formaciones.

Así pues, para escoger el tipo de escudo que se utilizaría se tuvieron en cuenta las propiedades de los suelos según su naturaleza considerando así la problemática ya expuesta. Se optó por una solución mixta de forma que las herramientas pudiesen excavar terrenos blandos y duros. En los tramos de yesos masivos, los discos realizarían un corte incompleto y las puntas se encargarían de terminar de romper la franja de terreno situada entre marcas continuas. Al contrario que en los tramos de terreno blando, donde serían las puntas las que trabajarían a fricción contra el terreno, impidiendo que los discos puedan llegar a bloquearse si el terreno fuese muy pegajoso.

La construcción de los 7,6 Km. de túnel de línea de los tramos VII a IX del proyecto MetroSur, con el escudo Herrenknecht, se completó a principios de marzo de 2002. Los principales problemas que se solucionaron a lo largo de la construcción, se enumeran y describen a continuación:

- Tendencia al giro del escudo al excavar los yesos masivos puesto que se tiene una superficie de corte muy lisa que no aporta el rozamiento necesario en la carcasa del estudio. Este hecho fue solucionado soldando en la cara exterior de los escudos unas barras de acero longitudinales, las incisiones en la roca de las cuales sirvieron para conseguir la estabilidad deseada.
- Formación de grandes bloques de material dentro de la cámara, debido al fraguado del yeso excavado que se transforma en yeso anhidro debido al calor generado por el corte mecánico. Estos bloques obstruyen la entrada al tornillo, impidiendo el avance.
- El carácter tan pegajoso de las arcillas plásticas que llenan las cavidades de disolución de los yesos, impedía su entrada en la cámara por lo que se tuvieron que utilizar espumas y polímeros desincrustantes.

La consecuencia final de la solución de todos estos problemas fue la consecución de unos avances de 14 anillos diarios en los últimos 4 meses de excavación y una media de 10 anillos diarios desde su inicio.

10. METRO DE TOULOUSE

La obra que se realiza para la ampliación del Metro de Toulouse es una ampliación de la línea A, existente en la actualidad y la construcción de una nueva línea B que atravesará la ciudad de norte a sur. Esta obra se realiza por encargo del SMTC (*Syndicat Mixte des Transports en Commun*); concretamente, el cliente es la SMAT (*Société du Métro de l'Agglomération Toulousaine*). Se crea una UTE que se encargará de los trabajos de supervisión técnica, administrativa y financiera que se verá involucrada desde la fase de proyecto hasta la puesta en marcha del servicio. Para cada uno de los contratos que se harán en cada uno de los tramos definidos para la construcción, se crearán también una serie de UTEs que se encargarán de su construcción.

Los trabajos de desvío de los servicios afectados existentes (agua, luz y gas) comienzan en setiembre de 2001, el mismo año en que empieza la construcción de las estaciones en abierto. La primera tuneladora que comienza a trabajar, lo hace en agosto de 2002. Los trabajos de ingeniería civil, acabaron en 2005 y la puesta en marcha de la instrumentación y los sistemas entre 2005 i 2006. Está previsto que la puesta en funcionamiento sea inminente, en el 2007. El coste del proyecto es de un billón de euros (de los cuales 487 millones corresponden al proyecto de ingeniería), que incluyen la adquisición de terrenos, las desviaciones de servicios afectados, los trabajos de ingeniería y la instrumentación.

Cada uno de los lotes en los que se divide la construcción de los tramos definidos en el trazado, es ejecutado por una UTE creada para la ocasión.

- Lote 1: Es un tramo de 1047 m. de longitud desde depósito al norte de la línea excavado en superficie, con un coste de 21 millones de euros, la duración del cual se estima en 25 meses.
- Lote 2: Es un tramo excavado en profundidad que consta de un único túnel de dos vías con 4,7 Km. de longitud. Este tramo comprende siete estaciones y seis galerías de ventilación de 6 m. A lo largo del trazado.
- Lote 3: Se trata de un túnel de dos vías excavado en cuatro tramos con una longitud total de 1054 m. También se incluyen en este lote, la construcción de una galería de conexión entre las líneas A y B. El presupuesto es de 100 millones de euros.
- Lote 4: Un túnel con cinco estaciones que se realizará con un presupuesto de 100 millones de euros.
- Lote 5: Excavación de un túnel de 3,2 Km. de excavación con 5 estaciones subterráneas. Se excavarán también cuatro galerías de ventilación. El presupuesto total será de 71 millones de euros y se prevé que los trabajos duren 47 meses.
- Lote 6: Se construirán un túnel en superficie de 1416 m. con una estación. El tiempo será de 29 meses con un coste de 24,8 millones de euros.

El túnel se encuentra al este del río Garona, en subsuelo terciario, con una cobertura de formaciones aluviales de gravas y arenas densas que pasan a limos arenosos hacia la superficie. Hacia la zona sur, las formaciones aluviales son más arcillosas y arenosas. En la zona de la estación de Empalot, se presenta una dificultad por el hecho de que los edificios se encuentran contruidos sobre pilas colocadas en profundidad. El nivel freático se encuentra entre 3 y 5 m.

Para la excavación de los tramos en profundidad se utilizan cuatro tuneladoras de las cuales tres, las que excavarán los lotes 2, 4 y 5, convergerán en el centro de la ciudad.

Para el lote 2 se utilizará una tuneladora de 7,75 metros de diámetro de la casa Herrenknecht que actúa con presión de tierras. Incorpora una cinta transportadora para trasladar los materiales excavados en el frente hasta la boca del túnel. Esta tuneladora prevé unos avances de 20-25 m diarios, instalando un sostenimiento de dovelas de hormigón formadas por cinc piezas de hormigón pretensados con una clave trapezoidal.

El Lote 3 se excava con una tuneladora de 5,4 m de diámetro que incorpora una cámara de excavación sellada, con una mampara gracias a la cual se aplica el

confinamiento al aire que soporta el frente del túnel mientras que en el resto de la máquina las actividades se pueden realizar con toda normalidad. También es posible retirar la mampara para poder excavar en modo abierto.

En los lotes 4 y 5 se utilizarán dos tuneladoras que ya habían sido utilizadas para la excavación del metro de Lille, transportadas por mar hasta el puerto de Langon, a la desembocadura del Garona y desde allí por carretera hasta Toulouse. La tuneladora del lote 4 incorpora un escudo que aplica una lechada de hormigón para confinar el frente a partir del hormigón proyectado; a lo que debemos sumar que instala dovelas formadas por piezas de hormigón pretensado similares a las del lote 2. La tuneladora del lote 5 tiene un diámetro de cabezal de corte de 7,72 m, con una cinta transportadora que evacua el material del frente. El escudo se guía a partir de un sistema que utiliza un registro topográfico que calcula la secuencia de instalación de los anillos, que en los lotes 2 y 4 son iguales, con 34 cm. de grueso, dentro del túnel, que tendrá 6,8 m de diámetro. Las piezas de hormigón se fabrican en el mismo túnel por la propia UTE que realiza la excavación. Los avances conseguidos son de 12.75 m/día en el lote 4 y de hasta a 90 mm/min (200 m/mes) por el lote 5.

11. METRO DE COPENHAGUE

El proyecto del metro de Copenhague fue ejecutado en paralelo al proyecto del túnel d'Oresund, que unía Dinamarca y Suecia. Este proyecto, incluía una conexión entre el aeropuerto de Kastrup y la estación Central de Copenhague. Posteriormente, a pesar de no existir una congestión de tráfico importante, se quisieron solucionar pequeños problemas en el centro de la ciudad y en la zona del puerto con una ampliación del metro.

Para la excavación se crean dos UTE, una para los trabajos de excavación y construcción (con un presupuesto de 300 millones de libras y la otra para el diseño del proyecto. Los trabajos de excavación y construcción de los túneles constan de 5 estaciones elevadas; 2,5 Km. de viaducto; 1,8 Km. de escollera; 8,3 Km. de doble túnel; seis estaciones en profundidad y otra semiprofunda; nueve galerías de ventilación y emergencia y la unión entre las dos líneas existentes.

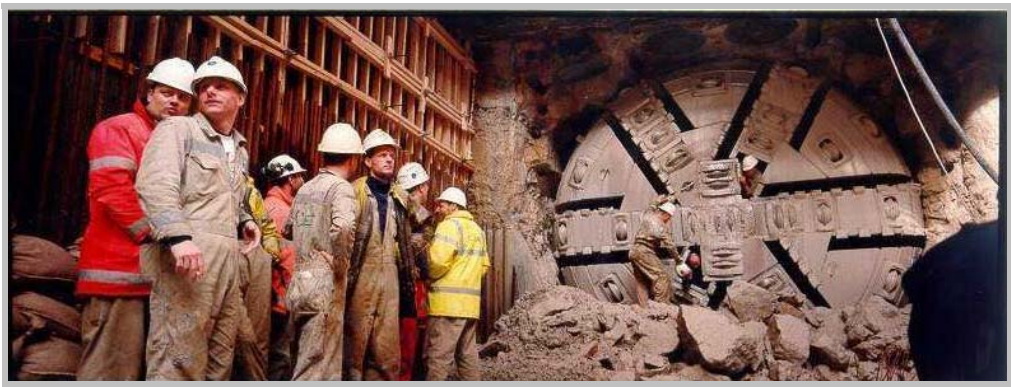
La geología de la zona está compuesta de arcillas del cuaternario y tills de arenas glaciares con grandes bloques de granito y una serie de arenas y gravas descansando sobre las limolitas de la serie precuaternaria de Copenhague con rocas nodulares y bandas rocosas de hasta a 600 mm. de grueso. A lo largo del túnel excavado, el trazado se encuentra aproximadamente en las limolitas de Copenhague y las zonas de entrada y salida se encuentran los tills glaciales.

Se utilizaron dos tuneladoras fabricadas por Mitsubishi bajo licencia de NFM; éstas pueden excavar en modo abierto y cerrado, a pesar de que solo operan en modo cerrado al principio y al final del trazado. Se utiliza un sistema de guía fabricado por Stoletzka. Las tuneladoras comenzaron a excavar el 31 de marzo de 1998. Después de acabar la obra, las tuneladoras son devueltas al fabricante, que las pone de nuevo en venta.

Como sostenimiento, se utilizan dovelas formadas por cinco piezas y una clave prefabricadas de hormigón armado. El sostenimiento está diseñado para aguantar, en un caso crítico de pérdida de capacidad, hasta el 50%. También se aplica una lechada desde la cola de la tuneladora.

Al principio de la excavación, la máquina excava a través de la serie de limolitas y tills, lo que hace que el avance sea lento, dados los problemas de abrasividad que dan este tipo de materiales y que provocan serios daños sobre el cabezal del escudo. Este problema se agrava en la zona de transición entre materiales, donde se encuentran bandas de bolos de tamaño destacable y se han de colocar una serie de varillas para impedir la entrada de estos bolos dentro del tornillo de evacuación de los materiales. Después de 5-6 meses de excavación, las tuneladoras salen a la superficie por la galería y se realizan una serie de modificaciones en los dos cabezales de corte, modificando los discos instalados, protegiendo los cojinetes con clavos de tungsteno.

En los primeros 6-7 meses de excavación el rendimiento de excavación se encuentra entre los 130-150 m/mes y a partir del verano de 1999 se trabaja con rendimientos de 400-450 m/mes en los 4-5 meses finales de excavación en el primer de los tramos. Las tuneladoras salen entonces a la superficie y son transportadas de vuelta a la galería d'Havnegade para excavar el tramo en dirección norte atravesando las estaciones de Kongens, Nytorv, Norreport y Forum, previamente excavadas (fotografía 11). Aprovechando este hecho, se restauran los escudos.



Fotografía 11.- Llegada de una de las tuneladoras Mitsubishi a una estación.

Para mejorar y facilitar la excavación, se realizan algunas modificaciones en la posición de las galerías, y se detiene una de las tuneladoras para poder trabajar con la otra 7 días a la semana y avanzar mejor en un tramo particularmente difícil dentro de una zona de tills glaciales que provoca un descenso en el rendimiento de excavación. Después de finalizar la excavación de este tramo, la segunda tuneladora comienza a trabajar de la misma forma durante los 7 días de la semana y se acaba la excavación de este tramo con tres semanas de antelación. Además, durante la excavación de estos tramos se utilizan polímeros para mejorar el rendimiento.

De esta manera, la excavación del trazado se finaliza en tres años con un rendimiento global de avance de 210 m/mes para cada máquina. Cabe tener en cuenta que después de la restauración de las tuneladoras los rendimientos que se consiguen son de 300 m/mes. El avance semanal máximo (5 días) es de 248 m, y en 24 horas, el avance máximo es de 54,6 m. Durante la excavación, cabe tener en cuenta, que las tuneladoras atraviesan hasta 22 veces estaciones, galerías o cámaras previamente excavadas lo cual hace que deban ser arrastradas y en este caso, el período para ubicar la tuneladora, es de unos diez días.

12. METRO DE ATENAS

El proyecto de ampliación de la red metropolitana de la ciudad de Atenas, comprende la excavación de dos nuevas líneas de metro (2 i 3) y pretende suavizar el importante crecimiento del tráfico motorizado en la ciudad. La compañía privada encargada de este proyecto es *Attiko Metro S.A.* y el cliente es *OMA (Olimpic Metro Athens)*. Las dos líneas de metro incluirán la construcción de 21 estaciones en 19 Km. de líneas de los cuales 17 se encontraran enterrados. De estos 17 Km., 12 se excavarán mediante la tuneladora y los restantes se excavarán mediante el NATM (*New Australian Tunnelling Method*) y mediante excavación en trinchera a cielo abierto. La mayor parte de la longitud de les líneas se encuentra bajo suelo urbano. En la siguiente imagen (fotografía 12) se puede ver el pozo de ataque con la problemática que conlleva ejecutarlo en zona urbana.



Fotografía 12.- Pozo de ataque

La geología de la zona es complicada; estratigráficamente se trata de una formación sedimentaria con una variedad de rocas magmáticas llamadas *Esquistos de Atenas*. La mayor parte del túnel se excava a través de estos esquistos argilosos, areniscas, limolitas y limolitas margosas lo que indica una marcada heterogeneidad y zonas fracturadas debido a les acciones tectónicas. En general, las capas por encima de la excavación constaran de suelos aluviales.

El cliente escoge dos máquinas tuneladoras idénticas fabricadas por *NFM Technologies* que excavarán la mayor parte de les líneas. Cada una de les tuneladoras irá destinada a una de les líneas que construirán. Las tuneladoras constan de un escudo articulado con un diámetro de 9,516 m y 8,965 m de longitud y un peso de 900 toneladas.

La tuneladora va equipada con un sistema de evacuación de material desde el frente al exterior, así como de equipamientos de colocación de sostenimiento y de inyección de hormigón en la zona de cola de la tuneladora.

13. METRO DE OPORTO

La ampliación del Metro de Oporto consiste en dos túneles de 2,5 y 4 Km. en las líneas C i S respectivamente. Se localizarán un total de 10 estaciones en estos dos tramos y serán construidos por una UTE de tres empresas (Soares de Costa, Somague y Impregilo) que a su vez subcontratan a otra (Geodata) para la caracterización geológica y geotécnica, el diseño del túnel, el control de asentamientos y riesgo sobre estructuras existentes y la instrumentación. Los trabajos en la línea C comienzan en junio del 2000 y finalizan en octubre de 2002, después de una parada y puesta en funcionamiento de un nuevo equipo de excavación durante el 2001 debida a tres hundimientos importantes acontecidos en octubre y diciembre de 2000 y en enero de 2001. en la línea S los trabajos comienzan en junio de 2002 y finalizan en octubre de 2003.

Geológicamente, la zona está constituida por una formación ígnea llamada *Granito do Porto*, que consiste en un granito rico en cuarzo y con dos tipologías de mica que presenta una coloración gris que pasa a ser amarilla en contacto con agua. Asimismo, también en presencia de agua, el granito presentará diversos grados de alteración, presentando una variabilidad importante de comportamiento en función de cual sea el grado de humedad. Por encima de este granito, encontramos a menudo materiales aluviales debido a la presencia de cursos de agua, la mayoría de ellos han sido cubiertos por la intensa urbanización de la zona.

El granito que entra en contacto con el agua y, por tanto, se encuentra alterado presenta una estructura metaestable que puede acentuar su potencial de colapso en función del porcentaje de porosidad y reducir la resistencia al corte del suelo residual. El suelo tiende así a un comportamiento plástico disgregable con posibles colapsos imprevisibles que se producen sin previo aviso si no se tiene un sostenimiento adecuado en el frente del túnel o si se excava más allá de lo previsto. El nivel freático se encuentra entre 10 y 25 m por encima del túnel. Las características hidrogeológicas, además, se ven modificadas por la existencia de antiguos pozos y minas de agua que hacen que el flujo de agua no sea forzosamente en la dirección que marcan las zonas de más porosidad o las fracturas.

Las tuneladoras sólo operan en modo cerrado, dadas las características geológicas que implican una marcada variabilidad. Debido a que la excavación se lleva a cabo en una zona altamente urbanizada, se han de controlar al máximo posible las pérdidas de volumen tanto en el frente como la cola así como por encima de la tuneladora durante la excavación. Es por ello, que se procede a utilizar los Planes de Avance de la Tuneladora (*PAT*). El *PAT* incluye una serie de documentos que proporcionan información sobre la excavación de un tramo de entre 200 m y 1 km. estos documentos son un informe sobre la investigación geológica, un informe del riesgo sobre los edificios, informes sobre la monitorización de las estructuras en superficie y en profundidad, un informe sobre los parámetros del funcionamiento de la tuneladora y un informe final que resume todo el plan de avance. Se hace un especial énfasis en la evaluación de los parámetros de la tuneladora como los de la densidad de los materiales de la cámara, la carga que soporta cada uno de los anillos, la presión de la lechada aplicada sobre el frente y el volumen y presión de la bentonita adicional aplicada sobre el frente. Estos informes se proporcionan al equipo de control de la tuneladora y son actualizados periódicamente basándose en las condiciones en que la tuneladora actúa en cada momento.

Después de los hundimientos a finales del año 2000 y principios de 2001, se pone en funcionamiento una instrumentación, que se detalla a continuación, tanto para aumentar las prestaciones de la tuneladora como para aumentar el nivel de seguridad:

- Se activa un sistema de sostenimiento secundario sobre el frente, que bombea una lechada de bentonita dentro de la cámara en el caso de que la presión dentro de ésta disminuya por debajo de un valor determinado.
- Se instala una bomba de emergencia de doble pistón detrás del tornillo de extracción de material del frente para poder controlar las variaciones de presión con el material líquido que se extrae durante la excavación.
- Se instala un segundo sistema para pesar el material circulante sobre la cinta transportadora.

Además de esta instrumentación, se han aplicado toda una serie de modificaciones sobre el software que controla la conducción de la tuneladora, incorporando también algunos sistemas de alarma que hacen que la excavación se detenga cuando el peso de los materiales extraídos supera un valor límite, que se active el sistema de sostenimiento secundario del frente cuando el valor de la presión de tierras al frente disminuya y una tercera alarma cuando se supere el límite de densidad del material extraído del frente.

Finalmente, para poder reemprender la excavación después de los accidentes, se formó un equipo de seguimiento de la excavación formado por especialistas del diseño y de la construcción, con la finalidad de acabar lo antes posible siguiendo los estándares de calidad y seguridad con la mejor optimización del coste posible.

A pesar de las condiciones difíciles, se llegaron a rendimientos de avance muy buenos. Las tuneladoras trabajaron 24 horas diarias seis días a la semana con, como mínimo, una parada diaria para el mantenimiento de la cabeza de corte. Las producciones que se consiguen son:

- Producción media diaria: 5 anillos (7 m)
- Mejor producción en un día (06/02/2002): 13 anillos (18,2 m)
- Mejor producción en una semana (7-13/10/2002): 56 anillos (78,4 m)
- Mejor producción en un mes (08/2003): 180 anillos (252 m)