



CONSTRUCCIÓN DE LOS TUNELES DEL FFCC DEL METRO DE MADRID EN SUELOS BLANDOS

Manuel Melis Maynar

*Profesor Titular de Ingeniería de Caminos
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de La Coruña
Campus de Elviña - 15192 La Coruña
Tfno: 981 16 70 00; Fax: 981 16 71 70
<http://www.udc.es/caminos>*

La ampliación del Metro de Madrid que se está construyendo en estos momentos está formada por las 13 obras siguientes (Tabla 1)

AMPLIACION DE METRO 1995-99				
TRAMO A CONSTRUIR	KM	KM	KM	ESTACIONES
	LINEA	FONDO SAGO	TOTAL	
1.- LINEA 10 LAGO-P.PIO	2,67	0,00	2,67	0
2.- LINEA 10 P.PIO-PL.ESPAÑA				0
3.- LINEA 4 PROLONG.HORTALEZA	2,04	0,00	2,04	2
4.- UNION LINEAS 8-10	1,62	0,00	1,62	1
5.- UNION LINEAS 7-8	1,01	0,24	1,25	1
6.- LINEA 9 PROLONGACION a VICALVARO	4,05	0,55	4,60	5
7.- LINEA 8 MAR DE CRISTAL - CAMPO NACIONES	2,23	0,40	2,63	2
8.- LINEA 7 Dr.MARAÑON-GUZMAN EL BUENO	2,48	0,00	2,48	5
9.- LINEA 7 GUZMAN EL BUENO - LA PALOMA	2,74	0,00	2,74	2
10.- LINEA 7 LA PALOMA - PITIS	4,13	0,15	4,28	6
11.- LINEA 1 PROLONGACION A VALLECAS VILLA	2,47	0,20	2,67	4
12.- LINEA 11 PROLONGACION A CARABANCHEL	2,05	0,60	2,65	3
13.- LINEA 4 PROLONG. MAR DE CRISTAL - Pque.Sta.MARIA	2,04	0,40	2,41	2
14.- LINEA 8 CAMPO DE LAS NACIONES - AEROPUERTO - PUEBLO DE BARAJAS	5,40	0,20	5,60	2
SUMAS	34,93	2,71	37,64	35

Tabla 1

Los métodos constructivos utilizados en cada obra son los siguientes (Tabla 2):

OBRA	METODO CONSTRUCTIVO
1.- LINEA 10 LAGO-P.PIO	EPB EXISTENTE Φ 7.40 m 1 VIA
2.- LINEA 10 P.PIO-PL.ESPAÑA	CLASICO MADRID
3.- LINEA 4 PROLONG.HORTALEZA	EPB nº 2 NUEVA Φ 9.50 m 2 VIAS
4.- UNION LINEAS 8-10	CLASICO MADRID
5.- UNION LINEAS 7-8	CLASICO MADRID
6.- LINEA 9 PROLONGACION a VICALVARO	EPB nº 3 NUEVA Φ 9.50 m 2 VIAS
7.- RAMAL MAR DE CRISTAL - RECINTOS FERIALES	2 EPB EXISTENTES 1 VIA
8.- LINEA 7 Dr.MARAÑÓN-GUZMAN EL BUENO	EPB nº 4 NUEVA Φ 9.50 m 2 VIAS
9.- LINEA 7 GUZMAN EL BUENO - LA PALOMA	EPB nº 4 NUEVA Φ 9.50 m 2 VIAS
10.- LINEA 7 LA PALOMA - PITIS	EPB nº 1 NUEVA Φ 9.50 m 2 VIAS
11.- LINEA 1 PROLONGACION A VALLECAS VILLA	CLASICO MADRID Y PANTALLAS
12.- LINEA 11 PROLONG. A CARABANCHEL	CLASICO MADRID Y PANTALLAS
13.- LINEA 4 PROL. MAR CRISTAL - Pque.Sta.MARIA	EPB nº 2 NUEVA Φ 9.50 m 2 VIAS
14.- LINEA 8 MAR CRISTAL - BARAJAS	2 EPB nº 1 y 2 Φ 9.50 m 2 VIAS

Tabla 2

Los Proyectos comenzaron en el segundo semestre de 1995, y se han puesto ya en servicio los tramos siguientes (Tabla 3):

AMPLIACION DE METRO 1995-99		
	KM	PUESTA EN SERVICIO
TRAMOS EN SERVICIO	TOTAL	
1.- LINEA 10 LAGO-P.PIO	2,67	26 Diciembre 1996
2.- LINEA 10 P.PIO-PL.ESPAÑA		26 Diciembre 1996
3.- LINEA 4 PROLONG.HORTALEZA	2,04	27 Abril 1998
4.- UNION LINEAS 8-10	1,62	22 Enero 1998
5.- UNION LINEAS 7-8	1,25	13 Febrero 1998
SUMAS	7,58	

Tabla 3

Del resto de las obras la mayor parte de los túneles están terminados, así como todas las estructuras de las estaciones, salvo en el tramo 14 al aeropuerto, cuyas obras han sido adjudicadas en Marzo de 1998. Las fechas previstas de terminación son las indicadas en la Tabla 4.

No es frecuente estudiar proyectos de infraestructuras en los que a los escasos 3 años de comenzar la redacción del Proyecto de Construcción la infraestructura se ponga en servicio. Especialmente si se trata de obras subterráneas en zonas densamente habitadas, y para ferrocarriles suburbanos, con la complejidad de sus instalaciones electromecánicas y de control y señalización de trenes. Sin embargo, se ha podido hacer en este



caso de la Ampliación del Metro de Madrid, y ello es sin duda debido a factores tales como el equipo humano y técnico disponible, la calidad de las empresas consultoras y constructoras y otros más. Pero entre estos factores quisiéramos destacar uno sumamente importante, que es la adecuada selección de los métodos constructivos a utilizar.



AMPLIACION DE METRO 1995-99		
TRAMOS EN SERVICIO	KM TOTAL	PUESTA EN SERVICIO PREVISTA
6.- LINEA 9 PROLONGACION a VICALVARO	4,60	Octubre 1998
7.- LINEA 8 MAR DE CRISTAL - CAMPO NACIONES	2,63	Junio 1998
8.- LINEA 7 Dr.MARAÑON-GUZMAN EL BUENO	2,48	Agosto 1998 y Diciembre 1998
9.- LINEA 7 GUZMAN EL BUENO - LA PALOMA	2,74	Diciembre 1998
10.- LINEA 7 LA PALOMA - PITIS	4,28	Diciembre 1998
11.- LINEA 1 PROLONGACION A VALLECAS VILLA	2,67	Noviembre 1998
12.- LINEA 11 PROLONGACION A CARABANCHEL	2,65	Septiembre 1998
13.- LINEA 4 PROLONG. MAR DE CRISTAL - Pque.Sta.MARIA	2,41	Julio 1998
14.- LINEA 8 CAMPO DE LAS NACIONES - AEROPUERTO - PUEBLO DE BARAJAS	5,60	Agosto 1999
SUMAS	30,06	

Tabla 4

En efecto, la construcción de túneles en suelos en zonas urbanas es sin duda uno de los retos más interesantes de la Ingeniería de Caminos actual, especialmente en su vertiente geotécnica. El lector entenderá fácilmente que el túnel en suelo blando es un problema geotécnico mucho más complicado que el túnel en roca dura. La estabilidad del frente es mucho más crítica y debe estudiarse con mucho más detenimiento, y también la estabilidad de bóveda, hastiales y contrabóveda. Y si el túnel se construye en zona urbana los problemas aumentan exponencialmente, ya que las subsidencias en general deben mantenerse en unos límites muy bajos, para evitar daños a las estructuras de superficie y a los servicios enterrados sobre el túnel.

En consecuencia, la elección de los métodos constructivos a utilizar para la construcción de los túneles es el factor crítico para el éxito del Proyecto global.

1. ESTUDIO Y SELECCION DE LOS METODOS CONSTRUCTIVOS A UTILIZAR

En los primeros meses de trabajo del equipo técnico responsable de esta ampliación se estudiaron en primer lugar los métodos constructivos que era necesario utilizar para cumplir el programa. Las prioridades para la selección de estos métodos constructivos fueron las siguientes:

- 1.- Máxima seguridad para los trabajadores en el interior del túnel

- 2.- Máxima seguridad para los edificios y otros elementos en la superficie del terreno
- 3.- Mínima superficie de frente abierto del túnel en todo momento
- 4.- Las consideraciones de coste o de plazo no pesarían frente a las de seguridad y calidad

Para la selección de los métodos constructivos a utilizar se estudiaron los utilizados en las ampliaciones de Metro importantes que se estaban llevando a cabo en Europa, tales como la de Valencia y Bilbao en España, Lille, Lyon, Toulouse, París, Londres, Milán, Roma, Colonia. Se estudiaron también los comportamientos de los diversos métodos constructivos utilizados en el túnel de la Mancha y en el túnel de unión de la isla danesa de Zelanda con el continente (el Storebaelt). Se estudiaron también los resultados obtenidos en los túneles de metro de otras ciudades como Los Angeles, Seul, El Cairo, Hong Kong, Santiago y Taipei. Por diversos motivos que el lector entenderá no pudieron estudiarse las ampliaciones de metro de países muy alejados como China, que está ampliando los de Pekín, Tianjin y Guangzhou, o Japón, que hubiese sido sin duda muy instructivo por ser el país padre de las EPB, donde más de 1.200 equipos EPB o Slurry han trabajado, llegándose a secciones de túnel de 14.4 metros de diámetro bajo la bahía de Tokio y donde ya hay tuneladoras totalmente automatizadas, manejadas por robots, así como tuneladoras de dos cabezas como en el metro de Hiroshima o hasta de tres cabezas capaces de hacer una estación completa como en el metro de Osaka. Pero fundamentalmente se estudiaron los procesos constructivos utilizados en el Metro de Madrid desde su primera obra en 1917, ya que las características geotécnicas del terreno y otros condicionantes locales suelen ser extremadamente importantes en la acertada elección de los procesos constructivos. Entre otros condicionantes, se pretendía evitar tener que construir por motivos técnicos las nuevas líneas tan profundas como la Línea 6 Circular, dados los gravísimos inconvenientes que se venían observando tanto para los usuarios, por problemas de accesibilidad, como para el mantenimiento y la explotación.

Se resumen a continuación algunos de los resultados de los análisis de estos métodos constructivos.

EL METODO CLASICO DE MADRID (ANTIGUO METODO BELGA)

El método más utilizado para la construcción de los túneles hasta hoy ha sido el método clásico de Madrid, antiguamente llamado Belga. De 116 km de túnel existentes hoy, casi 80 han sido construídos de esta forma, sin que haya habido más un accidente en el tramo Avda. América – Pueblo Nuevo en la Línea 7 el 16 de Marzo de 1971, ni hundimientos importantes que reseñar. Este método tiene por lo tanto la ventaja de estar muy comprobado en la práctica de la ingeniería civil madrileña, y aunque su rendimiento



es pequeño como veremos más adelante, debe seguir siendo contemplado como un procedimiento a utilizar en cualquier programa de ampliación.

Es bien conocido que uno de los problemas más graves de la estabilidad del túnel es el hundimiento o la falta de estabilidad del frente, criterio éste que desde el principio ha sido fundamental para la selección de los métodos constructivos de la ampliación. Pues bien, desde el punto de vista geotécnico, este método clásico no presenta nunca un frente abierto de grandes dimensiones. La galería de avance tiene una sección de unos 3 m² en general, y puede incluso reducirse en función de la estabilidad del terreno. Esto reduce mucho la posibilidad de hundimiento del frente, ya que a la vista de la galería, que actúa no sólo como avance, sino también de reconocimiento previo, se decide en cada pase la longitud del mismo y las dimensiones de los ensanches. Por otra parte, terminado el avance, la parte inferior del frente queda soportada por el volumen de la destroza, que se desfasa del avance según convenga para que la sección completa del túnel sea siempre estable. De la misma forma, este método permite la ejecución de los hastiales por medio de bataches a voluntad, cercanos siempre al comienzo de la destroza. La combinación de estas variables ha dado como resultado una ejecución muy segura en los terrenos de Madrid, ejecución que termina con la construcción de la contrabóveda de solera que cierra la sección resistente.

Un problema típico de los suelos de Madrid es la repentina aparición de bolsas de arena con agua colgada a presión alta o baja, causa del único accidente registrado. Estas bolsas no suelen detectarse en los sondeos de reconocimiento durante la ejecución del Proyecto, por su pequeño tamaño, y su aparición, que con un frente abierto a sección completa puede ser catastrófico, se maneja bien con las pequeñas secciones de frente abiertas con el método clásico, ya que el entibado y la protección del frente de la galería de avance o de los sucesivos ensanches pueden ser sumamente rápidos. Incluso con aportaciones de agua el método clásico funciona bien, como ha podido verse en la zona del Alto del Arenal en Línea 1 en 1993, en el pase de la línea 10 bajo la Glorieta de Rubén Darío en 1996 o en los tunelillos de subida a vestíbulo de la Estación de Guzmán el Bueno en Línea 7 en Abril de 1998. En estas zonas la aportación de agua era muy grande, y realmente podía decirse sin exageración que llovía dentro del túnel durante la excavación, por rotura de una tubería del Canal en el último caso, debido a que los piquetes informativos de una huelga el día anterior, 28 de Abril de 1998, obligaron a salir a todos los trabajadores dejando el frente del túnel inadecuadamente protegido.

La construcción del túnel de línea por el método clásico tiene los inconvenientes siguientes:

- Está basada en la utilización intensiva de mano de obra especializada. Ello quiere decir que si hay que abrir muchos frentes de trabajo pueden producirse problemas graves de imposibilidad de encontrar suficiente personal.



- ❑ Pese a lo dicho es estos párrafos, no cabe duda de que los trabajos son mucho más peligrosos que los correspondientes al trabajo con tuneladora. Deben por lo tanto extremarse las medidas de seguridad.
- ❑ Los trabajos deben estar dirigidos por personal muy experto, y esto quiere decir por personal que lleve muchos kilómetros de túnel construído por este método.

EL NUEVO METODO AUSTRIACO (NATM, NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD)

El autor de estas líneas reconoce ser parcial en este punto. Si hay alternativas que permiten trabajar de forma que nunca haya una gran sección de frente abierto en el túnel, no hay motivo para utilizar técnicas que obliguen a tenerla. El NATM, que se ha utilizado en Madrid en 1994 en un pequeño tramo de 277 metros en el cierre de la Línea 6 Circular entre el río y el Intercambiador de Príncipe Pío, nos parece innecesariamente peligroso, incluso haciendo bien todos los controles y análisis de auscultación que precisa. Ni los condicionantes de coste ni de plazo deben ser tenidos en cuenta al evaluar la seguridad de la construcción o la estabilidad del frente.

Sin embargo, en la ampliación actual de la Línea Jubileo del Metro de Londres se ha utilizado extensivamente el NATM, en una arcilla (la London clay) bastante similar a nuestro toscó. Londres realizó dos túneles de ensayo, de plena sección, con resultados positivos antes de comenzar los trabajos, y a lo largo de los años 1993 y 1994 tuvo lugar un denso debate técnico en Inglaterra sobre la aplicabilidad del NATM en la London clay, con geotécnicos de primer nivel mundial como Sir Alan Muir Wood o los Prof. Muller y R. Brown, del Imperial College. Sir Alan Wood opinaba que tal vez el NATM fuera aplicable en los cambios de sección, pero que en los túneles era mejor utilizar otros métodos más comprobados, y que además eran más baratos aunque fueran un poco más lentos. Pese a ello la construcción de los túneles del Heathrow Express Link se realizó con el NATM, y según entendemos, con las mayores garantías y bajo el asesoramiento de los mejores técnicos europeos, con un excelente constructor (Balfour Beatty), una empresa consultora líder mundial en túneles (Mott MacDonald) y una empresa consultora (Geoconsult Suiza) especializada en el método NATM. Con todo, los tres túneles del complejo de estaciones de la Central Terminal Area del aeropuerto de Heathrow se hundieron el 21 de Octubre de 1994, sin que afortunadamente hubiese víctimas mortales. Las obras estuvieron paradas hasta que se autorizó el avance el 20 de Febrero de 1995, tras que otro consultor especialista (Ove Arup & Partners) reestudiara los nuevos procedimientos propuestos (el llamado método Combishell), y aún hoy, en Junio de 1998, sigue abierto en todo el mundo el debate del NATM en suelos. Problemas similares han ocurrido en Munich, con resultado de muertos, aunque por pertenecer al sumario no conocemos aún los detalles técnicos. Pese al último accidente del NATM en el metro de Munich, lo siguen y seguirán utilizando, según nos han informado,



ya que trabajan de la típica forma alemana, construyendo sólo 3 km de línea cada año, pero sin fallar ningún año desde 1973, y por ello aseguran no necesitar otros métodos. En otros casos, sin embargo, el NATM se ha utilizado con éxito en suelos blandos, como en los metros de Bochum, Stuttgart, Nuremberg y Frankfurt, además de muchos tramos del de Viena, con suelos muy blandos y con mucha agua y algunos del metro de Essen, que precisó en ellos aire comprimido mientras que la EPB del tramo adyacente trabajaba sin problemas.

Tras el hundimiento de Heathrow, la Health & Safety Executive de Inglaterra publicó un detallado informe sobre el NATM. En él se recogen los accidentes debidos al método en suelos blandos en zonas urbanas, y la relación es estremecedora. Lo más terrible del informe, en opinión de quien esto escribe, es que se sigue insistiendo en que el accidente de Heathrow se produjo porque el personal de Londres «no entendía bien» los principios del NATM. Esta afirmación, tantas veces oída al hablar del NATM, parece querer decir que el método debe ser aplicado por algunos escasos expertos o elegidos, expertos que nunca pueden estar de forma continua en el frente de trabajo, que cobran cantidades escandalosas por aplicar su experiencia y que en caso de un accidente vemos que dicen que «no se aplicó bien» el método o, como en Londres, que «el personal no entendió el principio científico del método». Sin asumir ninguna responsabilidad importante, dejan sólo ante sus graves responsabilidades a quien les hizo caso y dejó aplicar ese método.

Nos parece incomprensible que todavía algunos técnicos defiendan la aplicación de este método en suelos blandos y zonas urbanas, y entendemos que la única explicación debe ser el intentar evitar inversiones en equipos por parte de las Empresas Constructoras o el facturar elevadas cantidades por sus informes. En cualquier caso, y teniendo en cuenta todas estas experiencias, en los estudios realizados al analizar los procesos constructivos para la ampliación del metro de Madrid, el NATM fué desechado por el conferenciante.

EL PRECORTE MECANICO, MÉTODO PREMILLO PERFOREX.

Este método consiste en ir cortando el perímetro del túnel con una enorme sierra mecánica, rellenando los huecos así formados con gunita inmediatamente después del corte. De esta forma se va construyendo una delgada cáscara que protege el avance de la excavación, avanzando en tramos de algunos metros, 3 a 5 en general. Comenzó a utilizarse en Europa en los años 70, y en España se ha utilizado con éxito en el túnel de Cercanías de El Goloso o en los túneles de la M-40 por el monte del Pardo en Madrid. Otros de los túneles más conocidos son:

TUNEL	TERRENO	AÑO
RER Luxembourg-Chatelet	Caliza	1974-1977
RER Fontenay sous bois	Marga verde	1974-1976
Metro de Lille, Lots 6 y 7		1980-1982
TGV en Sceaux	Suelo blando. Bulones en el frente	1985
TGV Italia Direttissima. Arezzo	Arcilla plástica	1986
Túnel Galaure TGV Lyon 145 m2	Molasa arenosa	1991
Metro Madrid Línea 6	Tosco arenoso. Arenas	1994
Túnel carretera en Tolon	Rotura. Gran hundimiento en superficie	1996



El método se ha utilizado en Madrid en 1994 en un pequeño tramo de 540 metros en el cierre de la Línea 6 Circular entre el Intercambiador de Príncipe Pío y la Estación de Arguelles. Al igual que el NATM obliga a una gran extensión de frente abierto, bien sea la sección completa o la semisección de avance, ya que la excavación suele hacerse con equipos pesados, retros en general. Al salir con este método de la estación de Arguelles hacia la de Moncloa, y a unos 40 m del piñón, la súbita aparición de una bolsa de arena con agua colgada (a presión ciertamente elevada, ya que el chorro de agua que salía por el frente tenía un diámetro de más de 10 cm y alcanzaba más de 5 metros) dió lugar a una situación muy comprometida, que sólo la experiencia, sangre fría y rápida respuesta de los técnicos y asesores logró salvar. Parece que el motivo fué el no haber colocado a tiempo las riostras de solera necesaria para acodalar las tejas de la sección temporalmente hasta que cierran con la solera, que debe ir siempre algo retrasada por motivos constructivos. El proceso constructivo se cambió al método clásico.

Se ha estudiado con todo el detalle posible el grave accidente sufrido el 15 de Marzo de 1996 por el túnel de carretera bajo la ciudad de Tolón, que se estaba construyendo por este método. Al romper las tejas de la prebóveda se produjo un enorme socavón de más de 7 metros de profundidad y de 27 metros de largo, sin que al parecer hubiese víctimas mortales, si bien los daños a la circulación, a los servicios y a un puente cercano (Commandant Marchand) fueron grandes.

Se han estudiado con el máximo detalle posible las obras construidas con éxito por este método recientemente, como los túneles del FFCC de Cercanías en el Goloso un año antes, y los recientes del alta velocidad TGV en Francia, Galaure-TGV Rhone-Alpes, el de la autopista A-14 de París, Saint Germain-en-Laye y el de los túneles de la M-40. En conversaciones sostenidas con los propietarios de la patente en España se estudiaron las soluciones a los problemas conocidos y a los que pudieran surgir, pensando en un bastidor más grande y robusto y un brazo cortador más largo y ligeramente curvado, tal como se está utilizando con éxito en Japón. Se tuvo en cuenta que la estabilidad del frente podría resolverse mediante métodos tales como el uso de un denso bulonado de fibra de vidrio en la dirección del eje en cada avance. Se ha observado también la excelente calidad del hormigón de las tejas, ya que al pasar con la nueva línea 10 por debajo del tramo de la 6 construido con este método ha sido necesario romper algunas, y eran de un excelente color gris muy oscuro y de una resistencia extraordinaria. Pese a todo ello, a la vista de las experiencias en Madrid y de que exige una gran superficie de frente abierto, en los estudios realizados sobre los procesos constructivos a utilizar para la ampliación el precorte mecánico fue también desechado por el conferenciante.

ENTIBADORAS DE LANZAS U OTROS METODOS

Tal vez la primera entibadora de lanzas utilizada en el Metro de Madrid fue la desarrollada por Corsán para la ampliación de la línea 5 en el tramo Ciudad Lineal - Canillejas en 1980. Desde entonces y hasta hoy se han utilizado 4 entibadoras, en las líneas



5, 6, 8 y 9. La idea de la entibadora no es mala, ya que pretende sustituir el entibado del método clásico por una coraza metálica resistente y robusta, eliminando todo el pesado trabajo manual de la entibación con tabla. En general la excavación se hace con rozadoras, sólo en el avance, y nunca a sección completa, pero naturalmente, por hacerse la excavación con equipos grandes, la sección abierta del frente es mucho mayor que con el método clásico. Con las entibadoras la problemática de estabilidad del frente es la misma que con el NATM y los otros métodos anteriores. El frente queda desprotegido y sin sujeción en los 25 ó 30 m² del avance del túnel de doble vía, de 70 m² de sección total.

Por ello con este método se pierde la gran ventaja del método clásico, que es el comenzar la excavación con una galería muy pequeña, que se va ampliando en función de la resistencia del terreno. El lector puede comprobar que la solución analítica, dada por Poulos y Davis, de las tensiones y deformaciones creadas por un orificio circular de diámetro D en un semiespacio elástico nos dice que la deformaciones en clave son proporcionales, ceteris paribus, al diámetro. De la misma forma, las tensiones en clave y riñones son función creciente del diámetro. Es de sentido común por tanto que, si el frente no está sostenido, las excavaciones iniciales en cada avance sean del mínimo diámetro posible, y vayan ampliándose con cuidado y despacio.

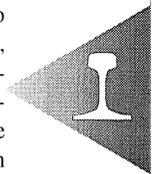
En los FFCC de Cercanías de Madrid se utilizó una entibadora en el tramo Atocha - Laguna, en la línea C5. La falta de contención en el frente produjo en Vía Carpetana una inestabilidad tal que hubo de prescindirse de la entibadora y continuar los trabajos por el método clásico. El fenómeno ha sido bien detallado por Oteo. Sin embargo, en la entrada del pasillo verde en la estación de Atocha, la entibadora utilizada por OCP en la peñuela ha tenido un buen resultado. Esta pequeña entibadora, de avance manual de las lanzas, realizó el paso bajo la playa de vías con un recubrimiento muy pequeño, y no ha habido incidencias. Durante el paso se controlaban con todo detalle los movimientos de cada vía, que se corregían reboteando por la noche.

A la vista de todas estas experiencias, y sobre todo de que trabajan también con una gran superficie de frente abierto, en los estudios realizados sobre los procesos constructivos a utilizar para la ampliación, las entibadoras de lanzas o similares fueron también desechadas por el conferenciante.

Posteriormente hemos podido ver sin embargo que en la línea de Cercanías de Alcobendas se está utilizando en estos momentos, Junio de 1998, una entibadora similar a la de línea 5 de 1980. El autor de estas líneas no la hubiese permitido utilizar.

TUNELADORAS DE FRENTE ABIERTO

En el Metro de Madrid se han utilizado 3 tuneladoras de frente abierto, con un total de 19.4 kms construídos. En línea 6 se utilizaron 3 escudos, entre 1972 y 1983. En línea 8 uno de ellos de nuevo en 1982, y en línea 9 dos de ellos en 1980 y 1983. En línea 6 uno



de los escudos originó el famoso desastre de la glorieta Ruiz de Alda en 1973. En el tramo Laguna – Lucero otro escudo hubo de abandonarse, y en general estos equipos han dado lugar a graves problemas de venidas del frente, subsidencias y hundimientos, causando considerables retrasos en las obras y daños en general.

En la ampliación de la Línea Jubileo (Jubilee Line) que está terminando el Metro de Londres han sido utilizadas en total 11 tuneladoras para la excavación de los túneles. De éstas 8 son cerradas, 6 de tipo EPB de presión de tierras (4 Kawasaki en el contrato 105 y 2 Lovat en el Contrato 110) y 2 de lodos bentoníticos (2 Herrenknecht de slurry en el Contrato 107) , y 3 son de frente abierto (2 Wirth-Howden con retroexcavadora en el Contrato 102 y 1 Dosco con rozadora en el Contrato 103). Los asientos en los tramos construídos con las de frente cerrado han sido, según se está publicando en la literatura, los previstos, y se han compensado sin dificultad. Sin embargo, en los construídos con las máquinas de frente abierto, los asientos han sido tan elevados que ha sido necesario realizar un costosísimo tratamiento de inyecciones de compensación por valor de más de 5.000 Millones de Pta sólo en el Contrato 102. Estos trabajos han siendo realizados por la empresa española GEOCISA.

En la ampliación del metro de Atenas, las dos tuneladoras Mitsubishi de 9.50 metros de diámetro fueron encargadas de frente abierto al inicio de los trabajos. Los problemas causados por el frente abierto han sido enormes, de tal forma que 10 años después del comienzo del Proyecto sólo se han construído escasos 10 km de túneles. En estos momentos se está modificando una de las tuneladoras poniéndole las placas de cierre y un brazo retro, entendemos, de forma que se llegará así a un escudo similar al utilizado en el Metro de Madrid en 1979. No nos parece una solución a seguir.

A la vista de estas experiencias y de que, aunque protegen la bóveda y hastiales, el frente queda sin sujeción, en los estudios realizados sobre los procesos constructivos a utilizar para la ampliación, las tuneladoras de frente abierto fueron también desechadas por el conferenciante.

TUNELADORAS DE FRENTE CERRADO

Estos equipos, idea inglesa de 1965 que no tuvo éxito en Inglaterra y que fué enseguida recogida por Japón, solucionan el problema pendiente en las de frente abierto. Como es sabido, en estas máquinas la estabilidad del frente queda garantizada porque el material excavado queda almacenado en una cámara en la propia cabeza de la máquina donde se conserva teóricamente a la misma presión efectiva horizontal que tenía en el terreno. La cámara cerrada sostiene también la presión intersticial, de forma que, en pura teoría, repetimos, el frente sigue estando totalmente sostenido tras ser excavado. De la cámara los detritus de excavación van siendo retirados por un tornillo helicoidal de diámetro adecuado y velocidad regulable. La presión en la cámara puede mantenerse por el propio suelo excavado (sistema EPB), tratado casi siempre con espumas patentadas o



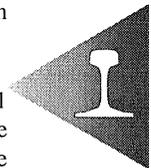
mezclándolo con lodos normalmente bentoníticos (sistema Slurry), en cuyo caso los residuos de excavación se extraen por tubería. Hoy día casi todos los túneles urbanos en suelos o rocas blandas se ejecutan con este tipo de máquinas.

Se han estudiado los métodos y equipos utilizados en el Canal de la Mancha (11 tuneladoras, de las que 5 fueron EPB en el lado francés y 6 abiertas en el lado inglés, de terreno más resistente y seco, el chalk marl), en el Metro de Lille, el de Lyon, el de Toulouse, el metro y RER de París, los metros de Londres, Lisboa, Milán, Roma, Colonia, El Cairo y Taipei y en el túnel de Storebaelt bajo el Báltico.

Las tuneladoras de frente cerrado parecen ser hoy día la mejor solución para los túneles urbanos en rocas blandas o suelos. No son la panacea, sin embargo. En Lisboa ha habido problemas graves de subsidencia, que han requerido la utilización de sistemas de inyecciones de compensación análogos a los utilizados en Londres. Tampoco se eliminan los accidentes: en una reciente máquina nueva, el brazo erector no enganchó bien una dovela y esta cayó matando a un trabajador. Las máquinas del Storebaelt en Dinamarca ha sufrido todas las desgracias imaginables, desde inundación por el mar Báltico que tenía encima con 11 metros de recubrimiento la «Jutlandia» hasta incendios en la «Dania».

En general, el punto débil de estas máquinas EPB es el rodamiento principal, que ha roto en más ocasiones de las deseables. Tenga en cuenta el lector que el enorme empuje horizontal de los gatos (10.000 tn en los equipos de Madrid) con que la cabeza está empujando contra el suelo a excavar pasa a la cabeza giratoria, y el gran rodamiento de la cabeza es el elemento transmisor. Así rompió el rodamiento (o los sellos que impiden que el suelo llegue al rodamiento) la máquina «Excalibore» en Canadá bajo el río St. Clair, las máquinas «Sharon» y «Tracy» de Londres, y 2 máquinas más en Taipei. Cada avería de este tipo significa un retraso de al menos 6 meses, de forma que en los proyectos de nuestra actual ampliación del metro de Madrid se han previsto métodos de construcción alternativos (cielo abierto en algunos casos y método clásico en el resto) para continuar las obras de forma inmediata en caso de rotura del equipo, y se han especificado máquinas con rodamientos más robustos.

Parece evidente que las tuneladoras de frente cerrado son la mejor solución para la construcción de túneles urbanos. No hay nunca frente abierto, el túnel queda perfectamente revestido al mismo tiempo que se excava, y el personal está siempre protegido contra desprendimientos. Es decir, la seguridad de los trabajos, que el responsable de los mismos debe tener como prioridad absoluta al planificar un proyecto de la envergadura del que nos ocupa, parece totalmente garantizada dentro de las posibilidades humanas actuales.



MÉTODOS SELECCIONADOS

Los métodos seleccionados han sido, a la vista de todo lo anterior, los de cielo abierto, el método clásico y las tuneladoras de frente cerrado. De éstas la elección lógica, por motivos medioambientales, es la solución de empuje de tierras (EPB), ya que la solución de empuje con lodos (slurry) exige equipos de reciclado de bentonita que manchan y molestan mucho en superficie.

2. EQUIPOS Y RENDIMIENTOS

RENDIMIENTO DEL MÉTODO CLÁSICO (ANTIGUO BELGA)

El rendimiento medio que debe ser considerado para el Método Clásico no debe superar un avance por día de 3 turnos, es decir, un avance en 24 horas. El avance normal puede tomarse como 2.5 metros. Para el rendimiento global medio no deben considerarse los sábados ni fines de semana, y en estas condiciones, a 5 anillos por semana, puede considerarse un avance medio de 50 metros/mes por frente de trabajo. Este rendimiento está suficientemente comprobado en los 80 años en que lleva utilizándose el método en los suelos de Madrid, y es el realmente obtenido ahora al finalizar los trabajos de túneles de la Ampliación.

RENDIMIENTO DE LAS TUNELADORAS EPB

El rendimiento considerado para las EPB de la ampliación fue de 400 metros al mes de túnel terminado. En el gráfico adjunto (Figura 1) pueden verse los rendimientos reales, que se acercan mucho al previsto.

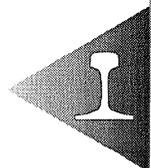
En general las especificaciones exigidas al fabricante, como en el caso de las 4 tuneladoras grandes de la ampliación del Metro de Madrid, fijan unos tiempos de 20 minutos para excavación y 20 minutos para la colocación del anillo. La velocidad de avance de los gatos principales es como máximo de 8 centímetros por minuto en posición de excavación. Esta velocidad, para los 150 centímetros de longitud de anillo, da 18 minutos y 45 segundos. Estos 20 minutos a su vez dan 40 minutos por anillo, y si no hubiera pérdidas podrían hacerse 12 avances en los 480 minutos de un turno.

Llevado al extremo de capacidad teórica, en un día de tres turnos, con 20 horas útiles (dejando 4 horas para pequeños mantenimientos diversos) podrían hacerse 30 anillos o avances. Con 6 días por semana y 4.3 semanas por mes se obtendrían en teoría 770 avances al mes. Siendo 1.5 metros la longitud de cada avance, supone 1.155 metros/mes. Aunque esto pueda parecer exagerado, se han obtenido rendimientos de este orden de magnitud en varias ocasiones. Los 1.000 metros mes han sido superados, por ejemplo,



en el túnel del trasvase Guadiaro-Majaceite por FCC y Dragados en los meses siguientes:

Abril 96	1.064 m
Agosto 96	1.276 m
Septiembre 96	1.131 m
Noviembre 96	1.335 m
Diciembre 96	1.008 m
Enero 97	1.100 m



Bien es verdad que esta máquina, por sus especiales características, no paraba la excavación durante la colocación del revestimiento. Tras terminar este túnel, la tuneladora "Isabel" pasó a otro túnel en Ecuador, cerca de la presa de Daule, donde ha llegado a los 1.650 metros / mes. Ahora está pasando a Sudáfrica a seguir batiendo récords, entendemos.

AVANCE DE LAS TUNELADORAS AL 10 MAYO 1998

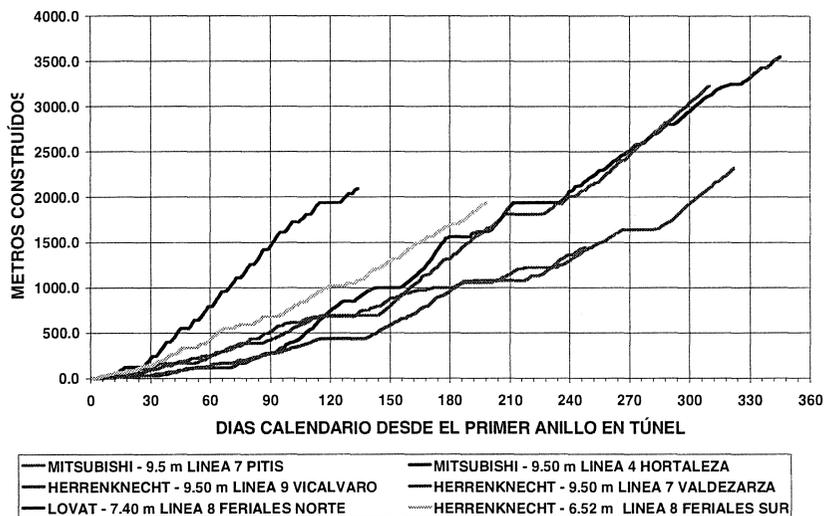


Figura 1

Los rendimientos medios de las tuneladoras inglesas (abiertas) y la francesa Mar Tren N del Canal de la Mancha fueron los siguientes:

TUNEL	FABRICANTE	DIAM	Long.Km	COMIENZO	FIN	Metros/Mes
UK Mar Tren N	Robbins-Markham	8,50	18,0	15-feb-89	01-may-91	671
UK Mar Tren S	Robbins-Markham	8,50	19,0	15-mar-89	08-jun-91	699
UK Tierra Tren N	Howden	8,84	10,0	02-jun-89	11-sep-90	644
UK Tierra Tren S	Howden	8,84		27-nov-89	20-nov-90	
UK Mar Servicio	Howden	5,38	25,0	01-dic-87		
UK Tierra Servicio	Howden	5,76	8,1	20-sep-88	20-nov-89	570
FR Mar Tren N	Kawasaki	8,50	20,0	ene-89	may-91	706

En definitiva, se tomó como rendimiento de los equipos EPB a considerar para la ampliación del Metro de Madrid, 400 metros de túnel al mes. Sobre los 1.155 metros teóricos este rendimiento supone un factor de seguridad de casi 3. Esto no quiere decir que se es demasiado pesimista. La realidad es que, aún con un ciclo de anillo corto, parecido al especificado, la utilización del equipo es sólo un porcentaje del disponible, debido bien a averías del mismo o bien a problemas logísticos, con los trenes de tierras o con los trenes de dovelas. En el cuadro siguiente se resumen, entre otros datos, las paradas por logística de las tuneladoras Mar Tren N del Canal de la Mancha, lados inglés y francés. Puede verse que los ciclos de la EPB francesa llegan a los 40 minutos de la especificación, y que la abierta inglesa incluso lo reduce a un 70% (27 minutos sobre los 40 pedidos), pero que las paradas por logística llegan a ser un tercio del tiempo total. Entendemos que 400 m/mes en túnel es un rendimiento medio para las EPB de Madrid.

UTILIZACION DE LA MAQUINA	Oct-Dic 89	Ene-Mar 90	Abr-Jun 90	Jul-Sep 90	Oct-Dic 90	Ene-Abr 91
UK Marine Running Tunnel N						
Utilización TBM, %		53,70	58,50	57,35	63,42	60,40
Paradas por logística %		12,50	15,30	28,80	21,18	28,10
Trenes /h uso TBM		1,20	1,44	1,37	1,96	2,25
Ciclo Minutos/anillo		51,20	43,30	52,45	33,60	27,00
Avance neto m/h		1,80	2,15	2,05	2,94	3,37
FRANCIA Marine Running Tunnel N						
Utilización TBM, %	44,10	46,10	52,20	53,60	53,80	57,00
Paradas por logística %	30,20	32,50	23,60	19,40	24,40	24,10
Trenes /h uso TBM	1,20	1,39	1,42	1,39	1,56	1,54
Ciclo Minutos/anillo	51,30	32,30	43,90	41,10	38,80	39,30
Avance neto m/h	1,89	2,22	2,26	2,22	2,49	2,46

Se tomaron 3 semanas para el cruce de cada una de las estaciones, de 115 metros de longitud, y que la tuneladora cruce arrastrada o empujada por sus propios gatos sobre una cuna especial que queda finalmente embebida en la solera de la estación. Los tiempos que se ha tardado en cruzar las estaciones han sido en general menores de estas 3 semanas.



RENDIMIENTO DE LA SOLUCIÓN A CIELO ABIERTO (PANTALLAS)

La profundidad media de las pantallas a construir es de 25 metros. Esto quiere decir que un equipo corriente de pantalladora de cuchara y grúa de apoyo puede hacer un panel de 2.50 m de largo en un turno, independientemente de su espesor.

En los estudios previos se desechó, por su excesivo e injustificado precio, la utilización de los equipos rotativos tipo hidrofresa, decisión que se ha visto confirmada durante la ejecución de los trabajos. Los equipos hidrofresa hubiesen podido hacer más de 100.000 m² de pantalla (de los 500.000 m² totales de la ampliación) si su precio hubiese sido razonable, pero las exigencias de los poseedores de los mismos nos han llevado a desecharlos para la ampliación de Metro. Es de suponer que a la vista de esa pérdida de mercado los verdaderos propietarios, accionistas o máximos responsables de estos equipos en Alemania y otros países tomen las medidas oportunas para no seguir perdiendo mercado que por otras características de los equipos (como verticalidad y rapidez) podrían ganar fácilmente.

El rendimiento tomado para las pantallas ha sido por tanto de un panel por equipo y día.

3. COMPORTAMIENTO DE LAS TUNELADORAS DE MADRID

En Junio de 1998, casi terminándose los 37.5 km de túneles de la Ampliación, puede resumirse en comportamiento de los equipos EPB recordando que ha habido 6 tuneladoras EPB (es decir, de presión de tierras) trabajando en la Ampliación: 4 Tuneladoras para túnel de 2 vías, fabricadas expresamente para la Comunidad de Madrid, con las especificaciones técnicas exigidas por la Comunidad:

- “La Adelantada”, diámetro 9.50 m, marca Mitsubishi, fabricada bajo licencia en Francia. Parte se construyó en la Comunidad de Madrid, en Coslada. Terminó la Línea 7, tramo Pitis – Valdezarza y actualmente está comenzando el tramo Recintos Feriales – Aeropuerto.
- “La Chata”, gemela de la anterior, diámetro 9.50 m. Trabaja en Línea 4. Termina el 12 de mayo de 1998 y pasa al mismo tramo del Aeropuerto, atacando desde el otro extremo.
- “Almudena”, diámetro 9.50 m, marca Herrenknecht, fabricada en Alemania. Trabaja en Línea 9.

- “La Paloma”, gemela de la anterior, diámetro 9.50 m. Trabaja en Línea 7, tramo Valdezarza - Canal.

2 Tuneladoras para túnel de 1 vía, existentes en España y utilizadas en la Ampliación de Metro para reducir costes y plazos:

- “La Cibeles”, diámetro 7.4 m, marca Lovat, fabricada en Canadá. Trabaja en Línea 8, tramo Mar de Cristal – Campo de las Naciones, túnel Norte.
- “Puerta del Sol”, diámetro 6.6 m, marca Herrenknecht, fabricada en Canadá. Trabaja en Línea 8, tramo Mar de Cristal – Campo de las Naciones, túnel Sur.

Debe decirse antes de nada que estas 6 tuneladoras de presión de tierras utilizadas han tenido problemas en sus comienzos, problemas de diseño y problemas de funcionamiento, pero debe decirse también que las 6 tuneladoras han superado esos problemas y han terminado con éxito sus trabajos en el plazo disponible o superándolo ligeramente. La superación de los problemas se ha debido fundamentalmente al trabajo de los técnicos de las empresas constructoras propietarias de las máquinas, y en poco porcentaje a la ayuda de los propios fabricantes.

En la figura 1 pueden verse los diagramas de avance comparados de las tuneladoras. En el eje de abscisas aparecen los días calendario desde que cada tuneladora ha colocado su primer anillo en tierras, es decir, una vez que ha comenzado a excavar en túnel y ha colocado todos los anillos de fuera del mismo que transmiten el empuje a la estructura de empuje. Como la distancia entre el frente de ataque, la cabeza, y el anillo recién colocado es del orden de los 8 metros en todas las máquinas, quiere decir esta representación que el primer anillo que aparece en el gráfico es realmente el 5º ó 6º realmente colocado. En ordenadas aparecen los metros de túnel construídos.

De estos diagramas comparados de avance se deducen varias conclusiones importantes.

1.- El diagrama de avance metros-días de una tuneladora es una curva que puede asimilarse a una parábola de eje vertical y vértice en el origen para las primeras semanas de funcionamiento, que llamaremos parábola o curva de aprendizaje y una recta para el resto del período de trabajos, cuando el equipo ha llegado a obtener su velocidad de crucero o rendimiento sostenible.

2.- La parábola de aprendizaje puede representarse por la ecuación

$$y = a d^2$$

donde



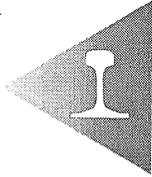
y = metros construídos

d = días calendario, teniendo en cuenta todos los condicionantes (estaciones, averías, descarriles, etc)

a = constante que define el funcionamiento de máquina y equipo

a = 0.15 (excelente)

a = 0.02 (malo)



La EPB LOVAT de línea 10 que posteriormente ha construído el túnel norte de línea 8 (Recintos Feriales-Mar de Cristal) ha tenido un $a=0.1$. Con este valor ha batido un record mundial para su diámetro (7.40 m) en línea 8, construyendo 1938 metros de túnel en 115 días hasta llegar al telescopio de entrada en la estación ($a=0.15$). Al continuar posteriormente con el tunelillo de maniobras entre líneas 4 y 8 ha construído en total 2100 metros en 134 días calendario ($a=0.12$). Las tuneladora Mitsubishi de línea 7 Tramo Arroyofresno-Valdezarza ha construído su túnel de 3113 metros en 304 días calendario ($a = 0,034$). Las tuneladoras que más problemas de arranque han tenido, las Herrenknecht $\Phi 9.40$ metros de línea 7 (Valdezarza-Islas Filipinas) y línea 9 (Pavones-Puerta de Arganda) han construído sus túneles de 1035 metros en 185 días ($a=0.03$, línea 7) y 1533 metros en 259 días ($a = 0.022$, línea 9).

2.- La experiencia de un equipo humano con una máquina determinada es básica para mejorar los rendimientos, consecuencia nada nueva por otra parte pero que no es suficiente para justificar un buen rendimiento. El día 134 de trabajo, la máquina LOVAT $\Phi 7.40$ m "Cibeles" en línea 8 había construído 2100 metros, como hemos dicho. Ese mismo día de trabajo la HERRENKNECHT $\Phi 6.52$ "Puerta del Sol" en línea 8 había construído sólo 1077 metros (es decir, el 51%), la HERRENKNECHT $\Phi 9.40$ "Almudena" en línea 9 había construído 716 metros (el 34%), la HERRENKNECHT $\Phi 9.40$ "Paloma" en línea 7 había construído 430 metros (el 20%), la MITSUBISHI $\Phi 9.40$ m "Adelantada" en línea 7 había construído 700 metros (el 33%) y la MITSUBISHI $\Phi 9.40$ m "Chata" en línea 4 había construído 885 metros (el 42%). No parece que el diámetro sea un factor determinante en el sentido de que a mayor diámetro menor avance, porque la Cibeles ha construído mucho más deprisa que la "Puerta del Sol" a pesar de tener 1 metro más de diámetro. Tampoco parece que sólo los kilómetros construídos previamente por una máquina y un equipo sean suficientes para garantizar un rendimiento, puesto que si la Cibeles había construído antes la línea del Pasillo Verde de Cercanías (2.500 metros de túnel) y la línea 10 de Metro entre Lago y Príncipe Pío (1600 metros), también la "Puerta del Sol" había construído la línea 5 del Metro de Valencia (3000 metros de túnel). Es evidente que hay otros factores que influyen en el rendimiento.

A continuación se detallan los comportamientos de las 6 EPB una a una.

EPB HERRENKNECHT Φ 9.4 LINEA 7 "PALOMA" VALDEZARZA A ISLAS FILIPINAS

El pedido de la máquina se firmó entre Cubiertas (posteriormente NECSO) y Herrenknecht el 16 de Julio de 1996. El primer embarque se hizo en Rotterdam 11 meses después, el 16 de Junio de 1997. El primer anillo se construyó en la estructura de empuje de la estación de Valdezarza el día 23 de Agosto de 1997. Desde el pedido al primer anillo transcurrieron 13 meses y una semana.

El coste del equipo, con los trenes e instalaciones, según datos del Contratista principal (UTE Cubiertas-Ferrovial, posteriormente NECSO-Ferrovial), fue el siguiente:

Equipo y backup	1.445 Millones Pta
Locomotoras Schoma (3) 50 Tn	43 Mpta / ud
Tandem (3)	24.8 Mpta / ud
Vagonetas Muhlhauser (21)	2.7 Mpta / ud
Mesillas dovelas y mortero (9)	1.8 Mpta / ud
Vagón de personal (1)	1.7 Mpta / ud
Equipo trasero, pórticos, etc	70.5 Mpta

Durante el período de aprendizaje las averías han sido numerosas, más de lo esperado. El día 28 de Enero de 1998 la máquina estaba en el anillo 397 y llevaba 151 días de trabajo, de forma que la media era en ese momento de 2.6 anillos (es decir, con anillos de 1.5 metros, 3.94 metros de longitud) por día de calendario. Rendimiento bajísimo que tenía sumamente preocupados al Contratista y a la Dirección General de Infraestructuras de la Comunidad. Esta máquina era la que se había tenido que situar en las peores condiciones de las 6 para sus trabajos de excavación, ya que hubo de montarse en el interior de la estación de Valdezarza, sumamente profunda, y no era posible la extracción de escombros por rampa. El sistema de extracción de escombros que se diseñó consistía en una cinta vertical de 30 metros de altura, de banda y canchales de goma, de Canadá, que era alimentada por un alimentador de banda metálica situado en el foso de descarga de trenes. Sin embargo, pronto se vió que no podría funcionar adecuadamente, ya que los materiales excavados tenían una alta plasticidad, se pegaban al alimentador y a la banda vertical y el sistema no funcionaba. Se decidió entonces ir a una solución más clásica. Se amplió el foso de descarga de los trenes y se construyó un túnel a través de las paredes de la estación, en el que se encajó la rampa de salida de camiones. De esta forma la extracción de escombros, aún con las dificultades de estar constreñido el sistema dentro de la estación de Valdezarza y a gran profundidad, comenzó a funcionar de forma adecuada. Los trenes de desescombro descargaban en el foso ampliado y allí una retroexcavadora con brazo de longitud adecuada cargaba sobre los camiones, que saliendo por la rampa y el túnel, llevaban las tierras a vertedero. El túnel de extracción se terminó en Enero de 1998, y los avances mensuales han sido los siguientes:



MES	ANILLOS	METROS
Ago 97	1	1,5
Sep 97	25	37,5
Oct 97	79	118,5
Nov 97	77	115,5
Dic 97	106	159,0
Ene 98	141	211,5
Feb 98	243	364,5

La máquina llegó a la estación de Francos Rodríguez el día 6 de Marzo de 1998, a los 188 días calendario del comienzo. El rendimiento medio en este primer tramo fue de 5.69 metros/día calendario. Salió de esta estación de Francos Rodríguez el día 5 de Abril, de forma que tardó 30 días calendario, aunque el paso propiamente dicho por la estación fue bastante más rápido. Se aprovechó el que en la estación de Valdezarza no había trenes descargando para sacar por ella la tuneladora "La Adelantada" del tramo Pitis – Valdezarza que llegó a Valdezarza el día 10 de Marzo, donde se desmontó para sacarla y fue trasladada al Campo de las Naciones para comenzar el tramo Campo de las Naciones – Aeropuerto.

EPB HERRENKNECHT Φ 9.4 LINEA 9 "ALMUDENA" PAVONES A PUERTA ARGANDA

El pedido de la máquina se firmó entre la UTE Entrecanales (posteriormente NECSO)-OCP (posteriormente ACS) y Herrenknecht el 7 de Agosto de 1996. El primer embarque se hizo el 14 de Abril de 1997, y la cabeza de corte llegó por un gran avión de transporte Antonov el 30 de Mayo de 1997. El primer anillo se construyó en la estructura de empuje del pozo del fondo de saco al sur de la estación Puerta de Arganda el día 14 de Junio de 1997. Desde el pedido al primer anillo transcurrieron 10 meses y una semana.

El sistema de descarga de escombros es por un foso construido en el fondo de saco al sur de la última estación "Puerta de Arganda". En este punto comienza a su vez la extensión de la Línea 9 a Rivas y Arganda, que no forma parte del presente Contrato, y que se ha estudiado de forma que las interferencias entre ambas obras sean mínimas. Los vagones no son de descarga lateral, sino de vuelco. Un gran pórtico en el foso levanta los vagones llenos, los vuelca en un acopio temporal y allí una pala carga los camiones de transporte a vertedero. El sistema es en principio más lento que el vuelco lateral, pero tiene como ventaja el que los vagones no manchan el túnel con el barro que siempre sale por las rendijas de los de descarga lateral. Este barro ensucia la vía provisional y es causa de numerosos descarriles que reducen los rendimientos diarios.

Las averías de esta máquina han sido similares a la de su gemela de Línea 7. Durante el período de arranque, la curva de aprendizaje, ha habido que ir ajustando y reparando pequeños defectos en todas las instalaciones auxiliares, como en el resto de las máquinas de todas las marcas. Sin embargo, en las dos máquinas Herrenknecht de Φ 9.40 m (y algo



similar ha ocurrido también en la tercera $\Phi 6.52$ m de Línea 8) ha aparecido un problema específico e importante: la rotura de los reductores que mueven los piñones de ataque que hacen girar la cabeza. La cabeza de corte gira por medio de una corona dentada situada en la parte interior del rodamiento principal, como es habitual en todas las máquinas de este tipo. En esta corona dentada atacan los 14 piñones de los 14 motores, que en los equipos Herrenknecht son hidráulicos. Pues bien, los rodamientos de estos 14 reductores han ido rompiendo de forma progresiva desde el comienzo de los trabajos, y ha habido que irlos sustituyendo cada vez. En un principio la avería parecía que era producida porque los motores hidráulicos de las cintas transportadoras estaban colgados del mismo circuito hidráulico que los motores principales de giro, y que estos motores de las cintas, de menor calidad aparente, arrojaban pequeñas virutas metálicas al circuito de aceite, residuos que dañaban los reductores de los piñones de los motores de giro. En consecuencia se sustituyeron los motores de las cintas por motores eléctricos, y las averías continuaron. No parece por tanto que esta haya sido la causa, sino que el gran esfuerzo de giro necesario para mover la cabeza en el suelo de Madrid hace que los rodamientos de los reductores sufran esfuerzos superiores a los de diseño. En definitiva, que los 14 motores de giro no son suficientes para el par motor necesario en la cabeza. A este respecto debe decirse que cuando la dirección General de Infraestructuras especificó un par motor de 2.000 mT, tanto el Contratista adjudicatario de las obras como el fabricante del equipo, Dr. Martin Herrenknecht, insistieron en que este par motor era excesivo, y de hecho dimensionaron la cabeza con un par motor inferior.

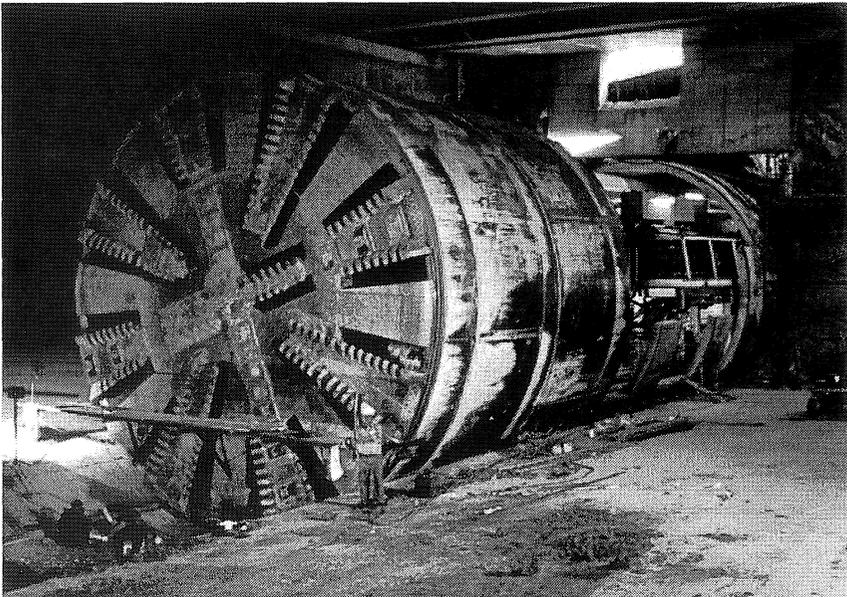


Foto 1: "Almudena" Herrenknecht entrando en Puerta de Arganda



La relación de averías más importantes sufridas por la máquina es también muy larga, y otro motivo muy importante del bajo rendimiento son los descarrilamientos, que ocurren como es natural en todas las máquinas.

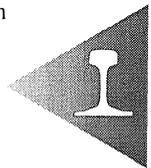
Los avances mensuales han sido los siguientes:

MES	ANILLOS	METROS
Jun 97	9	13,5
Jul 97	113	169,5
Ago 97	122	183,0
Sep 97	177	265,5
Oct 97	87	130,5
Nov 97	145	217,5
Dic 97	58	87,0
Ene 98	100	150,0
Feb 98	194	291,0

La máquina llegó a la estación Puerta de Arganda, tras construir 674 metros de túnel y 449 anillos, el día 7 de Octubre de 1997, a los 112 días calendario del comienzo, con un rendimiento medio a origen de 6 metros /día calendario. La salida de la estación fue el día 27 de Octubre, atravesando la estación por el método habitual, empujándose el propio escudo por medio de las 3 dovelas inferiores situadas sobre la cuna que se había dejado en la solera. La entrada en la estación siguiente, en la Universidad Ramón Carande, tuvo lugar el día 9 de Marzo de 1998, tras haber construido 1.079 anillos y 1.619 metros (630 anillos y 921 metros desde la estación anterior). El rendimiento medio a origen hasta este momento era de 6.1 metros por día calendario, y 10 metros por día de trabajo de la máquina.

EPB MITSUBISHI Φ 9.4 LINEA 7 "ADELANTADA" ARROYOFRESNO A VALDEZARZA

El pedido de la máquina se firmó entre FCC y la empresa NFM, constructora del equipo bajo licencia de Mitsubishi, el 2 de Abril de 1996. El primer embarque se hizo el 2 de Diciembre de 1996, llevando por transporte fluvial y marítimo las piezas al Puerto de Sagunto, donde la última llegada fue el 19 de Enero de 1997. Problemas con el transporte terrestre de Sagunto a Madrid hicieron que las piezas llegaran a obra el 14 de Marzo de 1997. El autor de este capítulo no puede resistir la tentación de contar al lector una anécdota. Dos meses de arduas gestiones hicieron falta para tener todos los permisos de transporte, de las Demarcaciones de Carreteras de Valencia y Castilla La Mancha, por los estudios que hubo que hacer sobre la resistencia de las obras de fábrica, porque la pieza más pesada pesaba más de 80 Tn. Se decidió finalmente que en la estructura del km 61 en Fuentidueña de Tajo la pieza no podía pasar por la estructura de sentido a Valencia, y que sería necesario desviar el tráfico para que pasara por el nuevo viaducto de la otra calzada. El autor, que estaba filmando en vídeo este transporte, no filmó el paso sobre la estructu-



ra en cuestión, porque una reunión en Madrid le hizo volver a la oficina. Se enteró el día siguiente que por un error de coordinación entre los distintos organismos y el transportista la pieza pesada pasó por la estructura vieja sin que ocurriera nada. Son las cosas de nuestro país. El primer anillo se construyó en la estructura de empuje de la estación Arroyofresno el día 23 de Abril de 1997. Desde el pedido al primer anillo transcurrieron 12 meses y medio, con dos meses perdidos en el transporte por carretera.

El coste del equipo, con los trenes e instalaciones, según datos del Contratista principal, fue el siguiente:

Equipo NFM	1.354 Millones Pta
Backup	382 Millones Pta
Locomotoras y Tandem Schoma 50 Tn (4+4)	357 Millones Pta
Vagonetas Muhlhauer (31)	107 Millones Pta
Pórtico 25 Tn	23.1 Millones Pta
Cintas transportadoras C4-C5-C6	18.3 Millones Pta
Silo mortero	9.2 Millones Pta
Ventilador Korfmann	5.6 Millones Pta
Bomba inyectora	1.2 Millones Pta
Locomotora Schoma CFL 180	18.3 Millones Pta
Ventilador Korfmann	5.6 Millones Pta
Total	2.287 Millones Pta

Otros costes adicionales han sido los siguientes:

Transporte	60 Millones Pta
Seguros	50 Millones Pta
Mejoras y equipos adicionales	81 Millones Pta

Paso de Estaciones

La tuneladora salió de la Estación de Arroyofresno. La siguiente estación, Lacoma, se atravesó en túnel, poniendo anillos, ya que aún no se había terminado de excavar el recinto entre pantallas. La siguiente estación, Avenida de la Ilustración, se atravesó también en túnel. La siguiente, Peñagrande, estaba ya excavada, y se llegó a ella el 27 de Noviembre, a los 1.811 metros y 208 días calendario del comienzo. El paso se hizo, como en todos los pasos de máquina de la actual ampliación, preparando en la solera de la estación la cuna de paso, con forma circular. En la cuna se dejaron embebidos dos perfiles doble T de ala ancha sobre los que iba deslizando el escudo, que avanzaba empujado por sus propios gatos, colocando las 3 dovelas inferiores. El paso de la estación terminó el 16 de Diciembre de 1997, a los 19 días de entrar, sin ninguna incidencia. La siguiente estación, Antonio Machado, que se acababa de cambiar de posición por petición de los vecinos del inmueble sobre la que estaba situada, tampoco estaba excavada, y se pasó en túnel. Finalmente, la máquina salió en el pozo de la estación de Valdezarza entre los días 10 y 20 de Marzo, siendo desmontada para su extrac-



ción y transportada al pozo de ataque situado en los recintos Feriales del Campo de las Naciones, donde comenzó el nuevo tramo Feriales – Aeropuerto de Barajas que se había adjudicado a la UTE FCC –Dragados el 24 de Febrero de 1998.

Las fechas de llegada y salida de cada estación fueron las siguientes:

ESTACION	DISTANCIA Metros	FECHA ENTRADA	FECHA SALIDA	FORMA DE PASO
ARROYOFRESNO		COMIENZO	5 May 97	
LACOMA	588	16 Ago 97	26 Sep 97	En túnel, con dovelas
ILUSTRACION	560	26 Oct 97	3 Nov 97	En túnel, con dovelas
PEÑAGRANDE	431	27 Nov 97	16 Dic 97	Arrastre
ANTONIO MACHADO	536	21 Ene 98	28 Ene 98	En túnel, con dovelas
VALDEZARZA	771	10 Mar 98	FIN OBRA	

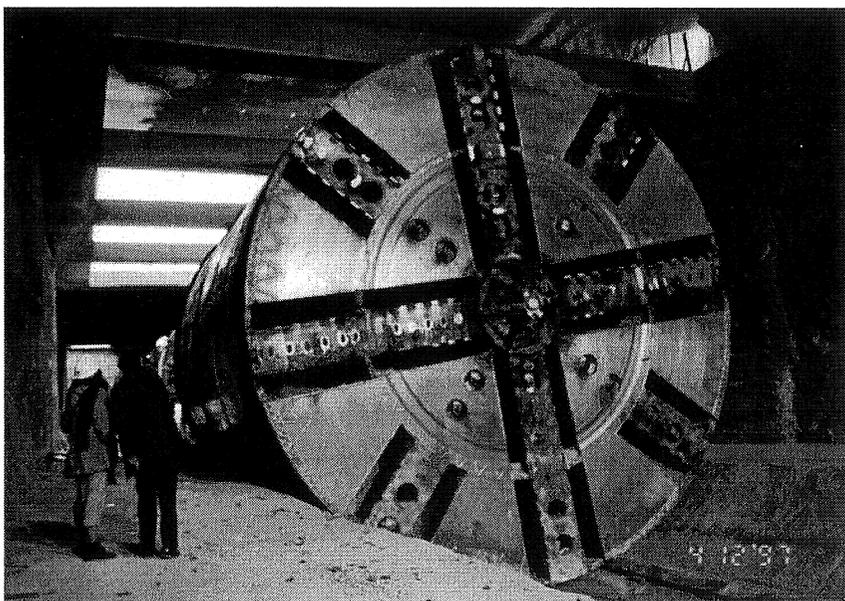
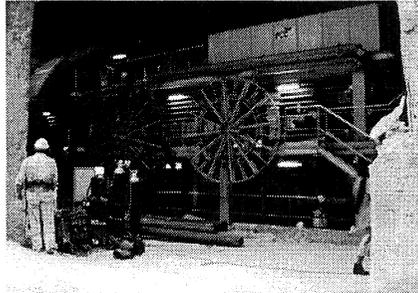
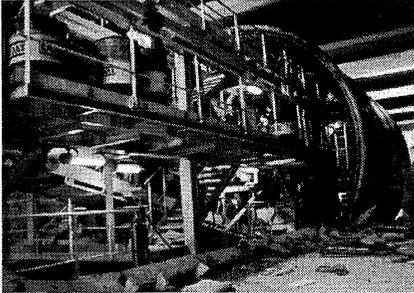


Foto 2: "Adelantada" Mitsubishi entrando en Peñagrande

Rendimientos

El túnel comenzó el 23 de Abril de 1997 y terminó sus 3.231 metros el 9 de Marzo de 1998, a los 310 días de calendario. El avance medio a origen es de 10.42 metros/día calendario. Se colocaron en total 2.154 anillos durante los 216 días de trabajo de la máquina, lo que da un rendimiento medio de 10 anillos por día de trabajo, 15 metros de túnel terminado. El rendimiento, pues, ha sido excelente.

MES	ANILLOS	METROS
May 97	77	115,5
Jun 97	67	100,5
Jul 97	133	199,5
Ago 97	187	280,5
Sep 97	82	123,0
Oct 97	363	544,5
Nov 97	300	450,0
Dic 97	148	222,0
Ene 98	343	514,5
Feb 98	354	531,0
Mar 98	102	153,0
TOTAL	2.155	3.233,0



Fotos 3 y 4: "Adelantada" en Peñagrande

Desgastes

El suelo de Madrid, por ser de origen granítico, es sumamente abrasivo. Los desgastes han sido grandes. Los elementos cortadores de la cabeza de esta máquina son 265 en total, 152 cuchillas y 113 picas, de las que 25 sustituyen a los 25 cortadores de disco cuando éstos no están instalados. Son los siguientes:

128 Cuchillas de corte normales (C3), situadas en los radios y semirradios de la cabeza, junto a las aberturas de entrada, y que son las básicas para la excavación.

16 Cuchillas de corte de gálibo (C1), situadas en los extremos de los radios y semirradios de la cabeza, y que son las básicas para la excavación perimetral y que el escudo pueda avanzar.

8 Cuchillas de corte largas (C2), situadas en los puntos medios de los radios de la cabeza, y que deberían haber sido situadas más abajo, ya que la zona en que los semirradios acaban es una gran longitud sin dientes de corte donde se han producido graves desgastes.

26 Picas de corte (P1) situadas en el pinocho o parte central de la cabeza.

25 Picas de corte (P2) situadas en los alojamientos de los cortadores de discos cuando éstos no están instalados.

62 Picas de corte (P3) situadas en la parte central de los radios y semirradios de la cabeza.



Los desgastes han hecho necesario realizar 344 cambios de los C1, 120 de los C2 y 1203 de lo dientes C3. En 1514 anillos (2271 metros), ha habido que cambiar 1923 elementos de corte, fundamentalmente las cuchillas tipo C3, que son las más abundantes y que más trabajan, y de las que ha habido que cambiar 1.203 uds. Los cambios necesarios han dado los desgastes medios siguientes:

Cuchillas de corte de gálibo (C1)	0,15 uds/ml de túnel
Cuchillas de corte largas (C2)	0,053 uds/ml de túnel
Cuchillas de corte normales (C3)	0,53 uds/ml de túnel
Picas de corte (P1)	0,0211 uds /ml de túnel
Picas de corte (P2)	0,0511 uds/ml de túnel
Picas de corte (P3)	0,04 uds/ml de túnel

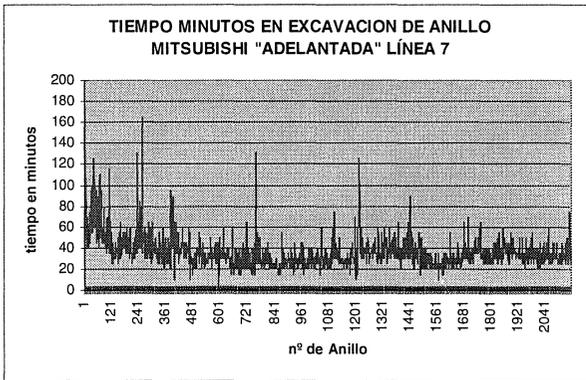


Figura 2

Los tiempos de excavación de los 2153 anillos han variado desde 25 a 175 minutos, con una media de 35,6 minutos y una moda de 30 minutos. La desviación típica es de 14,2 minutos.

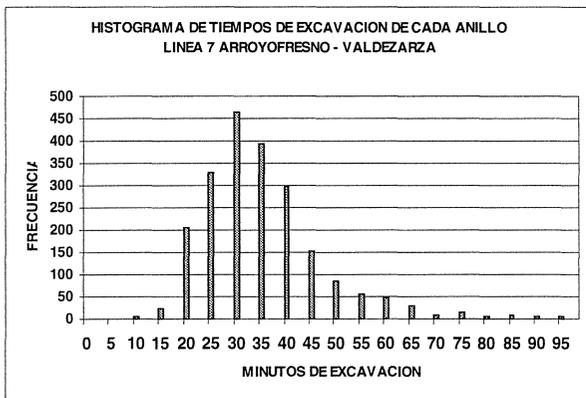


Figura 3

En la figura 2 se observa perfectamente cómo el tiempo de excavación va disminuyendo conforme va aumentando el número de anillos construidos, al ir avanzando la curva de aprendizaje del equipo. El histograma de los tiempos de excavación es el dado en la figura 3.

El tiempo de colocación del anillo de dovelas varía de 10 a 245 minutos, con una media de 33,5 minutos, una moda de 25 minutos y una desviación típica de 20.5 minutos. El gráfico de tiempos de colocación de cada anillo es el de la figura 4. El tiempo de colocación de dovelas también va disminuyendo al ir aumentando el número de anillos construidos, hasta llegar a un valor cercano a los 25 minutos. El tiempo especificado para el equipo era de 21 minutos. El histograma de los tiempos de colocación de los anillos de revestimiento es el que aparece en la figura 5.

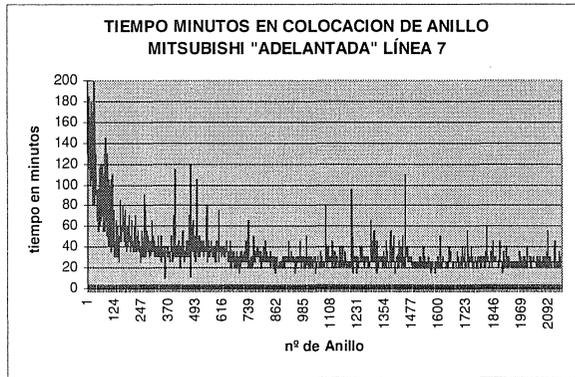


Figura 4

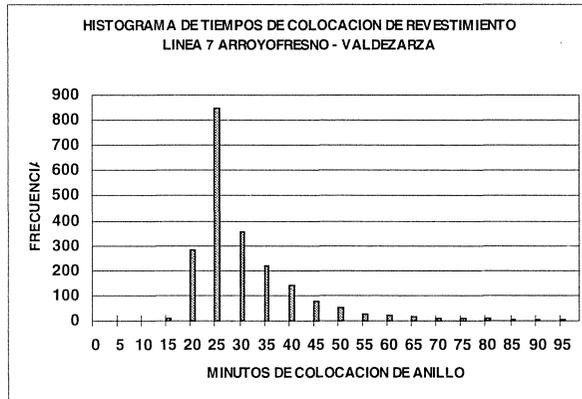


Figura 5

EPB MITSUBISHI Φ 9.4 LINEA 4 "CHATA" ESPERANZA A MAR DE CRISTAL

El pedido de la máquina se firmó entre Dragados y la empresa NFM, constructora del equipo bajo licencia de Mitsubishi, el 1 de Abril de 1996. El primer embarque se hizo el 27 de Enero de 1997, llevando por transporte fluvial y marítimo las piezas desde Chalon al Puerto de Sagunto, donde el primer embarque llegó el 2 de Febrero de 1997 y el segundo embarque, que salió el 1 de Febrero de 1997, llegó el 5 de Febrero de 1997. El transporte por carretera se hizo durante el período del 25 de Febrero al 26 de Marzo de 1997, y la última pieza llegó a la obra el 3 de Abril de 1997. El primer anillo



se construyó en la estructura de empuje del pozo del fondo de saco de Esperanza el día 27 de Mayo de 1997, y desde el pedido al primer anillo transcurrieron 13 meses, con un mes perdido sin justificación en el transporte por carretera.

La instalación de la máquina, extracción de escombros y alimentación de dovelas, mortero de inyección y otros suministros, ha sido una de las más difíciles de la ampliación, por el pequeño espacio disponible en el fondo de saco de la estación de Esperanza donde se construyó el pozo de ataque. El pozo es sumamente corto, de forma que para poder instalar todo el backup o tren de apoyo de la máquina hubo que ir construyendo los primeros anillos de forma prácticamente manual, hasta que la longitud de túnel fue suficiente para la longitud de todo el backup

Desde el comienzo del túnel, el 27 de Mayo, hasta la llegada a la estación de Canillas el día 15 de Octubre de 1997 transcurrieron 143 días calendario, pero sólo 86 días de trabajo efectivo, ya que se perdieron 57 días (i) en la parada que se hizo bajo el Liceo Francés para que terminaran las clases antes de que la máquina pasara por debajo y en averías importantes que sufrió la máquina y que se describen en otros párrafos. En este tramo de 1.000 metros y 667 anillos el avance medio fue de 7 metros por día calendario y 11.5 metros de túnel por día de trabajo.

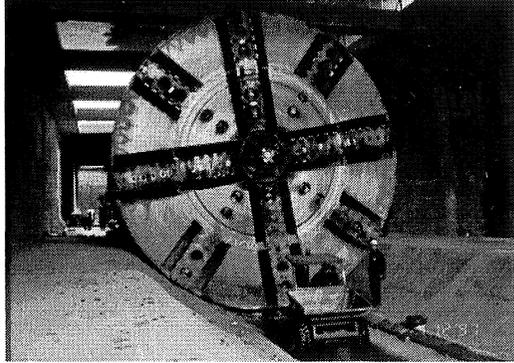


Foto 5: "Chata" Mitsubishi Línea 4 entrando en Canillas

La salida de la estación de Canillas fue muy rápida, el día 28 de Octubre, tardando solamente 13 días en atravesarla. Desde este punto hasta la estación Mar de Cristal, con 369 anillos y 554 metros de túnel, la máquina tardó 24 días de calendario. El paso de la estación Mar de Cristal se hizo en 12 días, entrando la máquina el día 5 de Diciembre de 1997 en el telescopio de conexión con la Línea 8 (Mar de Cristal – Recintos FERIALES)

Para la construcción de los 1.938 metros de túnel desde el comienzo en el fondo de saco de Esperanza el día 27 de Mayo de 1997 hasta la salida del telescopio de conexión con Línea 8, el día 23 de Diciembre de 1997, transcurrieron 212 días calendario y 126 días de trabajo efectivo. El rendimiento medio por día de calendario ha sido de 9.14 metros, y por día de trabajo de 15.4 metros. Esta máquina ha hecho dos veces (19 de Noviembre y 2 de Diciembre de 1997) un máximo de 25 anillos en 24 horas, lo que es un récord mundial para su diámetro.

Los avances mensuales han sido los siguientes:

MES	ANILLOS	METROS
May 97	15	22,5
Jun 97	17	25,5
Jul 97	41	61,5
Ago 97	181	271,5
Sep 97	310	465,0
Oct 97	154	231,0
Nov 97	346	519,0
Dic 97	228	342,0
Ene 98	199	298,5
Feb 98	282	423,0

Las averías del equipo han sido también muy numerosas. Los tiempos de excavación han variado mucho a lo largo de la traza. La máquina ha excavado en cerrado (es decir, con tornillo y cámara a presión, sea alta o baja) del origen hasta el anillo 178 inclusive, del anillo 565 al 667 inclusive y del 1417 al final del tramo. Como puede verse en la figura 6, los tiempos de excavación en abierto son mucho menores que en cerrado.

Los tiempos de colocación de anillo son los que se indican en la figura 7. Puede verse cómo ha ido reduciéndose desde los 60 a 80 minutos que se tardaba al comenzar a trabajar con la máquina hasta los 20 a 25 minutos al final del túnel, tiempo que coincide sensiblemente con los 21 minutos especificados al encargar la máquina.

Pase de estaciones

Las fechas de pase de las dos estaciones son las siguientes:

ESTACION	DISTANCIA Metros	FECHA ENTRADA	FECHA SALIDA	FORMA DE PASO
POZO DE ESPERANZA		COMIENZO	26 May 97	
CANILLAS	1005	14 Oct 97	28 Oct 97	Arrastre
MAR DE CRISTAL	555	19 Nov 97	FIN TRAMO 1	

En el anillo 18, al llegar bajo el Liceo Francés el día 1 de Junio de 1997, se paralizaron los trabajos durante 27 días, hasta el 28 de Junio en que recomenzaron. Se decidió esta parada por el mal estado de uno de los pequeños edificios del Liceo,

La máquina va a terminar su túnel el próximo 12 de Mayo, y pasará al tramo Recintos Feriales – Aeropuerto de Barajas, atacando desde el extremo contrario a donde ha comenzado la “Adelantada”.



EPB HERRENKNECHT Ø6.52 LINEA 8 "PUERTA DEL SOL" CAMPO DE LAS NACIONES A MAR DE CRISTAL (TÚNEL SUR)



La máquina, para túnel de una sola vía, era propiedad de la UTE Entrecanales (posteriormente NECSO)- OCP (posteriormente ACS). Se pidió a Herrenknecht en Mayo de 1993, y embarcó para Valencia en Julio de 1994. Construyó la línea 5 del Metro de Valencia entre las estaciones de Alameda y Avinguda, que terminó en Mayo de 1997. La máquina se transportó a Madrid y colocó el primer anillo en la estructura de empuje de la estación de Campo de las Naciones el 18 de Agosto de 1997.

Las características son las siguientes:

Modelo : Herrenknecht EPB
 Diámetro de excavación: 6.52 m
 Abertura de cabeza 35%
 Longitud total: 6 m
 Peso total: 420 t
 Cilindros articulación: 12 con 900 t
 Potencia total instalada 1.250 KW
 Velocidad de giro variable de 0 a 9 rpm
 Par motor máximo 500 mT hasta 1 rpm
 Motorreductores : 8 uds
 Empuje : 24 cilindros en 12 parejas = 4.320 t
 Carrera : 1.75 m
 Velocidad máxima de avance 60 mm/min
 Cintas: 0.8 m x 25 m largo (2 uds) a 1 m/s
 Radio mínimo : 125 m
 Tornillo: 70 cm x 7.5 m, velocidad variable hasta 15 rpm reversible

Otros Datos:

Fecha de Pedido: Mayo 1993 (Para línea 5 del Metro de Valencia, tramo Alameda – Avinguda)
 Fecha embarque : Julio 1994
 Precio, con backup : 910 MPta
 5 locomotoras Schoma CFL-180DCL de 24 t 23.5 Mpta/ud
 13 vagones Mulhauser 12 m3 + 4 portadovelas + 3 mortero 49.0 Mpta
 Planta de fabricación de dovelas, 28 moldes, 8 anillos/turno 110 MPta

Los avances mensuales han sido los siguientes:

MES	ANILLOS	METROS
Ago 97	33	39,6
Sep 97	160	192,0
Oct 97	281	337,2
Nov 97	164	196,8
Dic 97	247	296,4
Ene 98	337	404,4
Feb 98	279	334,8

EPB LOVAT Φ 7.4 LINEA 10 LAGO – PRINCIPE PIO (PASO BAJO EL RÍO MANZANARES) Y LINEA 8 “PUERTA DEL SOL” CAMPO DE LAS NACIONES A MAR DE CRISTAL (TÚNEL NORTE)

Sin duda esta máquina ha sido la estrella de la ampliación del Metro en cuanto a su eficacia y rendimiento en los trabajos. Construyó en primer lugar la nueva Línea 10 de Lago a Príncipe Pío, pasando bajo el río Manzanares, y a continuación el túnel Norte del tramo Mar de Cristal – Recintos Feriales de la nueva Línea 8.

Las características son las siguientes:

Modelo : Lovat M-288 SE
 Diámetro de excavación: 7.38 m (288 pulgadas)
 Longitud total: 7 m
 Peso total: 500 t
 Articulación hasta 1.5°
 Cilindros: 16 con 170 t
 Potencia: 6 x 225 KW = 1.350 KW
 Velocidad y par motor: 559 mT a 230 bar, 2.3 rpm (mínima)
 268 mT a 230 bar, 4.8 rpm (máxima)
 Par de arranque: 736 mT a 275 bar
 Empuje : 25 cilindros de 125 t = 3.000 t a 210 bar
 Carrera : 1.73 m
 Cintás: 1.2 m x 15 m largo + 1.2 m x 50 m largo
 Potencia total conectada: 1.750 KW
 Tensión 6.000 V primaria, 600 V secundaria, 50 Hz
 Radio mínimo : 200 m
 Tornillo: 30” velocidad variable hasta 6.5 rpm reversible

Otros Datos:

Fecha de Pedido: 30 Julio 1992	
Plazo fabricación : 9 meses	
Precio, con backup :	7.5 Millones \$USA
1 locotractor Zeplin LoK 14.240	39 Mpta
6 vagones Mulhauser 14 m3	2.2 Mpta/ud
1 vagón mortero	6 Mpta/ud
2 mesillas dovelas	0.8 Mpta/ud

Línea 10 Lago – Príncipe Pío

Tramo 1 569 m

Comienzo de perforación el 10 de enero de 1996. Se perforaron 100 metros en cerrado, con tornillo, con un rendimiento de 9 m/día, y el resto en abierto, con cinta, con un rendimiento de 23.4 m/día. El túnel terminó el 1 de Marzo de 1996.



Tramo 2 721 m

El desmontaje, traslado y nuevo montaje se hizo en 31 días. Comenzó la perforación el 2 de Abril de 1996 y terminó el 21 de Junio de 1996. Se perforaron con tornillo 147 metros, a 14.7 m/día, y el resto con cinta, a 21.9 m/día durante 569 metros y a 7.5 m/día un tramo de 45 metros especialmente malos.

Tramo 3 314 m (todo con tornillo)

El nuevo desmontaje, montaje y traslado se hizo en 46 días, con una extracción especialmente difícil por el pequeño pozo de la Glorieta de San Vicente. Comenzó la perforación el 6 de Agosto de 1996 y terminó el 10 de Septiembre de 1996. (La obra se puso en servicio el 26 de Diciembre de 1996). El rendimiento medio fue de 13.4 m/día.

La longitud total de 1604 m se perforó a una media de 16 m/día

Línea 8 Mar de Cristal – Campo de las Naciones (Túnel Norte)

La máquina se montó en los recintos Feriales y colocó el primer anillo en la estructura de empuje de esa estación el 22 de Julio de 1997.

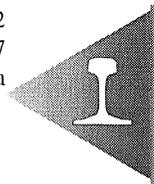
Los avances mensuales han sido los siguientes:

MES	ANILLOS	METROS
Jul 97	20	24,0
Ago 97	310	372,0
Sep 97	536	643,2
Oct 97	591	709,2
Nov 97	268	321,6
Dic 97	25	30,0

Esta máquina tiene el récord de longitud construida en un mes en la Ampliación de Metro de Madrid, con 709,2 metros en Octubre de 1997. Además tiene el récord mundial del tramo para ese diámetro, con 1.938 metros de túnel construidos en 115 días calendario (a 17 m/día calendario) y 73 días de trabajo, a 26.5 m/día de trabajo.

Comentarios sobre las tuneladoras EPB

Las 4 tuneladoras grandes (9.50 m de diámetro de corte) construyen túnel de doble vía, y en la Consejería de Obras Públicas se especificó para su aceptación un empuje total de 10.000 toneladas, mientras que lo habitual en el resto de los países para estos diámetros de máquinas era de 6.000 tn. Se fijó ese empuje para poder absorber empujes del terreno superiores al llamado “empuje al reposo” e incluso poder llegar a vencer el denominado “empuje pasivo” a determinadas profundidades.



El par motor de desbloqueo, es decir, la “fuerza” de giro de la cabeza de corte, que es el otro parámetro esencial de las tuneladoras, se fijó en 2.000 metros.Tonelada, mientras que lo habitual para este diámetro era como máximo de 1.600 mT.

Se especificó también que la máquina dispusiera de tornillo sinfín y de cinta transportadora, de forma que pudiera trabajar de dos formas:

- Si el terreno es muy malo, empuja mucho o hay mucho agua, se trabajará en modo cerrado, sacando el suelo de la cámara de excavación por medio del tornillo sinfín. De esta forma queda totalmente impedido el que el suelo del frente del túnel pueda empujar, entrar en la máquina y formarse cavernas o hundimientos en superficie.
- Si el terreno es bueno y no empuja se trabajará en modo abierto, sacando los materiales excavados de la cámara por medio de la cinta transportadora.

Se especificó también que pudiera pasarse de modo cerrado a abierto o viceversa en un turno de trabajo, es decir, en 8 horas.

Los tiempos de excavación especificados fueron los correspondientes a unos avances de 3 cm/minuto en cerrado y hasta 8 cm/minuto en abierto. Como los anillos a colocar son de 1.5 metros (150 cm), esto quiere decir que en la excavación debe tardarse en el caso óptimo 19 minutos. Los tiempos de colocación del anillo de dovelas se fijaron en 21 minutos.

Un avance completo, por tanto, puede hacerse en 19 min avance excavación + 21 min colocación anillo = 40 minutos, lo que en 24 horas daría un máximo teórico de 36 anillos. Esto en la práctica nunca se calcula así, porque se trabaja con horas de 50 min y con días de 20 horas (reservando 4 para mantenimiento), con lo que el máximo teórico es de 25 anillos. Esto ya se ha conseguido en nuestra ampliación de Metro, lo que probablemente es récord mundial para este diámetro y para tuneladoras de suelo (no de roca, que son más rápidas).

Asientos y subsidencias

Las zonas de Madrid en que estamos trabajando están cubiertas de sensores, clavos y elementos de medida y auscultación. Se han dispuesto más de 6.000 puntos de control de todo tipo. El proceso de todos estos datos, junto con los datos de las 6 tuneladoras, que envían 64 variables cada minuto al centro de control, más los datos de edificios instrumentados, de anillos instrumentados y de características del terreno, se almacenan y procesan en una base de datos. Se ha elegido una sencilla y comercial, manejada por un programa específico, Todos los datos y medidas se pondrán en su momento a disposición de los técnicos interesados.

