

REFLEXIONES SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LOS TÚNELES DEL METRO DE MADRID

Manuel J. Melis

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M.Sc, MBA

Director General de Infraestructuras del Transporte, Comunidad de Madrid

Vicepresidente de Metro de Madrid, S.A.

RESUMEN

La ampliación de la red del Metro de Madrid que está llevando a cabo la Consejería de Obras Públicas de la Comunidad de Madrid supone entre otras cosas la construcción de más de 20 km de túnel de gran sección en suelos blandos. Este artículo resume algunas de las consideraciones tenidas en cuenta al planificar los trabajos y seleccionar los métodos constructivos más adecuados para la ejecución de los túneles. Se resume también la historia de los métodos constructivos utilizados en los túneles del Metro de Madrid desde sus comienzos en 1917 hasta las últimas obras terminadas en 1995, describiendo de forma resumida los incidentes más notables ocurridos con cada uno de ellos.

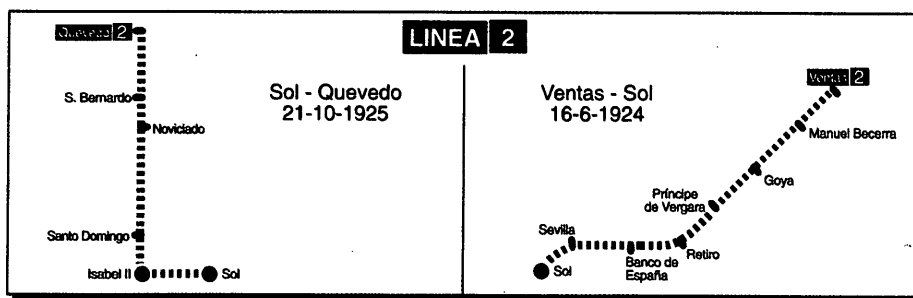
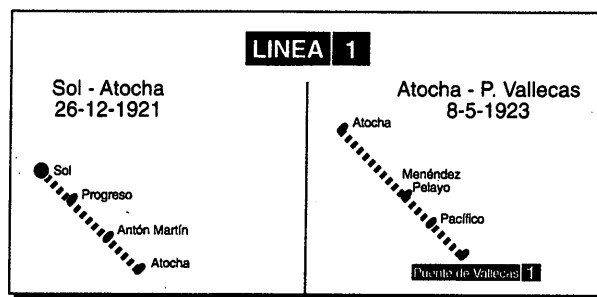
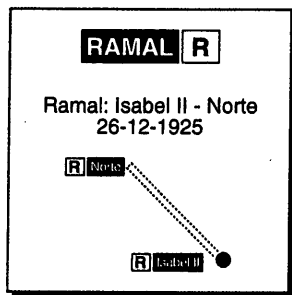
ABSTRACT

The extension of the underground railway network of Madrid being carried out at present implies the construction of more than 20 km of large section tunneling in soft soil. This article deals with some aspects of the plan of work and of the selection of the most suitable methods for the construction of the tunnels. Some details are given of the methods used in building the tunnels of the Madrid underground railway between their initiation in 1917 and the completion of those that were completed in 1995.

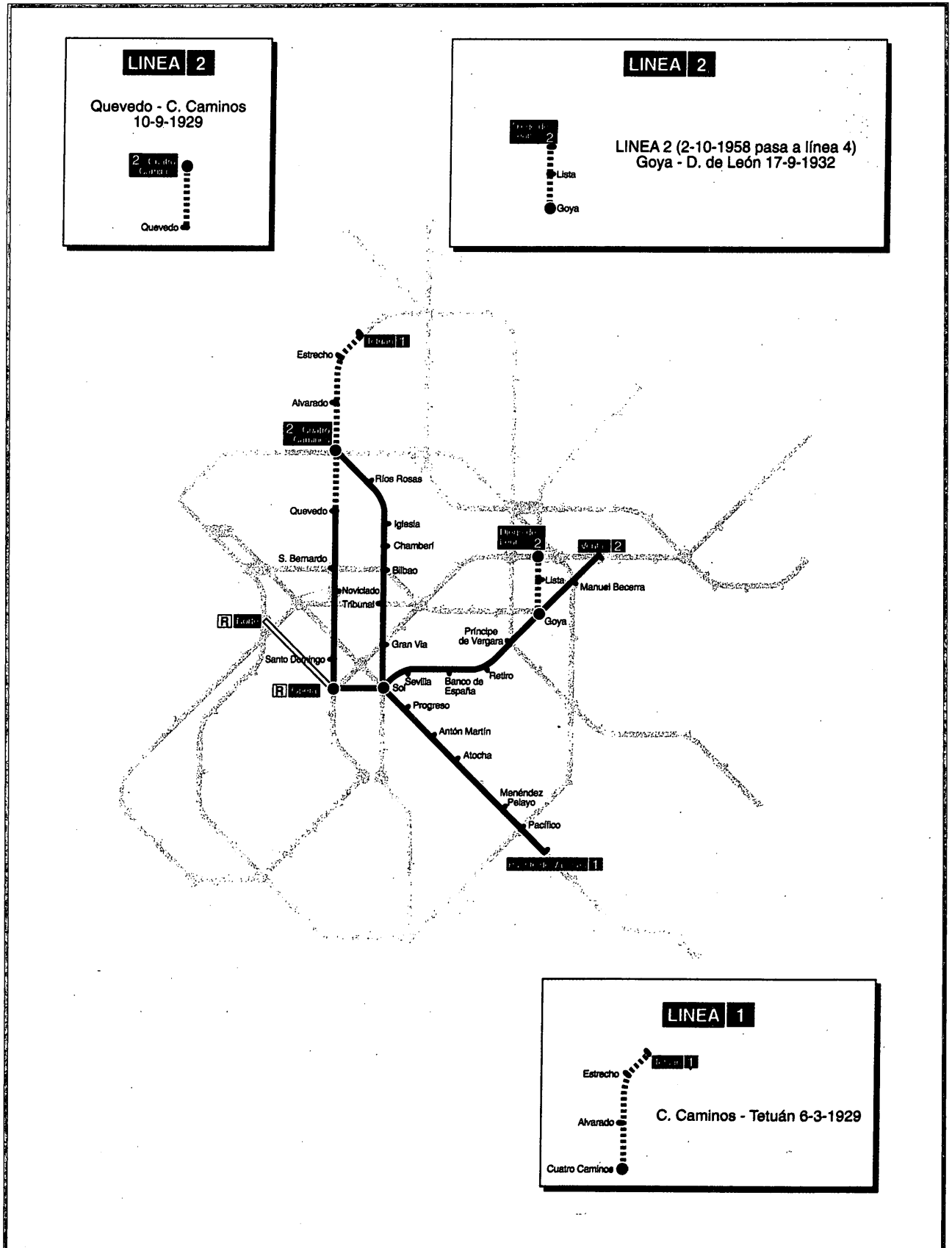
Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
enero de 1997.

Recibido en ROP:
octubre de 1996

**Evolución
de la red.
1920-1926.**



**Evolución
de la red.
1927-1935.**



LA GUERRA CIVIL: 1936-1939

Durante este período no cesó la actividad de Metro, inaugurándose el primer tramo de la línea 3, Embajadores-Lavapiés-Sol, el día 9 de Agosto de 1936. Tres días antes se habían comenzado a dejar abiertas las puertas por la noche para que el metro pudiera ser utilizado como refugio antiaéreo.

LA POSTGUERRA: 1940-1954

La situación institucional de la Compañía seguía siendo la de una Empresa privada. Sin embargo, la Administración Central se reservó la decisión de fijar la política salarial interna y el sistema tarifario. Por motivos sociales fué necesario congelar prácticamente las tarifas, lo que supuso una situación de desequilibrio económico para Metro de consecuencias gravísimas para su futuro como empresa privada.

EL ESTADO CONSTRUYE

LA INFRAESTRUCTURA: 1955-1966

El 22 de Septiembre de 1955 se promulgó el Decreto Ley de "Régimen compartido de financiación de la Compañía Metropolitana de Madrid" por el que se distribuyó la financiación de Metro. A partir de entonces, y ante la carencia de recursos financieros de Metro, correspondió al Estado la construcción de la infraestructura de las nuevas líneas y a la Empresa el equipamiento, el material móvil y la explotación.

El desarrollo del Plan de Transportes se materializó con la puesta en funcionamiento de nuevos tramos que ampliaron las líneas existentes y con la construcción de la nueva línea 5. Se inauguró también el Ferrocarril Suburbano de Carabanchel, cuya explotación se concedió a Metro en 1960.

EL PLAN DE AMPLIACIÓN

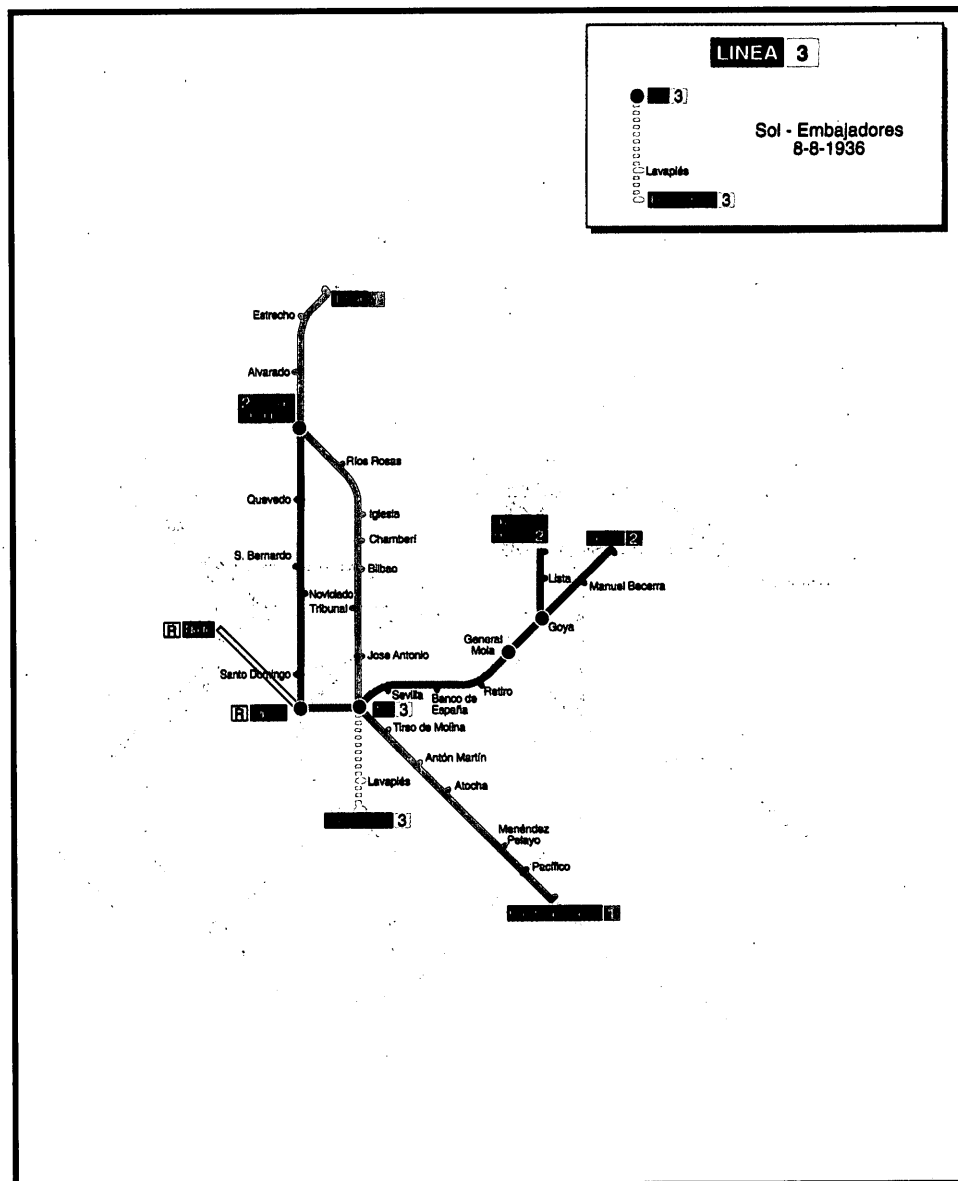
DE FERNÁNDEZ DE LA MORA: 1967-1977

De acuerdo con la tendencia de crecimiento de la población de Madrid se planteó la ampliación de la red metropolitana, y así surgió el Plan de Ampliación de Metro de 1967. La Compañía atra-

vesaba en los primeros años de la década de los 70 un período sumamente difícil desde el punto de vista económico, lo que llevó a plantear sucesivos incrementos de tarifas que garantizaran la estabilidad de la Empresa.

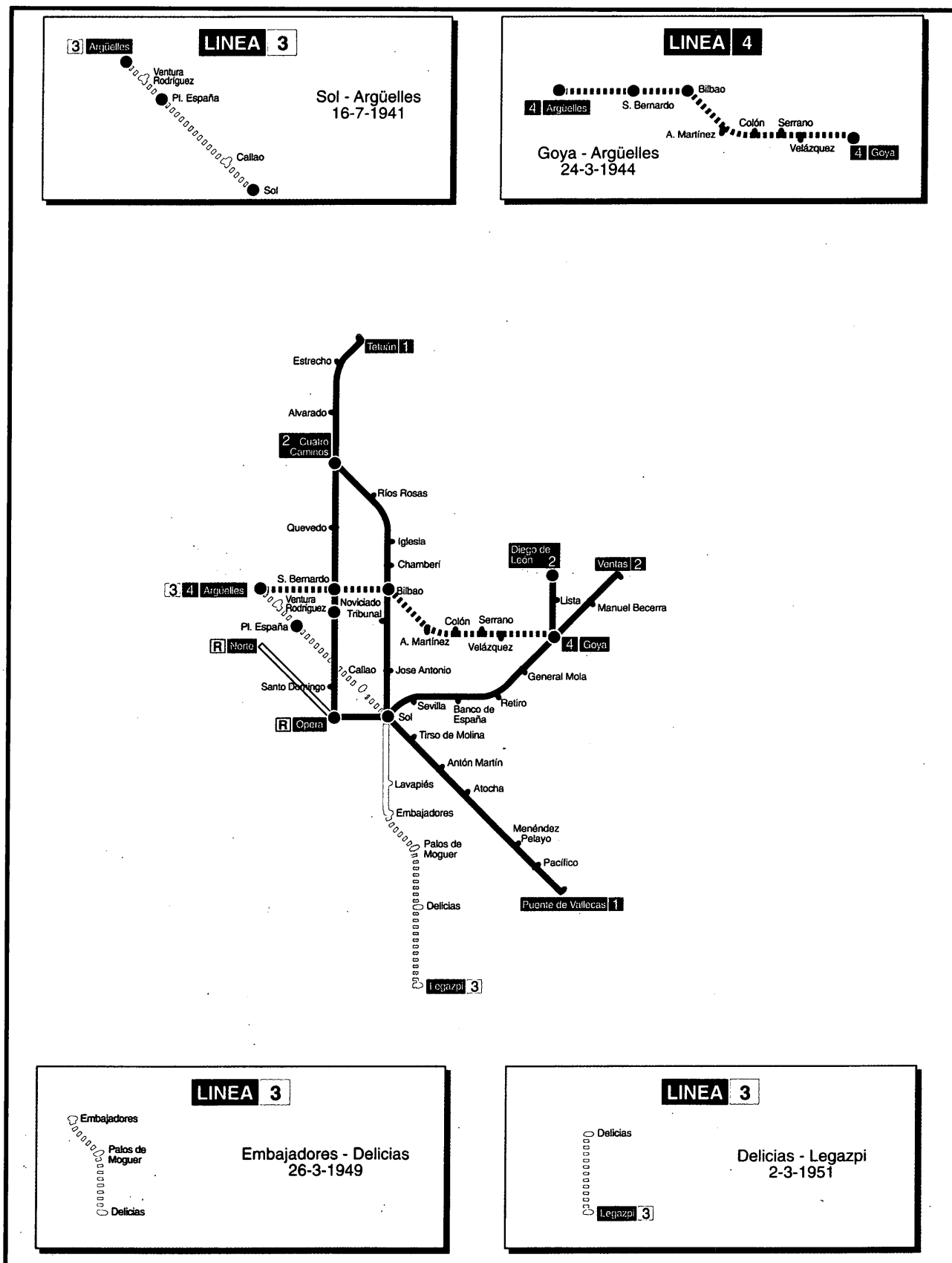
EL PERIODO DE INTERVENCIÓN: 1978-1985

El desequilibrio entre el aumento progresivo de nuevas construcciones con la necesidad de inversiones en equipamiento de superestructura y material móvil, los elevados costes de explotación y la insuficiencia de las tarifas, produjeron unos resultados económicos negativos que llevaron finalmente a Metro a un proceso de descapitalización.

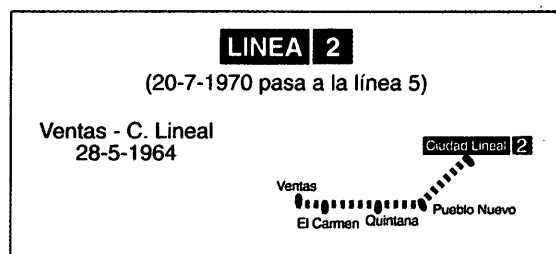
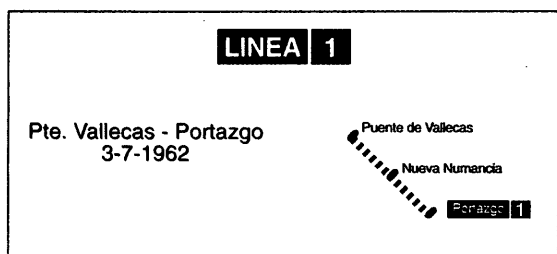
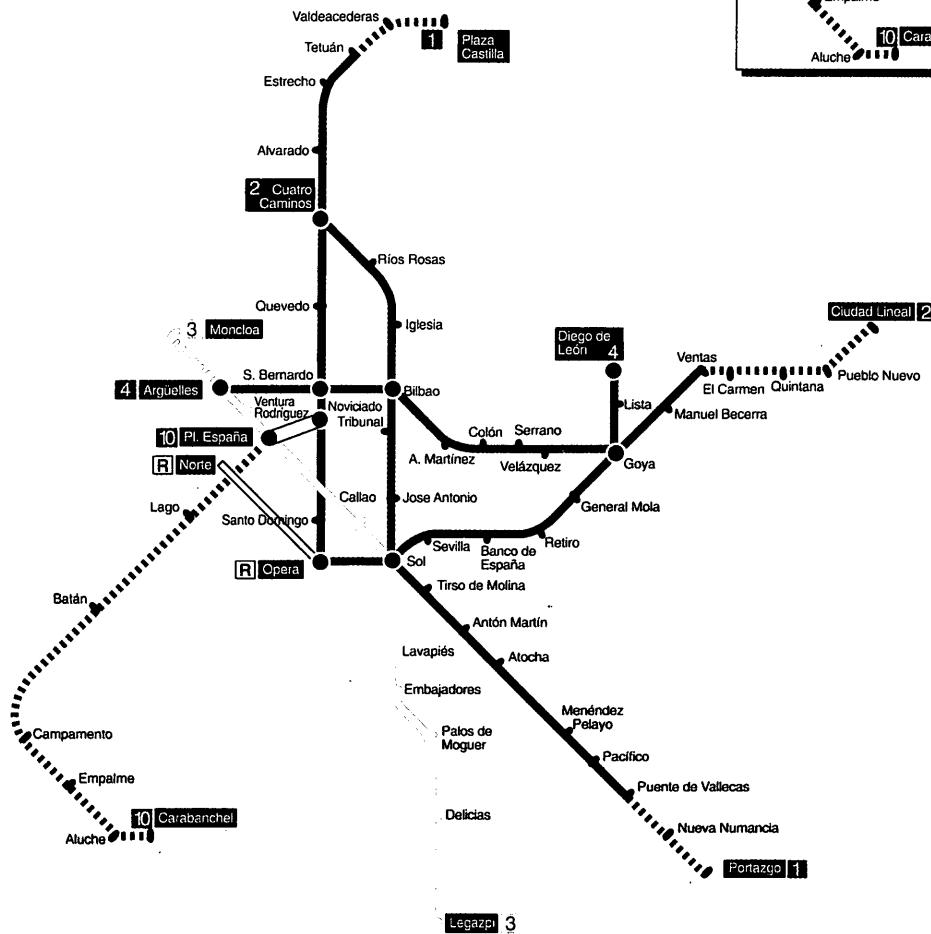
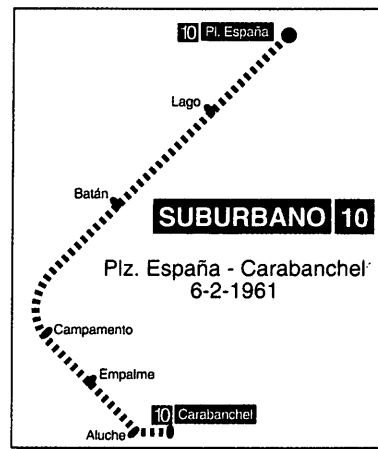
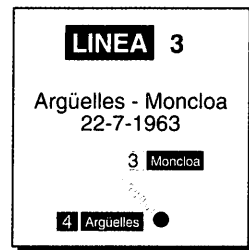


Evolución de la red. 1936-1939.

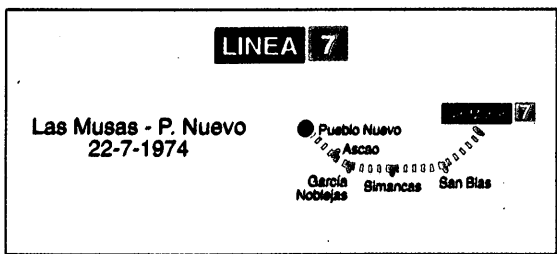
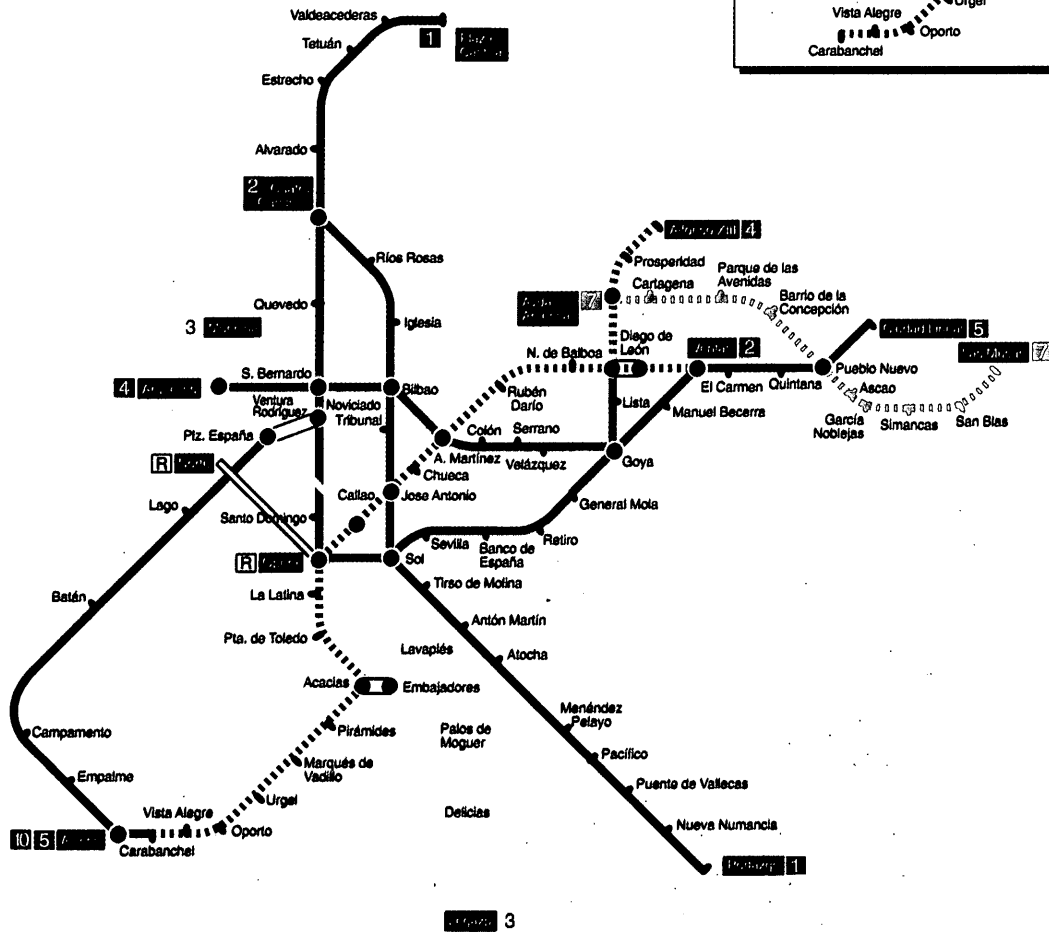
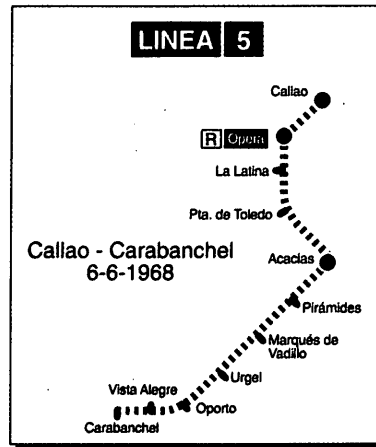
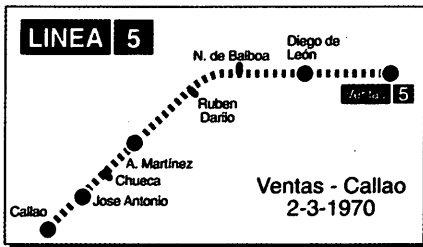
**Evolución
de la red.
1940-1954.**



*Evolución
de la red.
1955-1966.*



**Evolución
de la red.
1967-1977.**



Ante los resultados económicos de esta situación, el Gobierno intervino la Compañía Metropolitana por Real Decreto-Ley de 7 de Junio de 1978.

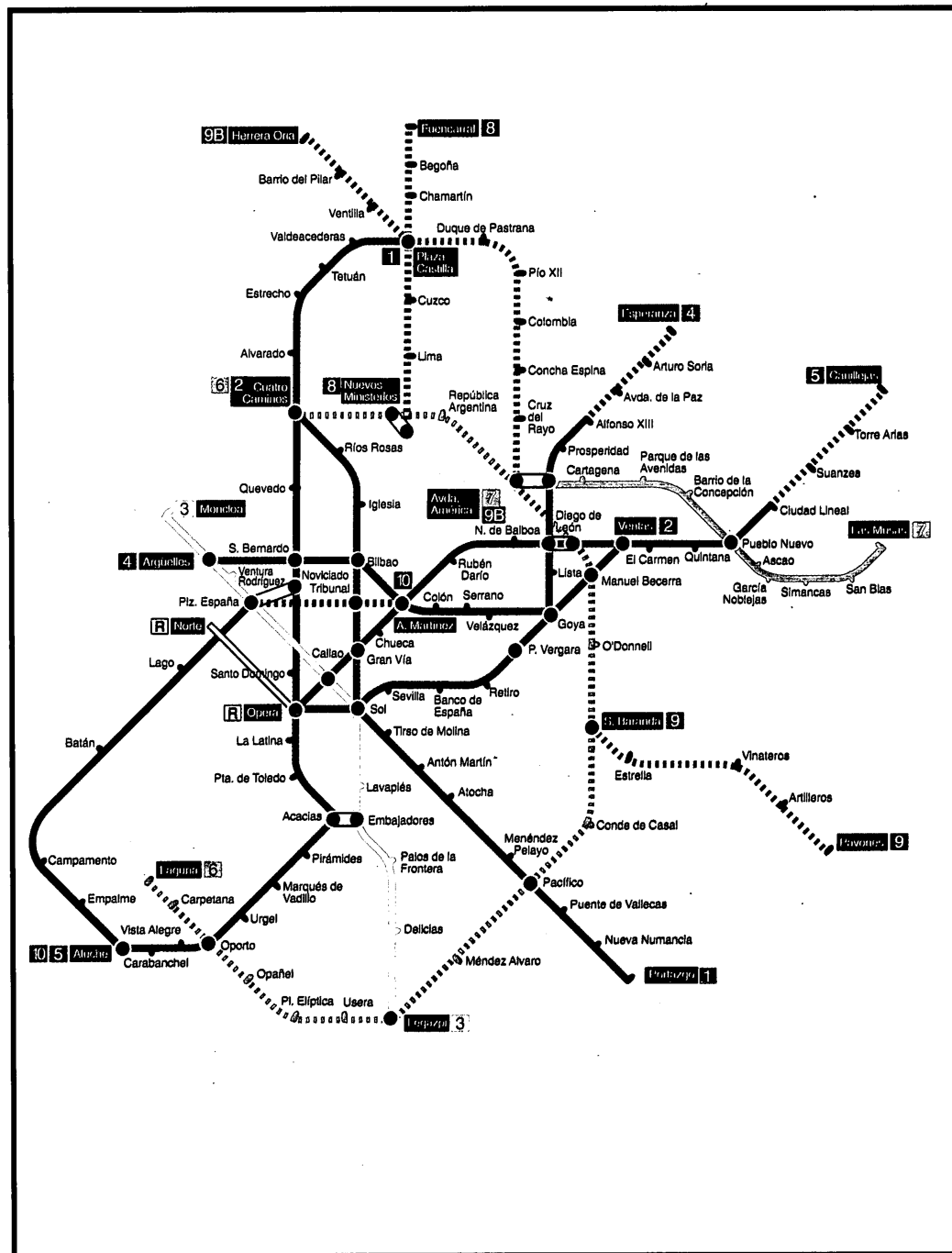
Las líneas inauguradas en este nuevo período fueron las de gálibo ancho (líneas 6, 8 y 9, con los coches tipo 5000 de 2.80 m de ancho en lugar del ancho de 2.40 m de los coches anteriores tipos 300, 1000 y 2000) que correspondían a tramos iniciados anteriormente de acuerdo al Plan de Ampliación de Metro de 1967 y sus revisiones de 1971 y 1974.

Aunque la construcción venía realizándose a ritmo lento desde años anteriores, la puesta en servicio de nuevos tramos coincidió en los primeros años de la década de los 80. La longitud de la red se incrementó más del 50 por ciento en el período 1979-1983, año en que Metro superó los 100 km de red. En 1995 la media de crecimiento anual de la red desde su origen era por tanto de 1.53 km al año, es decir, 116 km en 76 años.

LA TITULARIDAD PÚBLICA: EL CONSORCIO REGIONAL DE TRANSPORTES (C.R.T.): 1986-1994

Con fecha 24 de Marzo de 1986 el Ayuntamiento de Madrid y la Comunidad asumieron definitivamente la propiedad de la Compañía Metropolitana de Madrid. Cesó el Consejo de Intervención constituido en 1978 y se nombró un Consejo de Administración. Estas instituciones transfirieron temporalmente sus acciones de Metro (Ayuntamiento 75% y Comunidad 25%) al Consorcio Regional de Transportes de Madrid, organismo de nueva creación que asumió la función de planificar y diseñar el sistema de transporte.

A partir de 1990 y dentro del Plan de Actuación para el Transporte Público en Madrid se realizaron las inversiones ya citadas: la prolongación de línea 1 de Portazgo a Miguel Hernández y el



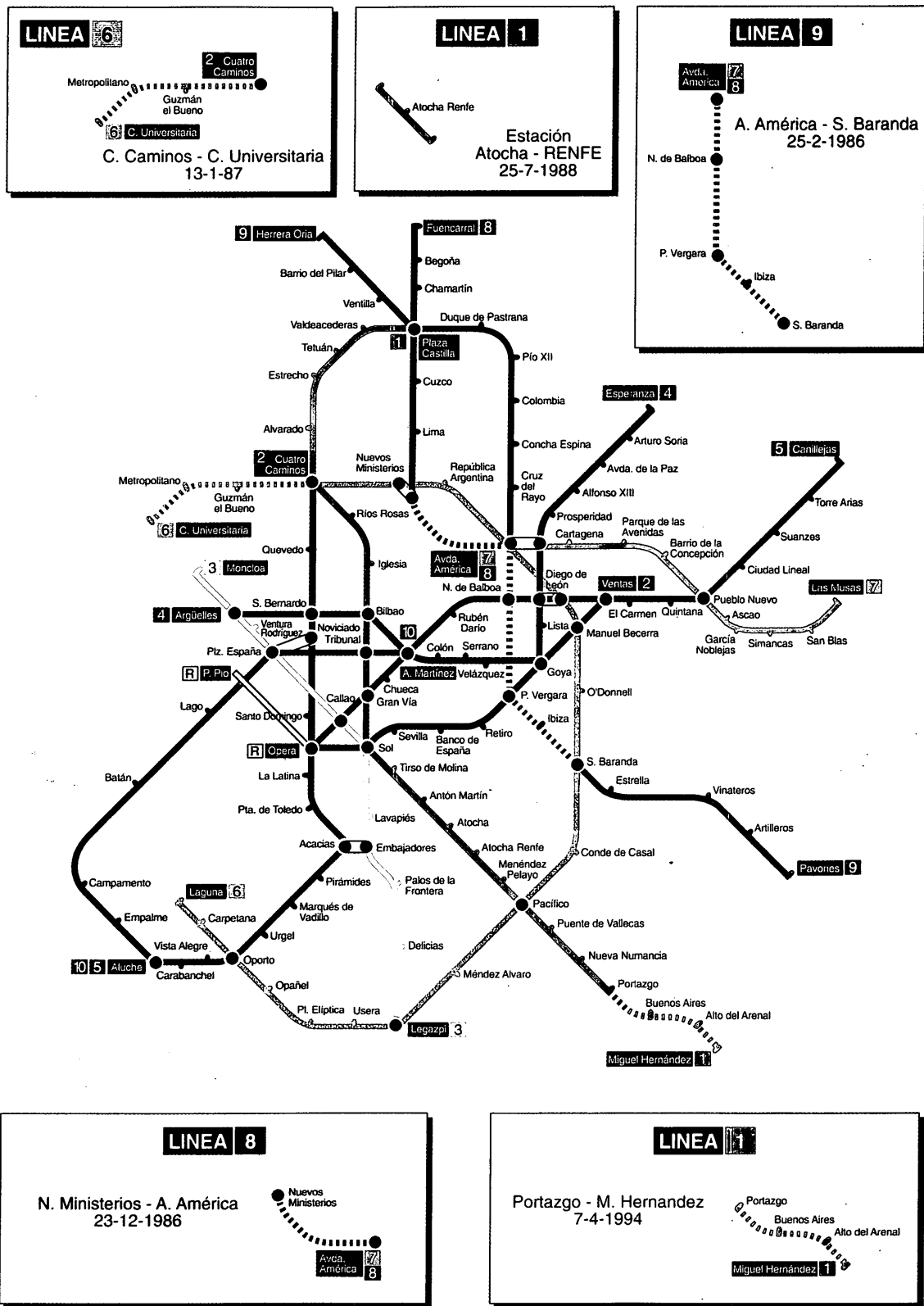
Evolución de la red.
1978-1985.

cierre circular de la línea 6 con el tramo pendiente Laguna-Ciudad Universitaria.

EL PLAN DE AMPLIACIÓN DE LA RED DE 1995-1999

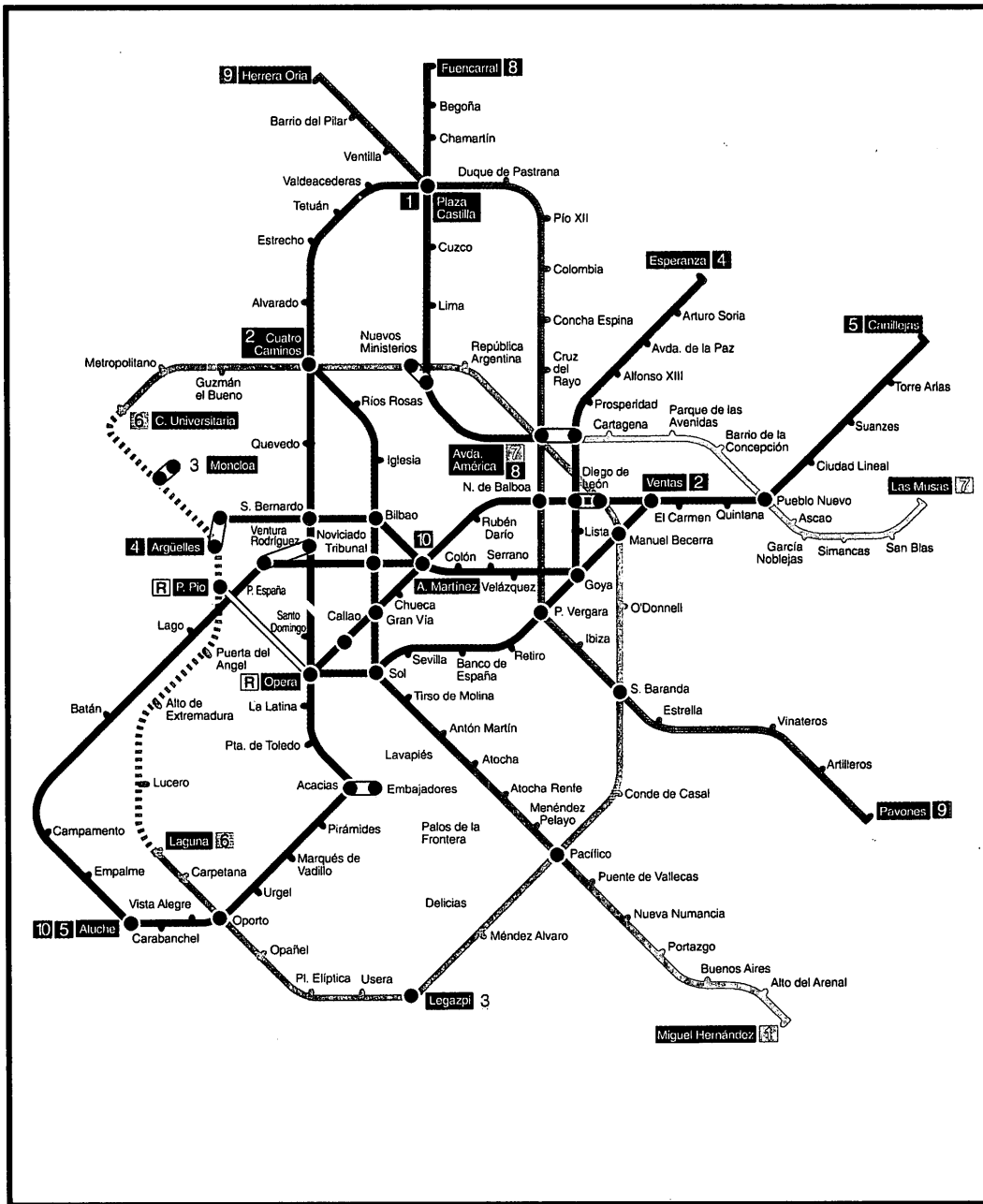
En Julio de 1995, con la llegada de un nuevo Gobierno a la Comunidad de Madrid se replanteó en profundidad la política llevada a cabo por el

**Evolución
de la red.
1986-1994.**



Consorcio en la década anterior y se decidió recuperar el déficit creado llevando a cabo el programa de ampliación más ambicioso de la historia de Metro: la prolongación de la red en un mínimo de 20 kilómetros en tan sólo cuatro años, debiendo realizar en este período los Estudios Informativos, los Proyectos de Construcción y la ejecución de las obras de infraestructura y de superestructura.

Para la realización del Programa Base (del que se obtuvo el Programa Acelerado con el que se está trabajando actualmente), en los primeros meses de trabajo del nuevo equipo se estudiaron los métodos constructivos que era necesario utilizar para cumplir el programa. Se estudiaron los procesos constructivos 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, en el túnel de la Mancha y el Storebaelt y en algunas 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, llegando a secciones de túnel de 14.5 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



**Red de Metro
de Madrid
a 31-12-1994.**

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 el 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.

De estos estudios iniciales, y por si tuvieran interés para otros profesionales de la Ingeniería de Caminos española, se resumen en estas páginas algunas notas sobre los procesos constructivos utilizados en la construcción del Metro de Madrid desde 1917 hasta nuestros días, así como algunas de las reflexiones del autor que le han llevado a la elección de los métodos con los que se está trabajando en la actual ampliación. El problema de la construcción de esta ampliación es básicamente un problema geotécnico y por ello la Dirección General de Infraestructuras, de la Consejería de Obras Públicas de la Comunidad de Madrid, viene colaborando o va a comenzar a colaborar en breve plazo, bien como expertos a tiempo completo (Prof. D. Carlos Oteo (ETS Ing.Caminos Madrid)), o bien como asesores geotécnicos, con los Catedráticos D. Santiago Uriel (ETS Ing.Caminos Madrid), D. José M^a Rodríguez Ortiz (ETSA Madrid), D. Eduardo Alonso y E. Gens (ETS Ing.Caminos Barcelona), D. Cesar Sagaseta (ETS Ing.Caminos Santander), D.J.L.Ripoll y D. M. Romana (ETS Ing.Caminos Valencia) y D. A.Uriel (ETS Ing.Caminos Granada) hasta su reciente y desgraciado fallecimiento en accidente de coche.

MÉTODOS CONSTRUCTIVOS UTILIZADOS HISTORICAMENTE EN LA CONSTRUCCIÓN DE LA RED DEL METRO DE MADRID

LÍNEA 1

En el tramo Cuatro Caminos-Sol, en los años 1917-1918, la intensa circulación de las calles Montera y Fuencarral y la estrechez de las mismas, impedía construir a cielo abierto. Por ello, aprovechando las características geotécnicas apropiadas del terreno de Madrid, se decidió construir por el método antiguamente llamado belga, hoy denominado clásico de Madrid. Se profundizó la rasante, situándola bajo de la cota de servicios y las obras comenzaron por cinco pozos de ataque provistos de grúas o montacargas eléctricos situados en la Puerta del Sol, Red de San Luis, Augusto Figueroa, Hospicio y Glorieta de Bilbao.

El proceso constructivo del método clásico de Madrid consiste en avances del túnel por anillos de 2.50 metros a 5 metros de longitud, según la naturaleza del terreno. El proceso actual se describe en detalle en otro artículo, y en 1917 se construía de la siguiente forma [Ref.1]:

▼ Se abre una galería de avance en calota de 3 metros de alto y 1,60 metros de ancho, perfectamente entibada.

▼ Para construir el anillo se ensancha a uno y otro lado la galería, recortando en el terreno la curva de trasdós de la bóveda, sujetando las tierras con una entibación en forma de abanico e intercalando las cimbras, espaciadas entre si 1,25 metros.

▼ Comienza la construcción de la bóveda de ladrillo subiendo desde ambos arranques hasta terminar, o cerrar, en la clave. Según avanza la fabrica, se retira la entibación.

▼ Construida la bóveda se descimbra, y se construyen los estribos descalzando un trozo de bóveda de dos metros de longitud.

▼ Terminados los estribos se hace el vaciado de tierras o destroza.

▼ Finalmente, la construcción de la solera.

En aquellas fechas ya se planeó utilizar sólo el hormigón, pero ante la carencia de cemento y áridos hubo que utilizar mampostería y ladrillo. El hormigón se reservó exclusivamente para las soleras.

En el tramo de Glorieta de Bilbao a Cuatro Caminos, el túnel, por la anchura de las calles de Luchana y Santa Engracia, pudo construirse a cielo abierto. Se abrieron en la calle dos filas de pozos, que, enlazados entre si, formaron dos estrechas zanjas, de 0,95 metros de anchura, paralelas y separadas 6 metros, dibujando el molde del hastial izquierdo y derecho de la futura galería y se hormigonaron, formando dos estribos. Se levantó el pavimento de la calle para abrir una zanja entre dichos estribos, cuyo fondo dibujaba el intradós de la bóveda. Sobre esta cimbra de tierra, previamente alisada y revestida de yeso, se hormigonó la bóveda por anillos de 4 a 6 metros de longitud. Terraplenada la zanja, después de dos o tres meses, una vez que fraguó la bóveda enterrada, se hizo el túnel, la destroza y la solera de la galería.

LÍNEA 2

El 16 de Junio de 1924 se inauguró el primer tramo de Sol a Ventas, para dar cobertura a la zona este de Madrid y a la Plaza de Toros en construcción con un potencial de más de 25.000 viajeros. La continuación de esta línea hasta Quevedo se puso en funcionamiento en Octubre del siguiente año. Unos meses después, el 10 de Septiembre de 1929, entró en servicio el tramo Que-

DATOS DE LAS LINEAS DE METRO CONSTRUIDAS DESDE SU INICIO HASTA 1995

LINEA	TRAMO	METROS	EMPRESA	AÑO	METODO CLASICO	ENTIBADORA	CIELO ABIERTO	ESCUDO ABIERTO	METODO AUSTRIACO	PRECORTE
1	Plaza Castilla - Tetuan	1,077	CUBIERTAS-MZO	1961	1,077					
1	Tetuan - Cuatro Caminos	(*) 1,741	SAN ROMAN	1929	522		1,219			
1	Sol - Cuatro Caminos	(*) 3,481	HORMAECHEA	1919	1,500		1,981			
1	Sol - Atocha	1,837	METRO	1921	1,837					
1	Atocha - Vallecas	2,266	METRO	1923			2,266			
1	Vallecas - Portazgo	1,048	CUBIERTAS-MZO	1962	1,048					
1	Portazgo - Miguel Hernandez	1,855	CONSTR.Y CONTI	1994	1,855					
	Suma Linea 1	13,305			7,839	0	5,466	0	0	0
2	Cuatro Caminos - Quededo	1,463	SAN ROMAN	1929	1,024		439			
2	Quededo-Sol	2,237	METRO	1925	2,237					
2	Sol - Ventas	3,754	METRO	1924	3,754					
	Suma Linea 2	7,454			7,015	0	439	0	0	0
	Ramal Opera - Norte	1,015		1925	1,015					
3	Moncloa - Arguelles	(*) 650	AGROMAN	1963	325		325			
3	Arguelles - Sol	(*) 1,922	AGROMAN	1941	961		961			
3	Sol - Embajadores	1,406	AGROMAN	1936	1,406					
3	Embajadores - Delicias	1,311	AGROMAN	1949	1,311					
3	Delicias - Legazpi	744	AGROMAN	1951	744					
	Suma Linea 3	6,033			4,747	0	1,286	0	0	0
4	Arguelles - Goya	3,371	AGROMAN	1944	3,371					
4	Goya - Diego de Leon	1,129	AGROMAN	1932	1,129					
4	Diego de Leon - Alfonso XIII	2,151	DRAGADOS	1973	2,151					
4	Alfonso XIII - Esperanza	2,222	DRAGADOS	1979	2,222					
	Suma Linea 4	8,873			8,873	0	0	0	0	0
5	Ciudad Lineal - Canillejas	2,718	CORSAN	1981		2,718				
5	Ventas - Ciudad Lineal	2,478	CUBIERTAS-MZO	1964	2,478					
5	Ventas - Callao	4,455	CUBIERTAS-MZO	1970	4,455					
5	Callao - Carabanchel	6,828	DRAGADOS	1968	6,828					
5	Carabanchel - Aluche	1,509	DRAGADOS	1961	500					
	Suma Linea 5	17,988			14,261	2,718	0	0	0	0
6	Cuatro Caminos - Manuel Becerra	4,034	DRAGADOS	1979				4,034		
6	Manuel Becerra - Pacifico	(*) 2,942	CUBIERTAS-MZO	1979		1,471		1,471		
6	Pacifico - Oporto	(*) 5,710	FOMENTO	1979	1,110			4,600		
6	Oporto - Laguna	(*) 1,592	FOMENTO	1983	792			800		
6	Laguna - Lucero	(*) 785	CUBIERTAS	1983	550			236		
6	Lucero - Puerta del Angel	1,960	CUBIERTAS	1983	1,960					
6	Puerta del Angel - Principe Pio	1,146	AGROMAN	1995			869		277	
6	Principe Pio - Moncloa	1,901	AUXINI	1995	1,361					540
6	Moncloa - Ciudad Universitaria	1,326	ENTRECANALES	1995			1,326			
6	Ciudad Universitaria - Cuatro Caminos	(*) 2,076	DRAGADOS	1987	1,776			300		
	Suma Linea 6	23,472			7,549	1,471	2,195	11,441	277	540
7	Las Musas - Pueblo Nuevo	4,030	DRAGADOS	1974	4,030					
7	Pueblo Nuevo - Avda. America	3,343	CUBIERTAS-MZO	1975	3,343					
	Suma Linea 7	7,373			7,373	0	0	0	0	0
8	Fuencarral - Plaza Castilla	3,306	HUARTE	1982				3,306		
8	Plaza Castilla - Nuevos Ministerios	2,497	CUBIERTAS-MZO	1982		2,497				
8	Nuevos Ministerios - Avda. America	1,664	CMZ-DRAGADOS	1986	1,664					
	Suma Linea 8	7,467			1,664	2,497	0	3,306	0	0
9	Sainz de Baranda - Pavones	3,540	ENTRECANALES	1980		1,180		2,360		
9	Sainz de Baranda - Avda. America	3,221	ENTRECANALES	1986	3,221					
9	Avda. America - Plaza de Castilla	4,235	DRAGADOS	1983		4,235				
9	Plaza de Castilla - Herrera Oria	(*) 2,864	AGROMAN	1983	573			2,291		
	Suma Linea 9	13,660			3,794	5,415	0	4,651	0	0
10	Alonso Martinez - Plaza de España	1,243	CUBIERTAS	1981	1,243					
10	Plaza de España - Lago	2,442		1967	2,442					
10	Lago - Campamento	4,034		1961			500			
10	Campamento - Aluche	1,125		1961	EN SUPERFICIE					
	Suma Linea 10	8,844			3,685	0	500	0	0	0
	TOTAL RED DE METRO EN 1995	115,684			67,815	12,101	9,886	19,398	277	540
	PORCENTAJES DE EJECUCION				58.62%	10.46%	8.56%	16.77%	0.24%	0.47%
	(*) Longitudes estimadas									

vedo-Cuatro Caminos, facilitando la correspondencia con la línea I en esta estación.

RAMAL OPERA-NORTE

El 26 de Diciembre de 1925 se pudo realizar la comunicación con la estación de Norte a través del ferrocarril subterráneo, para lo que se añadió un andén especial a la estación de Isabel II de línea 2 -hoy denominada Opera-. Las obras de construcción tuvieron algunas dificultades, ya que el túnel de enlace a su paso bajo de la Plaza de Oriente y los jardines del Campo del Moro atravesaban algunas dependencias enterradas del antiguo Alcazar

RAMAL GOYA-DIEGO DE LEÓN

La inauguración el 17 de Septiembre de 1932 del tramo Goya-Diego de León supuso el establecimiento de un nuevo sistema de explotación en "Y" de forma alternativa mediante la bifurcación en la estación de Goya, de manera que los trenes podían acceder sucesivamente a la zona de Ventas o Diego de León. Finalmente este ramal pasó a formar parte de la actual línea 4.

LÍNEA 3

La expansión hacia el sur se inició con la aprobación en 1932 de la construcción de un nuevo trazado que una el centro con los núcleos de Lavapiés y Embajadores.

LÍNEA 4

En sus comienzos, con 3.371 m de longitud desde Goya a Arguelles recorría las calles de Goya y Génova, atravesando las glorietsas de Alonso Martínez y Bilbao y llegando a su término por la calle Alberto Aguilera. En total tenía 8 estaciones y unía en su recorrido varias líneas ya que enlazaba con todas las existentes en el momento, en Bilbao con la 1, en Goya y San Bernardo con la línea 2 y en Arguelles con la recientemente inaugurada línea 3.

La prolongación de esta línea, de acuerdo con el Plan de 1967 y su revisión del 71, se llevó a cabo el 27 de Marzo de 1973 con la inauguración del tramo Diego de León-Alfonso XIII de 2.151 metros de longitud y tres nuevas estaciones que cubrían la población del barrio de Prosperidad. La extensión de la línea 4 desde Alfonso XIII a Esperanza

(en principio previsto sólo hasta Arturo Soria), se inauguró el 5 de Enero de 1979 con una longitud de 2.221 metros y 3 nuevas estaciones.

LÍNEA 5

Esta nueva línea entró en servicio en 1968, con un itinerario desde la estación de Callao donde se pudo realizar la correspondencia con línea 3, hacia la Puerta de Toledo y por la calle General Ricardos hasta llegar a la barriada de Carabanchel. Este recorrido de casi 7 km de longitud cuenta con 11 estaciones, 3 de ellas -Callao, Latina y Pirámides- con escaleras mecánicas.

El 2 de Marzo de 1970 se inauguró el tramo Callao-Ventas con una longitud de 4,5 km y 6 estaciones intermedias. Ambos tramos finalizaron el desarrollo del Plan de 1956. Se modificó el sistema de explotación entre Ventas y Ciudad Lineal, hasta entonces perteneciente a línea 2, para formar la unificación de la línea 5 Carabanchel-Ciudad Lineal con un recorrido total de 14 km, siendo la de mayor longitud de la red en ese momento. En Octubre de 1976, al inaugurarse el FFCC Aluche-Móstoles de RENFE, la interestación Carabanchel-Aluche hasta entonces integrada en línea 10, se incorporó a línea 5.

En el tramo Ventas-Callao tuvo lugar el famoso hundimiento de la calle Almagro, el 4 de octubre de 1967, al fallar la bóveda (de ladrillo) del telescopio de salida de la estación de Alonso Martínez. "El pavimento se hundió lentamente", dijeron los diarios, y en el enorme socavón (30 m x 15 m x 5m) formado en la calle Almagro cayeron 12 automóviles. Afortunadamente no hubo víctimas ni heridos graves.

LÍNEA 6

Se inauguró el 11 de Octubre de 1979 el primer tramo de línea 6 Cuatro Caminos-Pacífico con un recorrido de 6.977 metros y 10 estaciones de 115 m de longitud. Se incorporaron 71 tramos de escaleras mecánicas para facilitar el acceso. Se añadieron los tramos de Pacífico a Oporto el 7 de Mayo de 1981 y Oporto-Laguna el 3 de Junio de 1983 con una longitud de 5.7 km y 1.6 km y 6 y 2 estaciones, respectivamente. Coincidiendo con el inicio de las clases universitarias en el año 1987 se inauguró el 13 de Enero el tramo Cuatro Caminos-Ciudad Universitaria con 2.076 metros de recorrido y 3 estaciones.

En Mayo de 1995 se inauguró el tramo pendiente para el cierre en Circular de esta línea, tal vez la más importante de la red de Metro, abriéndose las estaciones de Lucero, Alto de Extremadura, Puerta del Ángel, Príncipe Pío, Arguelles y Moncloa. En su primer año de funcionamiento esta línea ha crecido en número de viajeros el 15%.

El tramo Cuatro Caminos-Manuel Becerra se realizó con un escudo abierto marca Memco, de USA. En Francisco Silvela, subiendo hacia Cuatro Caminos y antes del cruce con María de Molina, encontró una bolsa de arena suelta que entró por el frente sin que el brazo retro pudiera agotarlo. Se formó una gran caverna en el frente, parándose inmediatamente la excavación y cortando la circulación en superficie. Los sondeos hechos esa misma noche confirmaron que el pavimento estaba en voladizo sobre la enorme caverna. Se observaba además que, a través del hueco originado, desde la línea 6 se estaba viendo perfectamente la línea 4 situada encima. Se cerchó con perfiles omega la línea 4 y seguidamente la chimenea se rellenó de hormigón por gravedad a través de unas perforaciones hechas en la calzada. A continuación se inyectó el terreno con inyección química y los trabajos pudieron proseguir normalmente.

Tres meses después, en Junio de 1973, el escudo llegó a la glorieta llamada antiguamente Ruiz de Alda, hoy López de Hoyos. Ya se estaba vigilando la gran galería de la acera Oeste de Francisco Silvela que protege entre otras la tubería del Canal y la de gas, y se observó que tenía movimientos, de forma que el Canal redujo la presión, y el gas también. Debido a la desprotección del frente, el lunes 25 de Junio a las 5 de la tarde rompió la tubería de agua, la rotura rompió la galería y se formó un socavón que llegó a la calle, por donde salía el chorro de agua del Canal, que tardó mucho en cerrar el suministro por no funcionar las llaves de cierre. Se formó una gran chimenea hasta el túnel del escudo, que se inundó entero, llegando el agua casi hasta Manuel Becerra dentro del túnel. Afortunadamente todos los operarios del escudo pudieron salvarse por correr a gran velocidad hasta el pozo de salida. La subsidencia del terreno provocó la rotura de la tuberías de gas, de diámetro aprox. 500 mm, que explotó por una chispa de la central de telefónica cercana. El escudo quedó totalmente inutilizado, y el tiempo necesario para limpiarlo y volverlo a poner a punto fué superior a 3 meses.

El escudo abierto del tramo Laguna-Lucero originó también, por falta de soporte en el frente,

varias chimeneas y hundimientos, y debido a ello y a la cantidad de agua del terreno, se abandonó a los pocos metros de la estación de Laguna, continuándose los trabajos por el método clásico.

LÍNEA 7

Esta primera línea construida de gálibo ancho (para los coches tipo 5000, de 2.80 metros de ancho) entró en funcionamiento a partir de 1974 (22 de Julio) en dos fases: Las Musas-Pueblo Nuevo con 4.030 metros de recorrido y 6 estaciones y al año siguiente (18 de Marzo), Pueblo Nuevo-Avda. de América con 3.343 metros y 4 estaciones.

En este último tramo, el 16 de Marzo de 1971 se produjo un hundimiento en el ensanche del frente del túnel, por el método clásico, con el resultado de tres víctimas mortales y tres heridos leves. Este es el único caso que hemos podido registrar de víctima mortal en el método clásico en túnel. La causa del accidente fué la aparición en el frente, mientras se entibaba la galería de avance, de una bolsada de arena suelta con agua colgada, que no pudo dominarse.

LÍNEA 8

Para dar servicio a la estación ferroviaria de Chamartín (inaugurada en 1976) y coincidiendo con la celebración en España del Campeonato Mundial de Fútbol, se inauguró el 10 de Junio de 1982 el tramo Fuencarral-Nuevos Ministerios de 5.8 km de recorrido y 7 estaciones. Las obras, que comenzaron en 1972, se prolongaron durante 10 años. El 23 de Diciembre de 1986 se prolongó la línea 8 con 1.6 km por vía única desde Nuevos Ministerios a Avda. de América accediendo de esta forma a la estación con mayor numero de transbordos y correspondencia al ser un centro neurálgico de la red.

El escudo que realizó el tramo Fuencarral-Plaza de Castilla es el mismo utilizado por Agromán en el tramo Herrera Oria-Plaza de Castilla, que pasó aquí al terminar el mismo.

LÍNEA 9

Para llegar al trazado actual de línea 9 con mas de 15 km de longitud y 18 estaciones se efectuaron cuatro fases de construcción. El primer tramo, Sainz de Baranda-Pavones entró en servicio el 31 de Enero de 1980 con 3.540 metros de recorrido,



Detalle de una excavación por el Método Belga.

5 estaciones de 115 metros de largo, 15 pozos de ventilación y 52 escaleras mecánicas.

En la zona norte de la ciudad se construyó la línea denominada 9B en dos etapas: 3 km desde Herrera Oria a Plaza de Castilla con 4 estaciones y el tramo Plaza de Castilla-Avda. de América de 4.3 km de longitud y 6 estaciones que se inauguraron el 4 de Junio y el 30 de Diciembre de 1983, respectivamente.

La continuidad en el trazado de la línea 9 se consiguió con la inauguración el 25 de Febrero de 1986 del tramo Avda. de América-Sainz de Baranda con 3.2 km de longitud y 3 estaciones intermedias. Se dispuso de 32 escaleras mecánicas y 2 pasillos rodantes de 200 m de longitud en la esta-

ción de Núñez de Balboa para enlace entre las líneas 5 y 9.

En el tramo Avda. de América-Plaza de Castilla tuvo lugar en Semana Santa de 1973, el 14 de Abril, el accidente de la Estación de Pío XII por colapso de 2 arcos de la bóveda, con 2 víctimas mortales y 12 hombres rescatados vivos.

En el tramo Plaza de Castilla-Herrera Oria el escudo abierto no tuvo problemas apreciables. Al terminar los trabajos pasó al tramo Fuencarral - Plaza de Castilla de Línea 8.

LÍNEA 10

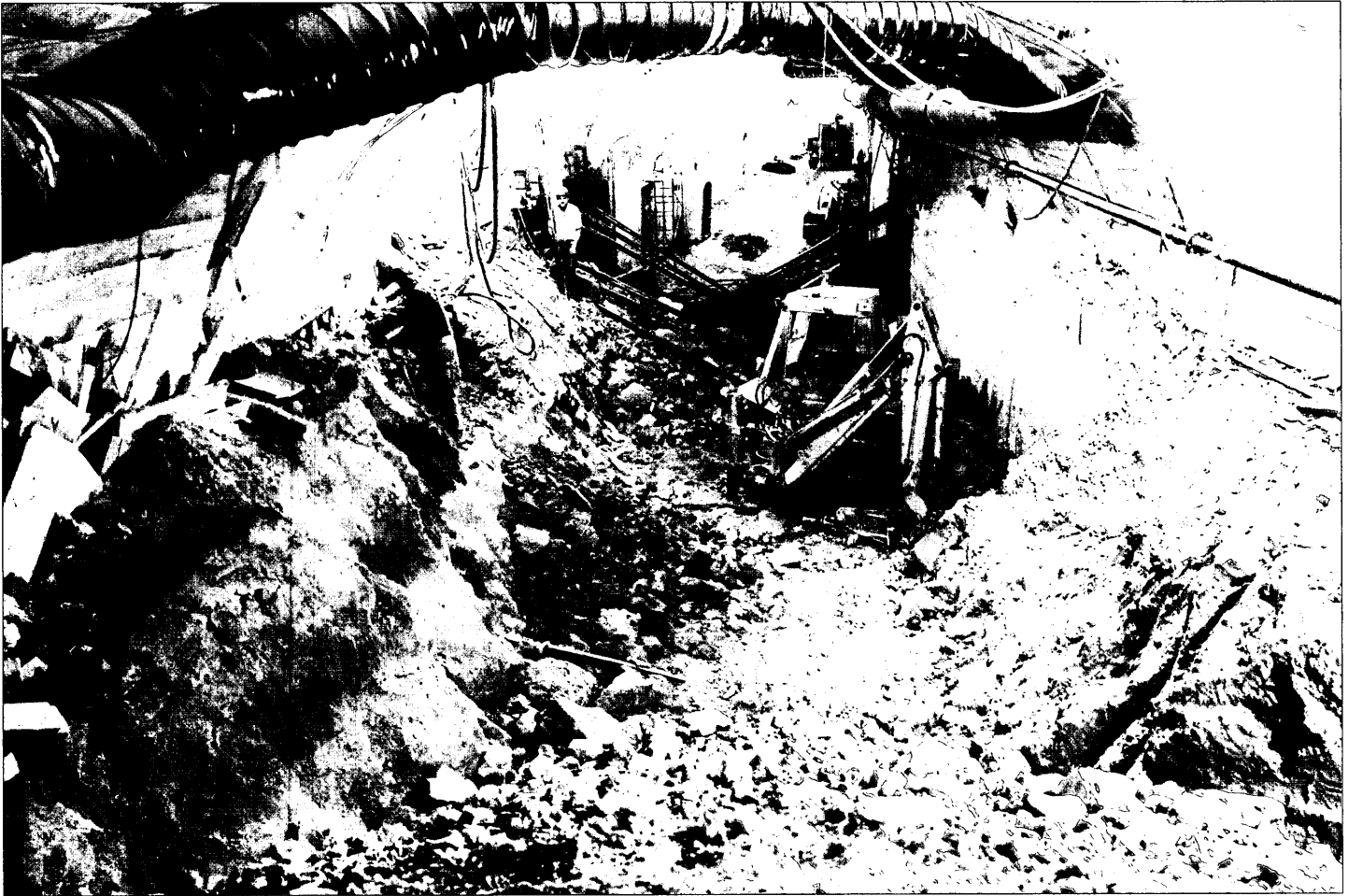
El 6 de Febrero de 1961 se puso en servicio el suburbano entre Plaza de España y Carabanchel de 9.1 km de recorrido, de los cuales mas de la mitad correspondían a cielo abierto. Las estaciones de El Lago, Batan y Empalme se encuentran en superficie, así como la de Aluche, de construcción elevada, sobre la Avda. de los Poblados El resto son subterráneas, destacando la de Plaza de España con una profundidad tal que es preciso acceder al nivel del andén mediante dos ascensores con capacidad para 2000 personas/hora y sentido. Se instalaron las primeras escaleras mecánicas, con un desnivel de 21.5 metros, siendo el mayor tramo de escalera de Europa en esa época.

El Ferrocarril Suburbano aumentó su recorrido con la puesta en servicio el día 18 de diciembre de 1981 del tramo Plaza de España- Alonso Martínez, permitiendo la conexión de esta línea con la 1 en Tribunal y con las 4 y 5 en Alonso Martínez.

RESUMEN Y COMENTARIO DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS HASTA 1996

EL MÉTODO CLÁSICO DE MADRID (ANTIGUO MÉTODO BELGA)

Como se ve, el método más utilizado para la construcción de los túneles ha sido el método clásico de Madrid, antiguamente llamado Belga. De los 116 km de túnel existentes hoy, casi 80 han sido contruidos de esta forma, sin que haya habido más que el accidente citado en línea 7, ni hundimientos importantes que reseñar. Deben incluirse además todas las pequeñas galerías, los cañones de acceso, etc., realizadas siempre con el método clásico. Este método tiene por lo tanto la ventaja de estar muy comprobado en la práctica de la in-



Aspecto de una excavación por el Método Clásico de Madrid (antiguo Método Belga).

geniería de Caminos madrileña, y aunque su rendimiento es pequeño (unos 2.5 metros por frente de ataque y día de trabajo, es decir, a 5 avances por semana, unos 50 metros al mes), 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 [Ref.4]. 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 avance 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 bataches a voluntad, muy cercanos siempre al comienzo de la destroza, y 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.

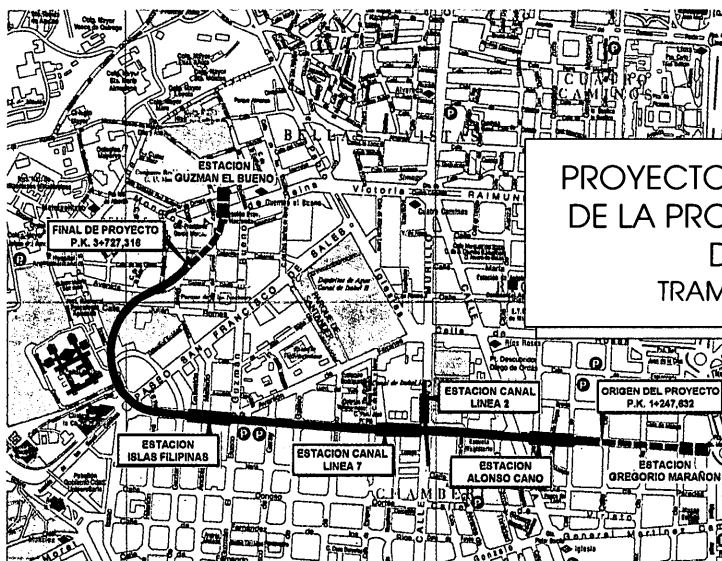
Un problema típico de los suelos de Madrid es la repentina aparición de bolsas de arena con agua colgada a presión alta o baja, causa del único accidente registrado. Estas bolsas no suelen detectarse en los sondeos de reconocimiento durante la ejecución del Proyecto, por su pequeño tamaño, y su aparición, 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

PROSER

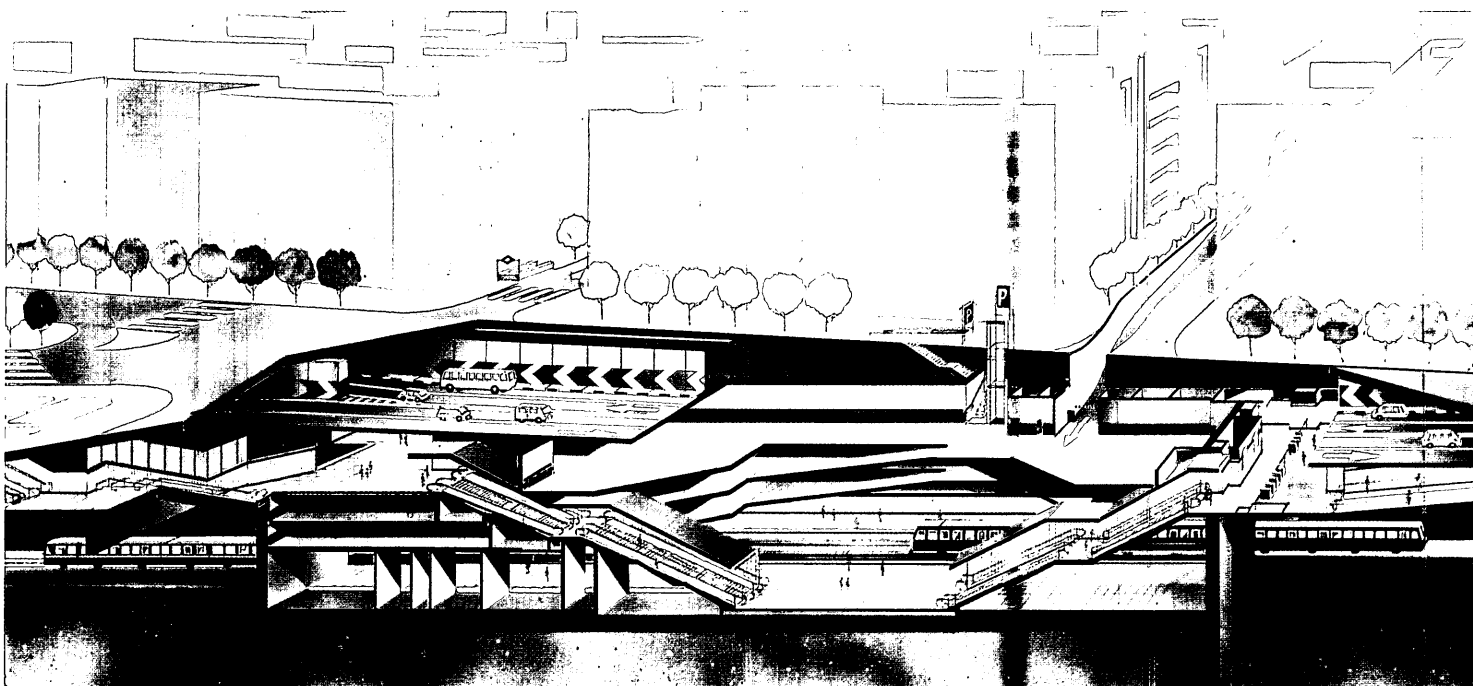
COLABORA CON:



Comunidad de Madrid
Consejería de Obras Públicas,
Urbanismo y Transporte



PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA
DE LA PROLONGACIÓN A VALDEZARZA Y PEÑAGRANDE
DE LA LÍNEA 7 DEL METRO DE MADRID
TRAMO: GREGORIO MARAÑÓN - GUZMÁN EL BUENO



ISLAS FILIPINAS: ESTACIÓN - PASO SUBTERRÁNEO - APARCAMIENTO



PROSER
PROYECTOS Y SERVICIOS, S.A.

CENTRAL: AGUSTÍN DE FOXÁ, 27 28036 MADRID
Tel.: (91) 323 18 81 Fax: (91) 733 87 94
DELEGACIONES:
BARCELONA, SEVILLA, STA. CRUZ DE TENERIFE

y la protección del frente de la galería de avance o de los sucesivos ensanches puede ser sumamente rápido.

Sin embargo aún quedan tres problemas sin resolver para el técnico con este método clásico de Madrid. El primero de ellos es la elección de la longitud de cada avance en función de las características del terreno. El segundo es el apoyo del arco de bóveda hormigonado en cada avance, normalmente de 2.50 metros de longitud, hasta que se construyen los hastiales y apoya en ellos. El tercero es el conseguir una adecuada unión o contacto entre bóveda y hastiales.

Con respecto a la elección de la longitud de cada avance debe decirse que hoy día, a finales de 1996 y 70 años después del nacimiento de la Geotecnia como ciencia con la publicación del "Erdbaumechnik" de Terzaghi, la realidad es que aún no se ha desarrollado ningún instrumento científico que ayude al técnico a estimar el avance adecuado en cada momento. La longitud del pase se estima de acuerdo con la opinión del encargado del tajo, hombre usualmente de gran experiencia en el método y en los suelos de Madrid. Si el terreno empuja mucho, la tabla de álamo negro del entibado "canta" y "avisa", según nos dicen. Pero por mucho respeto y confianza que tengamos en D. José Guerra, encargado del método clásico en la obra de Línea 10 en que actualmente se está trabajando bajo la Plaza de España, no cabe duda de que es necesario desarrollar un método más científico que confirme las opiniones personales. Es necesario obtener las curvas características del terreno y del entibado clásico en cada caso y para cada longitud de avance. Conocidas éstas, será posible estimar la longitud de avance y la entibación necesaria ("cuajada", "media", etc) en cada momento. Y el método debe llegar a poder estimar la curva característica del terreno a utilizar en el diagrama por medio de ensayos rápidos y sencillos, tales como el penetrometro de bolsillo y el vane test portátil. Los equipos disponibles actualmente están preparados para suelos más blandos que el tosco o la peñuela y no sirven en éstos (el penetrometro portátil ni siquiera penetra, y el vane test no puede hincarse en el tosco, ni aún en el blando). Pese a ello la Consejería de Obras Públicas ha creado un equipo con el objetivo de intentar estimar estas curvas características de terreno y sostenimiento, ver a qué curva característica corresponde el terreno encontrado por métodos rápidos "in situ", y obtener un encaje de avance y entibación en unos minutos, que confir-

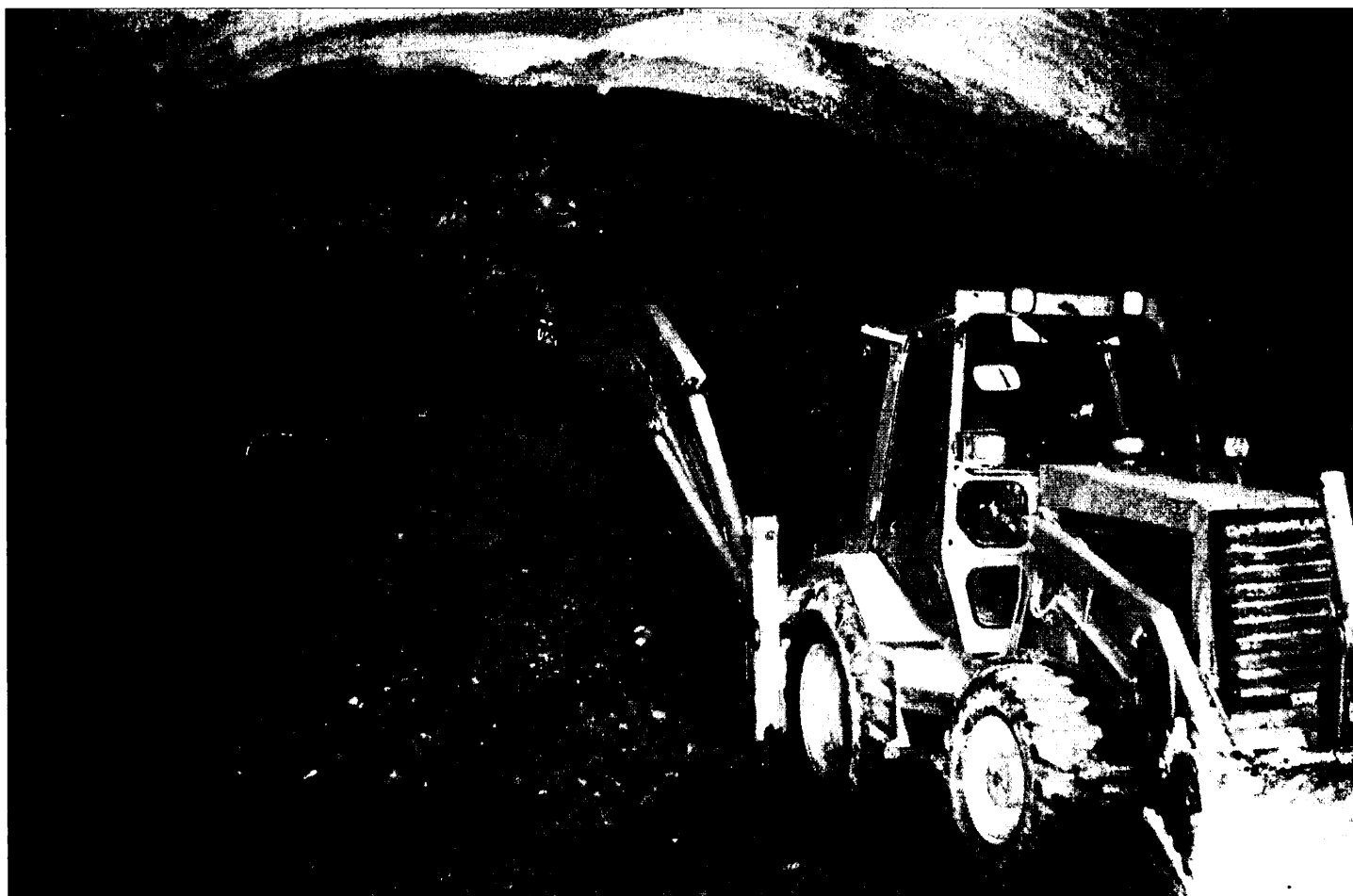
me o rechace la opinión subjetiva del personal. En su momento se publicarán los resultados de estos trabajos.

El apoyo de la bóveda suele hacerse proyectando un ensanchamiento del riñón en la zona de apoyo, de forma que al retirar el encofrado y quedar el anillo de bóveda libre, la carga debida al terreno superior y a su peso propio se reparta en una superficie algo mayor que la correspondiente al espesor normal de bóveda multiplicado por la longitud del anillo. Se suele dar también a esta superficie una inclinación hacia fuera, de forma que el empuje así transmitido al terreno no sea vertical, lo que empeoraría la situación al excavar la destroza, momento en que el anillo de bóveda queda soportado por sólo un pequeño talud de tierras, sino que quede dirigido hacia dentro del terreno. Pero la realidad es que algunas veces en la práctica no se hace esta inclinación en la superficie de apoyo porque dificulta el hormigonado de la parte superior del hastial correspondiente.

Finalmente, el adecuado apoyo entre bóveda y hastiales suele conseguirse inyectando la junta de unión. Creemos necesario profundizar en el diseño de los encofrados de hastiales, mejorando tal vez la posición de las boquillas de bombeo y garantizando que el hormigón fresco del hastial llegue a tener un contacto perfecto con la parte inferior de la superficie de apoyo de la bóveda. Si este apoyo no se produce durante el hormigonado del hastial, la bóveda descenderá, y el terreno sobre ella quedará suelto y descomprimido. Hemos podido observar este hecho al demoler antiguas bóvedas del túnel viejo de la línea 10. En la parte superior de estas bóvedas, por encima de la tablazón del entibado, había huecos y zonas de suelo descomprimido. Si bien esto no crea ningún problema cuando el túnel es profundo, sí puede hacerlo en túneles someros.

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

El autor de este artículo 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 el Metro de 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 innecesaria-



**Excavación con
Método Austriaco.**

riamente peligroso por la gran sección abierta en el frente que suele exigir, 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 del Metro de Londres se está utilizando extensivamente el NATM, en una arcilla (la London clay) bastante similar a nuestro tosco. 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, del que hablaremos en otros artículos), y hoy, en Octubre de 1996, 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 de-

talles técnicos. 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.

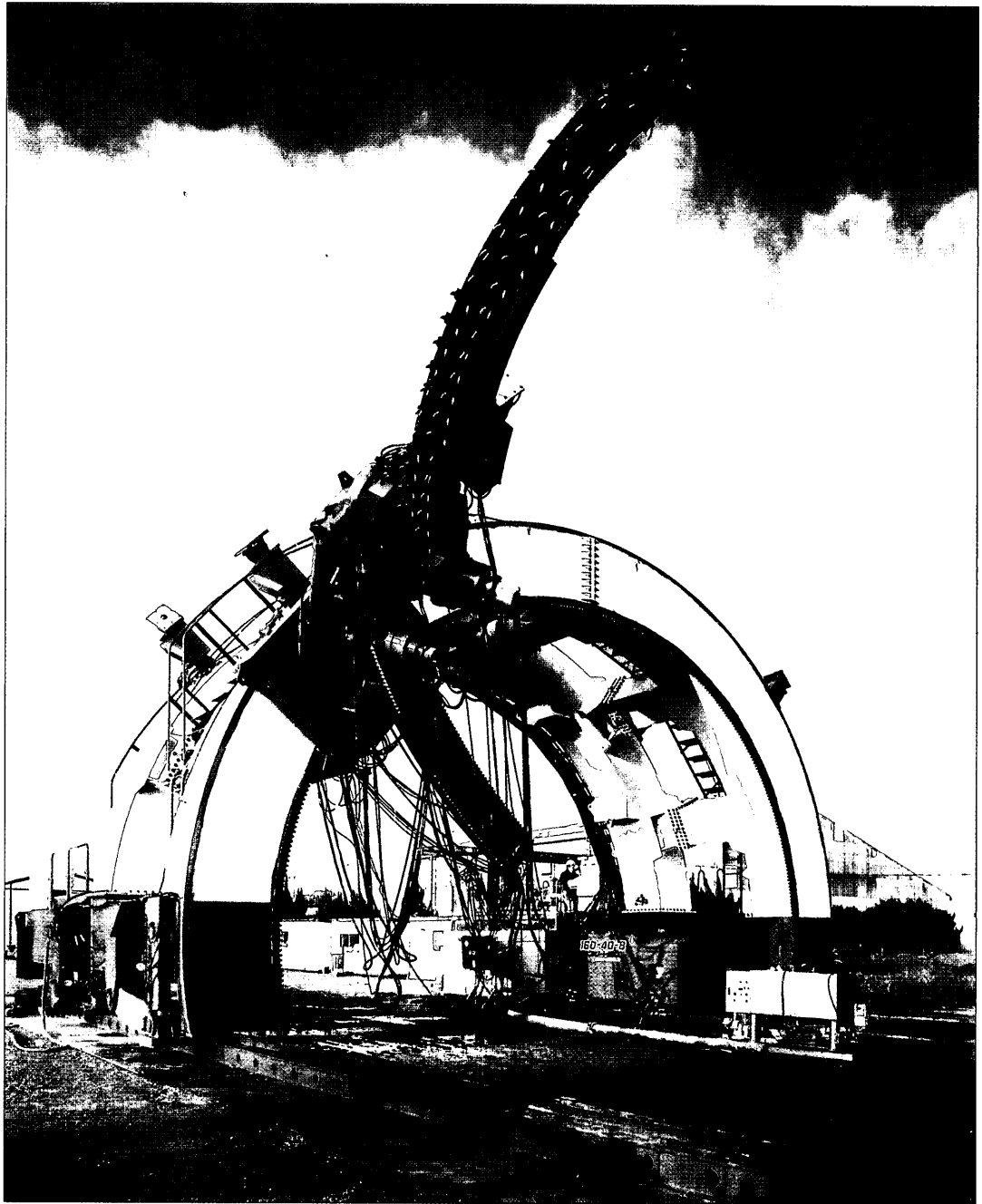
En cualquier caso, y teniendo en cuenta todas estas experiencias, en los estudios realizados al comenzar el análisis de los procesos constructivos para la ampliación del metro de Madrid, el NATM fué desechado por el autor de este artículo.

EL PRECORTE MECÁNICO

Este método, descrito también en otro artículo, se ha utilizado asimismo en Madrid recientemente 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 anterior, obliga a una gran extensión de frente abierto, bien sea la sección completa o la semisección de avance. 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 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 y el de la autopista A-14 de París, Saint Germain-en-Laye. En conversaciones sostenidas con los propietarios de la patente en



Máquina para Precorte Mecánico.

España se estudiaron las soluciones a los problemas 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 fué también desechado por el autor de este artículo.

ENTIBADORAS DE LANZAS U OTROS MÉTODOS

Se han utilizado hasta la fecha las 4 entibadoras que figuran en la tabla adjunta, en las líneas 5, 6, 8 y 9. La entibadora pretende sustituir el entibado del método clásico por su coraza, y en general la excavación se ha hecho con rozadoras, sólo en el avance, y nunca a sección completa.

La problemática de estabilidad del frente es la misma que con los métodos anteriores. El frente queda desprotegido y sin sujeción en los 15 m² del avance (el túnel sencillo tiene 40 m² de sección excavada completa, y el de doble vía 70 m², con 30 m² de sección en avance) y, como se ha dicho, el problema geotécnico que ello representa ha sido bien identificado por todos los autores desde hace casi 40 años [Refs. 3, 4, 5, 7, 11, etc].

En los FFCC de Cercanías la entibadora utilizada 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 [Ref. 14].

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

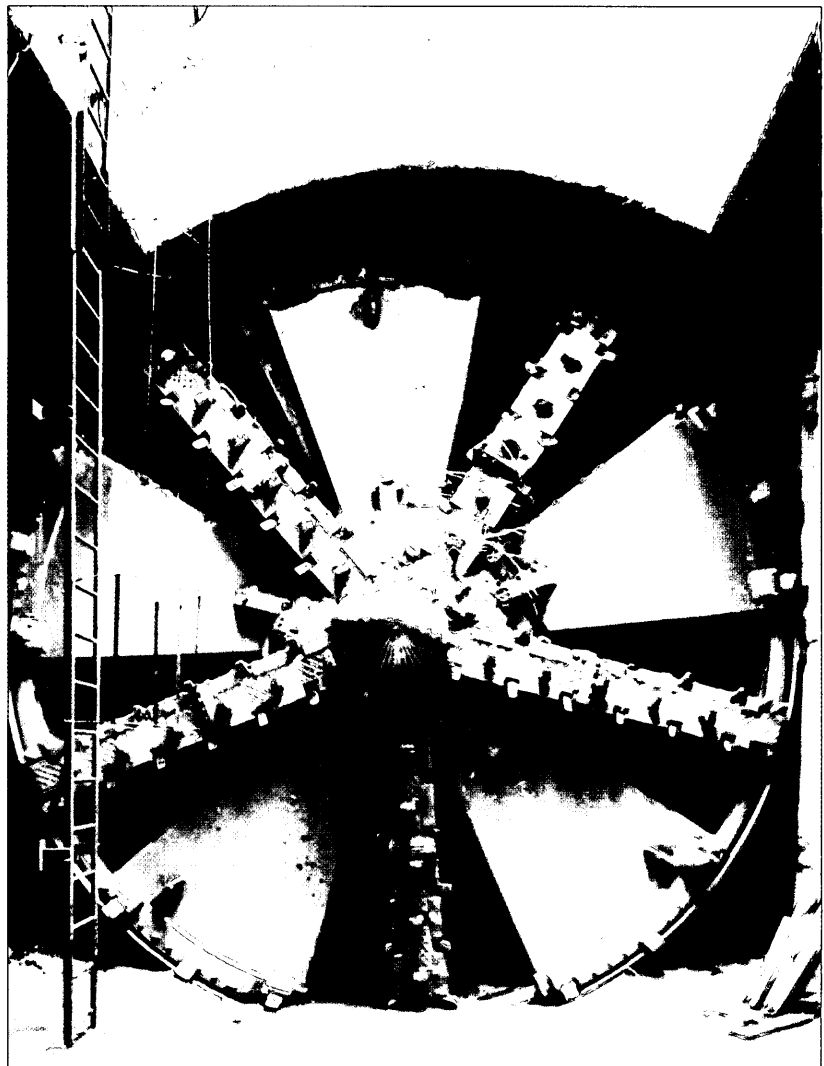
con todo detalle los movimientos de cada vía, que se corregían rebateando por la noche.

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 autor de este artículo.

TUNELADORAS DE FRENTE ABIERTO

Ya se ha visto que las tuneladoras de frente abierto y sección completa utilizadas en el Metro de Madrid en las últimas décadas han dado lugar a graves problemas de venidas del frente, subsidencias y hundimientos, causando considerables retrasos en las obras y daños en general.

Tuneladora de frente abierto.





**Tuneladora de
frente cerrado.**
(Foto cedida por
Dragados)

En la ampliación de la Línea Jubileo (Jubilee Line) que actualmente está realizando el Metro de Londres se están utilizando o han sido utilizadas en total 11 tuneladoras. 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 están 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 la de la línea 2 (Sepolia-Dafni), que comenzó los trabajos hace más de un año, sólo ha podido excavar algunos metros de túnel, y ello con graves problemas de formación de cavernas por inestabilidad del frente, cavernas y asientos que sólo han podido superarse a base de tratamientos intensivos del terreno a lo largo de la traza del túnel. La segunda máquina, en la línea 3 (Keramikos-Pentagono) no ha tenido tantos problemas por haber estado trabajando en una zona mejor, pero ahora, al acercarse a la zona de la estación de Syntagma donde cruza a la línea 2, se prevén los mismos problemas de inestabilidad de frente. Al estudiar este proyecto, el autor de este artículo se puso en contacto con el fabricante de las máquinas, quien contestó que los equipos se habían construído de

acuerdo con los datos del terreno conocidos en el momento y con las especificaciones de su cliente, y que no podía por tanto responsabilizarse de la inestabilidad del frente. Y hace menos de dos semanas uno de los técnicos del Metro de Atenas comentaba al autor que los problemas de excavación con frente abierto le parecen tan graves que tal vez la única solución para terminar los trabajos sería sustituir las máquinas abiertas por otras de frente cerrado, bien EPB o bien de slurry.

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 autor de este artículo.

TUNELADORAS DE FRENTE CERRADO

Estos equipos, idea inglesa de 1965 que no tuvo éxito en Inglaterra y que fué enseguida recogida por Japón, solucionan en principio 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.

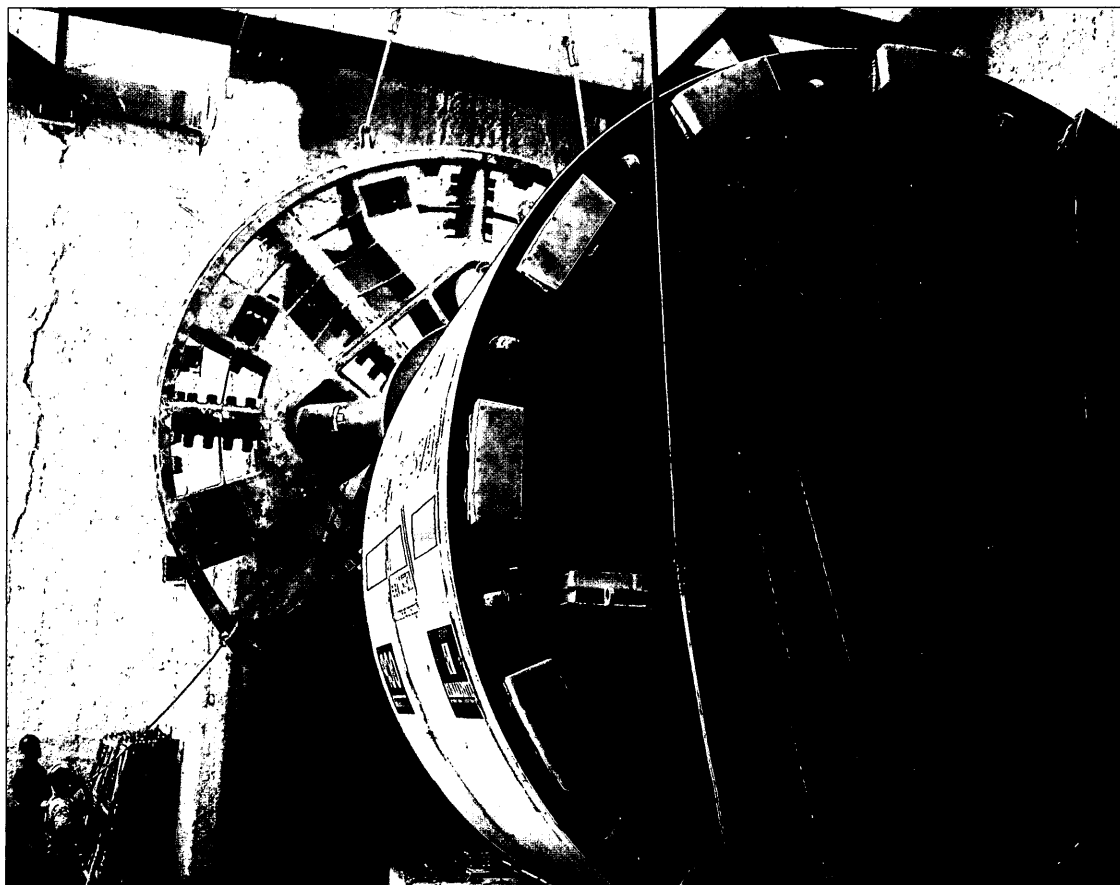
Se han estudiado los métodos y equipos utilizados en el Canal de la Mancha (11 tuneladoras, de las que 5 fueron EPB en el lado francés y 6 abiertas en el lado inglés, de terreno más resistente y seco, el chalk marl), en el Metro de Lille, el de Lyon, el de Toulouse, el metro y RER de París, los metros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

hace pocos meses ha comenzado a trabajar la segunda EPB, LOVAT de 9.50 metros de diámetro, similar al diámetro del Metro de Madrid (la primera, Kawasaki, lleva más de un año de trabajo).

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, lo que será objeto de un próximo artículo de detalle.

Por otra parte, el sostenimiento del frente tampoco es como la teoría indica. En los suelos de Madrid, en concreto en el caso del tosco (arena arcillosa o arcillas con una cohesión de unos 200-300 kPa y un ϕ de 30°-40° en ensayo triaxial CD), el frente es en general estable (es decir, cuando no aparecen bolsas de arena u otros problemas típicos). Pero si en estos casos en que no hay agua en el frente el lector tiene la oportunidad de parar la máquina una noche y asomarse al frente entre los radios del escudo llevando una luz portátil, podrá ver que el frente está sostenido vertical-



Montaje de la Tuneladora usada en el Metro de Valencia (Foto cedida por OCP).

mente por sí mismo a unos 30-40 cm de las chapas de cabeza, quedando vacía esta distancia que corresponde a la longitud de los dientes. En el caso de los equipos LOVAT, por ejemplo, que tienen dientes largos, este hueco (de 10 a 13 m³) puede producir, y ha producido, problemas cuando la sección excavada tiene en su parte superior estratos arenosos no cohesivos o con agua, ya que la zona superior suelta o con agua viene a rellenar todo el hueco, creando subsidencias de varios m en superficie si el túnel es somero. Al excavar en subida en Línea 10 desde el río Manzanares hasta el Intercambiador de Príncipe Pío, en que este fenómeno ha tenido lugar, las dificultades han sido enormes, de forma que sólo la pericia de los equipos humanos (DRAGADOS, en concreto el Ing. de Caminos Álvaro Fernández Cotas y su equipo) al cargo de los trabajos ha permitido superar con éxito ese tramo. En otras máquinas con dientes más cortos como las Herrenknecht o las Mitsubishi el problema es de esperar que sea menor, pero en cualquier caso entendemos que estos equipos no deben utilizarse con bajos recubrimientos (menores de 1 diámetro, tal vez) si estos son de rellenos de baja calidad.

Dejando aparte este problema de las zonas de túnel somero, 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.

Otros problemas de la utilización de estos

equipos son la adecuada elección del anillo de dovelas (derecho-izquierdo, universal, semi-universal, etc), la adecuada selección de los parámetros de la máquina (empuje total, par motor máximo), el método de inyección por el exterior de las dovelas para rellenar el hueco entre éstas y el escudo (por el propio faldón del escudo, a través de las dovelas, mixto, etc) para reducir asentamientos y subsidencias, los métodos de entrada al frente para cambio de dientes u otros trabajos, los métodos de guiado, los métodos de detección de obstáculos enterrados, los métodos de medida del volumen excavado y otros problemas. De todo ello se hablará en próximos artículos, detallando las especificaciones de las cuatro grandes máquinas que el mes próximo (Diciembre 1996) comienzan a llegar a Madrid y su comportamiento en la construcción de los 20 kilómetros de túnel que deben realizar. Por el momento, la experiencia de las máquinas EPB de pequeño diámetro, la LOVAT Ø 7.40 m en la línea 10 del metro en Madrid de Dragados y la Herrenknecht Ø 6.52 m en la línea 3 del metro de Valencia, de Entrecanales y OCP, no puede ser más satisfactorio, habiendo construido entre ambas más de 10 km de túnel en suelos cargados de

agua, blandos y malos. El caso de Valencia merece especial mención, ya que con una carga de agua superior a los 30 metros en algunas zonas, el túnel no tiene ni una gota de agua, ni existe filtración apreciable entre las dovelas, y la construcción se ha llevado a cabo de forma que nos parece muy satisfactoria. Con menos carga de agua, lo mismo ha ocurrido en Madrid al cruzar bajo el Manzanares con la Lovat, y ambas tuneladoras han llegado a superar en punta los 30 metros de avance al día.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

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, parece ser 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.

El autor de este artículo quiere dejar constancia escrita de que el no seleccionar en principio un método constructivo no quiere decir que el método no sea aceptable, sino que, a la vista de los perfiles geotécnicos obtenidos en los Proyectos de Construcción, parece que hay otros métodos alternativos más adecuados en este momento. Muchos de estos métodos han dado y siguen dando resultados excelentes en otros tipos de suelos.

No se ha tratado en este artículo de la programación de los trabajos y ajuste de los equipos constructivos. Durante los últimos 15 años, en los que casi no se ha trabajado en el metro de Madrid, los equipos humanos especializados en los métodos clásicos han ido desapareciendo, por jubilaciones o paso a otras actividades. El método clásico, por tanto, tiene ahora problemas si quiere hacerse una utilización extensiva, y sin embargo ha habido una explosión en la utilización mundial de las tuneladoras de frente cerrado, EPB o slurry. En próximos artículos se detallarán estos y otros

INOCSA PARTICIPA, COMO EMPRESA CONSULTORA, EN LAS OBRAS DE AMPLIACIÓN DEL METRO DE MADRID

INOCSA

**INSPECCIÓN Y VIGILANCIA DE LAS OBRAS DE PROLONGACIÓN DE LA LÍNEA 9
TRAMO: PAVONES-VICÁLVARO**

AREAS DE ACTIVIDAD

- Ferrocarriles y metro
- Autopistas, autovías y carreteras
- Obras hidráulicas
- Medio ambiente
- Agronomía
- Geología y geotecnia
- Edificación
- Urbanismo
- Sistemas de información

SERVICIOS OFRECIDOS

- Estudios de viabilidad
- Estudios de planeamiento
- Consultoría institucional
- Proyectos de construcción
- Dirección y control de obras
- Conservación y explotación de infraestructuras



*Más de 20 años fieles a nuestro principio fundacional:
Calidad, profesionalidad y servicio al cliente.*

INOCSA: INGENIERÍA DE AUTOPISTAS Y OBRAS CIVILES, S.A.
Santa Engracia, 151. 28003 Madrid.
Tel. (91) 553 61 06 • Fax (91) 533 77 96

problemas encontrados durante el Proyecto de la Ampliación de Metro.

BIBLIOGRAFÍA

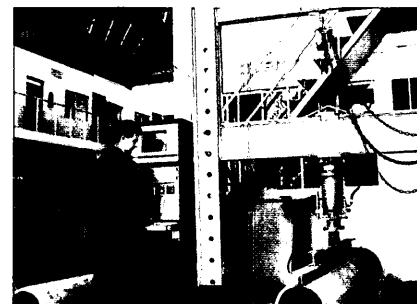
- 1.- **Aurora Moya**. "Metro de Madrid 1919-1989. Setenta años de historia". Metro de Madrid S.A. 1990
- 2.- **Metro de Madrid S.A.** cuentas Anuales e Informe de Gestión. Origen a 1995.
- 3.- **Broms, B.B.** "Stability of Clay at vertical openings", Soil mechanics & Foundations División, ASCE Enero 1967
- 4.- **Peck, R.B.** "Deep excavations and tunneling in soft ground" 7th Intl.Conf.on Soil Mech.& found. Méjico, 1969
- 5.- **Sagaseta, C.** "Analysis of undrained soil deformation due to ground loss". 1987 Geotechnique 37
- 6.- **Sagaseta, C y Uriel, A** "Selección of design parameters for underground construction" 12 Cong. Intl. Mecánica del Suelo, Río de Janeiro 1989

- 7.- **Muir Wood, A.** Comentarios sobre "To NATM or not to NATM", 1987. T&T Sept. 94
- 8.- **Kovari, K** "Erroneous concepts behind the NATM", T&T Nov. 94
- 9.- **Oteo,C.y De la Fuente, P** "Theoretical research on the subsidence originated by the underground construction in urban areas". Agosto. 96
- 10.- **Oteo,C.y De la Fuente, P** "Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid". Cedex C11. 1986
- 11.- **Oteo,C.y Moya J.** "Settlements induced by a tunnel in miocenic soft rocks of Madrid". 4th Intl. Congress Rock Mechanics. Montreux 1979
- 12.- **Oteo,C** "El terreno de Madrid en su relación con los túneles". 1995
- 13.- **Oteo,C y Sagaseta,C.** "Some spanish experiences on measurement and evaluation of ground displacements around urban tunnels". 1995
- 14.- **Oteo,C** "Tratamientos especiales en la ampliación del metro de Madrid". Com.Madrid 1995
- 15.- **Escario,V.** "Síntesis geotécnica de los suelos de Madrid y su Alfoz". M.Transp. 1985. ●



Las Fraguas, 16. polígono Ind. Urtinsa. 28925 Alcorcón (Madrid).
Tel.: 641 07 11 • 641 08 98 Fax: 641 52 97.

**ASISTENCIA TECNICA
CONTROL DE CALIDAD
ENSAYOS DE MATERIALES
ESTUDIOS GEOTECNICOS
ESTUDIOS MEDIOAMBIENTALES**



LABORATORIO Y ACREDITACIONES

- (HA) ➡ Area de control de Hormigón en masa o armado y sus materiales constituyentes: cemento, agua, aditivos y adiciones
- (SE) ➡ Area de ensayos de laboratorio de Mecánica de Suelo
- (ST) ➡ Area de toma de muestras inalteradas, ensayos y pruebas "in situ" de suelos
- (SV) ➡ Area de ensayos de suelos, áridos, mezclas bituminosas y sus materiales constituyentes en viales
- (AP) ➡ Area de ensayos de laboratorio de Perfiles y Barras de acero para estructuras
- (AS) ➡ Area de control "in situ" de la ejecución de la Soldadura de elementos estructurales de acero

Las Fraguas, 16. Polígono Ind. Urtinsa. 28925 Alcorcón (Madrid). Tel.: 641 07 11 - 641 08 98. Fax: 641 52 97.