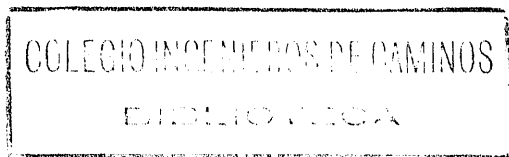


Ejecución del túnel del metro de Madrid en el tramo Sainz de Baranda-Pavones^(*)



Por JUAN VICENTE CABEZAS MORO

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

ALFONSO GARRIDO LEAL

Ingeniero de Caminos, C. y P.

La construcción de los túneles del Metro plantea una problemática muy diversa en función de la ubicación de la traza, los terrenos atravesados y el sistema de avance elegido. La ejecución mecanizada rápida mediante un escudo excavador biarticulado, que se expone en este artículo, es una alternativa muy digna de consideración.

INTRODUCCION

Como una parte del plan de actuación del M.T.C. sobre el Metro de Madrid, se ha puesto en funcionamiento el tramo Sainz de Baranda-Pavones de la Línea IX. Esta línea tiene un trazado Noroeste-Sureste y unirá las zonas de Mirasierra, Pilar, Plaza de Castilla, General Mola, Niño Jesús, La Estrella y Moratalaz.

Sus características son las del nuevo diseño programado en la Ampliación de la Red, de la cual ya están en servicio las Líneas VI y VII, y podrían resumirse en una capacidad para seis coches de $2,80 \times 18$ metros que suponen un total de 36.000 viajeros/hora y dirección.

Este tramo de 4 Km tiene cinco estaciones de 115 metros de longitud y 15,45 metros de luz. El túnel, de sección circular de 8,06 metros de diámetro interior, se ha ejecutado mediante escudo excavador biarticulado en una longitud de 2.350 metros; el resto, unos 1.100 metros, de sección de herradura con paramentos verticales, por el sistema belga con la ayuda de una entibadora deslizante para la bóveda y los hastiales por «batahes» en una fase posterior.

La ejecución del tramo de túnel circular nos ha llevado a una nueva técnica en la realización de túneles urbanos, planteándonos una serie de problemas esencialmente distintos a los conocidos y su ejecución mediante procedimientos convencionales.

En este artículo intentamos describir las características de funcionamiento de este sistema particular y algunas de las soluciones aportadas a las dificultades que se han planteado a lo largo de la obra, y solamente pretendemos que sirvan para señalar los hitos a considerar por quienes necesiten usar esta técnica de ejecución.

^{*)} Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 1 de agosto de 1980.

EL ESCUDO EXCAVADOR

Para la realización del túnel se empleó un equipo que estaba compuesto fundamentalmente por el propio escudo excavador «biarticulado» y un equipo de extracción de tierras integrado por trenes sobre vía sencilla, skip elevador de 10 m³ y una tolva de recepción de 300 m³.

A continuación pasamos a describir cada uno de estos equipos.

DESCRIPCION DEL ESCUDO

El escudo consiste en esencia en un tubo de chapa de acero de 40 mm de espesor, de 8,85 metros de diámetro y 9,00 metros de longitud repartidos en tres cuerpos, de unos 3,00 metros cada uno, articulados con el fin de amoldarse mejor a las curvaturas a que oblique el trazado.

Estos tres cuerpos podríamos denominarlos de la siguiente manera (fig. 1).

- Cuerpo frontal o sector de corte.
- Cuerpo central o sector de empuje.
- Cuerpo dorsal o sector de posicionado del revestimiento.

El cuerpo frontal es el encargado de la hinca y recorte del terreno. Dispone de un refuerzo en la chapa que rigidiza la sección de corte (1) donde se empotran unos dientes para facilitar su clavado.

La sección de corte reforzada es en realidad elíptica, dado que su plano no es perpendicular al eje del cilindro, sino que forma un ángulo con la vertical, de manera que la parte superior del sector avance más que la inferior, formando una visera de protección.

En la parte superior se alojan seis compuertas abatibles y deslizantes (2) que, a modo de diafragma, pueden sujetar y contener el frente de avance,

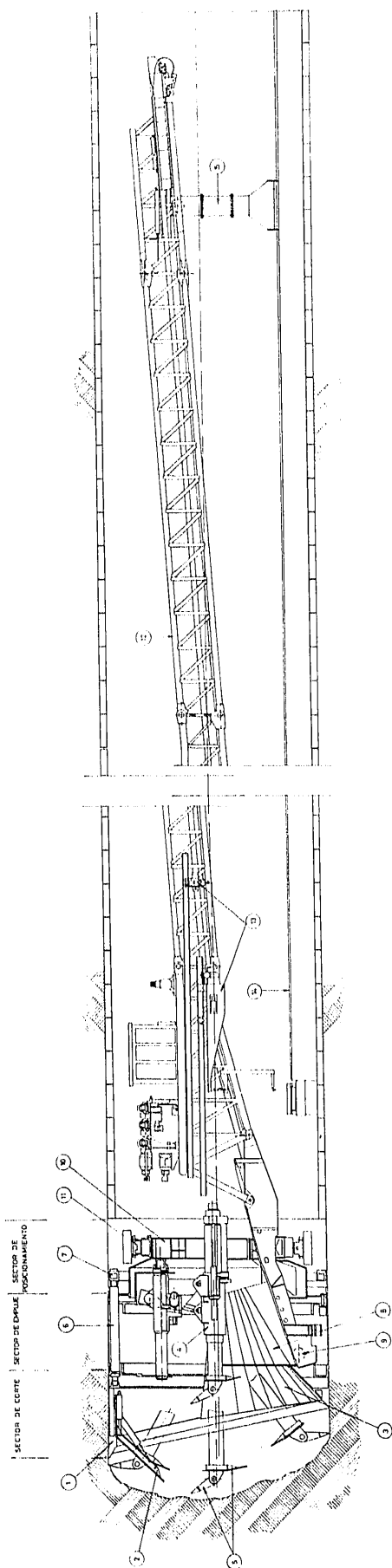


Fig. 1.—Escudo excavador Robbins 281-S.

cuando la estabilidad del mismo lo requiera. En su parte inferior, dispone de un abocinamiento de chapa (3) formando parte de la tolva de alimentación para conducir tierras a la cinta de extracción.

El cuerpo central aloja la mayor parte de los equipos del escudo: el brazo excavador, los cilindros de empuje, las consolas de maniobra, las pantallas de guiado, la tolva de alimentación con la cabeza tensora de la cinta de extracción, y el sistema hidráulico de corrección del giro alrededor del eje longitudinal.

El brazo excavador (4) consiste en un gran cilindro hidráulico capaz de múltiples movimientos. Está colgado, mediante un cojinete y un cilindro hidráulico en su plano vertical, de una mesa giratoria con eje también vertical, que puede deslizar longitudinalmente mediante otros dos cilindros hidráulicos. Es, también, capaz de girar alrededor de su eje longitudinal.

En su extremo frontal (5) dispone de un útil de excavación a modo de «ripper» y una pala que se utiliza de rastrillo. En fin, un enorme zapapico.

Este brazo, era manejado por un operador sentado en una butaca colgada de la mesa giratoria, con los correspondientes controles de maniobra para realizar los movimientos citados, de forma que podía alcanzar con el «ripper» todos los puntos de la sección de corte y del bulbo de avance.

El empuje del escudo se obtiene mediante 24 cilindros hidráulicos (6) distribuidos uniformemente en la periferia y con un accionamiento indistinto en cuatro grupos de seis, de forma que permiten el empuje en los sectores superior-inferior e izquierdo-derecho.

Cada uno de los cilindros es de doble efecto y de doble accionamiento, de manera que los émbolos frontales constituyen una rótula esférica que permite orientar el sector de corte respecto del central un ángulo de un grado aproximadamente y con los émbolos dorsales, embrochados a un anillo (7) llamado de empuje, se consigue el esfuerzo necesario sobre una sección plana que apoyada en el revestimiento produce el movimiento de avance del escudo.

La consola de maniobra del avance del escudo y movimiento de la cinta así como los cuadros de manómetros, termómetros y señales de seguridad están situados en la parte derecha a la altura del diámetro horizontal y controlados y manejados por otro operador. Aquí mismo se ubican las pantallas de localización y puntería del «láser» para el guiado y control geométrico del trazado.

En la parte inferior de este cuerpo se dispone la tolva de alimentación (8) y el tambor tensor de la cinta transportadora, así como el punto de apoyo frontal de la estructura portante de la máquina (9).

EJECUCION DEL TUNEL DEL METRO DE MADRID, SAINZ DE BARANDA - PAVONES

El sistema de corrección del giro del eje longitudinal del escudo, que se produce frecuentemente al tomar curvas en planta, que se detecta automáticamente mediante el simple uso de la plomada y que produce fuertes alteraciones en el funcionamiento de la cinta de extracción de tierras, está compuesto por dos cilindros hidráulicos de manejo manual dispuestos entre los sectores frontal y central de manera que produzcan un movimiento de torsión entre las secciones adyacentes de ambos sectores.

El cuerpo dorsal constituido fundamentalmente por la carcasa flexible donde se dispone la formación del revestimiento, contiene el erector de dovelas y el anillo de empuje antes citado, que se podría desplazar 1,80 metros, dado que ésta era la longitud máxima de carrera de los émbolos dorsales.

El erector de dovelas (10) lo integran dos coronas concéntricas, una fija y la otra móvil; sobre ésta se disponen cinco mesillas (11) con soporte de paralelogramo articulado que accionadas hidráulicamente pueden conformar un anillo con las dovelas. Las mesillas constituyen el elemento de cuelgue de las dovelas mediante las correspondientes dos llaves de enganche. En el momento de la expansión, cinco dovelas quedan adosadas a la carcasa, dejando en la parte inferior el correspondiente espacio para la sexta dovela, que completa el anillo del revestimiento. Al accionar el anillo de empuje se liberan las dovelas del erector, adosándose, como un anillo más, al revestimiento anteriormente construido.

Dado que la corona circular, formada por las cinco dovelas, antes de la expansión, es de radio menor que el anillo de empuje, se puede realizar la carga de estas dovelas en el erector, simultáneamente, a las operaciones de excavación y avance del escudo.

Aparte de los elementos anteriormente descritos, el escudo se completa con la cinta de evacuación de tierras de 1,25 metros de anchura, 45 metros de longitud y 70 metros por minuto (12); dos correas de cabrestantes ubicados a cada lado de la cinta para la manipulación de dovelas hasta su cuelgue en el erector (13); un cambio californiano (14) que permite el paso de vía sencilla a vía doble debajo de la cinta de carga y que es arrastrado por el propio escudo después de cada uno de sus avances; un pórtico de apoyo de la cola de la cinta (15); una tolva de recepción de tierras provenientes de la cinta equipada con un pantalón de descarga para cargar los vagones en una y otra vía. Finalmente, un centro de transformación con entrada a 5.000 V con unos 200 metros de cable flexible para su alimentación y la central hidráulica depósito de aceite para la maniobra de los numerosos circuitos hidráulicos del escudo.

El equipo que hemos descrito es el Robbins 281-S, que fue el elegido para la obra, después de examinar las características de este tipo de máquinas ofrecidas en el mercado internacional, y de valorar su grado de adecuación a nuestras circunstancias particulares, de geología de los terrenos atravesados, necesidades geométricas y estructurales del revestimiento, presencia de agua, pendientes máximas del túnel, montaje y desmontaje del equipo en el punto de trabajo, y soporte técnico postventa a la máquina en funcionamiento.

Podemos resumir sus características fundamentales con la siguiente ficha técnica:

- Potencia total = 900 C.V.
- Alimentación = 5.000 V.
- Empuje máximo = 4.200 Tn con 4.000 p.s.i. en los circuitos hidráulicos.
- Empuje medio = 2.500 Tn con 2.400 p.s.i. en los circuitos hidráulicos.
- Peso aproximado: 450 Tn.

Equipo de extracción de tierras.

Estaba integrado por cuatro trenes compuestos cada uno de locomotora de 250 C.V. y cinco vagones de 10 m³ de capacidad, dotados de vuelco lateral. La circulación se efectuaba sobre vía sencilla de un metro de anchura y carril de 45 Kg/m montada sobre balasto.

En el punto de arranque del equipo se montó de manera definitiva para toda la obra, un volcador automático de los vagones del tren, un «skip» elevador de las tierras capaz para admitir toda la carga de un vagón y depositarla en una tolva de recepción de 300 m³, dispuesta en la superficie a 35 metros de altura, sobre la solera del túnel. Una flota de camiones transportaba las tierras a vertedero.

Este equipo hubo de ser sobredimensionado con objeto de garantizar la retirada de tierras para el máximo avance de funcionamiento del escudo y como dato podemos indicar que era frecuente tener que transportar desde el frente 1.500 m³ de tierra por día de trabajo.

Implantación y montaje.

Se decidió introducir el escudo en el punto bajo de la traza de manera que su avance siempre fuera ascendente y así disponer de la evacuación de las aguas por gravedad.

Se aprovechó la realización a cielo abierto de la estación de La Estrella, en función de su menor profundidad, para ejecutar el pozo de entrada y montaje sobre los estribos y bóveda de la misma, realizándose en su solera el ensamblaje del escudo. En este pozo se instalaron además los equipos de

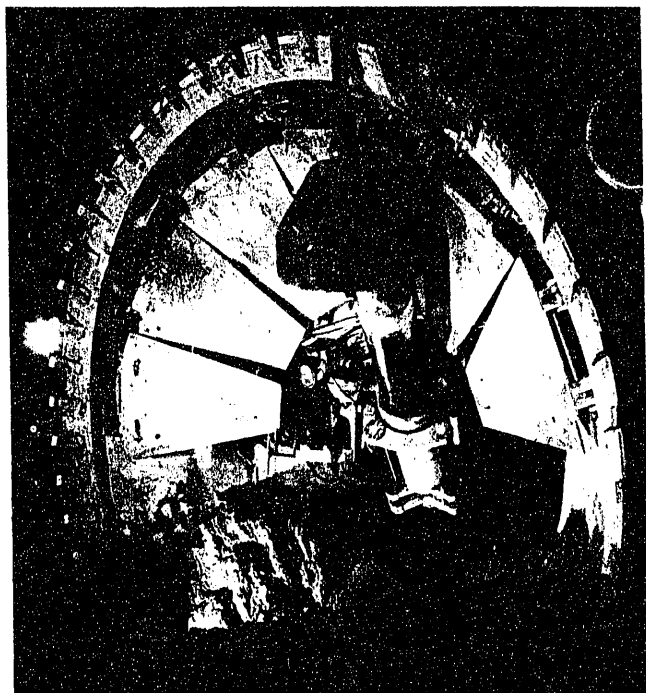


Fig. 2.—Vista parcial del escudo en la estación de Vinateros.

extracción de tierras y suministro de dovelas y demás materiales de avance.

Las dimensiones del pozo en planta eran de 10 metros por 15,45 metros (luz de la estación). La profundidad de la solera estaba a 20 metros desde el brocal, junto al que se realizaron los primeros ensamblajes de los tres arcos en que cada sector se había construido.

A continuación se descendieron por el pozo con el auxilio de grúas especiales, y se procedió a su soldadura para conformar el cilindro correspondiente.

La pieza más pesada de 80 Tn fue el arco superior del sector central donde se ubica la mesa de cuelgue del brazo excavador.

Posteriormente se descendieron el resto de los elementos que componían el equipo: brazo excavador, cinta transportadora, cambio californiano, trenes, etc.

Una vez realizado el montaje mecánico se procedió a la conexión de los circuitos tanto hidráulicos como eléctricos de la máquina, operación sumamente complicada y laboriosa.

Simultáneamente se procedía a la construcción del parque de dovelas, la instalación del «skip» de elevación de las tierras, tolva de evacuación de las mismas, centros de transformación de energía de 1.500 KVA, etc.

En todo este proceso se emplearon cinco meses, pero no se pudo comenzar la ejecución hasta tres meses más tarde, debido a un desafortunado incendio del aceite de los circuitos hidráulicos producido dentro de la máquina, que obligó a cambiar todas las conducciones de los circuitos hidráulicos y eléctricos y a verificar el tratamiento térmico de muchos elementos de acero además de reponer el stock de repuestos.

Para el arranque del escudo al comienzo del primer tramo y de los dos siguientes, después del paso por cada estación, se construyó una rígida estructura metálica desmontable, en forma de H con tornapuntas, que, referida a la bóveda y solera de la estación, soportara la acción de los cilindros de empuje que producían el movimiento de avance del escudo.

El traslado a lo largo de las estaciones y el avance en los primeros metros de túnel en una longitud igual a la del escudo, se realizaba empujando sobre las dos dovelas inferiores, únicas que se podían colocar.

Una vez que el escudo estaba totalmente clavado en el terreno se montaba la estructura antes mencionada a tope con él, con objeto de contener los primeros anillos colocados y permitir el empuje, al menos parcial, en todo el perímetro del mismo. Estos primeros avances suelen tener el inconveniente de que al ser pequeña la presión que se puede introducir en el sector superior, el escudo tiende a elevarse, razón por la cual la estructura de empuje debe ser lo más rígida posible con objeto de conseguir un guiado eficaz.

EL REVESTIMIENTO

Geometría y cálculo.

El revestimiento del túnel es una sección circular de hormigón armado de 8,06 metros de diámetro interior y 0,30 metros de espesor uniforme, formado por anillos de 1,25 metros de longitud compuestos por seis dovelas de 3,85 Tn cada una.

Cada dovela provenía del corte de un anillo circular por planos normales a su superficie, tanto interior como exterior, y formando un ángulo de 12 grados con las generatrices de los cilindros exterior e interior, de forma que su desarrollo es de planta trapecial.

Para conseguir el necesario engarce de la dovela con sus adyacentes, los planos de junta disponían de un machiembreado que unido a la forma trapecial hacía que las dovelas fuesen iguales dos a dos, en el anillo de tramo recto.

Para los tramos curvos, los anillos estaban conformados por dos planos transversales no paralelos.

separados en el exterior de la curva 1,25 metros y en el interior 1,19 metros, que permitía un radio mínimo de 165 metros en el túnel, muy inferior al mínimo admitido de proyecto que era de 250 metros. En este caso, de los tramos curvos, las seis dovelas del anillo eran todas distintas.

Las dovelas disponían, en su plano medio, de dos orificios transversales, que se empleaban para introducir en ellos las llaves correspondientes, para su manipulación y fijación en el erector. Estos orificios se empleaban posteriormente como acometidas de la inyección tanto de la gravilla de trasdoso como de las sucesivas inyecciones de lechada para la impermeabilización.

En el trasdós de la dovela, se construían dos acanaladuras longitudinales a la misma, de 10 cm por 2 cm de profundidad, donde se adherían dos anillos de poliuretano expandido especial, de 10 × 10 cm de sección, que al conformar el anillo del revestimiento constituían un retén de forma que la inyección de gravilla no pudiera escaparse hacia el escudo entre el último anillo colocado y el terreno. De estos retenes de cada anillo, el frontal era continuo y el dorsal discontinuo a fin

de que las dovelas tuvieran buen asiento y al mismo tiempo permitir el relleno de la zona de junta hasta el retén continuo del anillo anterior.

El cálculo del revestimiento se realizó con unas hipótesis de carga determinadas por el promedio entre los resultados de la aplicación de los métodos de Terzaghi, Protodiakonov, normas rusas, y Bierbämer, a cuatro tipos de terreno definidos para este fin en el estudio geotécnico previo, que se resumen en una carga vertical de 26,75 Tn/m².

Para la determinación de los esfuerzos en la sección se han empleado los métodos de Bugaieva y el consistente en asimilar el anillo a un polígono regular de 72 lados y en cada vértice suponer la interacción del terreno mediante una biela articulada del mismo material que el anillo. Para contemplar las articulaciones motivadas por la existencia de las dovelas, se ha efectuado el cálculo por el último procedimiento que se ha mecanizado en un ordenador, obteniéndose las leyes de los esfuerzos con las que se determina la armadura. La resistencia característica del hormigón fue de 350 Kg/m² y la cuantía de acero de 5.000 Kg/cm² de límite elástico fue de 64 Kg/m³ con armadura simétrica.

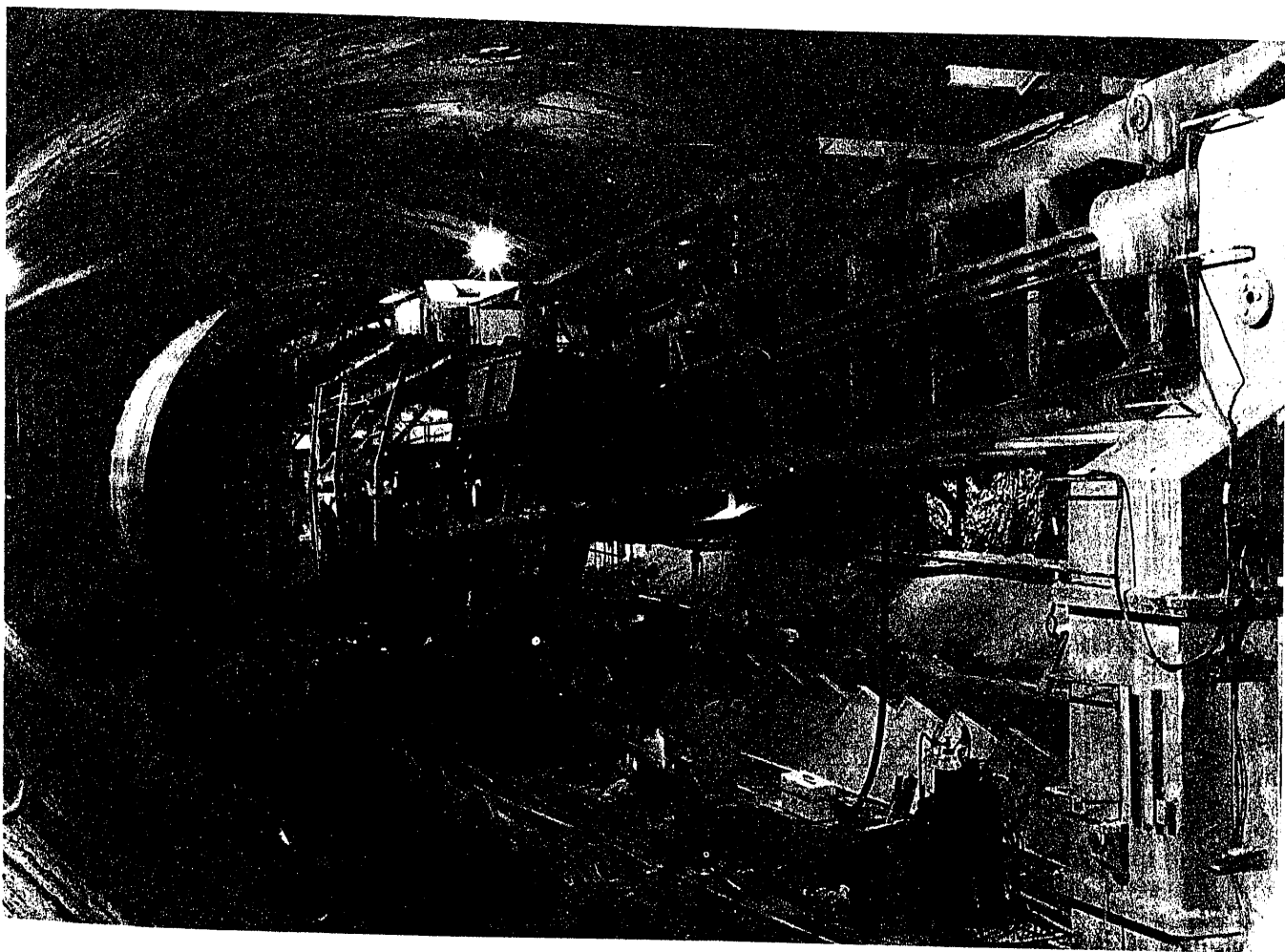


Fig. 3.—Vista dorsal del escudo en la estación de Vinateros.

Fabricación.

La fabricación de estos elementos se realizó en un parque de prefabricados que la empresa constructora tenía en funcionamiento a 30 Km de la obra.

En función de que ya existían instalaciones específicas solamente fue necesaria la construcción de los moldes y el acondicionamiento del equipo de curado por aire caliente para conseguir el ritmo medio necesario de 100 piezas por día.

Las dovelas de un anillo para curvas son necesariamente distintas entre sí y las de un anillo para recta son iguales dos a dos, por lo que el número de moldes mínimo era de ocho. Para conseguir la cadencia media de fabricación programada se dispusieron 12 moldes para dovelas de anillos de curva y 24 para dovelas de anillos en recta.

Los moldes eran fijos y el vibrado del hormigón, de consistencia seca, se realizaba en la propia masa y en superficie.

A continuación para el curado los moldes se cubrían con una campana de plástico a la cual se le insuflaba el aire caliente con objeto de obtener la curva de curado prevista.

Almacenamiento y transporte.

Las dovelas, una vez curadas, eran almacenadas en pilas de seis piezas, una encima de otra, con la concavidad hacia arriba.

Cada una de estas pilas se apoyaba en una bancada preparada al efecto sobre el terreno con la misma curvatura de la dovela. Sobre ésta se situaban las siguientes intercalando piezas de madera para su apoyo de forma que no se produjeran momentos flectores en las piezas, excepto los derivados de su propio peso.

Cada dovela iba rotulada con un código en el que se figuraba el número del molde, la fecha de fabricación y su tipo.

El transporte a la obra se realizaba en «trailers», sobre los que también se había preparado en la caja, unas bancadas de madera para el correcto apoyo de las piezas, conteniendo cada una de ellas dos pilas de tres dovelas.

La carga en la fábrica se efectuaba con los pórticos y grúas de que ya se disponía en la misma y la descarga a pie de obra se conseguía también con un pórtico y una grúa torre dispuestas en el parque de almacenaje que había junto al pozo de entrada al túnel. Dicho parque tenía una capacidad de 1.200 piezas y en él las dovelas se habían apilado también en lotes de seis piezas de fecha similar de fabricación, de manera que cada lote cons-

tituyera un anillo completo, con las piezas dispuestas en el mismo orden en que se debían recibir por el escudo y su edad mínima fuese al menos de veintiocho días para su colocación en el revestimiento.

Reclamado un anillo por los equipos de avance en el frente, especificando si debía ser recto o curvo, decisión que se tomaba al terminar el montaje del anillo anterior, el encargado del parque en superficie era informado telefónicamente y procedía al descenso de las piezas mediante un pórtico de 15 Tn y 10 metros de luz que circulando longitudinalmente al parque cargaba tres dovelas del anillo elegido y las introducía por el pozo de entrada al túnel hasta depositarlas en una vagoneta portadovelas que era transportada por el inmediato tren vacío que se dirigiera al frente a cargar tierras. De esta manera, en dos viajes se suministraba el anillo al escudo.

EL CICLO DE TRABAJO

La ejecución total del túnel se lograba esencialmente por la repetición del siguiente ciclo de trabajo:

a) Excavación correspondiente al avance necesario para 1,25 metros de longitud.

b) Montaje de un anillo del revestimiento compuesto por seis dovelas.

c) Inyección de gravilla para el trasdosado del revestimiento hasta conectarlo con la excavación realizada.

El proceso se iniciaba con la determinación de la posición real del escudo y su desviación respecto de la teórica, para lo cual se disponía de un ordenador en la oficina de obra. Los datos de entrada se comunicaban telefónicamente desde la consola de mandos del escudo donde se habían medido las incidencias del «láser» en las dos pantallas, la desviación de la plumada y la distancia del escudo a un punto fijo conocido, mediante distanciómetro.

La salida del ordenador indicaba las desviaciones en planta, en alzado y en dirección de la máquina para esa posición real, parámetros a partir de los cuales se establecían las presiones de empuje de los cilindros en los cuatro sectores, superior-inferior, izquierdo-derecho, y las instrucciones al operador del brazo excavador, con lo cual se conseguía la conducción de la máquina (J. V. Cabezas. Simposio Nacional sobre Rocas Blancas. Tomo 2, 1976).

El brazo excavador, además de efectuar la desbroza del frente era el encargado de alimentar, con las tierras, la cinta transportadora que las conducía

a la tolva de carga de los vagones del tren que ya esperaba sobre el cambio californiano para ser cargado. Este tren en su viaje de vacío desde el pozo en la cabecera del túnel hasta el frente había traído un vagón portadovelas con tres piezas correspondientes al anillo que se estaba excavando.

Durante la excavación y mediante el empuje de los cilindros contra el último anillo del revestimiento montado a través del anillo de empuje, la máquina avanzaba paulatinamente, dejando espacio dentro del sector dorsal para la colocación del siguiente anillo.

Cuando los cinco vagones que componían el tren se habían cargado, éste partía hacia el pozo de cabecera para efectuar la descarga y se continuaba el llenado de un segundo tren situado en la otra vía del cambio californiano que había traído las otras tres dovelas del anillo.

Al mismo tiempo que se realizaba la excavación, cinco de las dovelas del anillo se colocaban en el erector. Para ello cada dovela era recogida del vagón portadovelas, mediante un útil especial, por un polipasto montado sobre la estructura de la cinta y la depositaba en una plataforma previa. Esta plataforma tenía por misión girar la dovela 90 grados disponiendo su dimensión más larga en el sentido transversal en lugar de longitudinal que es el que se había utilizado para transportarlas a lo largo del túnel. Desde la plataforma, una vez girada, era recogida por otro útil que suspendido de dos polipastos la colgaba definitivamente en una de las mesillas del erector situada en la parte baja del mismo.

El erector giraba y una segunda mesilla pasaba a ocupar la disposición inferior para recibir mediante el mismo proceso otra pieza. Colocadas las cinco dovelas, éstas habían formado un anillo de menor radio que el definitivo, ocupando su centro los vértices de un pentágono aproximadamente, ello permitía, como ya se ha dicho, que el anillo de empuje de mayor radio no interfiriese con este preanillo de dovelas, de manera que se podía realizar, simultáneamente, la excavación y avance de un ciclo y la carga del erector, con el consiguiente ahorro de tiempo total del mismo.

Terminada la excavación, el avance y la carga del erector, se efectuaban las siguientes operaciones en serie:

- Se anulaba la presión de los cilindros y se invertía su efecto recogiendo el anillo de empuje al máximo.
- Se expandía el erector de manera que las mesillas situaban las cinco dovelas contra la chapa del sector dorsal ocupando ahora los vértices de un hexágono y dejando en la parte inferior el hueco de la sexta dovela.



Fig. 4.—Parte superior del sector central izado sobre el pozo de entrada.

- Se colocaba la sexta dovela en esta posición completando ya el anillo definitivo.
- Se accionaba nuevamente el anillo de empuje adosando el de dovelas al revestimiento anterior y descargándolo a su vez del erector mediante este pequeño desplazamiento longitudinal. Al mismo tiempo y debido a la forma trapezoidal de las dovelas, éstas se acunaban, unas con otras, conformándose el anillo a su dimensión definitiva y machiembándose con el anterior.
- Se enganchaban los cables de tracción del cambio californiano y mediante dos cilindros hidráulicos se tiraba del mismo hasta hacerlo avanzar 1,25 metros y situarlo en la misma posición relativa respecto de la máquina que al comienzo del ciclo. Para ello el californiano debía estar libre de cargas importantes, trenes o dovelas.

En este momento el equipo se encontraba listo para comenzar un nuevo anillo.

Formando parte del ciclo se realizaba también la inyección de gravilla en el trasdós del anillo montado en el ciclo anterior. Dado que el diámetro de la sección excavada por el sector frontal es superior al exterior del revestimiento, era necesario trasdosar cada uno de los anillos lo antes posible en evitación de descompresiones del terreno. Para

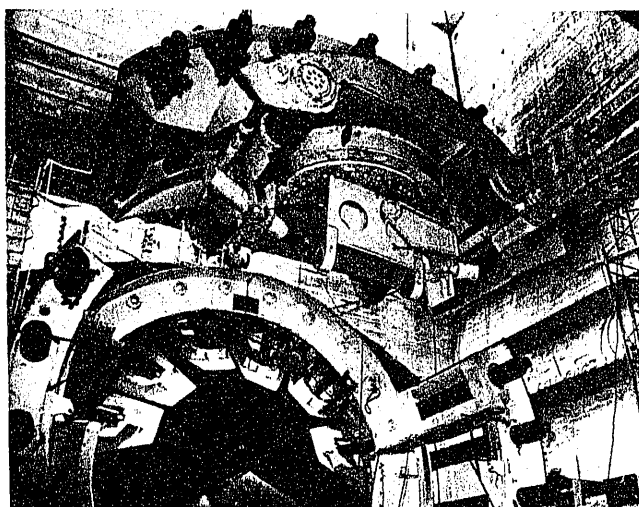


Fig. 5.—Descenso por el pozo de la parte superior del sector central.

ello se realizaba una inyección con gravilla de cuatro a seis milímetros a través de los dos agujeros de las dovelas con objeto de rellenar el vacío producido entre el revestimiento y el terreno, comprendido entre dos retenes continuos, uno de cada anillo.

El material de inyección se suministraba al frente en tolvas de tres metros cúbicos, transportadas por los trenes vacíos desde el pozo de cabecera. Estas tolvas se colgaban de la estructura de la cinta y desde allí abastecían a la máquina de inyección a través de mangueras flexibles.

Esta inyección, que podíamos llamar «seca», se completaba posteriormente, realizando por otros equipos que trabajaban sobre la estructura de la cinta, 10 ó 12 anillos detrás del último montado, una inyección «húmeda» a base de lechada de cemento, con objeto de consolidar el trasdós del túnel, trabando la gravilla inyectada y cortando en lo posible las filtraciones de agua, para lo cual sellaban todas las juntas con mortero de fraguado rápido. La operación de sellado era necesario ejecutarla varias veces pues se producían pequeños movimientos al empujar el escudo en estos últimos anillos. Con el fin de obtener una impermeabilización mayor, se imprimaba con betún asfáltico las juntas transversales entre anillos. En las del mismo anillo no se podía realizar debido a que por la inclinación de las mismas dovelas tendían a desacuñarse en cuanto se retiraba el anillo de empuje.

En el tratamiento de estas juntas no se tuvo el éxito apetecido, ya que las fugas de la inyección fueron importantes.

Cada cuatro o cinco anillos era necesario suministrar al frente un tramo de vía, con objeto de pro-

longar la misma. Este montaje se realizaba a la altura del cambio californiano aprovechando una ventana, por la cual podía introducirse el nuevo tramo de vía y embriarse a la vía anteriormente montada.

Acompañando al escudo, pero con ciclos de trabajo más largos, se realizaba otra serie de operaciones como el avance y situación del aparato de rayos «láser» y las prolongaciones de referencias topográficas, tubería de ventilación, línea de 5.000 voltios para la alimentación del escudo, iluminación del túnel, conducción de agua de refrigeración, balasto de la vía, etc.

El ciclo que hemos comentado podía realizarse perfectamente en una hora como se vio al conseguir realizar un día 19 anillos, esto es, 23,75 metros en unas veinte horas de trabajo efectivo. Sin embargo, las averías y las dificultades de avance eran frecuentes: excesiva presencia de agua en el frente, rotura de algún circuito hidráulico con las consiguientes fugas de aceite que había que cortar, modificación de la alineación del láser, descarrilamiento de trenes que obligan a despejar la vía para continuar, absentismo laboral, etc. Debido a ellas debemos decir que el realizar 16 anillos diarios fue frecuente, pero también lo fueron días de cuatro anillos y que se produjeron paralizaciones de más de un mes en dos ocasiones. Después de atravesar dos estaciones, en lo que se invertían unas tres semanas hasta volver a poner el equipo en condiciones de hacer túnel, se hicieron 2.350 metros en dieciséis meses con dos turnos de trabajo. En este plazo hemos de contar el periodo de puesta a punto que corresponde a los primeros tres meses de funcionamiento y durante los cuales se avanzaron 250 metros. Por tanto, el rendimiento medio mensual descontando paralizaciones y puesta a punto fue de 221 metros por mes y el máximo que se obtuvo fue de 250 metros en un mes.

EL SEGUIMIENTO GEOTECNICO

Reconocimientos.

El conocimiento previo de los terrenos que había de atravesar la traza, de las cimentaciones de las edificaciones y de las instalaciones de los restantes servicios urbanos, que pudieran verse afectados durante la ejecución del túnel, fue considerado desde el primer momento, como un tema de lo más importante.

Consecuentemente, y desde el punto de vista del conocimiento geotécnico, se efectuó una investigación previa que nos permitiera disponer, al comienzo del avance del escudo, de un perfil longitudinal con el corte estatigráfico de los terrenos a cruzar desde la superficie hasta la solera del túnel.

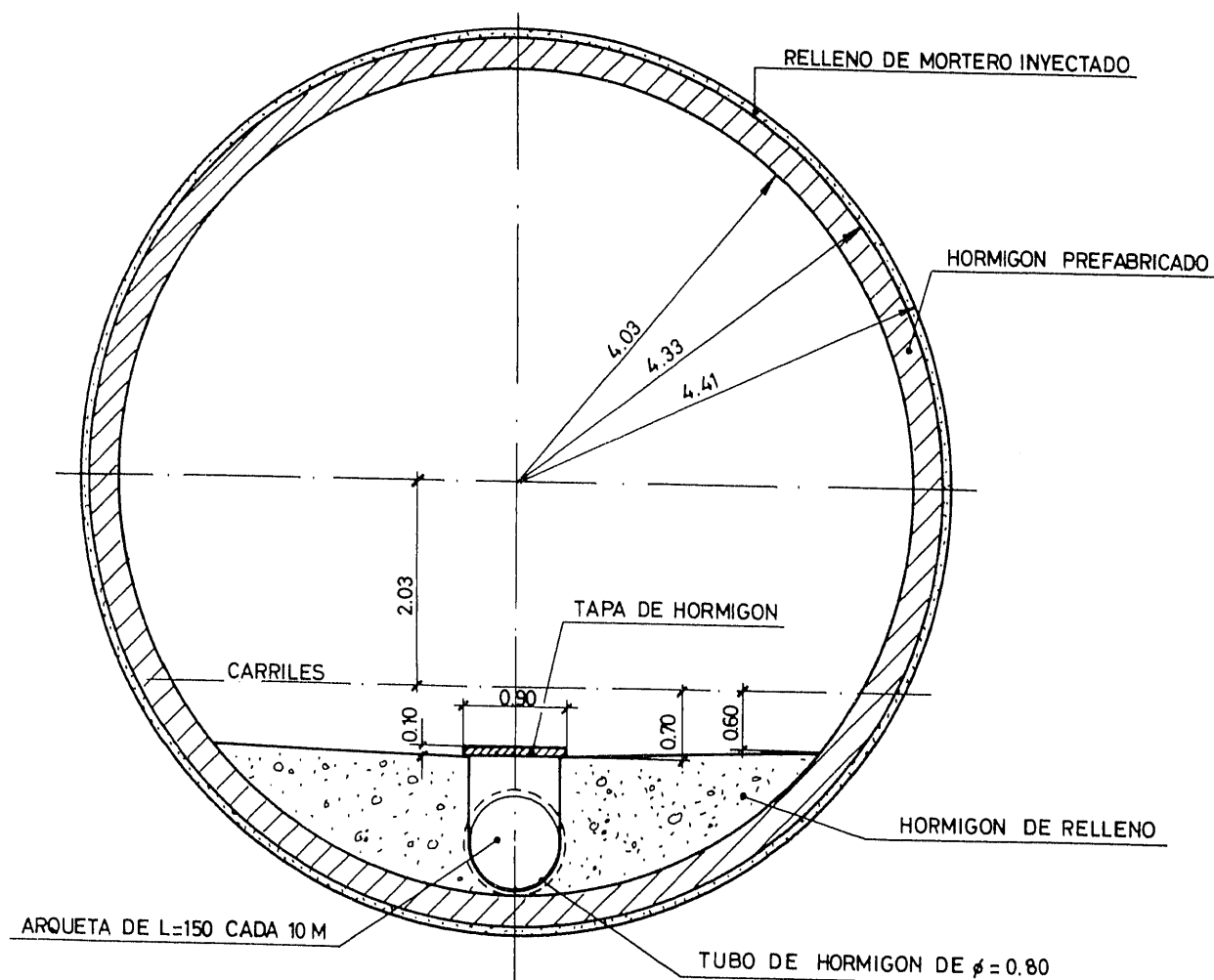


Fig. 6.—Sección de túnel circular.

Se partió, naturalmente, del informe geotécnico del proyecto, y de su estudio y del sistema constructivo elegido, que obligaba a anticiparse a las posibles incidencias que pudieran dar lugar a paradas en el avance del escudo, de gran repercusión económica, se decidió completar el informe, aumentando la densidad de los sondeos, hasta uno cada 100 metros, e intensificando los mismos en aquellas zonas en las que el proyecto presumía alguna singularidad, como antiguas vaguadas, terrenos flojos y presencia abundante de agua.

Por otra parte, la ejecución de los pozos de ventilación de las estaciones, de interestación, así como la ejecución de las propias estaciones que habían de realizarse con anterioridad al paso del escudo, suponía una información complementaria.

A lo largo de la traza se ejecutaron también dos taladros de 30 cm de diámetro por tramo interestación, entubados, cuya información a partir de los terrenos alterados, que extraía la penetrosonda fueron tenidos en cuenta en el corte estratigráfico.

Estos pequeños pozos cumplían posteriormente además los siguientes objetivos: verificar la situación topográfica de la realización del túnel; servir de canalización lo más próxima al frente para la inyección de impermeabilización, y permitir un cierto grado de ventilación al túnel.

Se utilizó también como sistema de reconocimiento un penetrómetro dinámico «Borro», automóvil, que permitió de una manera rápida diferenciar las diferentes capas de suelo del corte estratigráfico en función de su consistencia y fijar con bastante exactitud la profundidad de las mismas hasta determinadas cotas, el número de los que realizaron fue de 10 en una zona de 60 metros y tres más en otras dos zonas presumibles de gran variabilidad a no grandes profundidades.

Con todos los datos obtenidos de estas prospecciones y con los suministrados por los análisis de laboratorio como resultado de los ensayos de las muestras obtenidas en ellos, se representó el corte estratigráfico, que verificado posteriormente

durante el avance, resultó ciertamente muy aproximado a la realidad.

Por otra parte, se investigaron las cimentaciones de las edificaciones próximas a la traza o sobre ella, con objeto de prever las medidas que hubieran de tomarse si se considerara necesario. Durante el avance del escudo se mantuvo una observación topográfica permanente de cornisas, esquinas y puntos singulares de varios de los edificios próximos a la situación de la máquina, a fin de detectar cualquier posible movimiento de las mismas. Estas observaciones se completaban con la verificación de testigos en las juntas de dilatación y fisuras detectadas previamente, de las cuales se había levantado acta notarial e información gráfica.

De todas estas observaciones, se puede resumir que no se detectaron movimientos anormales en las edificaciones atribuibles al paso del escudo en sus proximidades.

En cuanto a los servicios situados a lo largo de la traza, se realizaron exhaustivos reconocimientos de los mismos: colectores, galerías de servicios, canalizaciones de agua, gas, electricidad, etc., estableciendo el necesario contacto con las correspondientes administraciones de las mismas, con objeto de intercambiar información y formalizar unos planes de urgente realización para el caso, que las medidas de seguridad adoptadas no fuesen suficientes y se produjeran incidencias al paso del escudo.



Fig. 7.—Vista del túnel terminado.

Los colectores y galerías de servicios recibieron un tratamiento especial, reconocidos y entibados en los tramos vulnerables, canalizados mediante conducción flexible, derivados a los cercanos, inyectorados, etc., según su situación de conservación y la posición relativa respecto de la excavación del túnel.

Las canalizaciones de agua y gas planteaban muchos problemas al estar ubicadas más superficialmente; sin embargo, se dispuso de una información de situación de las llaves de corte o agentes a los cuales pudiera ser necesario recurrir con urgencia.

Las canalizaciones eléctricas y telefónicas no crearon ninguna incidencia.

Otro de los servicios que fue objeto de nuestra preocupación, para la posible aparición de incidencias fue el tráfico, para lo cual se mantuvo un constante contacto con los servicios correspondientes del Ayuntamiento, Circulación y Policía de Tráfico, con el fin de prever cualquier posible modificación durante el paso por algunos puntos especiales.

ENSAYOS

De los ochenta sondeos realizados y de los frentes de trabajo durante la ejecución del avance del escudo se tomaron gran cantidad de muestras del terreno sobre las que se hicieron numerosos ensayos de laboratorio. El número de muestras analizadas se acercaron a las quinientas.

Los ensayos que se realizaron en el laboratorio fueron los siguientes:

De identificación:

- Límites de Alterberg, incluso a veces el límite de retracción.
- Análisis granulométricos por tamiz y sedimentación.
- Contenido de sulfatos, carbonatos y materia orgánica.
- Peso específico de las partículas.
- Análisis mineralógicos, por difracción y observación directa.

De estado:

- Humedad y densidad en las muestras alteradas.

De deformabilidad:

- Edométricos.
- Módulo de deformación en compresión triaxial.

De resistencia:

- Corte directo.
- Compresión triaxial, con y sin drenaje.
- Compresión simple.

De expansividad:

- Hinchamiento Lambe.
- Presión de hinchamiento.
- Hinchamiento libre en edómetro.
- Hinchamiento sin confinamiento para muestras muy resistentes.

Auscultación.

En colaboración con el Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, se programaron un conjunto de ensayos y auscultaciones tendentes a determinar por una parte los movimientos producidos en una zona de terreno como consecuencia del paso del escudo por la misma, incluso la subsidencia o repercusión en la superficie y por otra la distribución de presiones a que este terreno somete el revestimiento empleado en un anillo concreto.

Para la determinación de la subsistencia se realizaron previamente unas arquetas en superficie situadas cada 30 metros a lo largo del eje del túnel, en las cuales, después de excavar el pavimento se hincaba una pica de acero en el terreno natural. Estas picas se nivelaron inicialmente y posteriormente, durante el avance del escudo, se mantenía una observación continua de las mismas para determinar cómo se movían al acercarse el escudo, durante el paso bajo ellas y cómo se estabilizaba su movimiento una vez que el escudo las rebasaba y el revestimiento quedaba ejecutado.

Con objeto de profundizar más en el tema se prepararon unos ensayos más completos. Se eligieron previamente tres zonas a ensayar, donde se ejecutaron los sondeos oportunos para identificación de los terrenos. En cada uno de ellos se pretendió determinar los movimientos del terreno desde la clave del túnel a la superficie. Se introdujeron tres inclinómetros ópticos, para determinar los movimientos perpendiculares, horizontales y paralelos al eje del túnel, a distintas profundidades y dos extensómetros múltiples, en una de ellas, para la detección de los movimientos verticales.

En la superficie de esa zona se dispuso un conjunto de 23 arquetas de subsidencia que abarcaban una superficie de 40 metros, en el sentido transversal y 10 metros en el longitudinal al túnel, con objeto de determinar el movimiento vertical del relieve de la misma. Así mismo se construyeron otras arquetas para determinar los posibles movimientos horizontales de la superficie del terreno.

Todas ellas se observaron inicialmente antes

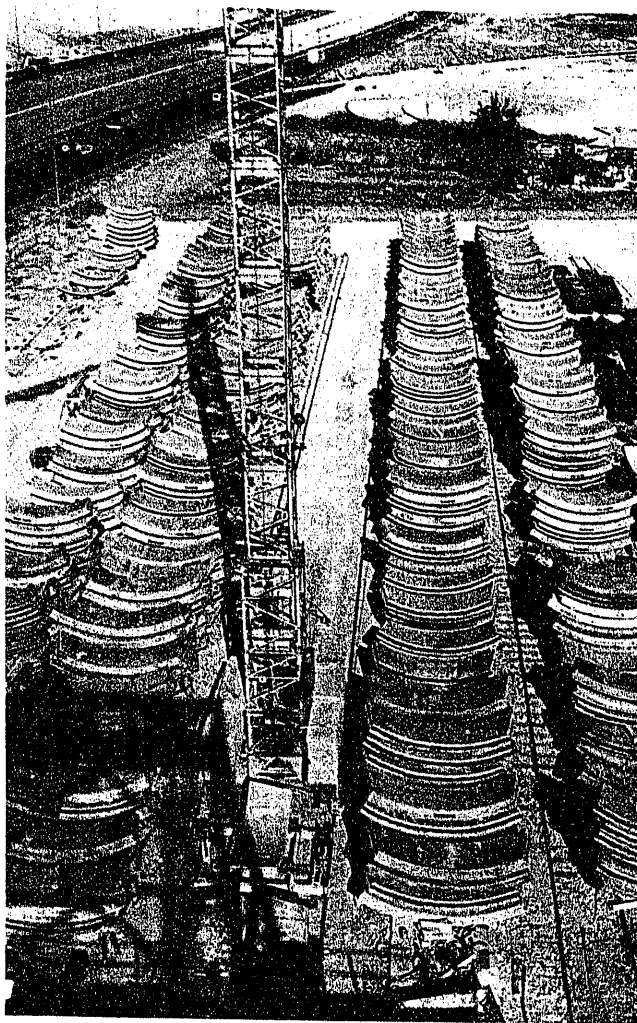


Fig. 8.—Parque de dovelas en la estación de la Estrella.

del paso del escudo, durante el cruce por la misma y, finalmente, una vez realizado el revestimiento.

Para la determinación de los esfuerzos sobre el revestimiento se alojaron previamente en las dovelas de tres anillos unas células «Ventilgeber» de forma que se podían medir posteriormente, una vez realizado el revestimiento con ellas, los empujes del terreno sobre el túnel con las periféricas y las tensiones en el hormigón del revestimiento con las radiales, naturalmente perpendiculares al esfuerzo a determinar.

También se realizaron medidas de convergencia de los anillos donde se procedió a la instrumentación de la sección.

Como resultado de todos estos trabajos podemos destacar las siguientes conclusiones:

a) Los máximos asientos en superficie determinados en el eje del túnel han sido muy pequeños, con un máximo de 11 mm.

b) El movimiento comenzaba antes de la llegada del escudo a la vertical del punto analizado. Se producía inicialmente un pequeño levantamiento; una caída fuerte en el momento del paso, y una estabilización a lo largo de cinco o siete días después.

c) La curva de asentamiento en un plano vertical y normal al túnel fue la típica de campana invertida, con asientos diferenciales máximos entre una y cuatro diezmilésimas a una distancia de seis a 11 metros del eje.

d) El valor del asentamiento máximo dependía muy directamente de la velocidad de avance del escudo, aumentando grandemente, del orden de cuatro veces, cuando se producían paralizaciones.

e) Los empujes medidos son del orden del 25 por 100 de la presión de altura de tierras referida al centro del túnel sin detectar direcciones de empuje preferentes.

f) Las medidas de convergencia han detectado acortamientos del diámetro horizontal en dos de ellas y un alargamiento en la otra.

Los resultados de estos ensayos, en las tres secciones comentadas, han sido publicados en un informe del Laboratorio del Transporte a la Administración.

ANECDOTAS

Después de dieciséis meses de trabajo con este sistema, que irónicamente llegamos a definir como «una fábrica de producir problemas y barro cuyo subproducto es el túnel» quedó inevitablemente un anecdotario muy amplio del cual queremos destacar sólo algunas porque creemos que del fondo de ellas se puede extraer alguna utilidad.

Ya hemos hecho referencia a una muy importante: el incendio en la máquina inmediatamente antes de comenzar los trabajos.

Durante los trabajos de perforación del tramo: Estrella-Vinateros, nos encontramos inesperadamente en el frente de avance con los restos de una obra. Por la profundidad a que nos encontrábamos y por los exhaustivos reconocimientos efectuados a la zona, dicho hallazgo se encontraba fuera de toda previsión.

En superficie había una calle de reciente construcción y en el frente detectábamos una fábrica de ladrillo y una estructura de madera a base de traviesas de ferrocarril formando un recinto hueco cuyas dimensiones eran difíciles de determinar.

Como primera medida se detuvo el avance para investigar la envergadura de la cavidad detectada, dado que la presencia de la misma hubiera podido originar un desprendimiento de terreno traducido

a un socavón en superficie en el eje de una calle principal de Moratalaz con un tráfico importante.

Con precauciones se observó el recinto, descubriéndose que correspondía al pozo de una antigua noria que al urbanizar en superficie había quedado deficientemente colmatada. Simultáneamente pudimos localizar su existencia en un plano de 1920 y reconocer otras similares en la misma zona. Se trataba de un recinto de sección rectangular rodeada de unos 2 x 5 metros revestido de fábrica de ladrillo.

Se inyectó lechada de cemento desde superficie y continuamos el avance del escudo sin mayores dificultades.

En el mismo tramo, habíamos detectado en el corte estratigráfico una zona de terreno duro compuesto por unos lentejones calizos. Al llegar a dicho punto nos encontramos precisamente con dicho terreno y aquí las dificultades fueron debidas al desconocimiento en la manera de operar con la máquina ante estos terrenos. Al pretender aumentar la presión de empuje para conseguir el avance, el revestimiento colocado sufrió un desajuste en las dovelas de los últimos 10 anillos. Esta circunstancia nos llevó a cambiar radicalmente el sistema de operación sobre la máquina llegando a la conclusión de que a mayor dureza del terreno mayor debía ser la excavación en el frente de manera que las presiones de empuje no superaran determinados valores límites a pesar de que la máquina podría admitirlos.

Los 10 anillos que pandearon quedaron en una situación estable pero sin la garantía requerida para mantenerse de manera definitiva por lo que fueron inmediatamente apuntalados y seguidamente arriados con una estructura metálica.

Posteriormente, cuando el túnel estuvo terminado se construyó una bóveda interior de hormigón armado que respetando los gálibos necesarios para el túnel aseguraba definitivamente su estabilidad.

Este accidente ocasionó la parada del escudo durante un mes mientras se decidía la solución más oportuna para seguir adelante.

Al avanzar nuevamente, se utilizaron presiones mínimas con objeto de transmitir a esta zona del revestimiento los menores esfuerzos posibles.

En el tramo Vinateros-Artilleros teníamos detectada una capa de terreno suelto en la parte superior de la sección. Al llegar a la misma, el frente se manifestó francamente inestable por la presencia de gran cantidad de agua haciendo extraordinariamente difíciles las labores de avance. La degradación del frente era más rápida que el avance de la propia máquina, produciéndose oquedades con gran aportación de agua y finos que llegaron a ser incontrolables.

Llegados a esta situación se decidió detener el equipo, entibar el frente con objeto de contener el

EJECUCION DEL TUNEL DEL METRO DE MADRID, SAINZ DE BARANDA - PAVONES

desprendimiento de terreno y pensar en posibles soluciones que nos permitieran seguir el avance.

Desde superficie se realizó una campaña de sondeos para averiguar la disposición de dicho estrato y con la intención de administrar al terreno una inyección para consolidar dicha zona.

La investigación determinó que el terreno mejoraba a partir del punto en que nos hayábamos detenidos y que la inyección tanto química como de cemento no sería admitida en función de la permeabilidad que detectábamos en los sondeos delante del escudo. Por otra parte teníamos constancia de que la afluencia de agua había disminuido considerablemente como si se hubiera ido agotando paulatinamente un bolsón de agua colgada.

A la vista de estos resultados se decidió proseguir el avance, y efectivamente encontramos a unos cuantos metros delante que el terreno mejoraba en clave respecto del que nos había hecho detenernos, aparte de que la presencia de agua no había aumentado y las oquedades no volvieron a producirse en las dimensiones alarmantes que nos habían inducido a detenernos.

Esta detención duró también algo más de un mes.

En el tramo Artilleros-Pavones, próximos ya a esta última estación, teníamos que pasar debajo del llamado «Canal del Este» que circula a lo largo de la prolongación de García Noblejas. Este canal es una galería abovedada de cuatro metros de luz y tres de altura, de hormigón en masa por cuyo interior discurre una tubería de un metro de diámetro perteneciente al Canal de Isabel II, funcionando con régimen de canal. La bóveda del túnel discurría cinco metros por debajo de la solera de dicha galería cruzándolo transversalmente.

Estudiado el tema con los servicios técnicos del Canal, se preparó el cruce tomando una serie de medidas precautorias que finalmente resultaron acertadas.

Primeramente se cerchó interiormente toda la galería en la zona del cruce, y se efectuaron dos sondeos a ambos lados de la misma para confirmar los terrenos inmediatamente próximos a la galería.

Se realizó una campaña de inyección desde la solera de la galería con objeto de rellenar los posibles huecos de su trasdós y consolidar el terreno que pudiera estar suelto como consecuencia de su construcción.

Se dispusieron testigos y puntos de referencia de nivel a lo largo de la tubería con objeto de detectar cualquier movimiento de la misma.

Con todas estas precauciones se detuvo el escudo a unos 20 metros delante de la galería, punto en el cual se realizó una revisión general de todo el equipo para evitar una parada imprevista durante

el cruce. Se comenzó entonces el avance teniendo toda una semana por delante calculando que necesitábamos cuarenta y ocho horas de trabajo ininterrumpido para realizar el cruce y situarnos 20 metros después del eje de la misma.

El objetivo se cumplió según lo previsto y la nivelación continua de la solera de la galería manifestó un asiento máximo de seis milímetros, que no afectó ni a la galería ni a la tubería interior.

En este tramo, la traza del túnel debía atravesar debajo de unos edificios cimentados sobre pilotes. El terreno había sido reconocido especialmente y se sabía de la existencia de un bolsón de arena suelta con agua que podía dificultar el avance. La profundidad a que nos encontrábamos era, sin embargo, importante, unos 20 metros desde la punta de los pilotes a la clave del túnel.

Con objeto de disminuir al mínimo el aflojamiento del terreno y dado que el trabajo no podía realizarse en una semana se decidió mantener el equipo en funcionamiento durante sábados y domingos sin realizar ninguna parada hasta después de haber superado ampliamente esta zona edificada.

CONCLUSION

Para terminar estos comentarios queremos destacar una serie de puntos que de manera general consideramos han de sopesarse a la hora de valorar la alternativa de este sistema constructivo.

El sistema «mecanizado rápido» para la ejecución de túnel no lo consideramos como contrapuesto a los sistemas convencionales de excavación manual y su utilización con éxito depende de muchos factores.

Sin embargo, se pueden hacer estas consideraciones:

- El tipo de terreno influirá fundamentalmente en la viabilidad del sistema y debe preverse el comportamiento de la máquina elegida ante el mismo.
- Los rendimientos obtenidos con escudo serán superiores a los conseguidos con métodos convencionales aunque ello depende naturalmente del número de frentes de trabajo.
- La seguridad para el equipo humano que trabaja en el avance es superior que con métodos convencionales.
- La inversión económica es importante e implica además unas instalaciones no recuperables también cuantiosas con las que se ha de contar.

En fin, la ejecución de una obra subterránea en medio urbano es un problema al que hay que aportar mucha imaginación, gran voluntad, valor y bastante dinero.