

Perspectiva tras 90 años de construcción en el Metro de Madrid

JESÚS M. TRABADA GUIJARRO (*) y RAÚL TALAVERA MANSO (**)

RESUMEN En 2009 el Metro de Madrid cumplió 90 años de servicio. En esos 90 años la red ha crecido desde los 3,5 km del primer tramo de la línea 1 hasta superar los 300 km. El crecimiento de la red se ha ido adaptando a la situación política y económica del país, así como a la tecnología de construcción subterránea disponible en cada momento. El artículo repasa los métodos constructivos empleados en Metro de Madrid, analizando los puntos fuertes y débiles de cada uno de ellos.

PERSPECTIVE AFTER 90 YEARS OF PROGRESS IN METRO DE MADRID

ABSTRACT In 2009 Madrid Metro turned 90 years of service. In those 90 years, the network has grown from 3,5km of the first section of Line 1 to exceed 300km. The growth of the network has been adapted to the political and economic situation of the country, as well as the underground construction technology available in each moment. The article reviews the construction methods used in Madrid Metro, analyzing the strengths and weaknesses of each one of them.

Palabras clave: Metro, Túnel, Historia, Métodos constructivos.

Keywords: Underground, Tunnel, History, Construction methods.

1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

El Metro de Madrid se inauguró en 1919. Desde la última década del siglo anterior, diversos intentos por establecer un transporte ferroviario subterráneo en Madrid no fructificaron, por falta de apoyo económico y/o institucional.

En mayo de 1914, se presentó en el Ministerio de Fomento el proyecto de un Ferrocarril Metropolitano de Madrid, en régimen de concesión. El proyecto suponía la construcción de 4 líneas de Metro con un total de 14 km. El 12 de enero de 1917 se otorga la concesión por 99 años, comenzando la construcción en julio de ese año.

Treinta y tres meses después, el 17 de Octubre de 1919, se inauguraba el primer tramo, la línea 1 entre Sol y Cuatro Caminos, de 3,5 km y 8 estaciones. En su ejecución se utilizaron el método tradicional de Madrid para el tramo Sol-Gta. Bilbao y a cielo abierto para el tramo Gta. Bilbao-Cuatro Caminos.

1.1. PRIMERAS LÍNEAS: 1919-1926

En los 4 años siguientes a la inauguración, la línea 1 se amplió hacia el sur en un total de 4.1 km: en 1921 se inauguraba el tramo Sol-Atocha (1,8 km) y en 1923 el tramo Atocha-Puente Vallecas (2,3 km). Casi un año después, se inauguró el primer tramo de la línea 2 (Sol-Ventas), de 3,8 km, y en Octubre de 1925 se amplía la línea 2 con el tramo Sol-Quevedo.

Aunque no contemplado en la concesión inicial, a mediados de 1924 se inició la construcción de un ramal de 1 km para conectar el metro con la estación del Norte (ramal Ópera-Norte). Este tramo se inauguró en diciembre de 1925.

De este modo, en 6 años se pusieron en servicio los primeros 14,6 km de la red de metro de Madrid.

1.2. PERÍODO 1926-1936

En 1927 se iniciaron los trabajos de ampliación de la línea 1 desde Cuatro Caminos a Tetuán (1,7 km), que se inauguraron en Marzo de 1929. El año anterior comenzó la prolongación de la línea 2 desde Quevedo hasta conectar con Cuatro Caminos. Este tramo, de 1,5 km, se inauguró en septiembre de 1929. En 1930 se aprobaba el proyecto de una nueva línea, incluida en la concesión aunque no coincidente con el trazado previsto en el proyecto inicial de 1914, que arrancaba en Goya (línea 2) y terminaba en Diego de León. Inicialmente tratado como un ramal de la línea 2, este tramo de 1,1 km fue el germen de la actual línea 4.

1.3. GUERRA CIVIL Y POSTGUERRA: 1936 A 1955

Aunque comenzó en 1934, fue con la guerra civil española recién iniciada cuando se inauguró la línea 3, desde Sol hasta Embajadores (agosto de 1936), con 1,4 km de longitud. Pero fueron tiempos difíciles, y aunque el metro seguía prestando servicio, la ampliación prevista de la línea 3 hacia el norte, hasta Argüelles, tuvo que esperar a tiempos de paz.

Tras algunos titubeos iniciales, los años inmediatos al fin de la guerra no fueron del todo malos para Metro: en 1941 se abrió el tramo de línea 3 Sol-Argüelles (1,9 km) y comenzaron las obras de la nueva línea 4, desde Goya hasta Argüelles, con 3,9 km de longitud. Esta nueva línea se inauguró en 1944.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Consejero Delegado de Madrid Infraestructuras del Transporte (MINTRA) y Director General de Infraestructuras de la Comunidad de Madrid.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Madrid Infraestructuras del Transporte (MINTRA).



FIGURA 1. Obras de construcción de la primera línea de Metro de Madrid.

Pero diversas situaciones y decisiones (dificultad en suministro eléctrico, política salarial y tarifaria) complicaron la situación económica de Metro y se paralizó las ampliaciones de la red. Sólo se inauguró, en 2 fases, la prolongación de la línea 3 desde Embajadores a Delicias (1949) y de Delicias a Legazpi (1951). En total, 2,0 km adicionales de red.

1.4. EL ESTADO CONSTRUYE LA INFRAESTRUCTURA 1955-1978

Debido a la difícil situación financiera de la compañía Metropolitana, el estado promulgó en Septiembre de 1955 un Decreto Ley por el que Estado y Compañía compartían el régimen de financiación de Metro: el Estado se encargaba de construir la infraestructura y la compañía del material móvil y la explotación.

En 1956 se aprobó un Plan de Transportes que incluía la realización de 60 km de Metro en un periodo de 15-20 años.

En este periodo se realizaron importantes extensiones de la red existente, así como la incorporación de nuevas líneas a la red: la línea 1 se prolongó al norte (hasta plaza de Castilla) y al sur (a Portazgo), la línea 3 de Argüelles a Moncloa y la 4 de Diego de León a Alfonso XIII. Se incorporó el suburbano de Carabanchel a la red de Metro, se abrió una nueva línea, la 5, de 14 km, desde Carabanchel hasta Ciudad Lineal pasando por Callao y Ventas. También se abrió la línea 7 desde Avenida de América hasta Las Musas.

En total, en este período se inauguraron 36,7 nuevos kilómetros de red.

1.5. INTERVENCIÓN ESTATAL 1978-1985

Pese a todo, la situación de desequilibrio económico de la compañía se agravaba, puesto que las nuevas ampliaciones exigían más equipamiento, más material móvil, mayores costes



FIGURA 2. Obras del tramo Bilbao-Luchana de la línea 1 del Metro de Madrid.

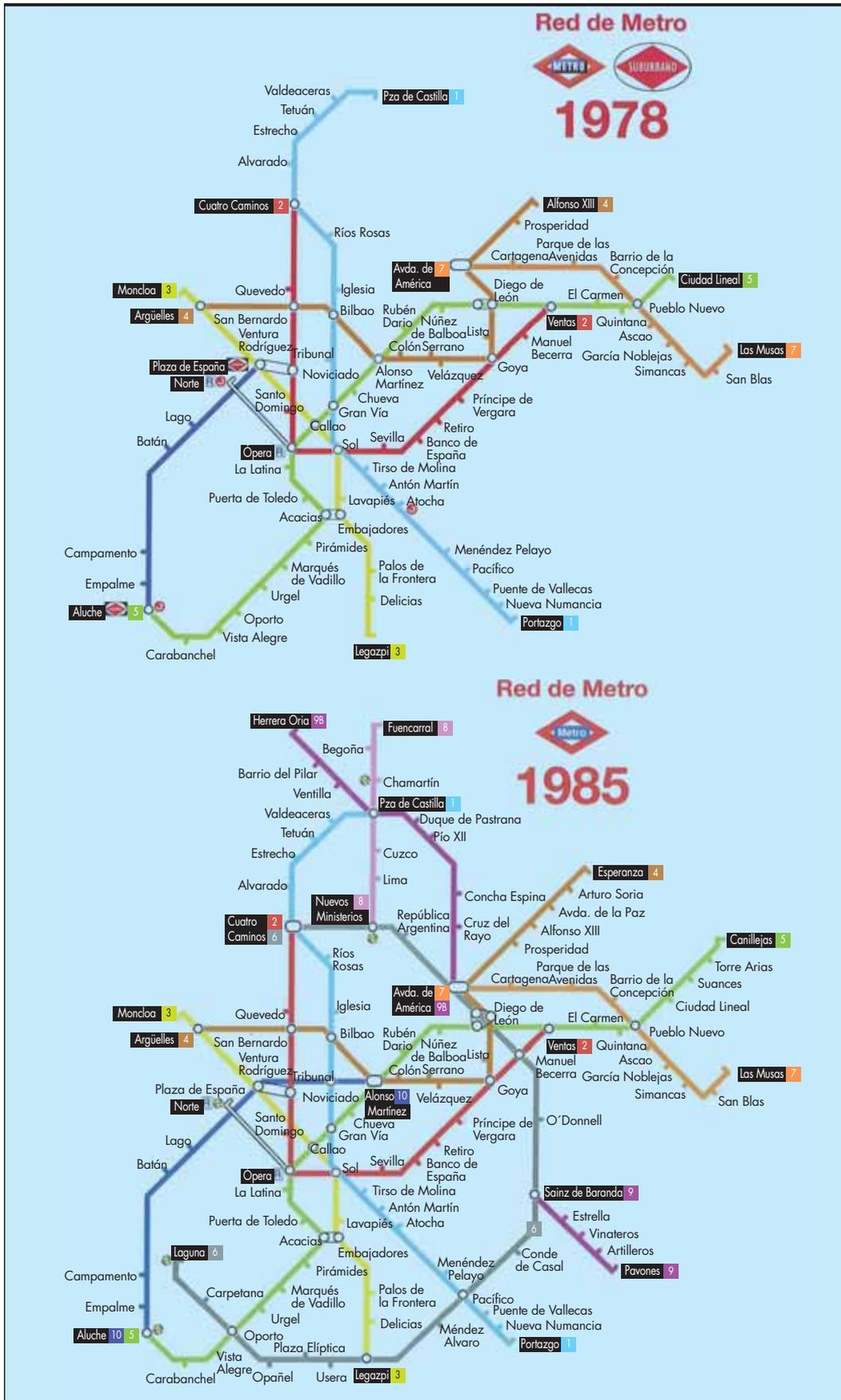


FIGURA 3. Estado de la red de Metro en 1978 y 1985.

de explotación, etc, y las tarifas eran insuficientes para cubrir estos costes. Esto llevó, en 1978, a la intervención por parte del Estado de la Compañía Metropolitana.

No obstante, la red creció más que nunca en esos años; desde la intervención hasta la creación del Consorcio Regional de Transportes, con la Comunidad de Madrid ya establecida, la red se incrementó en 46 km. Se extendieron las líneas 4 y 5 y se abrieron la 6, la 8, la 9 y la 10, a la que se unió el suburbano de Carabanchel.

1.6. EMPRESA PÚBLICA CRT 1986-1995

En Marzo de 1986 el Ayuntamiento y la Comunidad de Madrid asumen la titularidad de la Compañía Metropolitana de Madrid, que se convierte en empresa pública con el accionariado repartido entre el Ayuntamiento (75%) y la Comunidad (25%). Ambos cedieron sus acciones, de forma temporal, al Consorcio Regional de Transportes, que se encargará de planificar y diseñar el sistema de transportes.

Dentro de este Plan, se acomete en 1990, por parte de la Comunidad de Madrid, la prolongación de la línea 1 desde Portazgo hasta Miguel Hernández (1,9 km) y el cierre de la línea 6 (7,1 km) entre Laguna y Ciudad Universitaria. En esta ampliación ya se sientan alguna de las bases con las que se llevarán a cabo las ampliaciones siguientes.

1.7. LOS GRANDES PLANES DE AMPLIACIÓN: 1995-2007

Aprovechando el impulso del periodo anterior, la Comunidad de Madrid se propuso en 1995 recuperar el déficit en transporte público que arrastraba la región. Para ello, el Consorcio planificó un ambicioso Plan que suponía la construcción de al menos 20 km de red en el primer cuatrienio, y sentaba las bases de ampliaciones posteriores.

El gran éxito de ejecución y explotación de las nuevas ampliaciones realizadas entre 1995 y 1999, llevó a dos nuevos planes, cada cual más ambicioso, para los periodos 1999-2003 y 2003-2007.

En estos periodos la red de Metro salió de la región de Madrid, atendiendo a poblaciones periféricas que demandaban estos servicios. Se llevó la red de metro a barrios históricos de

Madrid que tenían déficit de oferta de transporte, se llevó el metro al aeropuerto y se implementó el metro ligero como nueva modalidad de transporte público.

En total, en estos 12 últimos años la red se multiplicó por 3 (de 119 km pasó a 319 km), convirtiéndose en una referencia mundial.

2. MÉTODOS CONSTRUCTIVOS EMPLEADOS

En la actualidad, la red de Metro de Madrid, incluyendo los metros ligeros, cuenta con 320 km de red en servicio y 319 estaciones. Desde el comienzo de las obras en 1917, diversos han sido los métodos constructivos empleados para la ejecución tanto de los túneles como de las estaciones.

A continuación se repasan los métodos utilizados, tanto para túneles como para estaciones, realizando posteriormente una breve descripción de cada uno de ellos.

2.1. MÉTODOS EMPLEADOS EN LA EJECUCIÓN DE TÚNELES

En la tabla 1 se detallan los métodos constructivos empleados en la ejecución de las distintas líneas de Metro de Madrid a lo largo de su historia. Dicha tabla se organiza por líneas, y dentro de cada línea, se ordenan los distintos tramos ejecutados tal y como conforman la propia línea.

En total, se pueden identificar 7 métodos de ejecución de túneles (excluyendo los tramos en superficie): método belga o tradicional de Madrid, métodos a cielo abierto, tuneladoras de frente abierto, tuneladoras de frente cerrado, excavación con entibadoras de lanzas, precorte mecánico y ejecución con nuevo método austríaco modificado.

Se observa que, de los 7 métodos constructivos empleados, los más utilizados son, con diferencia, el método tradicional de Madrid, la excavación a cielo abierto y la tuneladora de presión de tierras EPB. En la figura 5 se presenta la distribución porcentual de cada método empleado.

Se observa que el 75% de los túneles se han ejecutado con EPB o método tradicional de Madrid, porcentaje que llega hasta casi el 90% si se le añaden los métodos de ejecución a cielo abierto. Si no se contaran los km ejecutados con tunela-

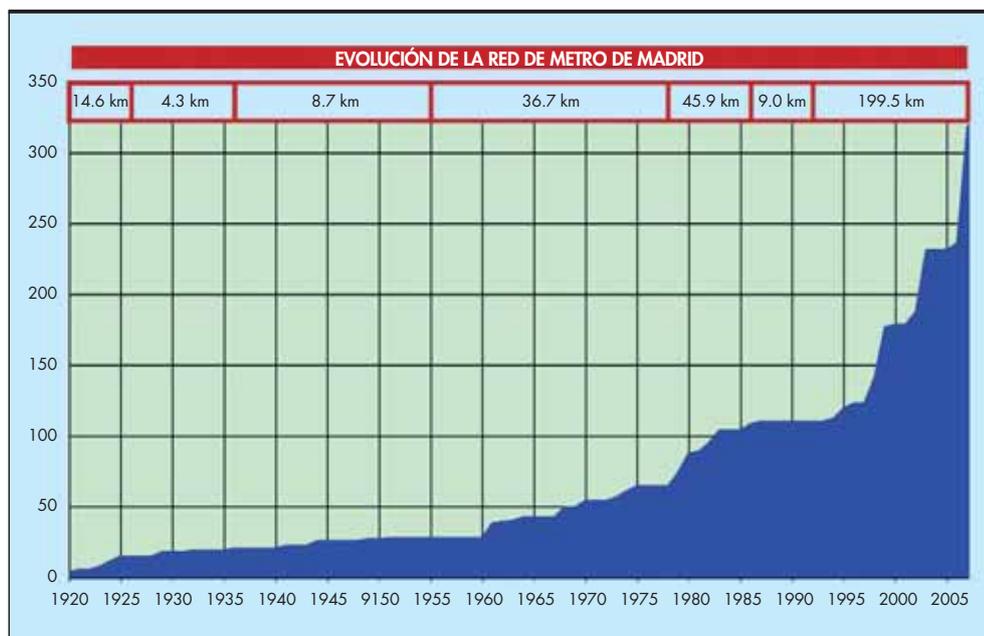


FIGURA 4. Evolución de la red de Metro de Madrid.

PERSPECTIVA TRAS 90 AÑOS DE CONSTRUCCIÓN EN EL METRO DE MADRID

L I N E A	TRAMO		METROS	EMPRESA CONSTRUCTORA	AÑO PUESTA EN SERVICIO	MÉTODO CONSTRUCTIVO							
	DE	A				EPM	MÉTODO MADRID	CIELO ABIERTO	ESCUDO ABIERTO	MÉTODO AUS- TRIACO	PRECORTE	ENTIBA- DORA	SUPERFICIE
1	Pinar de Chamartín	Intercam. Chamartín	2876,5	SACYR	2007	1086	899	891,5					
	Intercam. Chamartín	Plaza de Castilla	1978	FERROVIAL	2007		1258,47	719,2					
	Plaza de Castilla	Tetuán	1077	CUBIERTAS-MZOV	1961		1077						
	Tetuán	Cuatro Caminos	1741	SAN ROMÁN	1929		522	1219					
	Cuatro Caminos	Sol	3481	HORMAECHEA	1919		1500	1981					
	Sol	Atocha	1837	METRO	1921		1837						
	Atocha	Vallecas	2266	METRO	1923			2266					
	Vallecas	Portazgo	1048	CUBIERTAS-MZOV	1962		1048						
	Portazgo	Miguel Hernández	1855	CONS. Y CONTRATAS	1994		1855						
	Miguel Hernández	Congosto	2828	ACS FERROVIAL AGROMÁN	1999		1769	1059					
Congosto	Valdecarros	3105	FERROVIAL	2007	2611,29		593,71						
2	Cuatro Caminos	Quevedo	1463	SAN ROMÁN	1929		1024	439					
	Quevedo	Sol	2237	METRO	1925		2237						
	Sol	Ventas	3754	METRO	1924		3754						
	Ventas	La Elipa	1613,46	OHL	2006		1148,29	465,17					
3	Moncloa	Argüelles	650	AGROMÁN	1963		325	325					
	Argüelles	Sol	1922	AGROMÁN	1941		961	961					
	Sol	Embajadores	1406	AGROMÁN	1936		1406						
	Embajadores	Delicias	1311	AGROMÁN	1949		1311						
	Delicias	Legazpi	744	AGROMÁN	1951		744						
	Legazpi	San Cristóbal	5812,97	FCC	2007	4290	851,62	941,2					
	San Cristóbal	Villaverde Alto	2891,33	FCC	2007	2526,28	364,64						
4	Argüelles	Goya	3371	AGROMÁN	1963		3371						
	Goya	Diego de León	1129	AGROMÁN	1932		1129						
	Diego de León	Alfonso XII	2151	DRAGADOS	1973		2151						
	Alfonso XII	Esperanza	2222	DRAGADOS	1979		2222						
	Esperanza	Mar de Cristal	1997	DRAGADOS	1998	1584	235	178					
	Mar de Cristal	Ciudad Universitaria	2227	DRAGADOS	1998	2160		261					
	Ciudad Universitaria	Pinar de Chamartín	1998	SACYR	2007	1998							
5	Alameda de Osuna	Canillejas	2417,04	FERROVIAL	2006	2016,54		400,5					
	Canillejas	Ciudad Lineal	2718	CORSAN	1981		3371						
	Ciudad Lineal	Ventas	2478	CUBIERTAS-MZOV	1964		2478						
	Ventas	Callao	4455	CUBIERTAS-MZOV	1970		4455						
	Callao	Carabanchel	6828	DRAGADOS	1968		6828						
	Carabanchel	Aluche	1509	DRAGADOS	1961		500						
	Aluche	Casa de Campo	1820		2003								1820
6	Cuatro Caminos	Manuel Becerra	4034	DRAGADOS	1979				4034				
	Manuel Becerra	Pacífico	2942	CUBIERTAS-MZOV	1979				1471			1471	
	Pacífico	Oporto	5740	FOMENTO	1979		1110		4600				
	Oporto	Laguna	1592	FOMENTO	1983		792		800				
	Laguna	Lucero	785	CUBIERTAS-MZOV	1983		550		236				
	Lucero	Puerta del Ángel	1960	CUBIERTAS-MZOV	1983		1960						
	Puerta del Ángel	Príncipe Pío	1146	AGROMÁN	1995			869		277			
	Príncipe Pío	Moncloa	1901	AUXINI	1995		1361				540		
	Moncloa	Ciudad Universitaria	1326	ENTRECANALES	1995			1326					
Ciudad Universitaria	Cuatro Caminos	2076	DRAGADOS	1987		1776		300					

TABLA 1. Métodos constructivos empleados en la ejecución de las líneas de Metro de Madrid.

PERSPECTIVA TRAS 90 AÑOS DE CONSTRUCCIÓN EN EL METRO DE MADRID

LÍNEA	TRAMO		METROS	EMPRESA CONSTRUCTORA	AÑO PUESTA EN SERVICIO	MÉTODO CONSTRUCTIVO							
	DE	A				EPM	MÉTODO MADRID	CIELO ABIERTO	ESCUDO ABIERTO	MÉTODO AUSTRIACO	PRECORTE	ENTIBADORA	SUPERFICIE
7	Hosp. del Henares	Coslada	6651,09	DRAGADOS	2007	5822,63		826,46					
	Coslada	M40	4135,8	DRAGADOS	2007	4060,8		75					
	M40	Las Musas	1300	SACYR	2007			1300					
	Las Musas	Pueblo Nuevo	4030	DRAGADOS	1974		4030						
	Pueblo Nuevo	Avda. de América	3343	CUBIERTAS-MZOV	1975		3343						
	Avda. de América	Gregorio Marañón	1248	CUBIERTAS-FERROVIAL	1998		1108	140					
	Gregorio Marañón	Canal	1100	CUBIERTAS-MZOV	1998		870	230					
	Canal	Valdezarza	4520	FERROVIAL	1999	3435		1085					
	Valdezarza	Pitis	4230	FCC	1999	3556		874					
8	T4	Barajas	2572	FCC	2007	2572							
	Barajas	Campo Naciones	5037	FCC-DRAGADOS	1999	5037							
	Campo Naciones	Mar de Cristal	2500	DRAGADOS-NECSO-OCP	1998	2500							
	Mar de Cristal	Nuevos Ministerios	5700	ACS-FERROVIAL-NECSO	2002	3378	2293						
	Nuevos Ministerios	Avda. de América	1664	CMZ-DRAGADOS	1986		1664						
9	Arganda del Rey	Puerta de Arganda	13650	NECSO-FCC-ACS	1998								13650
	Puerta de Arganda	Pavones	4650	NECSO-OCP	1998	3500		1150					
	Pavones	Saínz de Baranda	3540	ENTRECANALES	1980				2360			1180	
	Saínz de Baranda	Avda. de América	3221	ENTRECANALES	1986		3221						
	Avda. de América	Plaza de Castilla	4235	DRAGADOS	1983							4235	
	Plaza de Castilla	Herrera Oria	2864	AGROMÁN	1983		573		2291				
10	Hospital Infanta Sofía	Fuencarral	15737	OHLACCIONAUTE MNORTE	2007	13248		2489					
	Fuencarral	Plaza de Castilla	3306	HUARTE	1982				3306				
	Plaza de Castilla	Nuevos Ministerios	1664	CMZ-DRAGADOS	1986		1664						
	Nuevos Ministerios	Alonso Martínez	1610	FCC	1998		1075	535					
	Alonso Martínez	Plaza de España	1243	CUBIERTAS	1981		1243						
	Plaza de España	Lago	2442		1961		2442						
	Plaza de España	Príncipe Pío	1070	CUBIERTAS	1996		1070						
	Príncipe Pío	Lago	1600	DRAGADOS	1996	1600							
	Lago	Casa de Campo	4034		1961			500					3534
	Casa de Campo	Colonia Jardín	1433,15	FCC-FERROVIAL	2003		640	793,15					
	Colonia Jardín	Cuatro Vientos	2791	FCC	2003	2741	50						
Cuatro Vientos	Puerta del Sur	2800	DRAGADOS	2003								2800	
11	Plaza Elíptica	Pan Bendito	2280	DRAGADOS	1998		385	1895					
	Pan Bendito	La Peseta	2708	DRAGADOS	2007	2149		559					
12	METROSUR	CONTRATO 1	9637	ACS-VIAS	2003	7911		1726					
	METROSUR	CONTRATO 2	7312	FCC	2003	3959		2576					
	METROSUR	CONTRATO 3	2293,3	OHL-SACYR	2003		413,13	1880,17					
	METROSUR	CONTRATO 4	6375	NECSO	2003	3300	1325	1750					
	METROSUR	CONTRATO 5	6568	FERROVIAL	2003	6470		98					
	METROSUR	CONTRATO 6	6238	DRAGADOS	2003	6078		170					

TABLA 1 (CONTINUACIÓN). Métodos constructivos empleados en la ejecución de las líneas de Metro de Madrid.

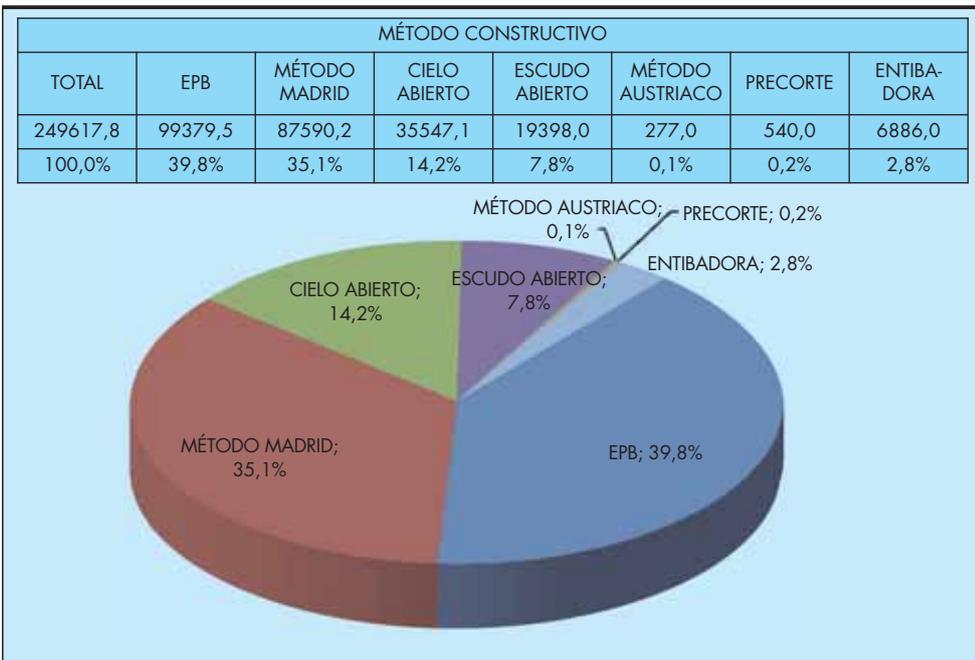


FIGURA 5. Distribución de métodos constructivos.

dora EPB, cuyo uso se inició en 1995, el total de km ejecutados por método tradicional y a cielo abierto alcanzaría el 82%. Por el contrario, el método austriaco y el precorte pueden considerarse métodos secundarios.

En la figura 6 se muestra la utilización de los distintos métodos a lo largo de los años, agrupando los tramos puestos en servicio en periodos de 5 años. Observando dicha figura se puede concluir que:

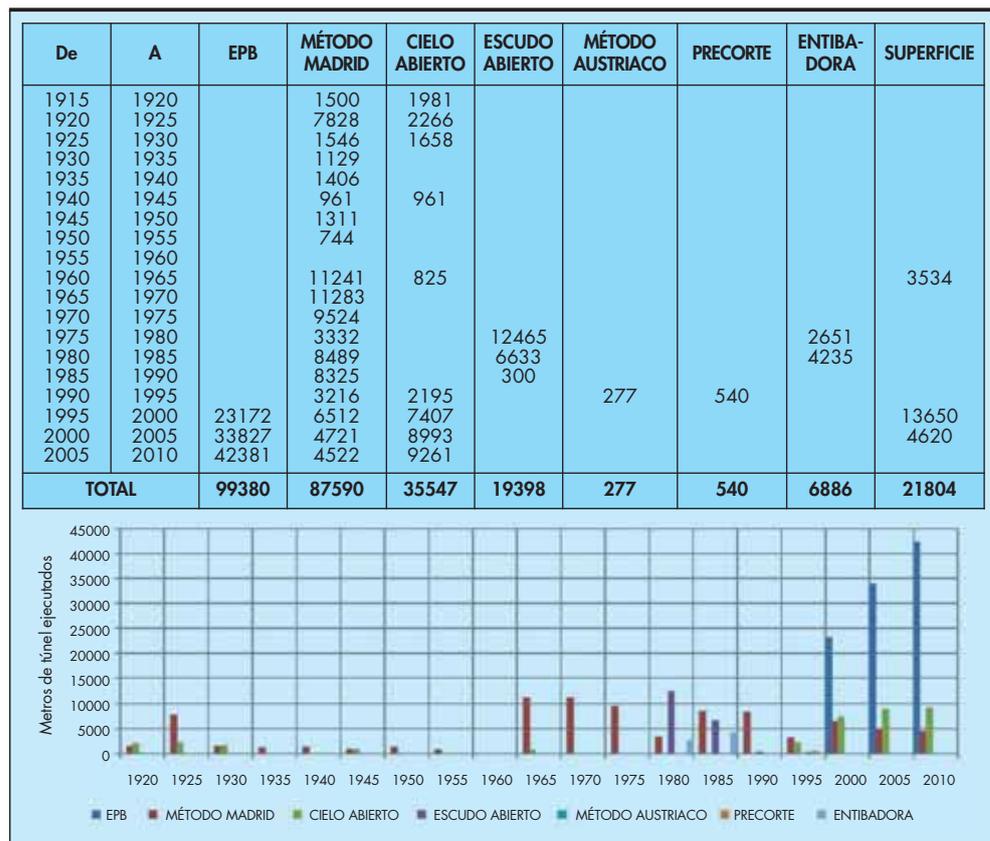


FIGURA 6. Distribución temporal de los métodos constructivos.

- El método tradicional de Madrid se ha empleado, de forma continua, desde el comienzo de las obras de la primera línea en 1917 hasta la apertura de las líneas de la Ampliación 2003-2007.
- Los métodos a cielo abierto también han sido empleados de forma continua, salvo en los años 80, en los que se sustituyeron por otros métodos
- En dicho periodo (años 80) se generalizó el uso de la entibadora de lanzas y el escudo abierto, aunque posteriormente se abandonaron.
- Tanto el método austríaco como el precorte sólo se han utilizado a principio de los 90, en concreto, en el cierre de la línea 6 inaugurado el 1995
- Aunque sólo se viene empleando desde 1995, la longitud total de túnel ejecutado con tuneladora EPB (unos 100 km) es superior a la de cualquier otro método.

2.2. MÉTODOS EMPLEADOS EN LA EJECUCIÓN DE ESTACIONES

El conjunto de estaciones subterráneas del Metro de Madrid se han ejecutado históricamente bien a cielo abierto desde superficie bien en caverna. En las primeras líneas, más superficiales, gran parte de las estaciones se realizaban a cielo abierto. Sólo las que se ubicaban a mayor profundidad o aquellas implantadas en calles con alto grado de ocupación (Sol, Gran Vía, Tribunal) se realizaron en mina.

Con el paso de los años, la ocupación de superficie se densifica, así como la red de servicios urbanos. Y las primeras líneas de Metro, ya en servicio, ocupan la zona más superficial. Esto obliga a llevar las estaciones a mayor profundidad, por lo que se generaliza la construcción de las estaciones en caverna.

En 1979 se ejecuta la primera estación a cielo abierto al abrigo de pantallas de hormigón (Avenida de La Paz en línea 4), y en 1988 la segunda, Atocha-RENFE, que es además la primera con vocación de espacio único integrador con otros modos de transporte. A partir de 1994, este método constructivo se generaliza y desde 1999 todas las estaciones ejecutadas se realizan a cielo abierto entre pantallas.

3. LOS TERRENOS DE MADRID

Desde el punto de vista geológico, Madrid se inscribe dentro de la Cuenca de Madrid, unidad sedimentaria menor incluida

dentro de la Depresión del Tajo delimitada por las sierras de Guadarrama y Somosierra al noroeste, Altomira al este y los Montes de Toledo al Sur (Figura 7).

La Fosa del Tajo está constituida fundamentalmente por materiales terciarios y, en menor medida, cretácicos, cuyos afloramientos se restringen a los márgenes de la misma.

Se reconocen tres tipos de depósitos:

- Facies de borde (Facies Madrid), con formaciones detríticas de naturaleza arenosa (arenas cuarzo-feldespáticas) en los niveles superiores y más arcillosas en los inferiores.
- Facies Central, química (margas yesíferas, yesos y calizas).
- Facies de transición (arcillas margosas, núcleos de "chert" (cuarzo), arenas micáceas y arcillas de alta plasticidad).

Todos estos depósitos se distribuyen de forma que, moviéndose en dirección perpendicular a la Sierra, se pasa de los sedimentos detríticos a los de transición (arcillas litificadas de alta plasticidad localmente denominadas peñuelas) y terminando en los yesos.

Desde 1917, los sucesivos túneles de Metro construidos han atravesado las distintas formaciones presentes en Madrid, desde los rellenos antrópicos hasta los yesos, pasando por las arenas y arcillas. Cada uno de estos terrenos tiene su problemática a la hora de excavarlos, pudiendo destacar:

- Capas importantes de rellenos sueltos, de nula capacidad portante, pueden generar inestabilidades en el frente, subsidencias inadmisibles, etc.
- Capas de arenas sin cohesión, que pueden generar inestabilidades en frente o dorsales.
- Arcillas con problemas de expansividad, y pegajosidad en caso de excavación con tuneladoras
- Capas de yesos, masivos o con arcillas, de gran dureza. En excavación con tuneladora, presenta problemas de fraguado en el interior de la cámara. También puede implicar la aparición de fenómenos kársticos.
- Presencia de agua, embolsada en capas arenosas, o subálvea, que puede generar arrastre de finos hacia la excavación con el consecuente riesgo de inestabilidad.

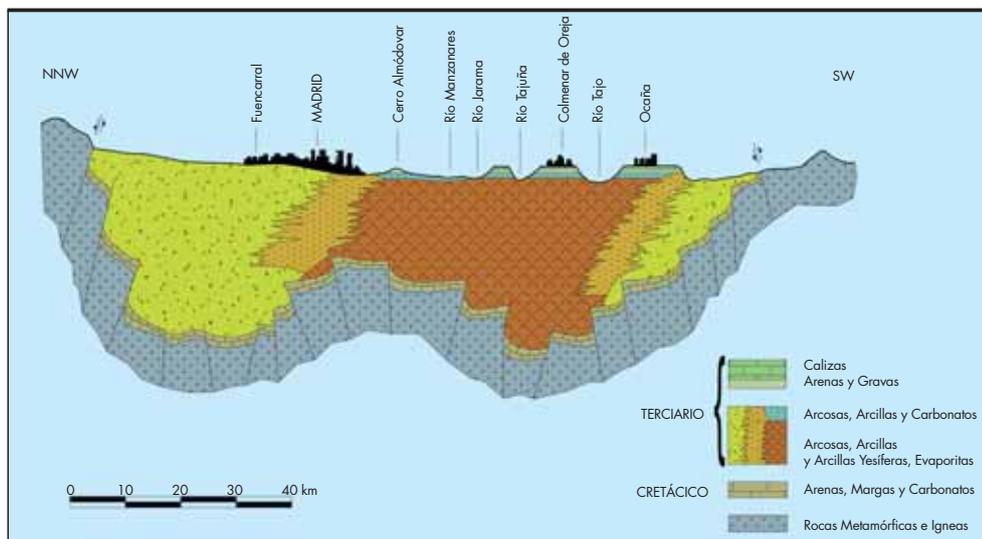


FIGURA 7. Terrenos de Madrid.

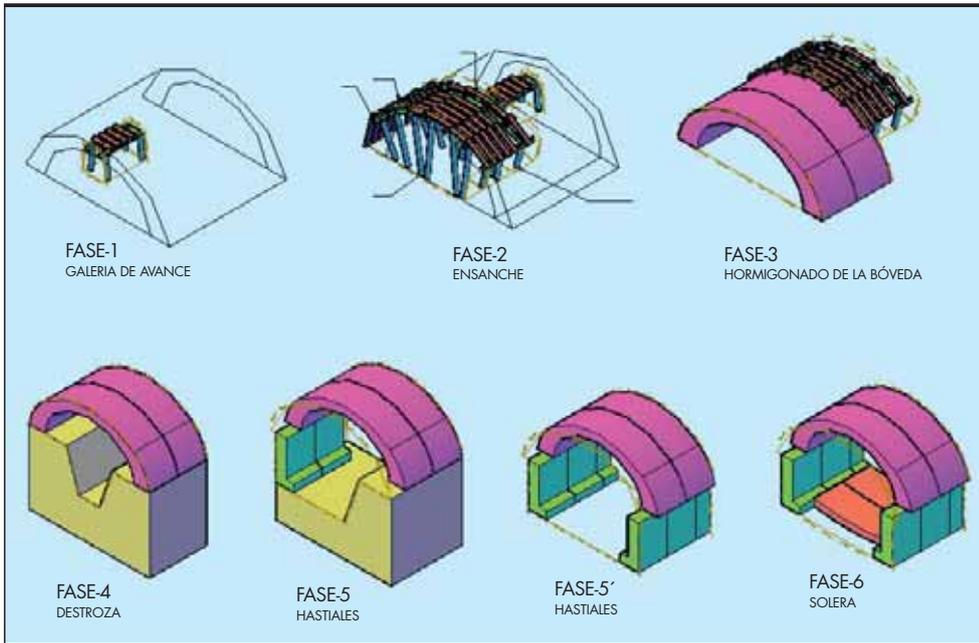


FIGURA 8. Fases del Método Tradicional.

4. EL MÉTODO TRADICIONAL DE MADRID

Es el método que se ha venido utilizando en Madrid desde la inauguración del Metro en 1919. Procedente de la minería, consta de varias fases que se van realizando sucesivamente, construyendo en primer lugar la media sección superior y posteriormente el resto. De esta forma, la sección de frente abierto sin proteger es relativamente pequeña.

Las fases de excavación y hormigonado, como se representa en la Fig. 8, son:

- Bóveda.
- Destroza central.
- Hastiales laterales.
- Contrabóveda.

4.1. BÓVEDA

Se inicia la excavación con una galería de avance en clave, de 1 metro de ancho por 1,50 de alto, con entibación continua de tabla de eucalipto. Las tablas se van colocando a medida que avanza la excavación, apoyadas en el propio terreno, forrando la parte superior de la galería. Una vez ejecutada la galería en la longitud de avance (entre 1,25 y 2,5 m según el terreno), se colocan las longarinas, que son perfiles metálicos TH que servirán de apoyo a las tablas, disponiéndose longitudinalmente al túnel y separadas 1 metro.

Entre las tablas y la longarina se coloca una tabla corrida haciendo de falso apoyo y separando éstas con calas para dejar espacio suficiente a las tablas de los pases laterales siguientes. Esta tabla corrida se denomina "falso".



FIGURA 9. Galería de avance.



FIGURA 10. Excavación de destroza central.

Una vez finalizada la galería de avance, se comienza a abrir la excavación a ambos lados de ésta en pases, numerándose éstos con primeros, segundos, etc., según se van alejando de la misma. La ejecución de los pases se realiza de forma análoga, pasando las tablas de entibación a través del falso y acuñadas contra la longarina ya colocada. De esta forma se configura una partición de la sección, en secciones de unos 3 m² con un sostenimiento unido transversalmente.

Inmediatamente después de ejecutada la excavación se procede al encofrado y hormigonado de la sección de bóveda, con lo que se impide la deformación instantánea del terreno. La excavación se realiza con martillos neumáticos y la evacuación mediante cintas transportadoras hasta tolva y camión. Los apoyos de la bóveda en el terreno deben ser inclinados, para un mejor reparto de las cargas.

4.2. DESTROZA CENTRAL

Una vez hormigonada la bóveda, y con un desfase de unos 5 ó 6 anillos, se comienza la destroza, consistente en excavar una caja central dejando un resguardo del orden de 1 a 1,5 m en los hastiales, para que los empujes que la bóveda transmite al terreno que sirve de apoyo no formen planos de rotura peligrosos, que pudieran dar origen al asentamiento y rotura de la misma. Esta operación se realiza con máquina excavadora que además se utiliza para retirar las tierras procedentes de la excavación de la bóveda que vierten en la destroza a través de una o varias cintas transportadoras.

4.3. HASTIALES LATERALES

Finalizada la destroza, se ejecutan los hastiales por bataches contrapeados. Su excavación se realiza con la misma máquina



FIGURA 11. Túnel ejecutado mediante método Tradicional de Madrid terminado.

que la destroza y se refina posteriormente a mano. La entibación suele ser ligera y poco cuajada. Se excavan módulos de 2,5 m, al igual que los anillos, con las dos precauciones siguientes:

- La junta de los anillos debe caer aproximadamente en el centro del batache con el fin de no descalzar la bóveda completamente.
- Nunca se excavan dos batches enfrentados al mismo tiempo por las mismas razones.

Esta operación, que parece tener poca importancia cuando el terreno es relativamente bueno, se puede complicar y llegar a ser una de las fases más comprometidas cuando existe abundancia de agua y el terreno tiene poca cohesión.

4.4. SOLERA O CONTRABÓVEDA

Se realiza la excavación correspondiente con máquina, en una longitud de 10 a 15 m (cinco anillos), que suele realizarse en fin de semana, hormigonando posteriormente con plantillas para conseguir la forma de la sección tipo. Se puede hacer en toda la luz o por mitades. Cuando el terreno presenta mucha agua se recurre a zanjas o pozos drenantes.

Este método, utilizado desde 1917 para construir 87,6 km de túnel, además de cañones, galerías, etc, está bien calibrado en los terrenos de Madrid. El rendimiento medio se sitúa en torno a 50 m/mes por frente de trabajo. Presenta como principales ventajas:

- Mínima inversión inicial en instalaciones, por ser un método que sólo requiere herramienta de mano y maquinaria tradicional de excavación.
- Posibilidad de avance en varios frentes, siempre que se disponga de varias rampas de ataque y personal especializado suficiente.
- Estabilidad del frente al ser un método de ataque a sección partida y tener la posibilidad de entibar éste.
- Adaptabilidad a casi cualquier tipo de terreno, lo que permite ejecutar sin tratamientos previos, en zonas en las que no sería posible con otros métodos.

- Gran flexibilidad de actuación frente a imprevistos, acortando los pases, aumentando la entibación, o tratando el terreno.
- Buen control de asentos, debido al propio sistema de ejecución con poco frente abierto, con el pre-sostenimiento colocado inmediatamente después de excavar y con el sostenimiento definitivo pegado al frente de excavación.
- Precio competitivo con métodos más mecanizados.
- Reduce incertidumbres de plazo al necesitar menos tratamientos que otros sistemas.

Por el contrario, se pueden citar como principales inconvenientes:

- Dependencia de mano de obra especializada para la ejecución del método.
- El método implica una elevada proporción entre la mano de obra y los materiales.
- Provoca muchas juntas de construcción, con la consiguiente repercusión en el acabado superficial y la duración a largo plazo de la obra.

5. MÉTODO ALEMÁN

Este sistema se ha utilizado para la construcción de estaciones en caverna, cuando su ejecución desde superficie no era factible. Es un sistema tradicional, con la misma filosofía que el tradicional de Madrid pero para luces superiores, en las que el apoyo de la bóveda directamente sobre el terreno podría no ser estable.

El sistema está basado en limitar al máximo la sección de excavación, hormigonar lo más rápidamente posible la sección excavada y apoyarlo todo en un sostenimiento continuo que impida las deformaciones iniciales del terreno. Se realizan en primer lugar los muros de hastiales y posteriormente la bóveda que apoya en ellos, tal y como se indica en las fases del método (Fig. 13):

- Excavación de galerías de hastiales y clave.
- Excavación y hormigonado de la semi-sección de los hastiales.



FIGURA 12. Estación subterránea ejecutada mediante método Alemán.

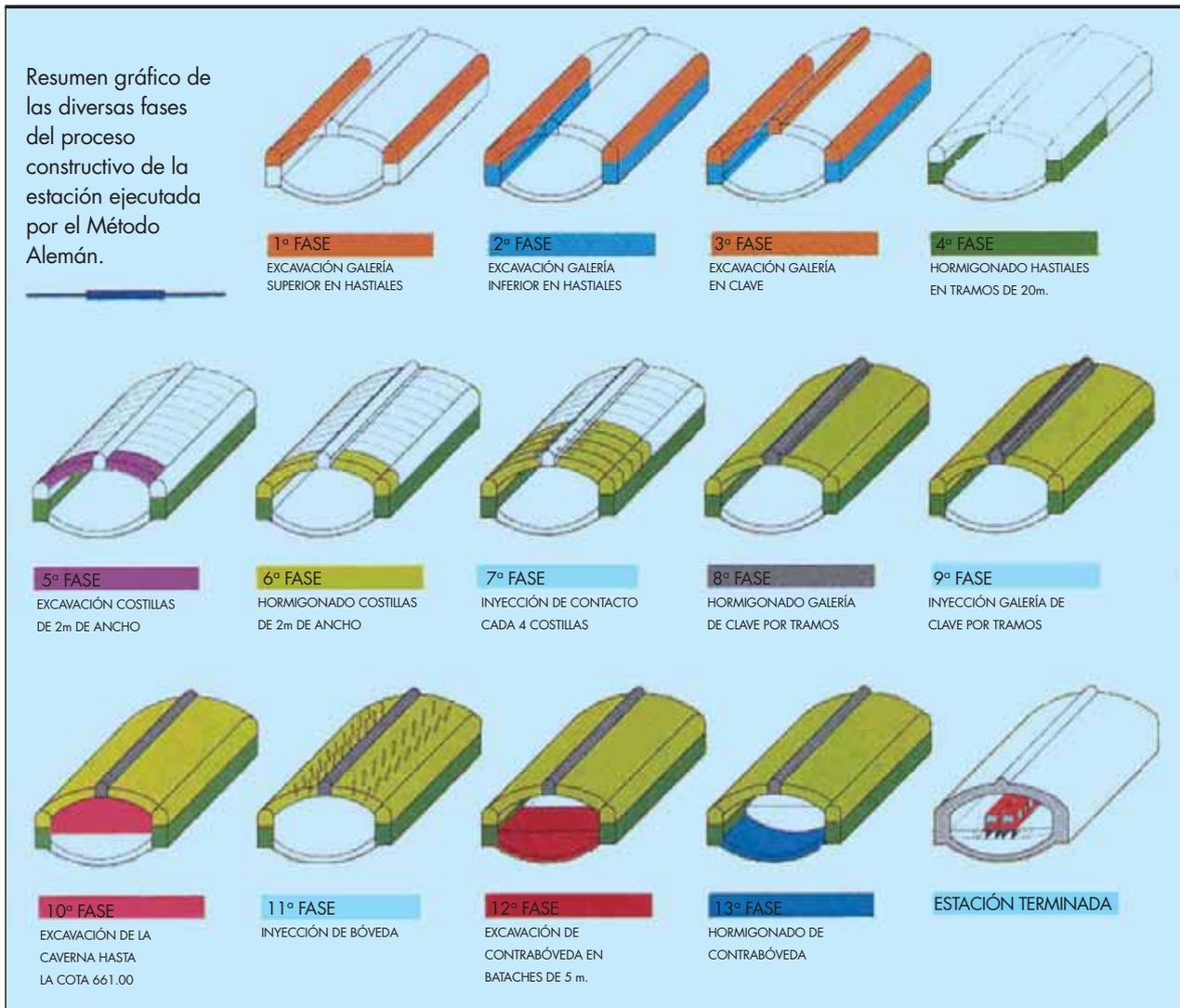


FIGURA 13. Fases de ejecución de una caverna mediante método Alemán.

- Excavación y hormigonado de galerías transversales de bóveda.
- Excavación de la caverna y hormigonado de la contra-bóveda.

5.1. EXCAVACIÓN DE GALERIAS DE HASTIALES Y CLAVE

Se inicia el ataque de la caverna desde un pozo auxiliar, desde un túnel o rampa de acceso, mediante la apertura de dos galerías laterales, en lo que serán los hastiales de la caverna en la sección superior de los mismos, con una dimensión de 2,50 x 2,50 m aproximadamente (Foto 9) y una galería en la clave de la futura caverna de menor dimensión de 2,00 x 1,50 m. Se excavan estas galerías en toda su longitud y se dispone de un sostenimiento mediante cerchas de vigas metálicas de sección TH y entibación de madera, similar al utilizado en el método tradicional de túneles.

5.2. EXCAVACIÓN Y HORMIGONADO DE LA SEMI-SECCIÓN DEL HASTIAL

Desde el fondo de las galerías laterales, y en retroceso, esto es, desde el final de la galería al inicio de la misma, se pro-

cede a la excavación y hormigonado de la semi-sección del hastial, mediante pozos de 2,50 m de profundidad y 5 m de longitud.

5.3. EXCAVACIÓN Y HORMIGONADO DE LAS GALERIAS TRANSVERSALES DE BÓVEDA

Desde ambas galerías longitudinales de los hastiales, sobre la sección hormigonada, se ejecuta una galería transversal (denominada costilla) con la forma de la directriz de la bóveda de la caverna, que conecta con la galería de clave y de una dimensión de 2 a 3 m de ancho y 1,50 m de altura, con un sostenimiento compuesto por longarinas metálicas y tabla. Una vez terminada la excavación y sostenimiento de esta galería transversales y desde la galería de clave se procede al hormigonado de estas costillas laterales junto con la semi-sección de la galería de hastiales y la propia galería de clave en el ancho de excavado.

Realizando estas galerías (excavación y hormigonado) en retroceso desde el fondo de la excavación hacia el inicio, se tiene totalmente ejecutada la estructura de la caverna: bóveda y hastiales.



FIGURA 14. Galería de hastial (Estación de Guzmán el Bueno).

5.4. EXCAVACIÓN DE LA CAVERNA Y HORMIGONADO DE LA CONTRABÓVEDA

Se excava la totalidad de la caverna, sacando las tierras por el propio túnel o desde pozos auxiliares, y se ejecuta la contrabóveda, por tramos de 10 m a 20 m de longitud.

De esta forma se obtiene una caverna subterránea de 12 a 20 m de luz, sin haber realizado excavaciones de galerías superiores a tres metros de luz. Al igual que se comentaba en el método tradicional es fundamental, para asegurar el control de las subsidencias en superficie, realizar el relleno sistemático de huecos entre hormigón y terreno (inyecciones de contacto).

Las ventajas e inconvenientes de este método constructivo son similares a las del método tradicional de Madrid.

6. MÉTODOS A CIELO ABIERTO

En este apartado se aglutinan los métodos de construcción que se ejecutan desde superficie. Fundamentalmente se tratan dos: el cut and cover o entre pantallas, y el falso túnel ejecutado en trinchera. El primero de ellos, con las limitaciones de la época, ya se ejecutó para poner en servicio la primera línea del Metro de Madrid, en 1919. También es el que se utiliza actualmente, de forma sistemática y casi exclusiva, para la ejecución de nuevas estaciones.

En ambos casos, se requiere una condición previa, y es que se pueda ocupar temporalmente la superficie bajo la cual discurrirá el túnel. Si esta condición se cumple y no existe ningún condicionante de servicios, obras subterráneas intermedias o cualquier otro impedimento, la elección del método a



FIGURA 15. Excavación de la caverna (Estación de Guzmán el Bueno).

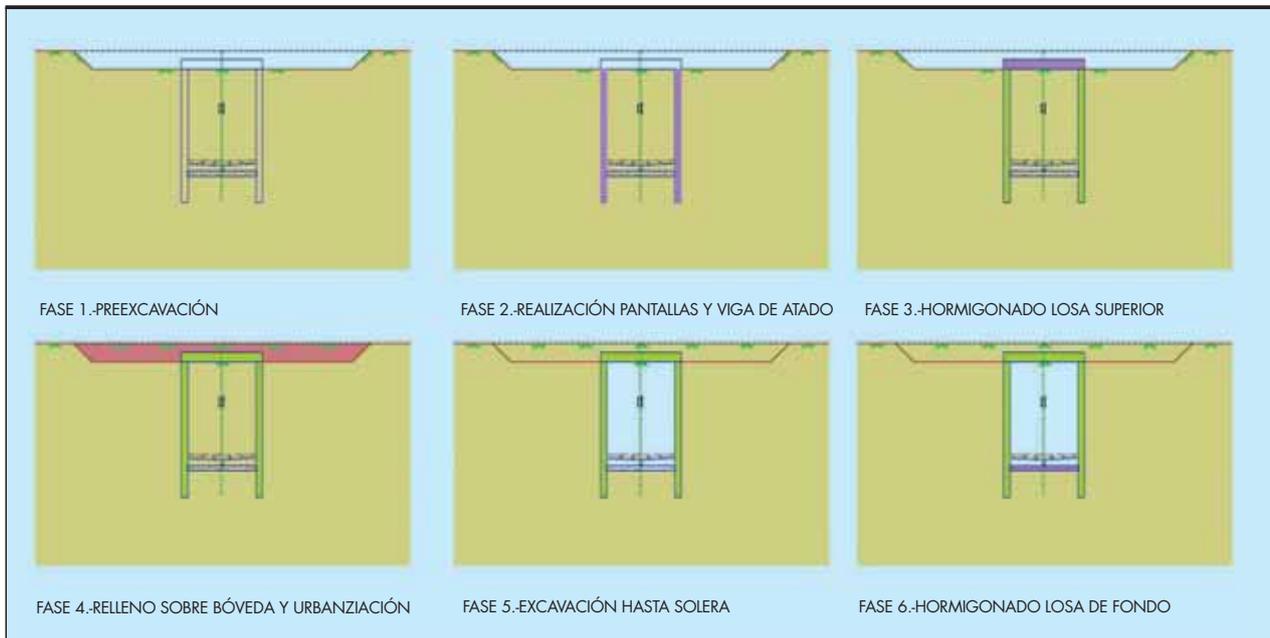


FIGURA 16. Fases de ejecución del túnel a cielo abierto.

cielo abierto o subterráneo sólo estará determinado por la profundidad, rendimientos, plazos y costes de una u otra solución. En el caso de Madrid, y para las profundidades y entorno en el que se han empleado estos métodos, se puede considerar un rendimiento promedio de 100 m/mes.

6.1. SISTEMA CUT AND COVER

El sistema cut and cover es relativamente sencillo, tal y como se esquematiza en la Fig. 16 adjunta.

La ejecución consta de las siguientes fases:

- Ejecución de muros laterales.
- Excavación entre muros hasta cota de losa superior y ejecución de la misma.
- Reposición de uso en superficie y excavación bajo losa.
- Ejecución de contrabóveda.

El sistema admite múltiples variantes, en función de la tipología de la losa superior, el momento de reposición del uso preexistente en superficie, la necesidad de ejecutar losas o apuntalamientos intermedios, etc.

6.1.1. Construcción de muros pantallas

Se trata de la ejecución convencional de pantallas, con las operaciones previas de muro guía para excavación de las pantallas, excavación con o sin fluido estabilizante (lodos o polímeros), colocación de armadura y hormigonado (Fig. 17). Las pantallas suelen ser de 0,60 m a 1,20 m de espesor y las profundidades normalmente varían entre los 10 y 30 m.

Puede considerarse también la opción de pilotes separados (en ausencia de agua) o de pilotes secantes. En los primeros años de ejecución de Metro, estos muros laterales se hacían mediante pozos y zanjas entibadas, manualmente.

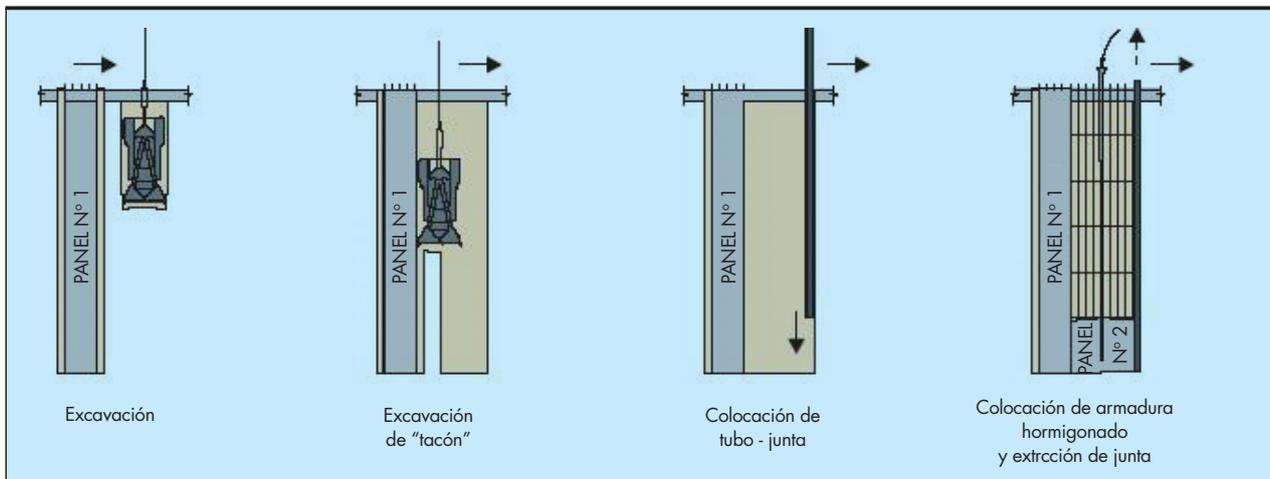


FIGURA 17. Ejecución de un batache de una pantalla.



FIGURA 18. Ejecución de un muro lateral de túnel desde superficie.

6.1.2. Excavación entre pantallas

Se excava el terreno hasta el nivel de bóveda o losa superior, disponiendo codales provisionales en caso necesario. Dependiendo del espesor de rellenos a disponer, se dispondrá una losa plana o una bóveda propiamente dicha.

6.1.3. Construcción de la bóveda y relleno

La fase se inicia picando la pantalla para empotrar la bóveda o losa plana en ella. La bóveda puede construirse sobre el propio terreno (dando a la excavación la forma adecuada) o bien mediante un encofrado que se apoya en el terreno, lo que requiere que la excavación sea algo mayor.

Una vez construida la bóveda e impermeabilizada, se rellena sobre la misma, y se restituye la superficie a su estado original. Este relleno ejerce un acodamiento sobre las pantallas, similar a la de los codales, lo que permite seguir ejecutando la estructura.

6.1.4. Excavación bajo cubierta y realización de contrabóveda

La excavación de la sección del túnel se realiza al amparo de la bóveda o losa, desde el propio túnel, lo que obliga a extraer las tierras mediante una rampa o pozo. Se excava hasta el nivel de contrabóveda y se ejecuta esta, empotrándola a las pantallas.

Aunque es poco habitual, en ocasiones (carga de agua importante) debe colocarse un nivel de arriostramiento entre la bóveda y contrabóveda, que dificulta las condiciones de trabajo y debe ser retirado una vez ejecutada la contrabóveda.

En el caso de las estaciones, el procedimiento constructivo es idéntico, aunque con alguna particularidad (figura 21):

- En las estaciones, para dar cabida a andenes y cuartos, es necesaria una luz mayor. Esto conlleva la necesidad de apoyos intermedios para las losas, generalmente en forma de pilas-pilote.
- La losa superior puede ser hormigonada in situ o de vigas prefabricadas.
- Es necesario crear un nivel intermedio (nivel de vestíbulo) en el que se sitúan los elementos de adquisición y cancelación de billetes. Esto implica la inserción de una losa intermedia entre losa superior y contrabóveda.
- Esta losa intermedia puede hacerse apoyada en el terreno (conectándose a las pilas-pilote), con cimbra apoyada en la contrabóveda, o colgada de la losa superior (postensada).



FIGURA 19. Ejecución de bóveda de túnel desde superficie.



FIGURA 20. Excavación interior bajo bóveda.

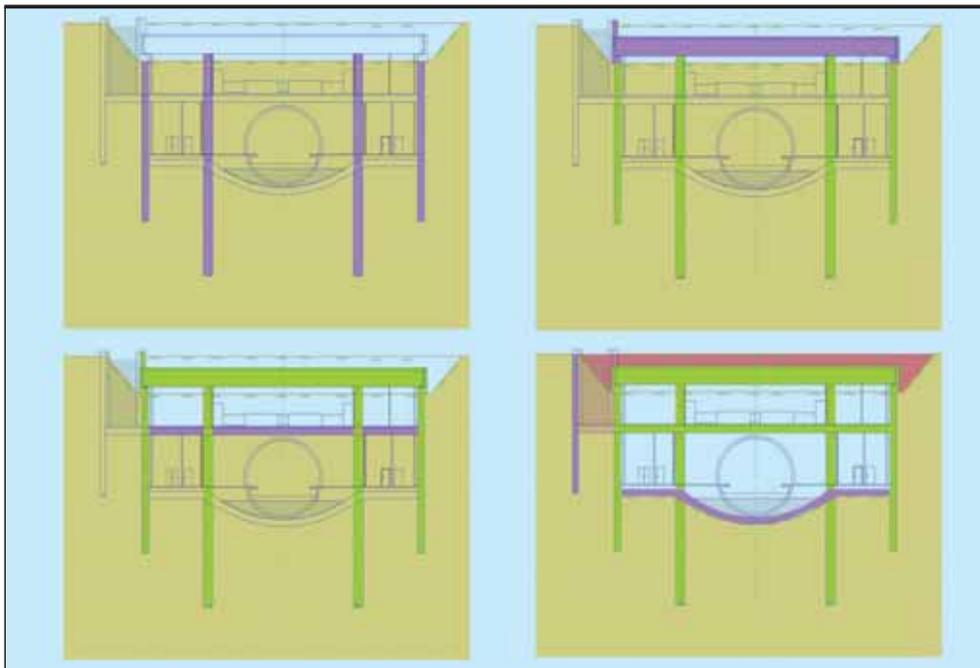


FIGURA 21. Fases de ejecución de una estación mediante cut and cover.



FIGURA 22. Estación de La Fortuna.



FIGURA 23. Ejecución de túnel a cielo abierto en trinchera.

6.2. FALSO TÚNEL EN TRINCHERA

Este método puede considerarse residual, puesto que exige una gran disponibilidad de terreno en superficie, algo prácticamente imposible en suelo urbano. En el caso de Madrid, sólo se ha empleado para fondos de saco y tramos en campo abierto, donde la urbanización está prevista pero aún no ha sido desarrollada.

Básicamente, consiste en abrir una trinchera hasta cota de contrabóveda para luego ejecutar la estructura del túnel y cubrir la trinchera de nuevo. Se pueden distinguir las siguientes fases:

- Excavación en trinchera hasta cota de contrabóveda.
- Ejecución de contrabóveda.

- Ejecución de muros laterales.
- Ejecución de bóveda con carro encofrador.
- Impermeabilización, relleno lateral, relleno sobre clave hasta restitución de uso preexistente.

Las principales ventajas de los métodos a cielo abierto son las siguientes:

- Se reducen las incertidumbres respecto a la seguridad, al plazo y al coste.
- Las subsidencias inducidas son notablemente menores y se eliminan los tratamientos del terreno.



FIGURA 24. Ejecución de túnel a cielo abierto en trinchera.

- Se tiene una mayor independencia del tipo de terreno atravesado.
- Menor dependencia de mano de obra especializada.
- Se pueden abrir varios frentes simultáneamente, lo que redundaría en reducción de plazo y menor vulnerabilidad en caso de presentarse un problema en el frente.
- Permite el aprovechamiento del espacio subterráneo creado entre superficie y gálibo del túnel: aparcamientos, galerías para servicios, etc.

Sus principales inconvenientes son:

- Necesidad de ocupación en superficie y un mayor riesgo de interferencia con servicios urbanos (abastecimiento de agua, alcantarillado, luz, gas, etc).
- Impacto en el patrimonio histórico y natural que exista en superficie.
- Suponen por lo general una mayor molestia al ciudadano, en cuanto a ocupaciones, desvíos de tráfico, ruidos, polvo, etc.

7. NUEVO MÉTODO AUSTRIACO MODIFICADO

El nuevo método austriaco modificado ha sido poco utilizado en el Metro de Madrid, tan sólo 277 m de túnel se han ejecutado por dicho método. Además, no se trata estrictamente del denominado NATM, puesto que no se sigue la filosofía implícita del método.

Resumidamente, la aplicación del NATM supone que el propio terreno colabora en su sostenimiento, de manera que la corona de terreno adyacente a la excavación se deforma en el tiempo de forma controlada, gracias a un sostenimiento primario más o menos ligero que se coloca tras la excavación. Este conjunto terreno deformado-sostenimiento ligero alcanza un equilibrio tenso-deformacional que permite continuar con los trabajos hasta que se coloca el revestimiento definitivo.

En el caso de Madrid, la única similitud con el NATM es el empleo de algunos de los elementos típicos del sostenimiento, no así el principio básico del método de dejar moverse al terreno. En el caso de Madrid, el túnel se ejecuta en 2 fases,

avance y destroza. Debido a lo escaso de su uso en Madrid (menos de 300 m), no se tienen datos de rendimientos promedios aplicables.

7.1. AVANCE

La ejecución del frente de avance, cuya sección comprende la totalidad de la bóveda más aproximadamente un metro de altura de hastiales, se excava mediante equipos mecánicos, (retroexcavadora, rozadora o pala cargadora, según las características del terreno) en una longitud de avance variable entre uno y dos metros, e inmediatamente se coloca un sostenimiento primario constituido por cerchas de acero, de perfil omega (cerchas TH) separadas entre 0,5 y 1 metro, unidos con tresillones metálicos separados 1 metro, y una capa continua de hormigón proyectado de entre 15 y 20 cm de espesor, aplicada en varias fases, con fibras metálicas, en una cuantía de alrededor de 40 kg/m³.

La disposición de este sostenimiento primario se realiza con un desfase máximo de 2 metros respecto a la excavación, en aquellos casos en los que es necesario, se le aplica una capa de unos 3 cm de espesor de hormigón proyectado de sellado para evitar alteraciones y pérdidas de humedad.

Posteriormente se hormigona la bóveda con el revestimiento definitivo, con un desfase entre sostenimiento y revestimiento de unos 18 m para permitir hacer otros trabajos de mejora y consolidación del terreno. Todo el proceso requiere una medición sistemática de la deformación del sostenimiento para tomar las medidas correctoras que fueran necesarias.

7.2. DESTROZA

Se ejecuta de forma similar al método tradicional, continuando con los hastiales y contrabóveda de la misma manera.

El principal problema no es el método en sí, sino la aplicación del mismo para suelos y en ámbitos urbanos. El principio de que el terreno debe deformarse para soportar parte de las cargas y poder así disminuir parte del sostenimiento primario puede ser adecuado en rocas (presentan reducida deformabilidad) pero en suelos y sobre todo en el caso de suelos rígidos no es posible, ya que alcanzan la rotura con una deformación muy pequeña, y en algunos casos prácticamente sin avisar.

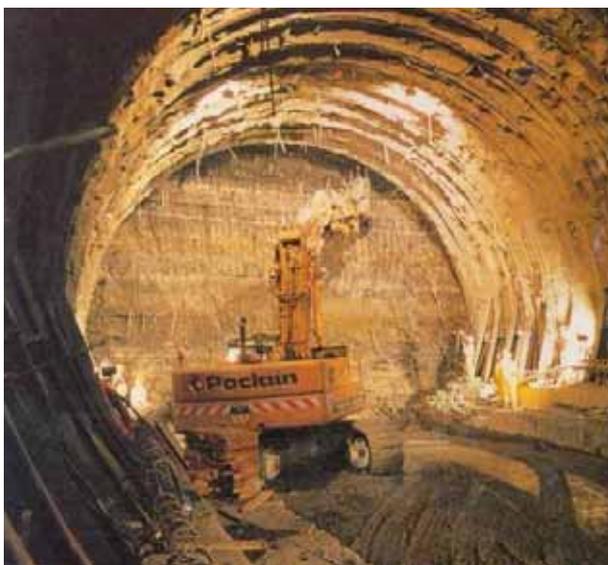


FIGURA 25. Ejecución de túnel mediante NATM.

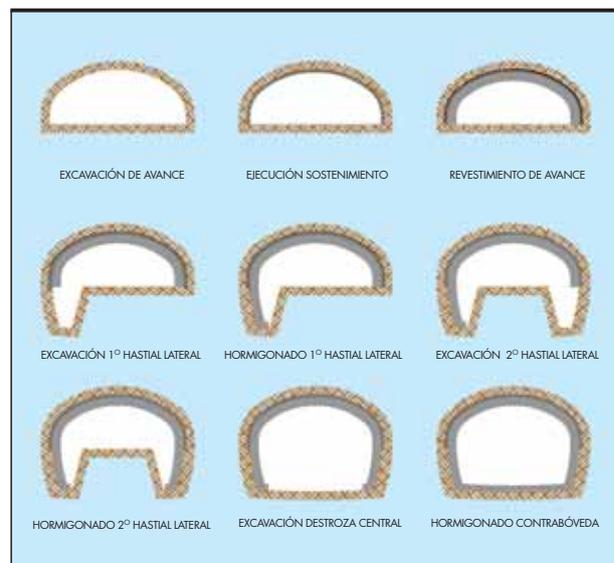


FIGURA 26. Fases del NATM Modificado.

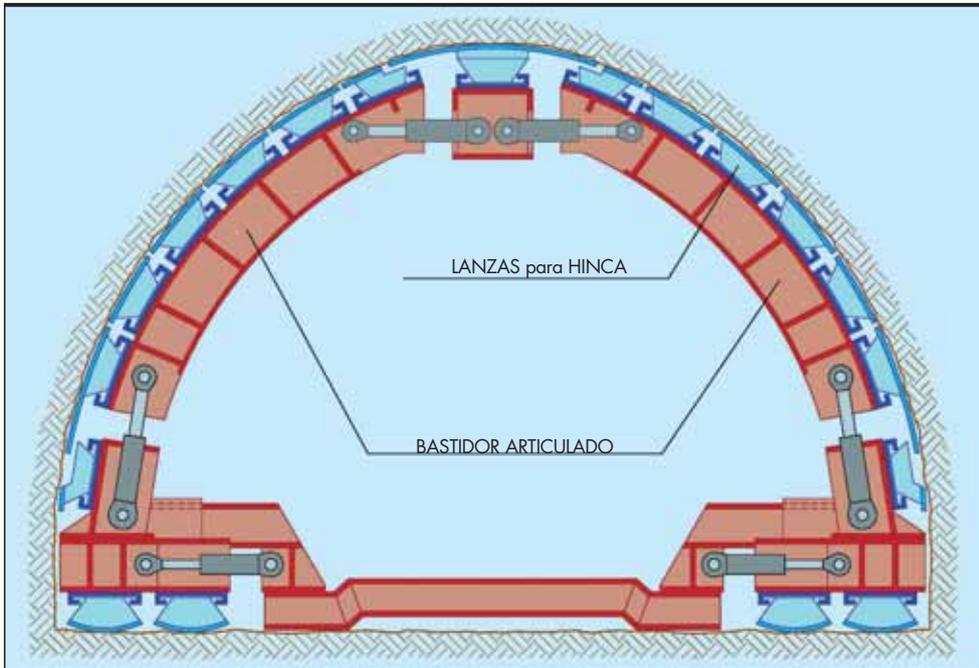


FIGURA 27. Esquema simplificado de una entibadora.

Además, aunque no se produzcan roturas graves, en túneles urbanos relativamente próximos a la superficie, la deformación del terreno adyacente al túnel puede inducir unos movimientos en superficie inadmisibles.

La sección de túnel abierta sin protección alguna es muy grande, lo que multiplica los riesgos en el caso de Madrid, donde es frecuente la aparición de capas de suelo sin apenas cohesión y con carga de agua.

8. LA ENTIBADORA DE LANZAS

Este método de construcción ha estado muy presente en Madrid en los años 70 y 80, ejecutándose un total de 6,9 km de túnel. El principio de este método es sustituir la entibación de los métodos clásicos por una entibación metálica desplazable que, además, permite hincar una serie de lanzas en el terreno para crear un paraguas a cuyo abrigo pueda excavar la sección.

Las entibadoras pueden trabajar en excavaciones a sección parcial o completa. Consisten en un bastidor doble articulado, sobre el que se sitúan perimetralmente lanzas o placas guiadas que, generalmente mediante gatos hidráulicos, se hincan en el terreno. Cuenta además con un sistema de traslación longitudinal autónomo.

Las fases de ejecución son las siguientes:

- Hincado de las lanzas para formar el sostenimiento.
- Excavación y desescombro del frente, por métodos manuales o mecánicos (rozadora, excavadora, etc).
- Avance de la entibadora y hormigonado con carro del anillo que deja libre.
- Excavación de destroza central.
- Ejecución de hastiales laterales por bataches.
- Contrabóveda.

En caso de que la entibadora sea a sección completa, en el avance se incluiría la destroza central y la ejecución de los hastiales laterales.



FIGURA 28. Entibadora de lanzas (FCC, Acceso ferroviario a Alcobendas).

En teoría, al crear un pre-sostenimiento con las lanzas y la entibación, se consigue una protección parcial del túnel y obtener mejores rendimientos que con el método clásico de Madrid en el que el avance se hace por fases de ensanche lateral. No obstante, el frente de túnel abierto, no protegido, es muy superior, y la gravedad en caso de que se presenten inestabilidades mayor.

Así pues, las ventajas aportadas por este método son:

- La ejecución de un pre-sostenimiento previo a la excavación.
- Al ser un método parcialmente mecanizado está menos sujeto a los posibles errores humanos y se mejoran las condiciones de seguridad del personal en el frente de excavación.
- Es un método aceptable en terrenos cohesivos. Al ser terrenos autoestables, la ejecución es muy sencilla.

En cuanto a sus inconvenientes:

- De difícil ejecución en terrenos que no sean autoestables, principalmente en arenas con pocos finos, incrementándose la inestabilidad con la presencia de agua.
- En terrenos de escasa o nula cohesión, las sobre-excavaciones pueden ser importantes.
- Por lo general, se trabaja en un único frente, lo que hace al sistema más sensible al cumplimiento de plazos en caso de aparición de algún problema.

9. EL PRECORTE MECÁNICO

Este método se ha utilizado a sección completa, en un total de 540 m de túnel. Se realiza en las siguientes fases:

- Formación del sostenimiento.
- Excavación de la sección interior.
- Formación de muretes laterales y contrabóveda.
- Revestimiento definitivo.

9.1. FORMACIÓN DEL SOSTENIMIENTO

Para la ejecución de este sistema es necesario disponer del equipo de precorte del terreno, consistente básicamente en un

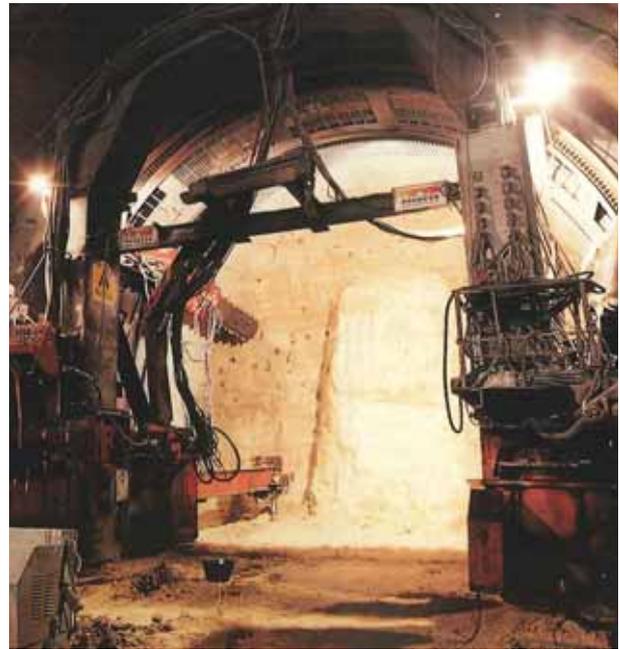


FIGURA 29. Equipo de precorte mecánico.

gran bastidor muy robusto que tiene la forma de la sección del túnel a excavar, que está dotado de un equipo de traslación longitudinal autónomo mediante gatos hidráulicos (Figura 29). Sobre el bastidor se desplaza un equipo de corte de cadena, que produce en el terreno una ranura perimetral en la sección a excavar de 18 a 25 cm de espesor. La longitud del precorte está condicionada por la dimensión del equipo de corte y suele ser de 3,5 m.

La ranura perimetral de 3 metros se hace por bataches sucesivos a un lado y otro de la sección, rellenándose inmediatamente con hormigón proyectado de alta resistencia inicial hasta completar el perímetro de la sección.

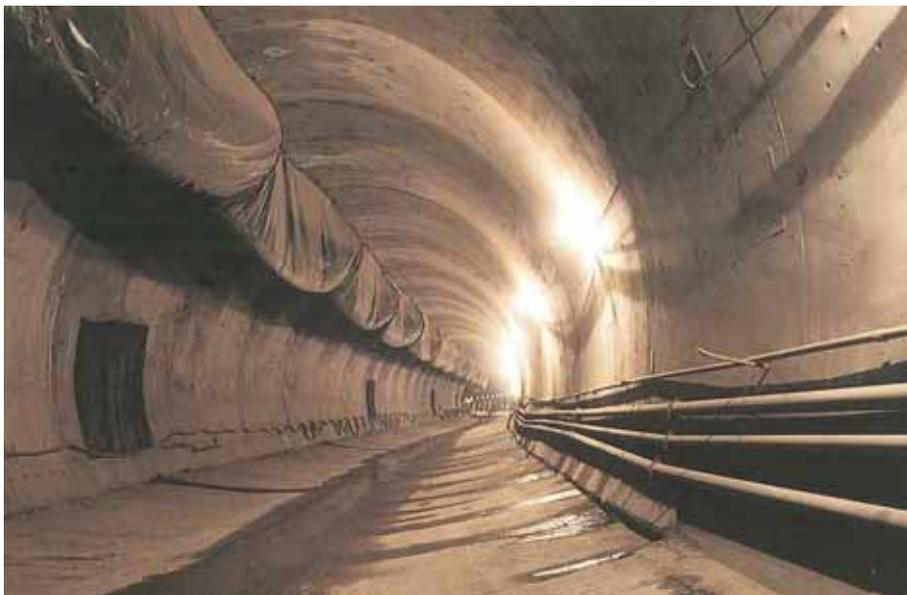


FIGURA 30. Sección definitiva de túnel ejecutado mediante precorte mecánico.

9.2. EXCAVACIÓN DE LA SECCIÓN INTERIOR

Una vez completada la sección del sostenimiento se excavan las tierras, dejando un machón central para estabilizar el frente, pudiendo disponer en alguna ocasión de anclajes de fibra de vidrio para mejorar dicha estabilidad. Terminada la fase de excavación se ejecuta un nuevo anillo concéntrico con el anterior. Los avances son de 3 a 3,5 m con un solape de 0,50 a 1,00 m entre anillos, resultando un avance neto de 2,75 m.

Normalmente se refuerzan los anillos con una o varias cerchas metálicas y se debe acodalar la base con vigas metálicas o riostras de hormigón (para evitar el cierre de la sección) que quedan embebidas en la contrabóveda definitiva.

9.3. FORMACIÓN DE MURETES LATERALES Y CONTRABÓVEDA

A la menor distancia posible del frente, compatible con las operaciones de sostenimiento y excavación (aproximadamente unos cuarenta metros), se ejecutan los muretes laterales que empotran las bases de los anillos, sobre los que discurren luego el carro del encofrado y se excava y hormigona la contrabóveda que cierra la sección, en tramos de cinco metros de longitud.

9.4. REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Finalmente mediante un encofrado convencional con la forma de sección definitiva del túnel se hormigona el revestimiento por tramos de unos cinco metros. En el caso de ser necesario se dispone una membrana impermeable entre el sostenimiento y revestimiento.

La separación entre las fases se puede acortar en caso de que sea necesario por problemas derivados de la estabilidad del terreno. Todo el proceso requiere una medición de la deformación del sostenimiento para adoptar medidas correctoras si fueran necesarias.

Las ventajas aportadas por este método son:

- La ejecución de un presostenimiento, previo a la excavación, que tiene una gran influencia en la reducción de asentamientos.
- Al ser un método mecanizado está menos sujeto a los posibles errores humanos y se mejoran las condiciones de seguridad del personal en el frente de excavación.
- Es un método indicado en terrenos cohesivos y en rocas blandas, no abrasivas. Al ser terrenos autoestables, la ejecución es muy sencilla.
- El acabado interior del sostenimiento es muy regular y, por tanto, los excesos de hormigón del revestimiento definitivo son limitados.
- Elimina las inyecciones de contacto y de consolidación en el trasdós.

Frente a las anteriores ventajas, se presentan los inconvenientes:

- De difícil ejecución en terrenos que no sean autoestables, principalmente en arenas con pocos finos, incrementándose la inestabilidad con la presencia de agua. Esta inestabilidad se presenta durante la excavación de la ranura anular de la prebóveda, lo que puede obligar a efectuar cortes de una menor anchura y a reducir la profundidad de la ranura excavada.
- En terrenos de escasa o nula cohesión, las sobreexcavaciones pueden ser importantes, superiores incluso al 50%. Los avances se pueden ver reducidos y los solapes entre las bóvedas sucesivas del hormigón proyectado pueden aumentar respecto a lo previsto
- Un problema en el frente paraliza la obra, sin posibilidad de atacar por otros frentes, debido al precio de la

maquinaria, que está diseñada para una sección tipo específica. Salvo túneles largos, en donde se ataca por varios frentes, no es posible tener varios equipos. Si el tramo a ejecutar es corto, la amortización de la maquinaria es un gran inconveniente.

- Se requiere un drenaje previo y efectivo de la zona e incluso su impermeabilización, para asegurar la estabilidad de todos y cada uno de los puntos del frente, antes de iniciarse la excavación.

Los problemas derivados de la inestabilidad en el frente de excavación son los mismos para cualquier método que se utilice, exceptuando la excavación con presión en el frente. Sin embargo, cuanto mayor sea la sección excavada, los problemas de inestabilidad pueden ser mayores y afectar a una zona más amplia del entorno. Por esta razón, el método del Precorte Mecánico, al llevar la excavación a plena sección, es potencialmente más peligroso.

10. TUNELADORAS DE FRENTE ABIERTO

Históricamente, es la primera tipología de escudos en aparecer. En el Metro de Madrid han trabajado un total de 3, realizando 19,4 km de túnel. Un escudo abierto no es más que un robusto anillo de acero que protege el perímetro de la excavación y el montaje del revestimiento, en el que se apoya mediante gatos para seguir avanzando.

Dicho anillo tiene 3 sectores diferenciados: el sector delantero o sector de corte, el intermedio o sector de empuje, y el trasero o sector de colocación del revestimiento.

El frente de la máquina puede presentar diversas soluciones, en función del sistema de excavación a emplear:

- Excavación manual mediante martillos neumáticos.
- Excavación mecanizada mediante brazo excavador o brazo rozador. En este caso, puede contarse con un sos-

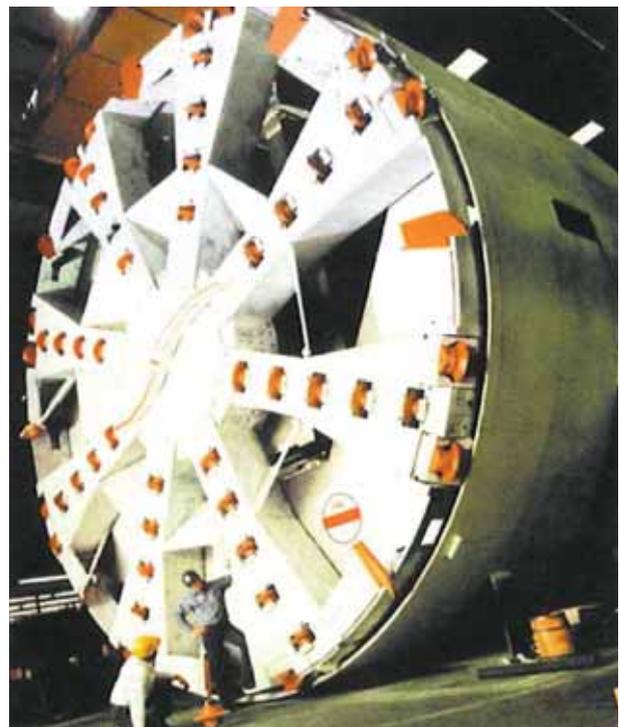


FIGURA 31. Tuneladora de frente abierto



FIGURA 32. Escudo abierto utilizado en el Metro de Madrid.

tenimiento parcial del frente, en forma de paneles que se aproximan al frente mediante gatos, según va excavando el brazo.

- Excavación mediante rueda giratoria mecanizada. El frente está totalmente sostenido por la rueda, aunque sin presurización alguna. Las aperturas para la entrada de material presentan un sistema hidráulico que las permite cerrar parcialmente, para controlar la entrada de material, o totalmente en caso de inestabilidad.

La excavación con este tipo de escudos se realiza a sección completa, por lo que presenta mayor riesgo cuanto menor protección del frente exista. En cualquier caso, al no tener presurizado el frente, el riesgo de entrada repentina de material (por ejemplo, la presencia de bolsas de agua con presión en paquetes de arenas sin cohesión, tan habitual en Madrid) siempre está presente.

Entre las principales ventajas de este sistema constructivo se encuentran:

- Mejores rendimientos, sobre todo en tramos largos, al poder simultanear las tareas de excavación y montaje de revestimiento. Como valor promedio, se puede considerar 200-250 m/mes.
- Mayor seguridad de los trabajadores al encontrarse éstos en el interior del escudo.
- Menor dependencia de la mano de obra especializada debido al alto grado de mecanización.

Y como desventajas principales:

- Alta inversión inicial.
- Necesidad de espacio para pozo de introducción, acopios e instalaciones auxiliares.
- Frente sin proteger, por lo que el riesgo de entrada de material y/o agua al interior del escudo existe.
- Un único frente de trabajo, lo que complicaría la consecución de las obras en caso de avería.

11. TUNELADORAS DE PRESIÓN DE TIERRAS (EPB)

Para el caso de que el túnel se tenga que construir en terrenos blandos e inestables, y sobre todo en suelos permeables sometidos a carga freática, el escudo de frente abierto presentaba los inconvenientes de todo sistema con gran frente abierto. Por ello, el siguiente paso de la técnica fue el de la utilización de escudos presurizados.

Los escudos presurizados garantizan la contención del terreno del frente de la excavación, impidiendo, además, la penetración del agua del subsuelo al interior del túnel.

La presurización se buscó inicialmente acudiendo al empleo de aire comprimido, que se aplicaba bien a un tramo completo del túnel excavado y revestido, al que se accedía mediante esclusas, bien a la zona inmediata al frente de excavación, que se concebía como una cámara hermética.

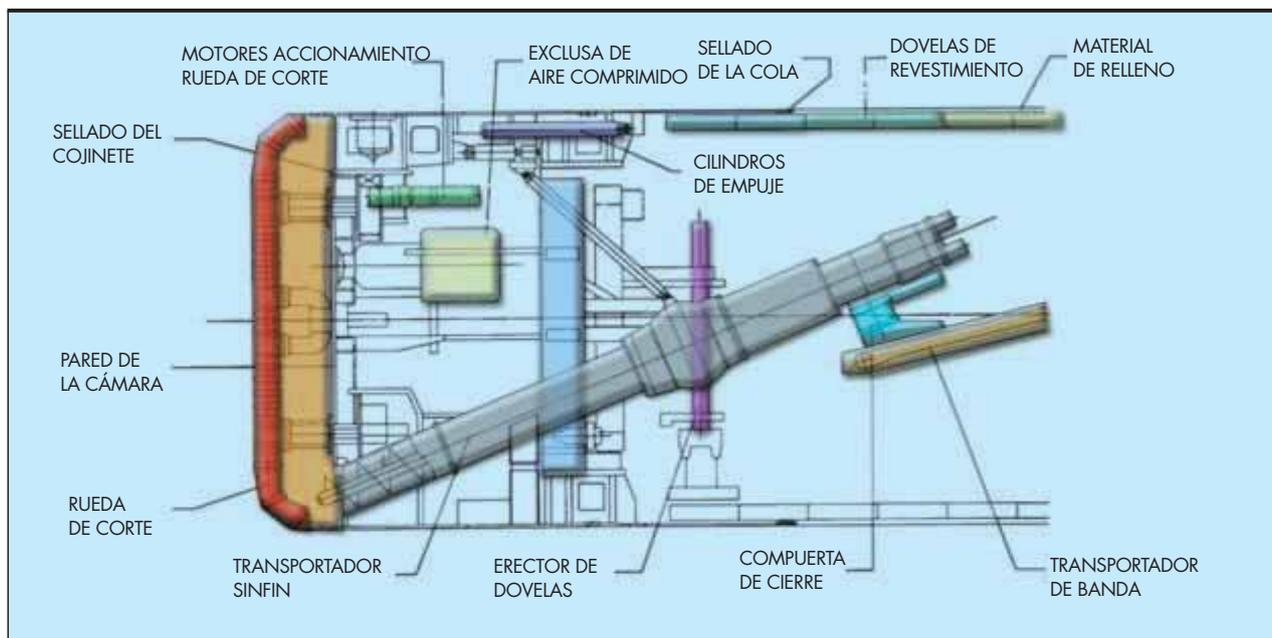


FIGURA 33. Escudo cerrado tipo EPB utilizado en el Metro de Madrid.



FIGURA 34. Escudo cerrado tipo EPB utilizado en el Metro de Madrid.

Posteriormente, se desarrollaron otros sistemas que persiguen los mismos objetivos de sostenimiento del frente y estanqueidad de la excavación, mediante la presurización de una cámara estanca situada tras la rueda de corte del escudo. El primero de los sistemas, denominado hidroescudo (Slurry Shield), presuriza el frente mediante la inyección de lodos bentoníticos a la cámara estanca. Estos lodos sirven, además, como vehículo para la extracción del material excavado, que se realiza por vía húmeda mediante el bombeo del fango resultante por tuberías hasta una instalación situada en superficie en donde se regenera el lodo, para posteriores usos, y se separa el inerte para su transporte al vertedero.

Otro de los sistemas de presurización del frente lo constituyen las tuneladoras que desarrollan la técnica de Equilibrio a Presión de Tierras, conocidas como tuneladoras EPB (Earth Pressure Balance), quizás las que mayor desarrollo y utilización están alcanzando en los últimos tiempos por su versatilidad. En este caso, la presurización de la cámara se consigue manteniendo en la cámara una mezcla de terreno extraído, aguas y espumas a cierta presión. Esta presión se regula mediante la extracción controlada de la mezcla a través de un tornillo sinfín.

La excavación se consigue mediante la rotación de la cabeza de corte, equipada con herramientas de corte (rastris-

llos, cinceles, picas, discos) adecuadas. El revestimiento se materializa en el interior del escudo mediante el posicionamiento de las distintas dovelas que conforman el anillo con un erector.

Aparte de las ya mencionadas para los escudos abiertos, las tuneladoras de frente cerrado presentan estas ventajas adicionales:

- Mayor seguridad y estabilidad del frente debido a la presurización.
- Mayor independencia de los terrenos excavados, al ser el sistema menos susceptible a los cambios de éste.
- Reducción de los problemas generados por el agua.
- Menor necesidad de tratamientos en el frente.
- Menores subsidencias en superficie por el control que se consigue mediante la presurización.

En el caso de Madrid, con este sistema se han ejecutado un total de 99,4 km, todos ellos a partir del año 1995, habiéndose convertido desde entonces en el sistema masivo de construcción de los túneles y elemento esencial en el éxito de las sucesivas ampliaciones de la red acometidas desde 1995. Un valor promedio de rendimiento para este método constructivo puede ser 500 m/mes.



FIGURA 35. Estación utilizada como pozo de ataque de 2 tuneladoras EPB.

12. CONCLUSIONES

A la luz de los datos expuestos anteriormente, se pueden extraer una serie de conclusiones en relación a los métodos de construcción empleados históricamente en el Metro de Madrid y la tendencia para su empleo en el futuro.

- La tuneladora EPB seguirá siendo el procedimiento constructivo esencial en la ejecución de túneles. La seguridad que supone su uso (tanto para trabajadores en el interior como frente a las subsidencias exteriores) y el rendimiento que se consigue (500 m/mes, frente a los 100 m/mes de los métodos a cielo abierto, o 50 m/mes del método tradicional) la hacen incomparable ante cualquier otro método.

- Además, alguno de los inconvenientes iniciales se pueden considerar atenuados: por un lado, ya hay varias tuneladoras EPB que han trabajado en Madrid, por lo que en caso de poder disponer de ellas las inversiones iniciales son notablemente menores (ya no hay que comprar sino reparar). De esta forma, podrían acometer tramos de menor longitud sin dispararse los costes.
- Por los motivos expuestos anteriormente (seguridad, rendimientos, costes), el empleo de tuneladoras de frente abierto no tiene justificación alguna. Siempre es preferible emplear tuneladoras de frente cerrado.
- Puede haber diversos motivos por los que el empleo de una tuneladora EPB no sea viable: tramos cortos de tú-



FIGURA 36. Tuneladora EPB en arrastre por estación.

nel, imposibilidad de ubicar un pozo de ataque con todas las instalaciones auxiliares y acopios, etc. En ese caso, habría que recurrir a procedimientos de ejecución a cielo abierto y, si no fuera posible, al empleo del método tradicional de Madrid. Fuera de la EPB, estos métodos son los que se consideran más seguros y fiables.

- De emplear estos métodos, y teniendo en cuenta sus rendimientos, es fundamental planificar el número de frentes necesarios para poder finalizar las obras en plazo. A este respecto hay que tener muy presente la escasez actual de equipos cualificados en el método tradicional, por lo que puede ser necesario combinar ambos sistemas.
- En cualquier caso, el método tradicional de Madrid se seguirá utilizando para cañones, galerías de conexión, tunelillos de conexión entre líneas o a cocheras, fondos de saco, etc.

- Los métodos constructivos de gran frente abierto (NATM, precorte, escudo abierto) no justifican su empleo debido al riesgo que supone su ejecución en suelos y en entorno urbano.
- Respecto a las estaciones, la tendencia es seguir empleando el cut and cover como método constructivo casi exclusivo, frente a métodos subterráneos: los riesgos geotécnicos son notablemente menores, el control de los costes y los plazos están por tanto más controlados, y además el diseño que se consigue se adapta mejor a los requisitos funcionales que actualmente se manejan en Metro de Madrid.
- El método alemán para la construcción de estaciones subterráneas en caverna sólo se justifica cuando por razones de profundidad o afecciones en superficie sea inviable la ejecución mediante pantallas. No obstante, es un método con mayores riesgos, más lento y más caro.



FIGURA 37. Montaje de tuneladora EPB con back-up.

13. BIBLIOGRAFÍA

ARNAIZ, M. (1993): "Sistemas constructivos en obras en ejecución para la ampliación del Metro de Madrid. Período 1990-1993. Jornadas Técnicas sobre la Ampliación del Metro de Madrid. Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid.

CABEZAS, J.V., GARRIDO, A. (1980): "Ejecución del túnel del Metro de Madrid en el tramo Sainz de Baranda-Pavones". Revista de Obras Públicas nº 3.181. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

MADRID, Ayuntamiento de (1986). "Geología, Geomorfología, Hidrogeología y Geotecnia de Madrid".

MELIS, M. (1996): "Reflexiones sobre la construcción de los túneles del Metro de Madrid". Revista de Obras Públicas nº 3.359. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

MENDAÑA, F., RUIZ MERINO, J. (1997): "Las tuneladoras modernas". Revista de Obras Públicas nº 3.369. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

MOYA, A. (2009): "Metro de Madrid 1919-2009. Noventa años de historia". Metro de Madrid.

OTEO, C., RODRÍGUEZ ORTIZ, JM y MENDAÑA, F. (2003): "Sobre los sistemas de construcción y parámetros geotécnicos de diseño en la ampliación del Metro de Madrid". Revista de Obras Públicas nº 3.429. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TRABADA, J. (1993): "Reflexiones y experiencias sobre las obras de ampliación del Metro". Jornadas Técnicas sobre la Ampliación del Metro de Madrid. Consejería de Transportes de la Comunidad de Madrid.

TRABADA, J. (1997): "Excavación en terrenos blandos". Capítulo 6 del libro: "Manual de túneles y obras subterráneas". Editor Calor López Jimeno.

TRABADA, J. (1996): "Comparación de resultados Cut and Cover, Método Belga, Precorte y perspectivas de Nuevas Tendencias: Experiencias en el Metro de Madrid". Curso sobre Excavaciones Urbanas. Colegio de Ing. de Caminos, Canales y Puertos.

VVAA. (2000). "El Metro de Madrid: Un nuevo reto". Revista de Obras Públicas, nº 3.405, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

PRIMERA ASAMBLEA GENERAL DE LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DE GEOTERMIA -GEOPLAT-



GEOPLAT celebra su casi primer año de existencia con la presentación del documento Visión a 2030 de la Plataforma, primer hito alcanzado satisfactoriamente para congratulación del sector geotérmico español.

Madrid, miércoles 14 de abril de 2009.- A las 10h en CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) comenzaba la primera Asamblea de la Plataforma Tecnológica Española de Geotermia -GEOPLAT-, que se constituyó en el mismo Consejo hace menos de un año, el 11 de mayo de 2009. GEOPLAT, como herramienta tecnológica del Ministerio de Ciencia e Innovación -MICINN- durante este tiempo se ha consolidado como un grupo de coordinación científico-técnica sectorial compuesto por los agentes del sector de la geotermia en España, que han trabajado codo con codo en la elaboración del documento Visión a 2030.

Los contenidos del documento Visión a 2030 se han estructurado en tres grandes bloques:

- Análisis del sector de la geotermia en España y en Europa, sus antecedentes y su situación actual en cuanto a tecnologías geotérmicas y marco regulatorio entre otros aspectos importantes. También se caracteriza el potencial geotérmico en España.
- Retos y oportunidades para el futuro del sector respecto a su mercado y posicionamiento, sostenibilidad, adecuación de su marco legal, fomento de su desarrollo tecnológico y formación de profesionales cualificados.

- Escenarios de visión para el sector geotérmico español. Ejercicio de prospectiva en el que se establecen dos escenarios a 2020 y a 2030 para cada una de las tecnologías geotérmicas:

	2020	2030
Geotermia PROFUNDA	1.000 MW _{eléctricos} + 300 MW _{térmicos}	3.000 MW _{eléctricos} + 1.000 MW _{térmicos}
Geotermia SOMERA	1.000 MW _{térmicos}	3.000 MW _{térmicos}

El sector ha conseguido en tiempo récord poner en funcionamiento una Plataforma Tecnológica en la que interactúan más de 125 entidades distribuidas en siete grupos de trabajo, y alcanzar con éxito el primer hito de su andadura: la finalización del documento Visión a 2030 de GEOPLAT.

En adelante, los miembros de GEOPLAT liderados por su Grupo Rector, están preparados para comenzar a trabajar en la consecución del siguiente hito: la elaboración de la Agenda Estratégica de Investigación de la Plataforma. En la cual deben diseñarse un conjunto de acciones con objetivos e hitos concretos establecidos a corto, medio y largo plazo; cuya implementación debe permitir la evolución tecnológica en el sector de la geotermia en España y por tanto contribuir al crecimiento y éxito del mismo.

PARA MÁS INFORMACIÓN:
SECRETARÍA TÉCNICA
c/ Aguarón 23B, 1ºB. 28023 Madrid
902 106 256 / secretaria@geoplat.org
www.geoplat.org