

Construcción en 39 meses de 8 km de túnel por el Método Clásico de Madrid

Manuel J. Melis Maynar

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

Dir.Gral. Infraestructuras, Consejería de Obras Públicas, Comunidad de Madrid. Presidente, Metro de Madrid

Jesús M. Trabada Guijarro

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Ingeniero Director de las Obras, Dirección General de Infraestructuras, Consejería de Obras Públicas, Comunidad de Madrid

RESUMEN

La prohibición del Nuevo Método Austríaco (NATM), y los métodos de frente abierto en general, en los túneles de la reciente ampliación del Metro de Madrid ha sido uno de los motivos de su éxito. Cuando no se han utilizado las tuneladoras de frente cerrado, se ha utilizado el Método Clásico de Madrid que se describe en el presente artículo.

ABSTRACT

Absolute prohibition of the use of NATM or other open-face tunnelling methods in Madrid Metro Extension has been one of the reasons of the success. When EPB tunnelling machines were not used, the Madrid Classical method was the tunnelling method used. This paper describes in detail this proven, safe and old method.

1. TÚNELES DE HASTA 10.6 M DE LUZ. EL MÉTODO CLÁSICO DE MADRID

Este método es el método de construcción por excelencia de Metro de Madrid. En Tabla 1 se relacionan los túneles construidos por este método desde la primera obra, en 1917, hasta finales de 1999. Del total de 173,0 kilómetros de túnel construidos, 83,4 lo han sido por éste método, que fué el primero en utilizarse en la primera línea de Metro de Madrid.

La sección tipo de un túnel de Metro de Madrid construido por este método se indica en la **figura 1**, y sus mediciones en

la **figura 2**. El Método Clásico de Madrid (antiguamente llamado Método Belga) consiste en, en lugar de excavar de una vez toda la sección del túnel, 70.39 m², que daría lugar a graves inestabilidades del frente del túnel y a colapsos del mismo, ir abriendo una pequeña galería en clave del túnel, galería que se va ensanchando poco a poco hasta permitir hormigonar toda la bóveda, como se indica en la **figura 3**. Con pequeñas secciones es posible solucionar cualquier problema de estabilidad que aparezca en el frente, mientras que con gran frente abierto no lo sería. Este método se suele aplicar a los túneles de línea, con un ancho máximo de unos 8 metros libres más 3 de am-

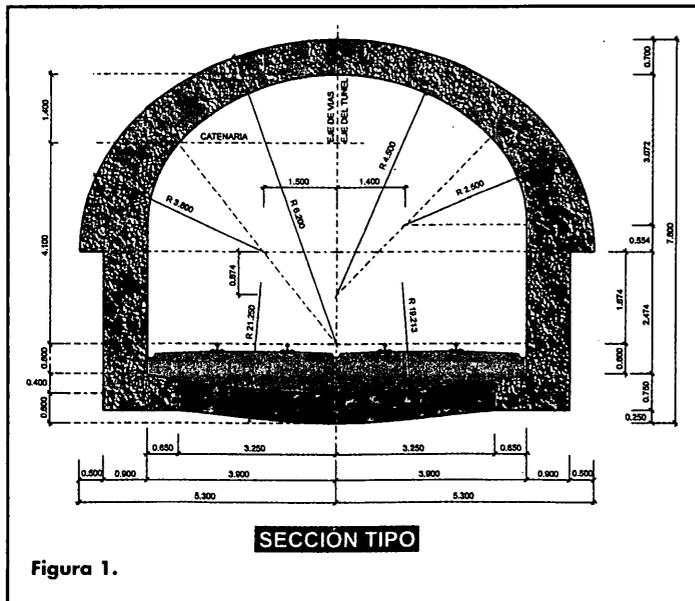


Figura 1.

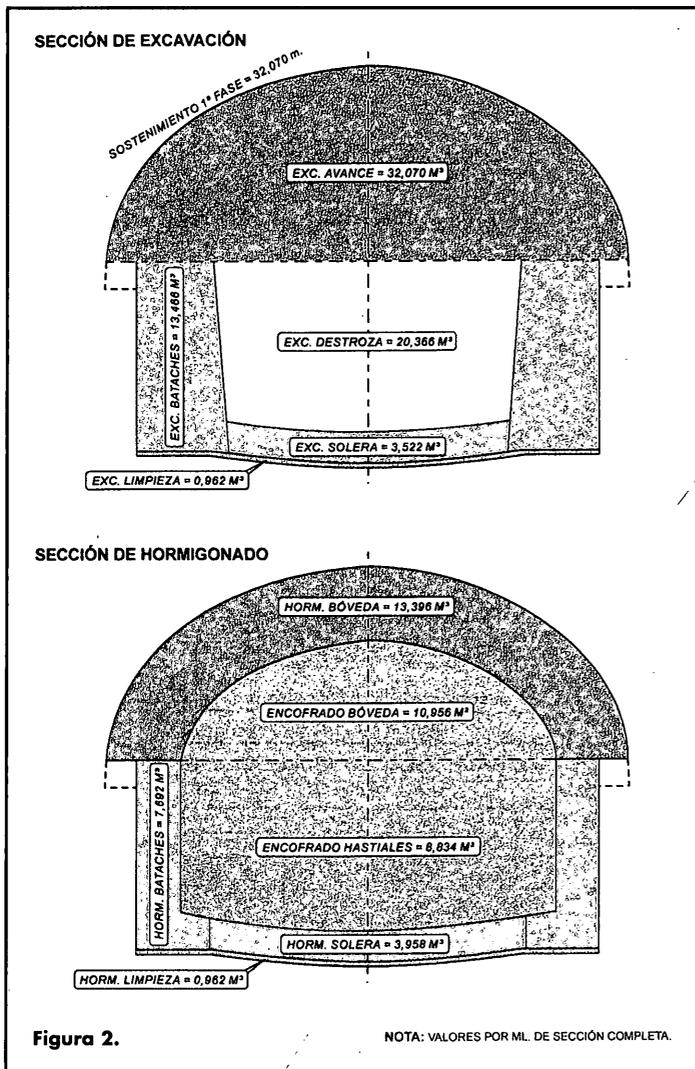


Figura 2.

NOTA: VALORES POR ML. DE SECCIÓN COMPLETA.

Los hastiales, unos 11 metros. Mayores luces de túnel llevarían a excavaciones muy grandes en el avance, y mucha superficie de frente abierto, como por ejemplo en los telescopios de unión de líneas o en las estaciones. En estos casos se utiliza el denominado método alemán que se describe en otro artículo de los mismos autores.

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. La estabilidad del frente ya fue estudiada por Terzaghi en los túneles del Metro de Chicago en 1942, y su cuantificación más clásica y conocida es la dada por Broms y Bennermark en 1967 (ASCE, Ene 67). Los resultados de Broms y su conocida fórmula empírica para la estabilidad del frente de un túnel en terrenos cohesivos se obtuvieron a partir de ensayos de laboratorio que comenzaron tras un deslizamiento ocurrido en 1964 en Estocolmo con pérdida de vidas humanas. De acuerdo con estos análisis, la estabilidad del frente del túnel viene definida por N, el número de estabilidad, o factor de estabilidad, definido por el cociente entre la diferencia de presiones en el frente dentro y fuera del túnel y la resistencia a esfuerzo cortante del terreno, más específicamente, la resistencia al corte sin drenaje, $(p_v - p_a) / c_u$. (Figura 4). En general, y por facilidad, para la presión p_v fuera del túnel, es decir, en el terreno, suele tomarse la presión vertical total, siguiendo la expresión de Bróms, y en este caso el frente del túnel será estable si el factor es igual o menor que 6. Vemos que puede mejorarse la estabilidad aumentando p_a , es decir, poniendo aire comprimido por ejemplo en el túnel, método que se ha utilizado asiduamente hasta hace pocos años.

Esta expresión de Broms y Bennermark, y la multitud de expresiones derivadas de ella a través de distintos tipos de

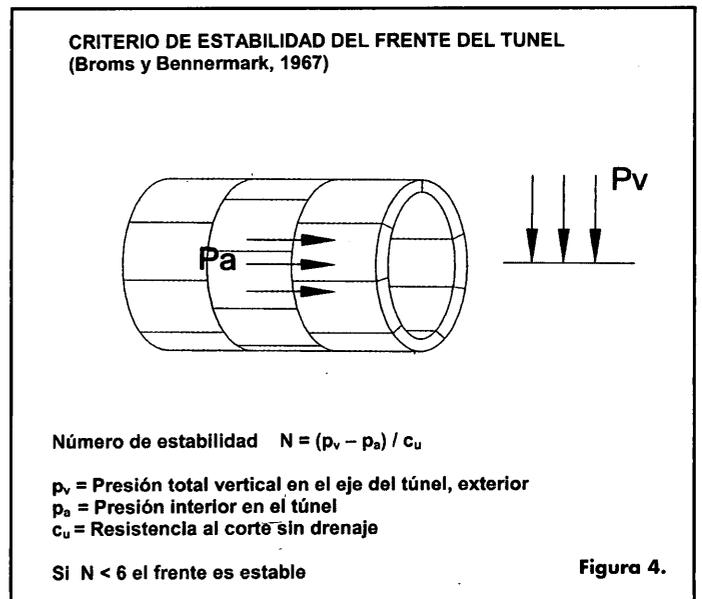
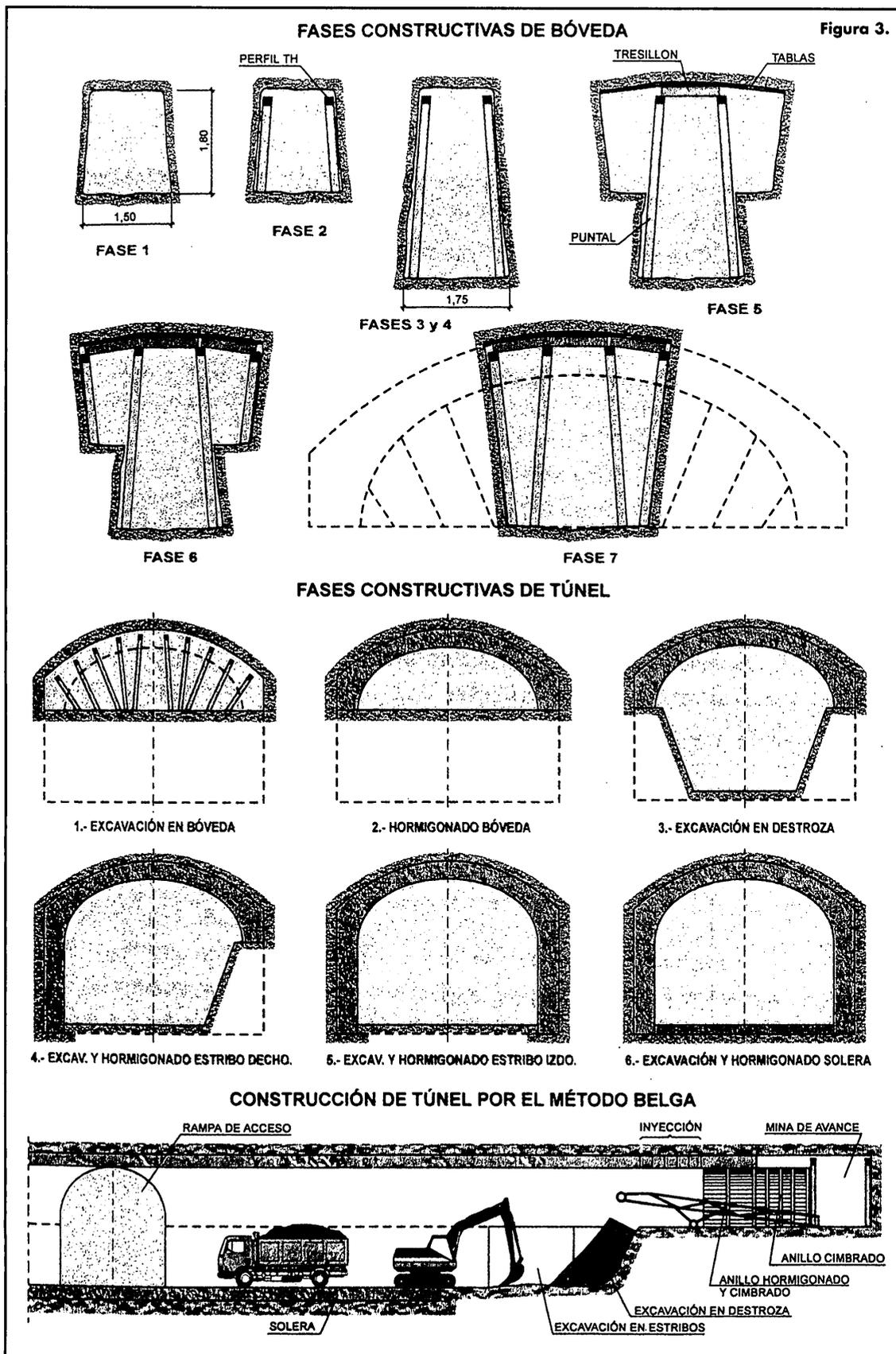


Figura 4.



análisis, es la única forma que hasta hoy nos da la Mecánica del Suelo para el análisis de la estabilidad del frente del túnel. A esta expresión de Broms han seguido en los 30 años transcurridos otras expresiones, basadas en distintos mecanismos de colapso, expresiones que pueden verse en la Ref. 1, pero todas ellas llevan a basar la estabilidad del frente en la resistencia al corte del terreno u otro parámetro resistente del mismo. No se tiene en cuenta la estratigrafía, ni la posible aparición de capas arenosas o bolsas de agua colgada, ni en definitiva la variabilidad del suelo. En muy contadas ocasiones puede disponerse de los resultados de los ensayos necesarios para estudiar el avance día a día del túnel, sería prohibitivo en tiempo y coste. De forma que en realidad el trabajar con un frente abierto en túnel es exponerse, consciente o inconscientemente, a una catástrofe por parte del técnico responsable. Si es preciso un frente abierto, éste debe ser de las mínimas dimensiones posibles, de forma que pueda resolverse inmediatamente cualquier problema que ocurra en el frente, entibando rápidamente, taponando con sacos, etc.

Como puede verse en la Tabla 1, el método clásico ha sido el méto-

TABLA 1. TÚNELES CONSTRUIDOS POR EL MÉTODO BELGA O CLÁSICO DE MADRID

LÍNEA	TRAMO	PUESTA EN SERVICIO	EMPRESA	LONGITUD TÚNEL	CLIENTE
1	Sol - Cuatro	17-oct-19	HORMAECHE	1.500	METRO
1	Sol - Atocha	26-dic-21	METRO	1.837	METRO
2	Sol - Ventas	16-jun-24	METRO	3.754	METRO
2	Quevedo-Sol	21-oct-25	METRO	2.237	METRO
	Ramal Opera - Norte	26-dic-25		1.015	METRO
1	Tetuan - Cuatro Caminos	6-mar-29	SAN ROMAN	522	METRO
2	Cuatro Caminos - Quevedo	10-sep-29	SAN ROMAN	1.024	METRO
4	Goya - Diego de Leon	17-sep-32	AGROMAN	1.129	METRO
3	Sol - Embajadores	8-ago-36	AGROMAN	1.406	METRO
3	Arguelles - Sol	16-jul-41	AGROMAN	961	METRO
4	Arguelles - Goya	24-mar-44	AGROMAN	3.371	METRO
3	Embajadores - Delicias	26-mar-49	AGROMAN	1.311	METRO
3	Delicias - Legazpi	2-mar-51	AGROMAN	744	METRO
1	Plaza Castilla - Tetuan	6-feb-61	CYT-MZOV	1.077	ESTADO
5	Carabanchel - Aluche	6-feb-61	DRAGADOS	500	ESTADO
10	Plaza de España - Lago	6-feb-61	VARIOS	2.442	ESTADO
1	Vallecas - Portazgo	3-jul-62	CYT-MZOV	1.048	ESTADO
3	Moncloa - Arguelles	22-jul-63	AGROMAN	325	ESTADO
5	Ventas - Ciudad Lineal	28-may-64	CYT-MZOV	2.473	ESTADO
5	Callao - Carabanchel	6-jun-68	DRAGADOS	6.828	ESTADO
5	Ventas - Callao	2-mar-70	CYT-MZOV	4.455	ESTADO
4	Diego de Leon - Alfonso XIII	27-mar-73	DRAGADOS	2.151	ESTADO
7	Las Musas - Pueblo Nuevo	22-jul-74	DRAGADOS	4.030	ESTADO
7	Pueblo Nuevo - Avda. America	18-mar-75	CYT-MZOV	3.343	ESTADO
4	Alfonso XIII - Esperanza	5-ene-79	DRAGADOS	2.222	ESTADO
6	Manuel Becerra - Pacifico	11-oct-79	CYT-MZOV	2.242	ESTADO
5	Ciudad Lineal - Canillejas	18-ene-80	CORSAN	2.653	ESTADO
6	Pacifico - Oporto	6-may-80	FOC-SICOP	860	ESTADO
10	Alonso Mtnez - Pl. de España	17-dic-81	CUBIERTAS	1.243	ESTADO
Antigua 8	Fuencarral - Plaza Castilla	10-jun-82	HUARTE	2.906	ESTADO
6	Oporto - Laguna	1-jun-83	FOMENTO	792	ESTADO
9	Plaza de Castilla - Herrera Oria	3-jun-83	AGROMAN	573	ESTADO
9	Sainz Baranda - Avda. America	24-feb-86	ENTRECANALES	3.221	ESTADO
Antigua 8	N. Ministerios - Avda. America	23-dic-86	CMZ-DRAGADOS	1.664	ESTADO
6	Ciudad Univ.- Cuatro Caminos	13-ene-87	DRAGADOS	1.776	ESTADO
1	Portazgo - Miguel Hernandez	7-abr-94	CONSTR.Y CONT.	1.855	COMUNIDAD
6	Laguna - Lucero	5-may-95	CUBIERTAS	550	ESTADO
6	Lucero - Puerta del Angel	5-may-95	CUBIERTAS	1.660	ESTADO
6	Príncipe Pío - Moncloa	5-may-95	AUXINI	1.361	COMUNIDAD
10	Príncipe Pío - Plaza de España	26-dic-96	NECSO	1.100	COMUNIDAD
10	Al. Martínez - Nuev.Ministerios	22-ene-98	FOMENTO	1.620	COMUNIDAD
7	Avda. America - Gr. Marañón	13-feb-98	NECSO	1.250	COMUNIDAD
7	Gregorio Marañón - Canal	16-oct-98	NECSO	1.020	COMUNIDAD
11	Plaza Elíptica - Pan Bendito	16-nov-98	DRAGADOS	300	COMUNIDAD
7	Canal - Guzmán el Bueno	12-feb-99	NECSO-FERROVIAL	200	COMUNIDAD
1	Miguel Hernandez - Congosto	2-mar-99	AGROMAN-AUXINI	2.830	COMUNIDAD
TOTAL METROS TÚNEL DE LÍNEA POR MÉTODO CLÁSICO				83.381	
Cañones de acceso y conexión				15.000	
TOTAL METROS TÚNEL POR MÉTODO CLÁSICO				100.000	

(Además de los 83.4 kilómetros de túnel de línea, todos los cañones de acceso a estaciones, los cangrejos de interconexión y los accesos a los pozos de emergencia y de ventilación se han construido por este método. Si bien no se dispone de una medición exacta de su longitud, puede estimarse en aproximadamente 15.000 metros lineales de túnel, si bien de menor sección que el túnel de línea. Puede decirse por tanto que la longitud de túneles construidos por el Método Clásico en 1999 es del orden de los 100 km.)

do más utilizado para la construcción de los túneles del Metro de Madrid. De los túneles construidos de esta forma sólo ha habido en 80 años un accidente en línea 7 el 16 de marzo de 1971, sin que haya habido tampoco hundimientos importantes que reseñar. Este método tiene por lo tanto la ventaja de estar muy comprobado en la práctica de la Ingeniería 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.

Desde el punto de vista geotécnico, el 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 como el Método Austríaco o el Precorte Mecánico puede ser catastrófico, se maneja bien con las pequeñas secciones de frente abiertas con el método clásico, ya que el entibado y la protección del frente de la galería de avance o de los sucesivos ensanches puede ser sumamente rápido. Incluso con aportaciones de agua el método clásico funciona bien, como ha podido verse en la zona del Alto del Arrenal en Línea 1 o en el pase de la línea 10 bajo la Glorieta de Rubén Darío. En ambas zonas la aportación de agua era muy grande, y realmente podía decirse sin exageración que llovía dentro del túnel durante la excavación.

Sin embargo en opinión del autor de estas páginas aún quedan tres problemas sin resolver para el técnico con este método clásico de Madrid. El primero de ellos es la elección científica 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 mediados de 2000 y 70 años después del nacimiento de la Geotecnia como ciencia con la publicación del "Erdbaumechanik" 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 eucalipto o 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 inaugurada en Navidades de 1996 o del tramo Avda. de América - Gregorio Marañón en la Unión de Líneas 7 y 8, 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 tal vez 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 penetrómetro 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 penetrómetro portátil ni siquiera penetra, y el vane test no puede hincarse en el tosco, ni aún en el blando). Es necesario 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 confirme o rechace la opinión subjetiva del personal.

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 hastia-

les, 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 que se ha demolido al construir el tramo Príncipe Pío - Plaza de España en 1996. 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.

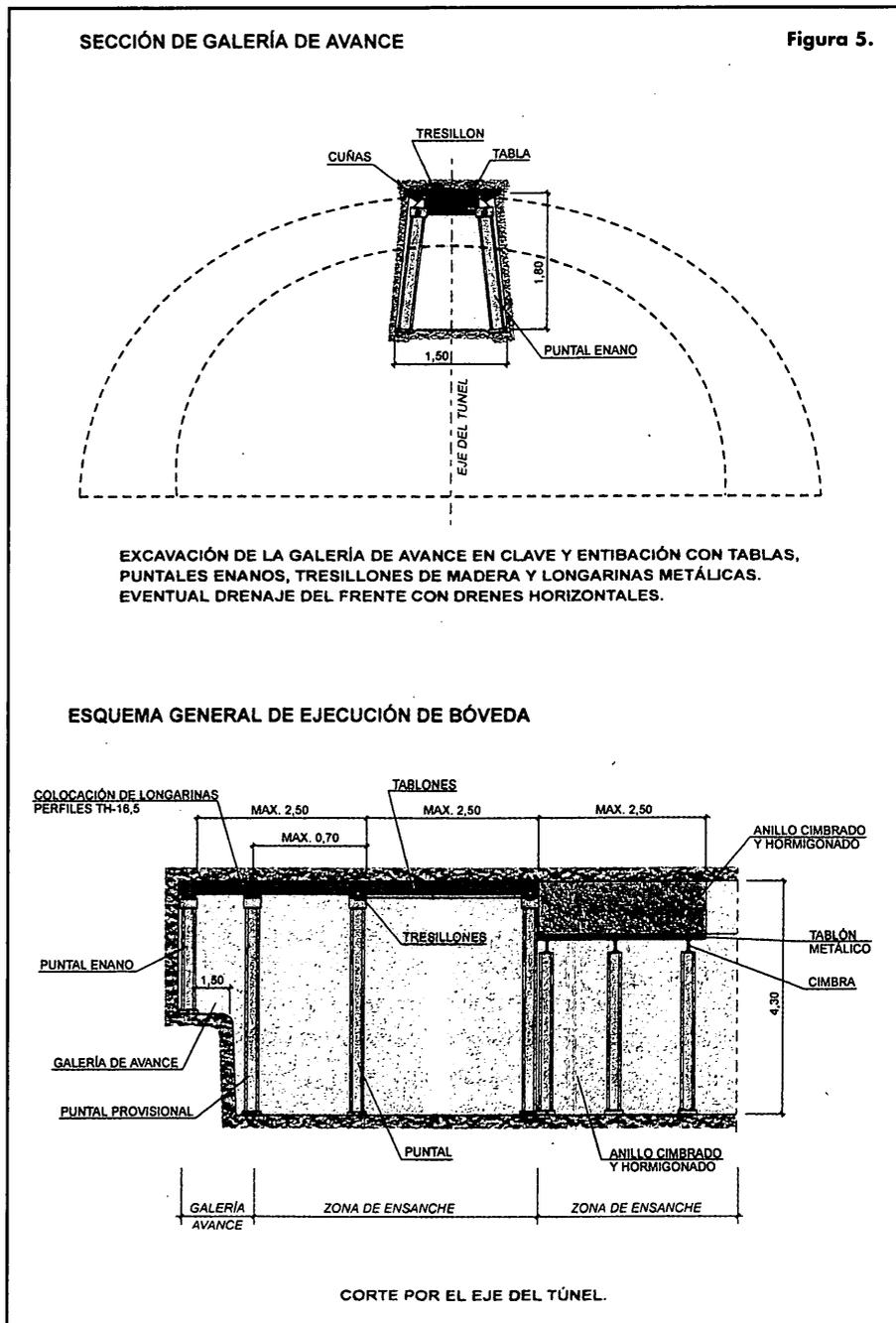
La construcción del túnel de línea por el método clásico tiene los inconvenientes siguientes:

- ▼ Está basada en la utilización intensiva de mano de obra especializada. Ello quiere decir que si hay que abrir muchos frentes de trabajo pueden producirse problemas graves de imposibilidad de encontrar suficiente personal.
- ▼ Pese a lo dicho es estos párrafos, no cabe duda de que los trabajos son más peligrosos que los correspondientes al trabajo con tuneladora. Deben por lo tanto extremarse las medidas de seguridad.
- ▼ Los trabajos deben estar dirigidos por personal muy experto, y esto quiere decir por personal que lleve muchos kilómetros de túnel construido por este método. Jamás deben encargarse estos trabajos a equipos sin experiencia.

2. EJECUCIÓN DEL MÉTODO CLÁSICO DE MADRID

Tal vez la mejor descripción del detalle de este método constructivo es la dada por los Ing. de Caminos D. J.M^a Cañamaque y Eduardo Santchordi en junio de 1980. Tras el desgraciado y aún reciente fallecimiento del primero de ellos, permítasenos, como homenaje a uno de los más destacados expertos en los túneles de Metro, reproducir parte del mismo, la que se refiere a la construcción.

La ejecución se realiza en cuatro etapas consecutivas por el siguiente orden (1) Bóveda, (2) Destroza, (3) Hastiales y (4),

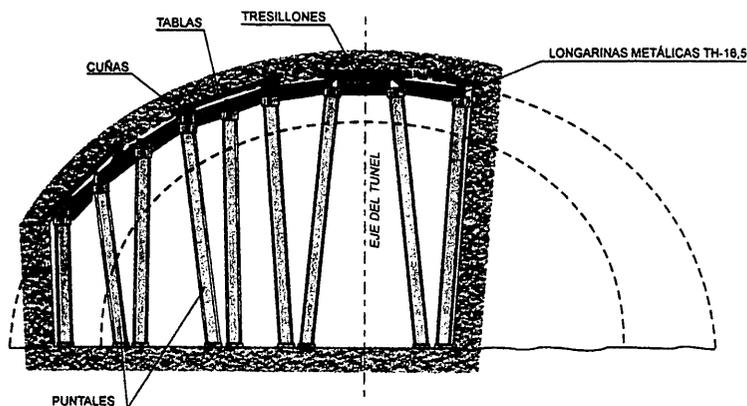


Solera, según se puede apreciar en el esquema adjunto. (Figura 3)

Bóveda

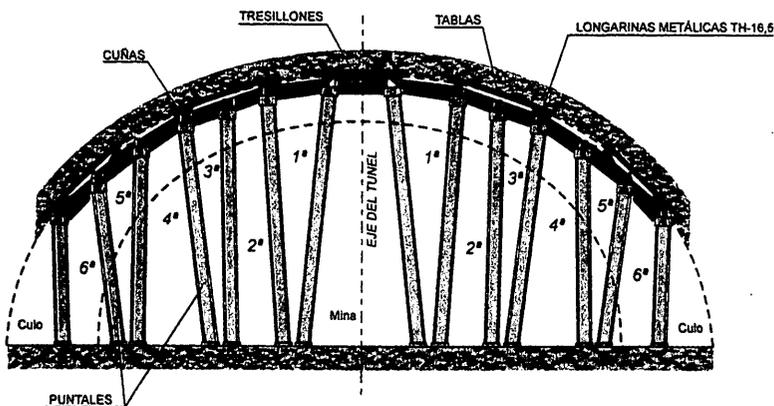
Esta es la etapa más importante y donde generalmente surgen la mayor parte de los problemas. La excavación se realiza con entibación de madera cuajada. Por norma general, el túnel se ejecuta en rebanadas o anillos de 2,5 m. de longitud, aunque ésta puede ser variable en función del tipo de terreno,

SECCIÓN DE ENSANCHE



ENSANCHE LATERAL DE LA GALERÍA DE AVANCE HASTA EXCAVAR LA SECCIÓN COMPLETA DE LA BÓVEDA, ENTIBANDO CON TABLAS, PUNTALES, TRESILLONES DE MADERA Y LONGARINAS METÁLICAS.

SECCIÓN DE ENSANCHE



FASES EN EL ENSANCHE LATERAL DE LA GALERÍA DE AVANCE.

Figura 6.

reduciéndose a 2 metros ó 1,50 metros si se considera conveniente.

En las figuras 5 y 6 puede seguirse el proceso en detalle. Se inicia la excavación con la mina de avance cuyo eje coincide con el del túnel. Para la entibación se utiliza tabla, fundamentalmente álamo negro por su mayor capacidad de deformación. Esta madera ha escaseado en distintas épocas, por lo que ha sido frecuente la utilización de eucalipto, menos fiable por su mayor fragilidad, lo que produce su rotura ante pequeñas deformaciones. Dentro del argot de la entibación, es muy

importante que la madera "cante", lo que avisa de que el terreno empuja, y que es necesario tomar precauciones especiales. Sus dimensiones son de 1,50 m. de largo por 0,15 de ancho y 0,025 m de espesor aproximadamente. Las tablas se van colocando a medida que avanza la excavación apoyadas en el propio terreno forrando la parte superior de la mina. Una vez concluida la excavación de ésta en toda su longitud se colocan las "longarinas" que son los perfiles metálicos (rollizos de madera de álamo negro inicialmente) que servirán de apoyo a las tablas. Entre las tablas y la longarina se coloca una tabla corrida haciendo de falso apoyo y separando estas con calas para dejar espacio suficiente a las tablas de los "pases" siguientes. El hueco por donde se mete esta tabla corrida se denomina "falso".

Las longarinas tienen unos 3 m. de longitud (0,25 de diámetro cuando eran de madera), apoyándose en pies derechos, de álamo negro, en sus extremos y en el centro. Entre las dos longitudes se ponen estampidores o "transillones" de madera.

Una vez finalizada la mina de avance, se comienza a abrir la excavación a ambos lados de ésta ejecutando lo que se denominan "pases". y denominándose estos como primeras, segundas, etc..según se van alejando de la mina de avance. La excavación de los pases se realiza de forma análoga, pasando las tablas de entibación a través del "falso" y acuñadas contra la longarina ya colocada. En el otro extremo las tablas apoyan en el terreno hasta que se finaliza la excavación del pase y se coloca la longarina siguiente con su falso, que permitirá pasar a su vez las tablas del segundo pase y así sucesivamente.

El túnel de doble vía para Metro se suele realizar con cuatro pases a cada lado y, si el terreno es excepcionalmente bueno, se reducen a tres, a costa de separar algo más las longarinas y en consecuencia hacer más largos los transillones. Con el fin de que los pies derechos no se claven en el terreno debido a la carga que les transmite, se suele colocar una o varias calas de tablón como apoyo.

Una vez finalizada la excavación de toda la bóveda, se procede a encofrar, generalmente mediante tres cerchas metálicas, divididas en dos o tres piezas según la luz, que sirven posteriormente de apoyo a las chapas de encofrado. Si partimos de un anillo anterior ya hormigonado; éste habrá dejado embebido parte del apoyo de las longarinas del siguiente, por lo que se podrán quitar al encofrar los pies derechos corres-

pondientes y los del otro extremo quedarán por delante del tape que se realice del encofrado, para lo que también se recuperan. Los apoyos intermedios se suelen relevar por otros más cortos que apoyan sobre la cercha intermedia del encofrado.

Una vez realizada esta operación se rellena el anillo de hormigón (figura 7). Como puede deducirse fácilmente, estas operaciones son totalmente artesanales, requiriendo del personal que las realiza gran habilidad, pericia y experiencia, pues en la mayor parte del proceso se corre el riesgo de desprendimientos imprevistos antes de apoyar las tablas sobre las longarinas.

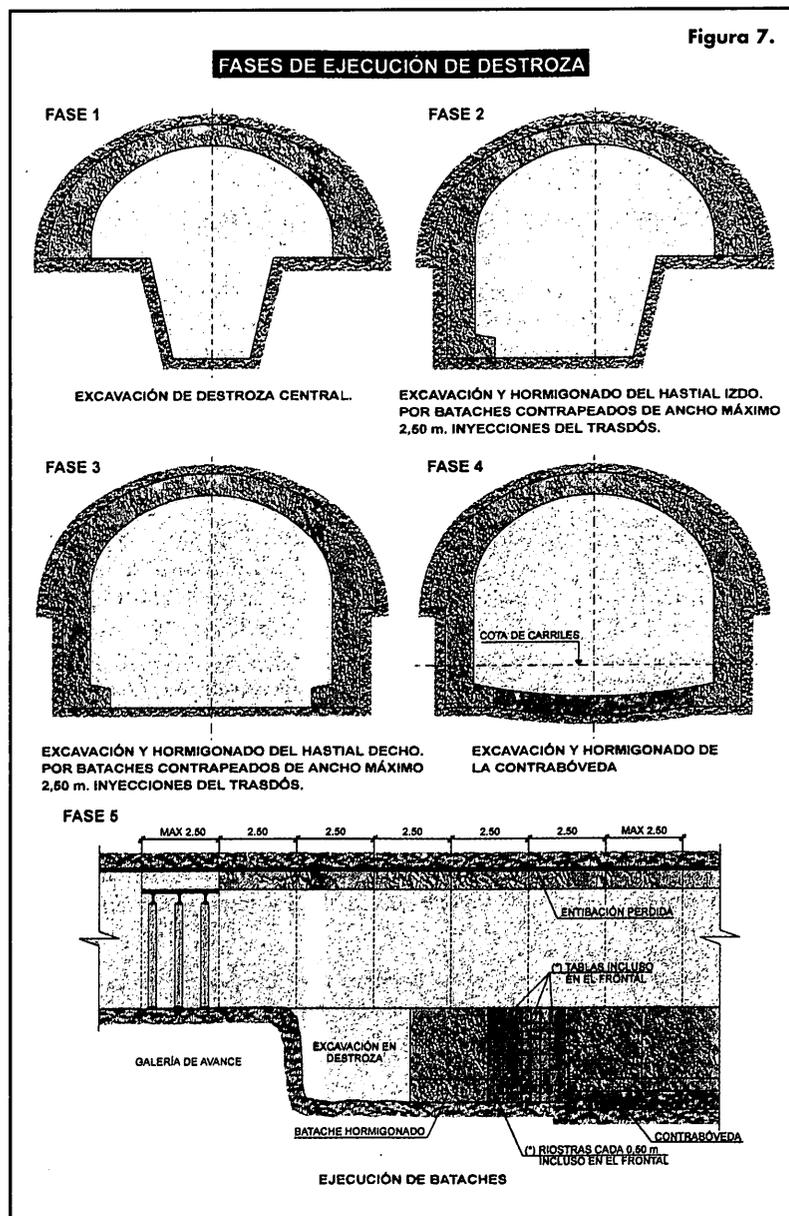
Antiguamente el terreno se excavaba con pico, por lo que se suele llamar "piquetas" a los especialistas que realizan esta función. Actualmente la excavación se hace con martillos neumáticos de poco peso y fácil manejabilidad, siendo ésta, junto con la cinta transportadora en sustitución de las carretillas, unas de las pocas variaciones introducidas desde 1963.

Las "longarinas" o elementos longitudinales de la excavación han sufrido cambios en su constitución o colocación en la misma excavación de acuerdo a tres etapas:

- ▼ La primera corresponde a la ejecución de bóvedas con fábrica de ladrillo. En este caso las longarinas eran rollizos de madera que se iban extrayendo conforme avanzaba la fábrica de ladrillo quedando la tabla recogida por aquélla.
- ▼ La ejecución de las bóvedas de hormigón trajo como consecuencia la imposibilidad de extraer elemento alguno de la entibación ya que ese conjunto quedaba por encima del encofrado y embebido en la bóveda por lo que para evitar la disminución de sección obligaba a llevar la citada entibación por encima del trasdós de la sección de bóveda con el consiguiente aumento de excavación y hormigón.
- ▼ En el año 1969 durante la ejecución del tramo de Línea VI Plaza de Roma-Pacífico se utilizaron las longarinas metálicas de perfil Omega cuya incorporación al hormigón permite mantener la sección de bóveda proyectada. Por otra parte la unión de cada anillo de bóveda con el siguiente y anterior a través de la longarina saliente favorece el trabajo conjunto del arco superior del túnel.

Destroza

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 no formen en el terreno, que sirve de apoyo, planos de rotura peligrosos que pudieran dar origen al asentamiento y rotura de



la misma. Esta operación se realiza con máquina excavadora y, además, en ella se retiran las tierras procedentes de la excavación de la bóveda que vierten en lo destroza a través de una o varias cintas transportadoras. Las máquinas empleadas normalmente son del tipo Volvo 12 MX de 76 HP, o komatsu PC-95 de 75 HP, y antiguamente se utilizaban Caterpillar 955 ó Poclain LC-80 con excavador frontal. La figura 8 es un recuerdo de cuando la excavación se extraía con mulas, tan sólo hace 33 años.

Hastiales

Finalizada la destroza, se ejecutan los hastiales o bataches. Su excavación se realiza con la misma máquina que la destro-

TABLA 2. AMPLIACIÓN DE METRO 1995-1999. TÚNELES CONSTRUIDOS POR EL MÉTODO CLÁSICO DE MADRID

LÍNEA	TRAMO	PUESTA EN SERVICIO	EMPRESA	LONGITUD TÚNEL	CLIENTE
10	Príncipe Pío - Plaza de España	26-dic-96	NEXO	1.100	COMUNIDAD
10	Al. Martínez - Nuev.Ministerios	22-ene-98	FOMENTO	1.620	COMUNIDAD
7	Avda. America - Gr. Marañón	13-feb-98	NEXO	1.250	COMUNIDAD
7	Gregorio Marañón - Canal	16-oct-98	NEXO	1.020	COMUNIDAD
11	Plaza Elíptica - Pan Bendito	16-nov-98	DRAGADOS	300	COMUNIDAD
7	Canal - Guzmán el Bueno	12-feb-99	NECSO-FERROVIAL	200	COMUNIDAD
1	Miguel Hernandez - Congosto	2-mar-99	AGROMAN-AUXINI	2.830	COMUNIDAD
TOTAL METROS TÚNEL DE LÍNEA POR MÉTODO CLÁSICO				8.320	

za 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 y, en segundo lugar, nunca se excavan dos bataches enfrentados al mismo tiempo por razones semejantes. Para encofrar se utilizan módulos metálicos.

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. El problema es que de una u otra forma hay que descalzar parte de la bóveda y si el terreno cede se produce el agrietamiento y rotura de la misma. Cuando se supone que esto puede llegar a ocurrir y la luz del túnel es grande se emplea el Sistema Alemán cuya única variante es precisamente ejecutar los hastiales antes que la bóveda para evitar los posibles asentamientos de ésta.

Solera

Se realiza la excavación correspondiente a máquina, hormigonando posteriormente con plantillas para conseguir la correcta forma de contrabóveda que indique la sección tipo del túnel. Se puede hacer en toda la luz, simultáneamente, y en módulos que varían entre 2,5 y 5 m. o bien por mitades. Cuando el terreno es arenoso y con abundancia de agua se suele producir un barrizal y las máquinas se atascan con frecuencia. En estos casos se

recurre a zanjas o pozas drenantes. En conclusión, el Método Belga es utilizable siempre que el terreno sea lo suficientemente bueno como para soportar el descalce de parte de la bóveda para ejecutar los bataches.

Esto es generalmente posible en el terreno de Madrid con luces inferiores a los 9 m. siendo principalmente el factor excluyente en su determinación la abundancia de agua en terrenos arenosos.

Por otro lado las escasas instalaciones que requiere para su puesta en funcionamiento hacían de él en los años 60 y 70 un sistema barato para tramos cortos, y además permite atacar el túnel por varios frentes sin grandes inversiones. Hoy día sin embargo, la escasez de mano de obra ha encarecido sensiblemente el precio del metro lineal.

El tipo de entibación descrito conlleva una gran incidencia de la mano de obra, con los problemas propios que acarrea una obra de artesanía. Sin embargo garantiza una vigilancia personal y continua con una gran flexibilidad de actuación frente a imprevistos. Es muy importante el trabajo continuado en turnos de 8 h para que el terreno, volviendo a utilizar frases del argot profesional, "no se entere".

Finalmente, a título de orientación, diremos que la velocidad de avance oscila entre los 30 m/mes, en terrenos muy duros, a unos 40- 45 m/mes en arenas de miga, habiéndose llegado en ocasiones a los 50 m/mes en terrenos óptimos siempre utilizando 3 turnos..

3. TÚNELES CONSTRUIDOS POR EL MÉTODO CLÁSICO EN LA AMPLIACIÓN 1995-99

Se han construido los 8.320 metros que figuran en la tabla 2.

Catorce bestias trabajan bajo las calles de Madrid

Las mulas "mineras" del Metro

Catorce mulas realizan trabajos de arrastre en las obras del Metro de la línea en construcción Ventas-Castellón. En cada uno de los quince pozos que se han abierto —excepto en uno de ellos, claro— hay una mula "minera" para transportar las vagonetas, "porque los gases de las máquinas que podrían realizar este labor vitieran el aire de los túneles", según se nos ha dicho.

Mucho se ha hablado acerca de la "situación laboral" de los referidas mulas. Los Sociólogos Protectores de Animales han protestado en más de una ocasión. Se suponía que se las obligaba a trabajar duros, que no la-

naban un lugar confortable de descanso, que las horas de trabajo eran excesivas, que su labor bajo tierra les hacía quedar ciegos y una vez que perdían la vista se les sacrificaba, sin más contemplaciones, en el Matadero Municipal.

El Servicio de Protección Animal del Ayuntamiento, ante las protestas, nombró una comisión de investigación que bajó a los túneles para comprobar la situación de estas bestias. Pareció que se quedó demostrado que su trabajo es el normal de arrastre, que no se les trata con crueldad, que disponen de lugares habituales lo más cómodamente para sus "ho-

ras de ocio", que trabajan unas seis horas diarias, como cualquier obrero de palas desorejados y, desde luego, que en el Matadero Municipal no se sacrifican mulas que hayan perdido la vista en los trabajos del Metro.

TORNA

Don como fuere, lo cierto es que por debajo del asfalto de catorce calles madrileñas se poseen catorce tantas mulas arrastrando a sus vagonetas. Descendieron en los montecitos, algunas hasta más de veinte metros de profundidad, y son un poco como las mineras de los equipos de trabajo.

En el pozo número 3, de la calle de Juan Bravo, hemos visto a Torna, una de ellas. Mueve —se debía escribir desquidadamente por su mulero— nuestra vista atraído su cuidado, sus miró, con las orejas inclinadas hacia adelante, y estuvo poniendo de la esperanza omisión de autolindes y Prensas. En la vía correspondiente, la presencia pintoresca de la mula entre todo el trabajo de máquinas y motores recabó la atención de todos, y Torna tuvo que aguantar el chaparrón de flashes de los fotógrafos, como a cual quier estrella cinematográfica en su mejor acto de propaganda.



La mula Torna realiza su trabajo.

12 ENERO 1967

Figura 3.

TABLA 3. TÚNELES POR MÉTODO CLÁSICO EN METRO DE MADRID 1995-1999

	UNIÓN L 8-10	UNION L 7-8	L 7 (2)	L 10 P. PÍO - PI. ESPAÑA	L 1 VALLECAS
	FCC	NECSO-FERROVIAL	NECSO-FERROVIAL	NECSO	AGROMAN-AUXINI
MES	METROS	METROS	METROS	METROS	METROS
Jul 95				10	
Ago 95				46	
Sep 95				54	
Oct 95				45	
Nov 95				53	
Dic 95				37	
Ene 96				58	
Feb 96				32	
Mar 96				60	
Abr 96				75	
May 96				143	
Jun 96				196	
Jul 96				132	
Ago 96				60	
Sep 96	15			53	
Oct 96	33			40	
Nov 96	28				
Dic 96	45				
Ene 97	15		107		
Feb 97	26				
Mar 97	89				
Abr 97	124	188			
May 97	112	165			
Jun 97	92	47			182
Jul 97	150	305			20
Ago 97	124	120			188
Sep 97	93	195			50
Oct 97	86	30			50
Nov 97	3				15
Dic 97					35
Ene 98			62		115
Feb 98			89		135
Mar 98			155		150
Abr 98			150		120
May 98			149		150
Jun 98			126		171
Jul 98			142		121
Ago 98					133
Sep 98					80
TOTAL METROS	1,033	1,050	980	1,094	1,715

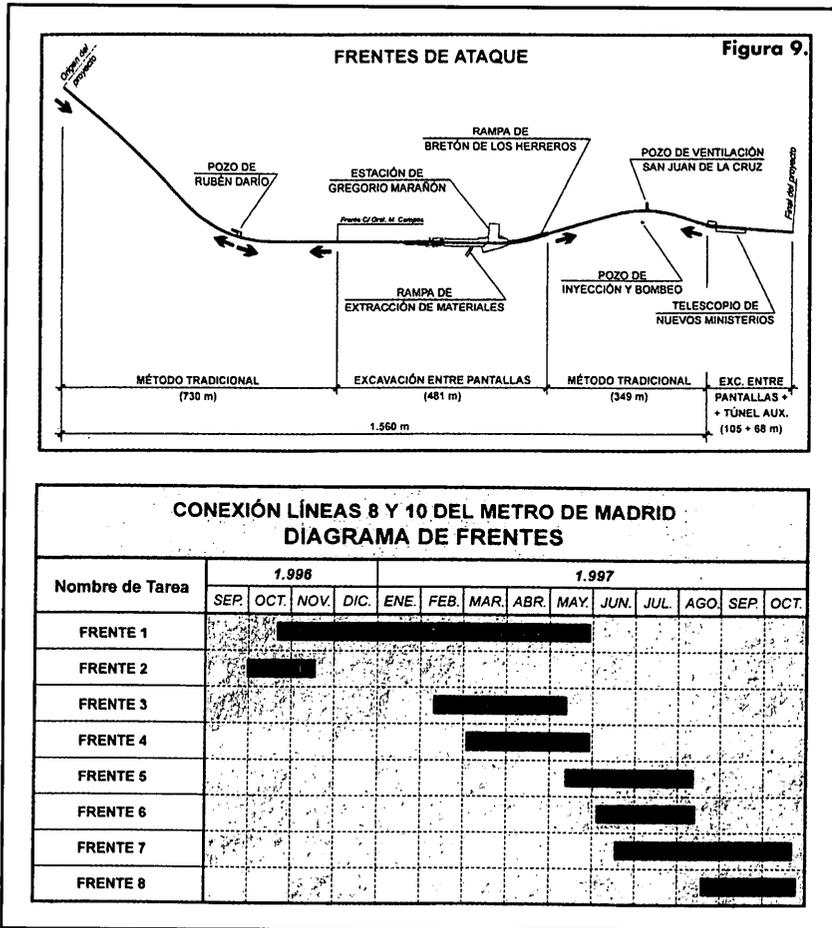
Los rendimientos globales de los tramos más importantes, con una longitud total de 5.872 metros, han sido los reflejados en la tabla 3.

4. TRAMO DE UNIÓN DE LÍNEAS 8 Y 10

El tramo se esquematiza en la **Figura 9** y su fotografía aérea puede verse en la **Figura 10**. Se construyó con 4 frentes de trabajo:

- ▼ Avance 1 hacia el sur desde el telescopio de unión de líneas 7 y 10
- ▼ Avances 2 y 3 hacia norte y sur desde el pozo construido en la Glorieta de Rubén Darío
- ▼ Avance 4 hacia el norte desde el fondo de saco existente en Línea 10 en Alonso Martínez. Este fondo de saco se había dejado cuando se construyó apuntando hacia la calle Zurbano, mientras que la nueva alineación exigía que el túnel siguiera recto hasta la glorieta de Rubén Darío, donde efectúa el giro a izquierdas para enfilarse la calle de Almagro. Por ello, a la altura de las calles Caracas y Zurbano hubo de hacerse la complicada demolición del fondo de saco existente y el entronque con las nuevas bóvedas. La enorme flexibilidad del Método Clásico permitió esta operación sin problemas excesivos.

Entre los frentes 1 y 2 se construyeron 232 anillos de 2.50 metros, si bien al cruzar desde el avance 1 bajo el túnel de Cercanías (tubo de la risa) Atocha-Chamartín, a la altura de la Plaza de S. Juan de la Cruz, los pases se dieron de media longitud, 1.25 metros, apeando la vía de Cercanías y con limitación de velocidad a 30 km/h.. En la zona norte de la estación de Gregorio Marañón, bajo el edificio que tenía en esa época la Embajada de Argentina, se construyó un tramo de 50 metros con pantallas.



El avance 1 del túnel se encontró con el avance 2 en el anillo 170, el 4 de Agosto de 1997.

El avance 2 hacia el norte comenzó cuando el pozo de S. Juan de la Cruz estuvo preparado. El primer anillo hacia el norte, (nº 232) se hormigonó el 13 de Febrero de 1997. Hasta el cale norte se tardaron por lo tanto 5 meses y medio, 172 días de calendario, para 158 metros, 63 anillos de 2.5 metros.

Entre el avance 3 hacia el sur (anillo nº 233) y el avance 4 desde Alonso Martínez (anillo nº 411) se construyeron 179 anillos. El avance 4 comenzó el día 23 de Octubre de 1996, y el 3 desde el pozo de Rubén Darío el día 4 de Marzo de 1997. El autor de estas páginas cometió un grave error de cálculo, un error de principante, que es el confiar que este avance 3 desde el pozo iba a seguir su ritmo normalmente, y que no hacía falta seguir con el avance 4 para terminar el túnel en plazo. El avance 4 se paró el 6 de Noviembre de 1996. Pero en ningún túnel debe confiarse. El día 30 de Mayo de 1997 en el anillo 267 hubo una venida de agua con grandes cantidades de material arenoso en el frente 3. La flexibilidad del método clásico y la pequeña sección de avance permitieron su control. Se hormigonó el avance y se procedió a inyectar desde superficie el volumen de suelo perdido, entrando más de 300 metros cúbicos de hormigón y mortero. Repito, más de 300 m³, mientras que en el túnel todo el ma-



Figura 10.

terial entrado desde el frente se sacó en 8 camiones. Evidentemente, existía una caverna o un viaje de agua sobre el túnel que no habían sido localizados en los sondeos geotécnicos pese a su número. Los tratamientos del terreno duraron hasta el día 2 de Septiembre de 1997 en que se siguió con el túnel, en el anillo 269. En dos anillo se tardó 95 días de calendario. Si se hubiese estado utilizando para el túnel un método de gran sección, como el Nuevo Método Austríaco o el Precorte Mecánico, el túnel, la calle y los edificios colindantes hubieran colapsado. El número de muertos que hubiera habido no puede estimarse, con seguridad más de 8.

El día 30 de Mayo de 1997 se comenzó también por tanto el túnel desde el avance 4, y el cale entre los frentes 3 y 4 tuvo lugar en el anillo 289 el día 18 de octubre de 1997.

Las conclusiones que obtuvo el autor de este túnel fueron las siguientes, por si sirven de alguna utilidad al lector:

- ▼ Jamás parar un túnel, ni por noches, ni fines de semana, ni fiestas
- ▼ Jamás hacer caso a ningún consejo que, bajo pretexto de costes o plazos proponga bajar el rendimiento en un túnel
- ▼ Jamás utilizar métodos de frente abierto mayor de 3 a 5 m².
- ▼ Prohibir la Geoestadística. Las probabilidades son, en su caso, para la Universidad, no para el túnel. En el túnel la probabilidad de problemas debe ser nula.

Como resumen, se construyeron por este método 1.033 metros de túnel entre Septiembre de 1996 y Octubre de 1997.

5. TRAMO DE UNIÓN DE LÍNEAS 7 Y 8

El tramo se esquematiza en la **Figura 11**. Comienza en el telescopio de entronque con la Estación de Avenida de América, donde salía el pequeño túnel de unión con la antigua Línea 8 que giraba desde María de Molina hacia el norte, conectando en Nuevos Ministerios con la Línea 8. Este túnel, de una vía, era un túnel de maniobras que se había decidido utilizar para unir Nuevos Ministerios con Avenida de América, permi-

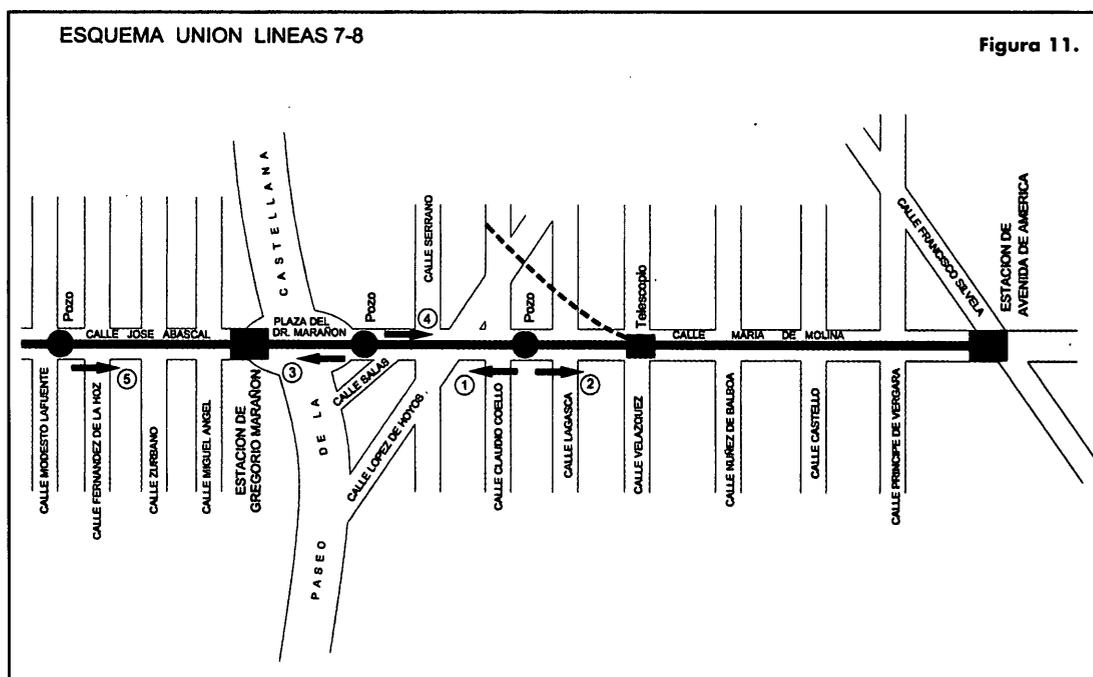


Figura 11.

tiendo a la Línea 8 conectar con esta estación. Desde este telescopio el túnel baja por toda María de Molina hasta la Castellana, donde entra en la nueva estación de Gregorio Marañón bajo la Línea 10, pasando bajo el túnel de Cercanías Atocha-Chamartín en la Plaza de Gregorio Marañón. Tras salir de la estación de Marañón el túnel, para formar el fondo de saco de maniobras que era necesario hasta la terminación de la Línea 7, sigue por la calle Abascal y llega hasta el cruce con Modesto Lafuente.

El túnel tiene un total de 397 anillos desde el telescopio de Avda. de América hasta el fondo de saco en Modesto Lafuente. Se construyó con 5 frentes de trabajo:

- ▼ Avances 1 y 2 hacia Oeste y Este desde el pozo de Claudio Coello, junto a María de Molina. El telescopio de Avenida de América no pudo utilizarse para el túnel porque tardó más en ser excavado hasta la cota inferior.
- ▼ Avances 3 y 4 hacia Oeste y Este desde el pozo construido en la isleta de la calle Salas, junto a la Castellana. Gran parte de la estación de línea 7 de Gregorio Marañón salió también por este pozo, dejando un camión cautivo que luego salió desmontado.
- ▼ Avance 5 hacia el Este desde el pozo de Modesto Lafuente. La estación de Gregorio Marañón de línea 7 no pudo utilizarse para el túnel por la misma razón que el telescopio. Cuando llegara su excavación a cota de túnel, éste debía estar ya construido.

El avance 1 hacia el Este comenzó el 18 de Marzo de 1997 (anillo nº 67), y caló en el telescopio de Avda. de América (anillo nº 1) el 5 de Septiembre de 1997. En 171 días calendario se construyeron 67 anillos, 168 metros de túnel.

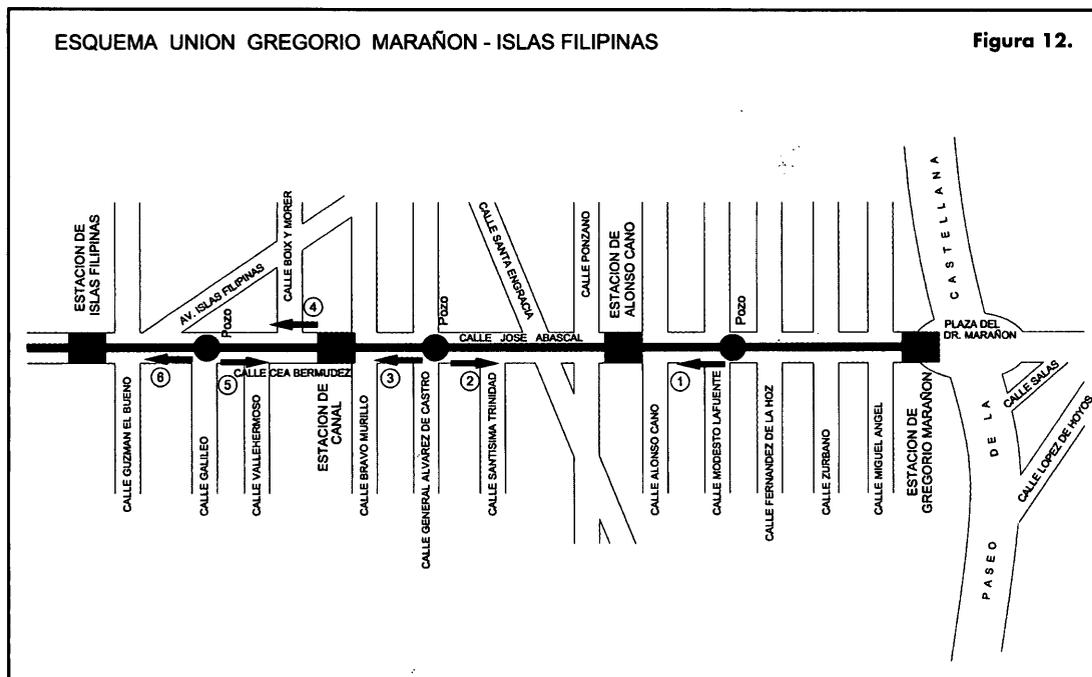


Figura 12.

400), va hacia el este siguiendo toda la calle Cea Bermúdez, atraviesa las estaciones de Alonso Cano y Canal y termina en el piñón este de Islas Filipinas (anillo nº 859).

El túnel tiene por tanto un total de 460 anillos (1.150 m) desde el fondo de saco de Modesto Lafuente hasta Islas Filipinas. Se construyó con 6 frentes de trabajo:

- ▼ Avance 1 hacia el Oeste desde el pozo de Modesto Lafuente.
- ▼ Avances 2 y 3 hacia Este y Oeste desde el pozo de la calle Álvarez de Castro.

El avance 2 hacia el Oeste comenzó el 20 de Marzo de 1997 (anillo nº 68), y caló con el avance 3 entre las calles Pinar y Serrano (anillo nº 128) el 3 de Septiembre de 1997. En 167 días calendario se construyeron 61 anillos, 153 metros de túnel. Este avance 3 había comenzado en el pozo de la calle Salas el día 11 de Febrero de 1997 (anillo nº 209), si bien, ante la falta de operarios especializados, el trabajo a ritmo en ambos frentes del pozo no comenzó realmente hasta el 11 de Marzo.

El avance 4 hacia el Oeste desde el pozo de Salas comenzó en esa fecha en el anillo nº 210. El túnel tuvo que cruzar bajo el túnel Atocha-Chamartín, con pases cortos y apeando vías, y tuvo que resolver entre otros problemas la entrada de un colector de fecales sin identificar por el Ayuntamiento. Se resolvieron estos problemas y el túnel caló felizmente en la estación de Gregorio Marañón el 27 de Septiembre de 1997, en el anillo nº 264.

Finalmente, el avance 5 hacia el este desde el pozo de Modesto Lafuente comenzó en el anillo 385 también el día 11 de Marzo de 1997, y el cale en la estación de Gregorio Marañón en el piñón Oeste (anillo nº 265) tuvo lugar el 1 de Octubre de 1997 sin incidentes. Los 16 anillos del fondo de saco terminaron por el oeste en el anillo nº 401 el 4 de Julio de 1997.

Como resumen, se construyeron por este método 1.050 metros de túnel entre Abril y Octubre de 1997.

6. LÍNEA 7. TRAMO GREGORIO MARAÑÓN – ESTACIÓN DE ISLAS FILIPINAS

El tramo se esquematiza en la **Figura 12**. Comienza al final del avance Oeste del pozo de Modesto Lafuente (anillo nº

▼ Avance 4 desde el piñón Oeste de la estación de Canal hacia el Oeste.

▼ Avances 5 y 6 hacia Este y Oeste desde el pozo de la calle Galileo.

El avance 1 comenzó el 13 de Diciembre de 1997 en el fondo de saco (anillo nº 402), y continuó hacia el Oeste calando en Alonso Cano (anillo nº 465) el día 7 de Abril de 1998.

El avance 2 comenzó el 3 de Noviembre de 1997 en el pozo de Álvarez de Castro (anillo nº 553), y continuó hacia el Este calando en Alonso Cano (anillo nº 466) el día 8 de Mayo de 1998. El avance 3 comenzó el 29 de Octubre de 1997 en el mismo pozo (anillo nº 554), y continuó hacia el Oeste calando en la estación de Canal (anillo nº 606) el día 11 de Marzo de 1998.

El avance 4 comenzó el 11 de Abril de 1998 en el piñón Oeste de la estación de Canal (anillo nº 607), que se preparó a este efecto pese al retraso que ello producía en su programa de trabajos. Caló con el avance 5 el día 9 de Junio de 1998 en el anillo nº 648

El avance 5 comenzó el 17 de Enero de 1998 en el pozo de la calle Galileo (anillo nº 756), y continuó hacia el Este calando con el avance 4 donde y cuando se ha dicho. El avance 6 comenzó el 20 de Enero de 1998 en el mismo pozo (anillo nº 757), y continuó hacia el Oeste calando en la estación de Islas Filipinas (anillo nº 859) el día 12 de Septiembre de 1998. No hubo incidentes que comentar, salvo la profunda limpieza que hubo que hacer del terreno contaminado por gasolinas en las cercanías de la gasolinera de la calle Galileo.

Como resumen, se construyeron por este método 980 metros de túnel entre Enero y Julio de 1998.

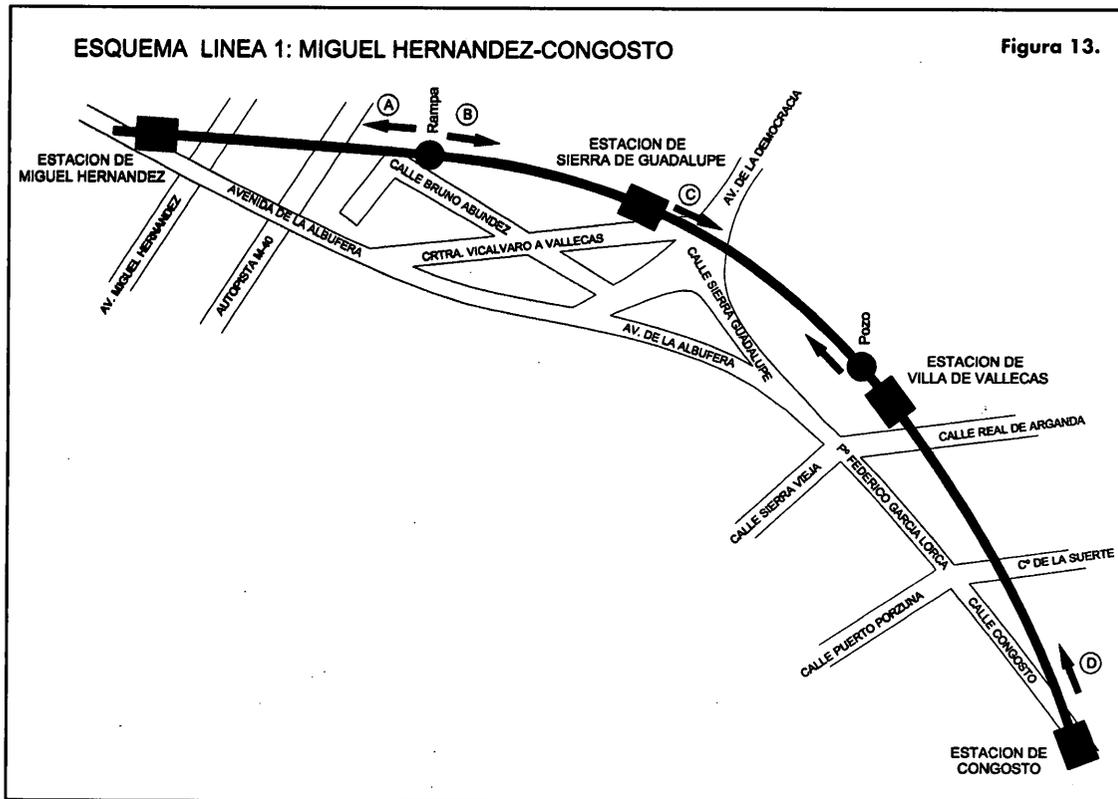


Figura 13.

El tramo C se atacó en dirección Sur desde otra rampa situada junto al piñón sur de la estación de Sierra de Guadalupe. Comenzó el 20 de Octubre de 1997 y caló el 9 de Septiembre de 1998 en el anillo C-125 con otro avance que había comenzado desde el pozo n° situado junto al piñón norte de la estación de Villa de Vallecas en fecha 21 de Mayo de 1998, en el anillo C-153. Los 7 anillos restantes en dirección sur desde este pozo hasta la estación calaron el 2 de Junio de 1998. Se hicieron en total 3 avances. El rendimiento fue muy bajo, ya que hubo que adecuar el avance del túnel a los trabajos, intensísimos, de

7. LÍNEA 1. TRAMO MIGUEL HERNÁNDEZ - CONGOSTO

El tramo se esquematiza en la **Figura 13**. Comienza al final del fondo de saco de la estación de Miguel Hernández, cruza bajo la M-40, atraviesa las estaciones de Sierra de Guadalupe y Vallecas Villa, y termina aproximadamente en el punto medio entre esta última y Congosto, donde comienza el tramo de pantallas. El túnel se dividió en los tramos A (158 anillos) y B (210 anillos) entre Miguel Hernández y Vallecas Villa, C (160 anillos) entre ésta y Sierra de Guadalupe y D (138 anillos) entre ésta y el entronque con las pantallas.

Los tramos A y B se construyeron desde la rampa situada al efecto en la calle de Diego Abúndez. Siempre que se puede debe trabajarse por rampa en lugar de por pozo, por permitir mucha mayor facilidad en la extracción de tierras y en el acceso del hormigón y otros materiales. Desde esta rampa comenzaron los avances en direcciones Norte (A) y Sur (B). El túnel norte (A) caló sus 158 anillos el 22 de Abril de 1998. el túnel Sur (B) caló sus 210 anillos el 8 de Julio de 1998. Se hicieron en total 2 avances.

consolidación de los edificios bajo los que pasaba. Estos trabajos de consolidación consistieron en inyecciones de compensación a escala masiva, así como en grandes superficies de pantallas de jet grouting.

El tramo D comenzó el 27 de enero de 1998 desde la zona de pantallas hacia el norte, en el anillo D-1. Caló en fecha 8 de Septiembre de 1998 en el anillo D-123. Caló con otro avance que desde la estación de Vallecas Villa había comenzado en el anillo D-138 hacia el sur en fecha 15 de Julio de 1998. Los trabajos de consolidación y refuerzo de los viejos edificios de la zona fueron también intensísimos. Lamentablemente, los abusos de alguna parte de la ciudadanía fueron enormes, y tanto por la prensa como por la televisión como por algunas asociaciones vecinales se achacaron a las obras del túnel daños en edificios que de ninguna forma habían sido afectados por ellas, sino que eran edificios de construcción pobre y deficiente y ya en práctica ruina antes de las obras. En cualquier caso, el autor, ocupando un puesto de designación, no debía opinar sobre el asunto.

Como resumen, se construyeron por este método 1.715 metros de túnel entre Junio de 1997 y Septiembre de 1998. ■