

EXPERIENCIAS EN LA CONSTRUCCION DE LA INFRAESTRUCTURA DEL TRAMO CALLAO-CARABANCHEL DEL FERROCARRIL METROPOLITANO DE MADRID (*)

Por JOSE FLOREZ ALIA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ex-profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos.

En el presente artículo se describe la obra del Metro Callao-Puente de Toledo y el Metro General Ricardos-Carabanchel, que constituyen un todo uno, desde Callao a Carabanchel, con una longitud total de casi siete kilómetros, bajo el antiguo Madrid hasta la populosa barriada de Carabanchel Bajo. Las peculiares características de esta obra, correspondiente a la línea V del Metropolitano de Madrid, última de las líneas que va a cruzar el viejo centro, con los planes actuales, hacen que los problemas que se han planteado en su construcción hayan sido importantes. En este artículo se describe la obra y los procedimientos de ejecución, tratándose los tres problemas más importantes a que dio lugar. El primero, el cruce con el río Manzanares; el segundo, la presencia de aguas agresivas a los hormigones; y el tercero, las dificultades que plantea el cruce con una capa freática de importancia del túnel. Asimismo se acompaña un informe geológico de la zona cruzada con el túnel, zona importante de Madrid, que supone unos datos interesantes, para que queden reflejados por escrito y puedan ser tenidos en cuenta en futuras obras, tanto en la parte atravesada por la línea como en toda la ciudad, ya que su corte geológico atraviesa de estrato superior a estrato inferior, casi todo el Sarmaciense, que constituye el subsuelo de nuestra capital.

Capítulo I.—DESCRIPCION DE LA OBRA

El tramo Callao-Carabanchel forma parte de la Línea V, Ciudad Lineal-Carabanchel y tiene una longitud total de 6 Km. 780 m.

El importe de construcción de su infraestructura ha sido de 681 millones de pesetas y su inauguración el 5 de junio de 1968, habiéndose comenzado a principios del año 1963.

Constituye esta Línea V una gran transversal que cruza Madrid, en dirección Noreste-Suroeste y es la primera línea completa construida por el Estado.

El tramo Callao-Carabanchel va desde el mismo corazón de Madrid, atravesando la ciudad vieja, hasta la zona intensamente poblada de Carabanchel en el cinturón periférico de viviendas sociales.

Comprende 10 estaciones que tienen las siguientes profundidades:

Callao	19,50 m.
Opera	16,00 »
La Latina	28,00 »
Puerta de Toledo	15,00 »
Acacias	16,50 »
Pirámides	19,00 »
Marqués de Vadillo	13,50 »
Urgel	10,00 »
Oporto	9,00 »
Vista Alegre	10,00 »

Las estaciones de Callao, La Latina y Pirámides tienen escaleras mecánicas, debido a su profundidad.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de abril de 1970.

La distancia media entre estaciones es alrededor de 700 m., con un mínimo de 488 entre Callao y Opera y un máximo de 891 entre Puerta de Toledo y Acacias.

En el proyecto se admitió como máximo una pendiente de 40 milésimas y se estudiaron siete diferentes trazados antes de elegir el que ha sido construido. La línea comienza con un mango de 150 m. antes de la estación de Callao. Esta estación cruza por debajo de la anterior Línea Legazpi-Moncloa. Quedan unos 3 m. de tierra entremedias de las dos estaciones. Todos los accesos de Callao han sido ejecutados sin cortar la circulación y es de destacar el vestíbulo de 20 x 7 m. que queda justo debajo de la Gran Vía, tangente al pavimento y que fue realizado sin corte de circulación, ni empleo de procedimientos especiales en superficie.

La línea desciende hasta Opera atravesando por debajo de edificios antiguos. La estación de Opera está situada en la Plaza de Isabel II y cruza por debajo de las estaciones correspondientes a la Línea Cuatro Caminos-Ventas y Opera-Norte. En este último caso la bóveda es secante con la solera de la vieja estación, que hubo que demoler en parte para construir aquella.

Tras de Opera sigue la línea atravesando por una zona muy antigua: calle Escalinata, calle de Santiago, Plaza de Comandante de las Morenas, Plaza Mayor, calle de Toledo, hasta la estación de La Latina. La profundidad llega a sobrepasar los 30 metros. El total de longitud bajo edificios de la línea alcanza casi el medio kilómetro. La edad media de estos edificios sobrepasa los cien años y por ello, por la modestia en general de estos edificios, su estado de conservación es muy deficiente. También hay que tener en cuenta que las cimentaciones son precarias y como más tarde veremos, circula por el sub-suelo una importante capa freática.

Tras de La Latina, en pleno barrio típico de Madrid, y al lado de la Catedral de San Isidro discurre la línea bajo la calle de Toledo hasta la estación de la Puerta de Toledo. Dicha estación tiene dos particularidades molestas, forzadas por el trazado de curva tan violento. La primera es que la estación tiene un radio de 200 m. de curva, y la segunda es que el túnel a ambos lados, tiene un radio de 90 m. Lo que es excepcional en toda la línea se aceptó por estar en una zona en que los trenes llevan poca velocidad por ser contiguos a la estación.

Después de Puerta de Toledo la línea va descendiendo hacia el río, precisando de un desarrollo, pues, la pendiente es muy fuerte, impidiendo que bajase por la continuación de la calle de Toledo. Así, pues, hace una curva yendo a enlazar con Embajadores en la Línea Legazpi-Moncloa, en la estación de las Acacias.

Siguiendo por el Paseo de las Acacias nos encontramos la estación de Pirámides, en la margen izquierda del río, y tras cruzar el río aguas abajo del Puente de Toledo en túnel, y no en puente como se estudió primitivamente, y no se proyectó así por impedirlo el gálibo de la Avda. del Manzanares y la cota de la estación de Marqués de Vadillo.

Tras cruzar el río nos encontramos con la estación de Marqués de Vadillo en la calle de General Ricardos. A continuación están las estaciones de Urgel y Oporto. En esta última se desvía el trazado por la Avenida de la Oca, antiguamente llamada Avenida de los Ingenieros.

Al fin llegamos a la estación de Vista Alegre, denominada así por el coso taurino que en estos momentos se habla que va a ser demolido. A continuación llegamos a empalmar con el mango del túnel del Suburbano ya construido y que sale de la estación de Carabanchel. Aquí, pues, termina el trazado de la Línea de Callao a Carabanchel que empalmada con la de Callao-Ventas y con la de Ventas-Arturo Soria, formará la futura Línea V de Madrid.

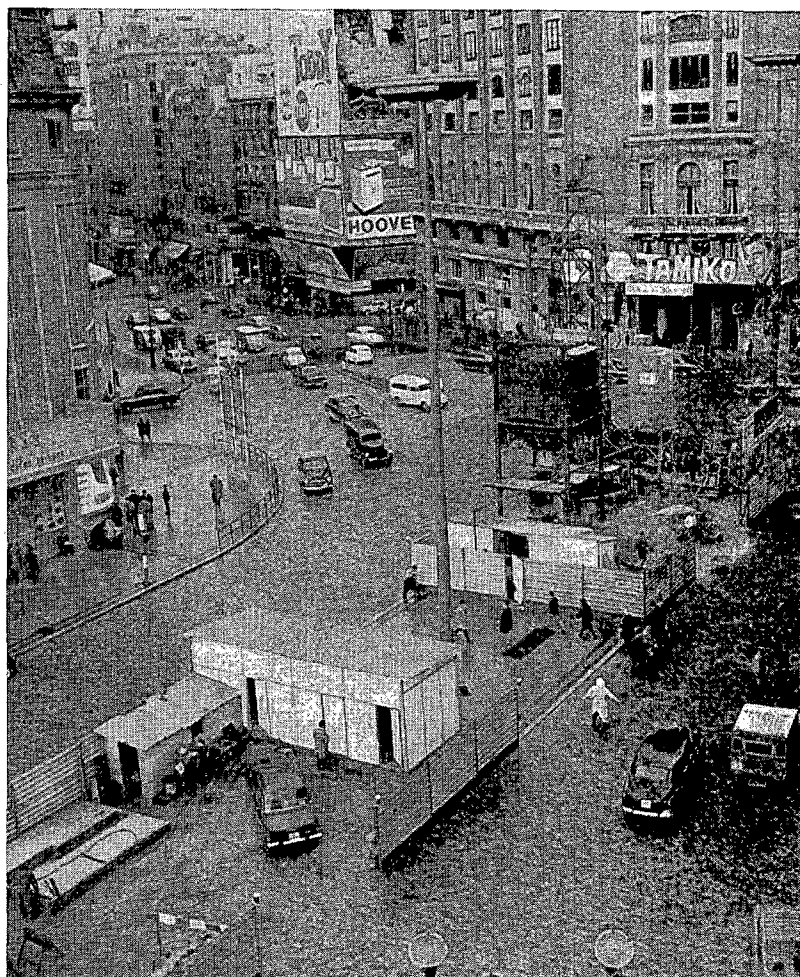
La misión de esta línea, aparte de empalmar, de unir zonas densamente pobladas de los arrabales de Madrid con el centro, es la de descongestionar la Puerta del Sol, ya de suyo sobrecargada por un tráfico muy intenso y por una concepción en lugar de recticular, de trazado centralizado como los dedos de una mano. Esta línea tiene correspondencias numerosas con casi todas las líneas en explotación y sin embargo, pasa por zonas muy céntricas, dando de lado al centro neurálgico y sobrecargado de la Puerta del Sol.

La longitud de las estaciones es de 90 m. y su anchura libre es de 14. Tienen dos andenes de 4,25 m. de anchura, secciones que se adjuntan tanto de túnel como de estación, y son clásicas de herradura.

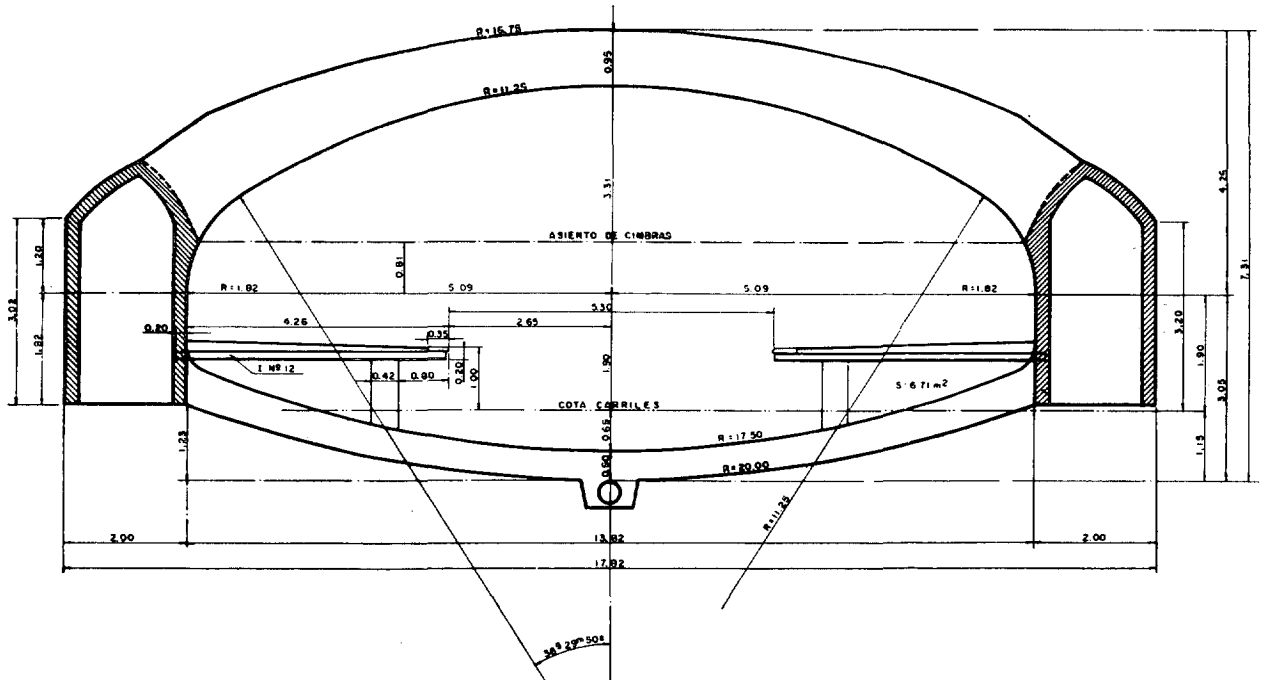
Características principales de la línea son:

Pendiente máxima	0,041	
Número de curvas	21	
Radio máximo	1 200	m.
Radio mínimo	90	»
Longitud total de estaciones	900	»
Longitud del túnel, salvo estaciones	5 880	»
Distancia entre hastiales en túnel	6,86	»
Distancia entre hastiales en estaciones	13,82	»

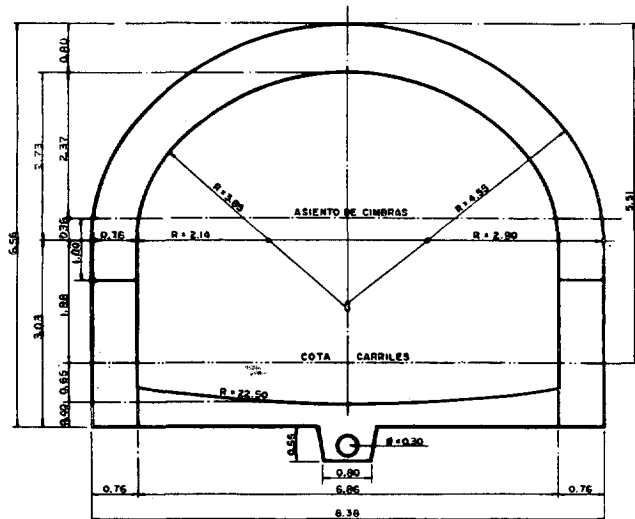
Pozo de trabajo de Callao. Instalaciones de tolva, silos y compresor.

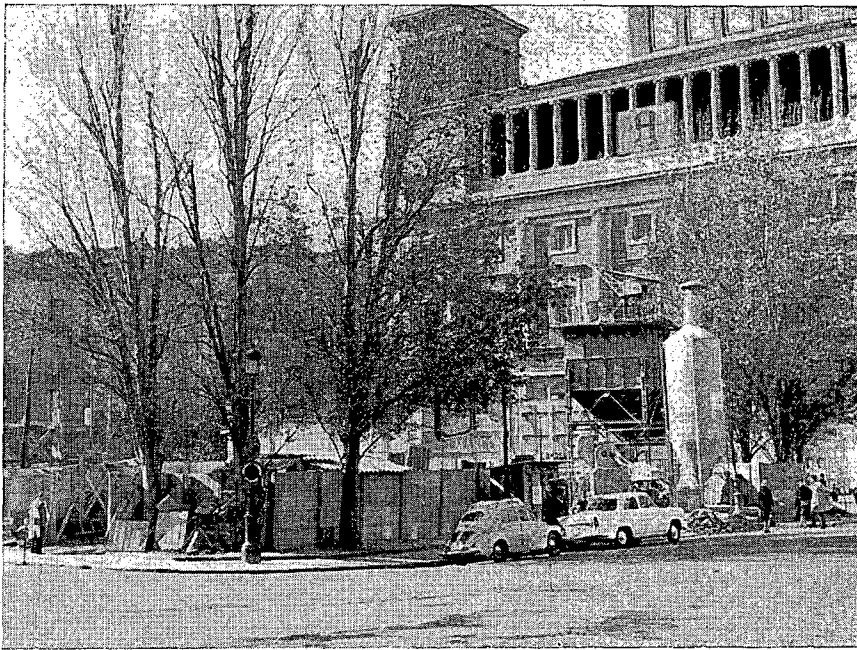


SECCION DE ESTACION

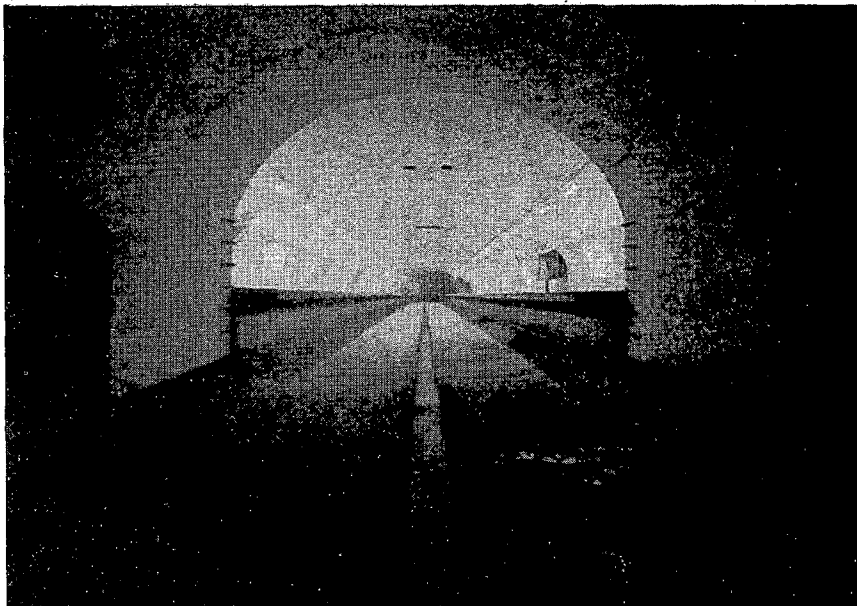


SECCION DE TUNEL

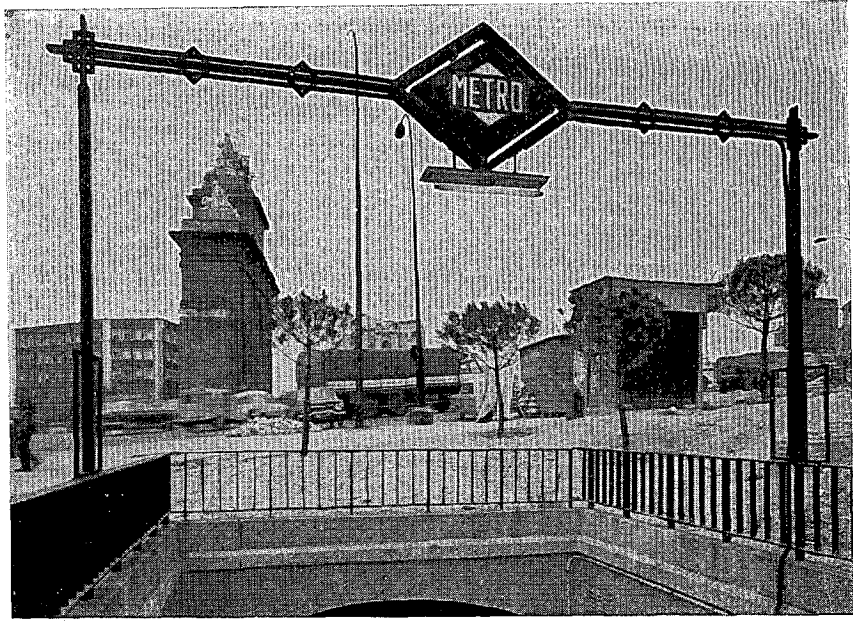




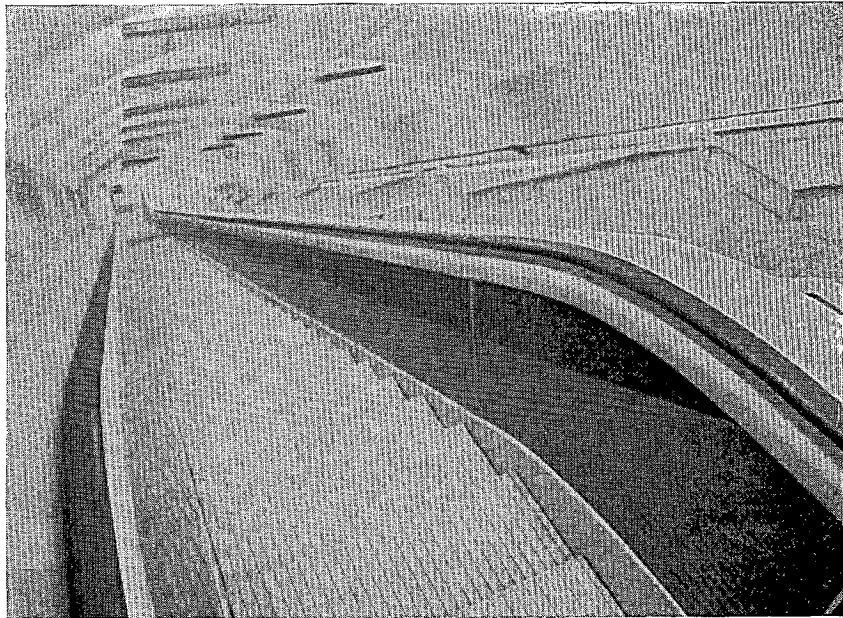
Instalaciones en la plaza de Isabel II.



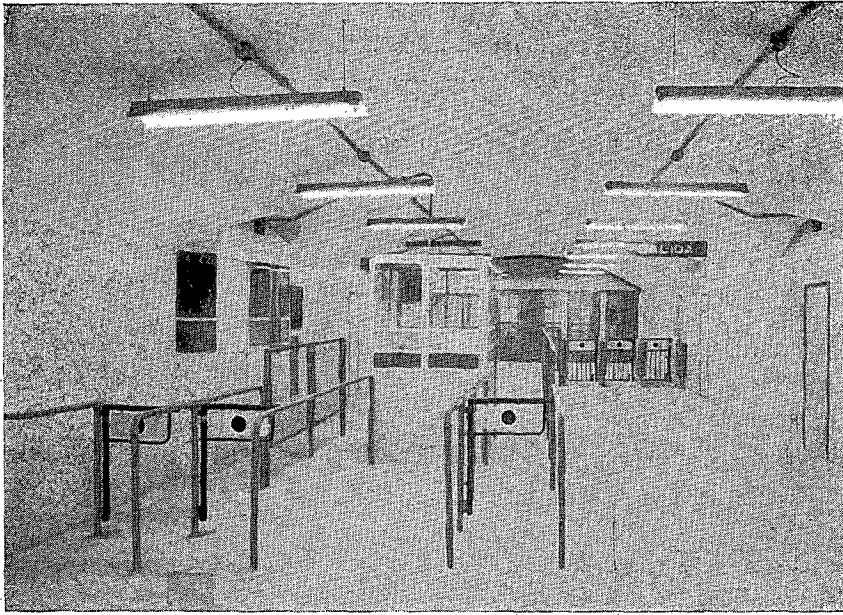
Túnel terminado.



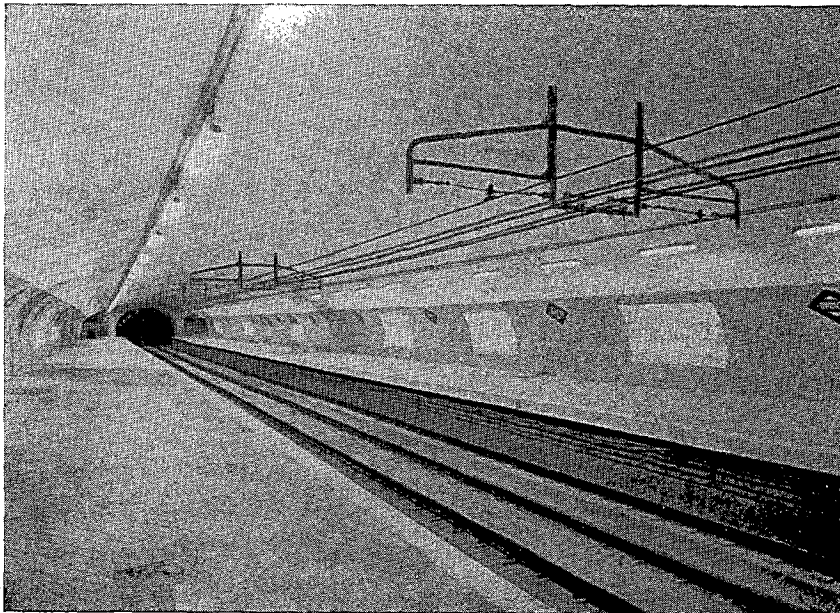
Acceso Puerta de Toledo.



Escaleras mecánicas de la Latina. Un tramo.



Vestibulo estación.



Estación de Oporto.

Las cantidades ejecutadas de las principales unidades son las siguientes:

Excavación de tierras	586 000 m. ³
Hormigones	182 000 m. ³
Taladros p./inyecciones	66 500 ml.
Inyecciones de cemento	58 000 Tm.
Perforación p./inyecciones químicas	26 000 ml.
Inyecciones químicas	48 000 Hl.

También adjuntamos perfiles longitudinales de la obra.

La ejecución de esta obra fue llevada a cabo bajo la dirección de la 1.^a Jefatura de Construcción de la Dirección General de Transportes Terrestres del Ministerio de Obras Públicas y fue ejecutada por la Empresa Dragados y Construcciones, S. A.

En dicha obra se invirtieron unos cinco millones de horas de trabajo y se emplearon técnicas similares a las utilizadas en los Suburbanos de París, Milán y Londres, que trabajaban simultáneamente al nuestro de Madrid.

El subsuelo que se ha atravesado en la construcción de estas líneas ha sido, primero en la parte superior, desde Callao hasta Opera, de arena con un poco de arcilla; de Opera hasta la Puerta de Toledo hemos ido, salvo el principio de arenas con agua en la calle Escalinata, todo el túnel ha transcurrido por arcillas arenosas marrones. Algo más abajo de la Puerta de Toledo hemos atravesado las arcillas verde-azuladas que comienzan a ser margosas. En la estación de Acacias nos encontramos, como luego veremos, con horizontes calizos, e incluso con vetas de sílex. El cruce del Manzanares se realiza con arenas aluviales del Cuaternario. Nuevamente y hasta antes de Urgel nos hallamos en arcillas verde-azuladas. De Oporto a Vista Alegre hay arcilla marrón y hacia Carabanchel se rozan las arenas arcillosas.

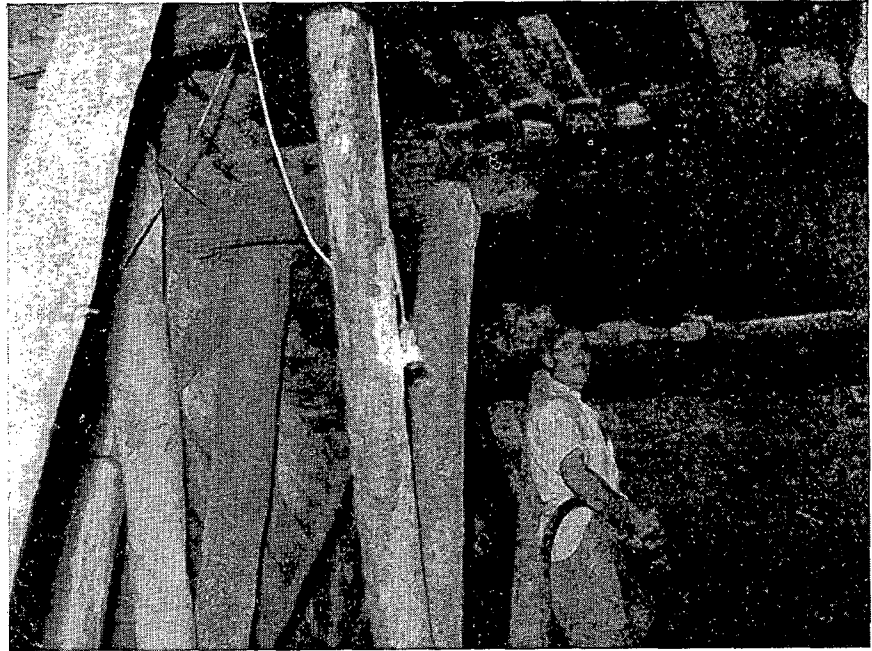
Capítulo II.—PROCEDIMIENTOS DE EJECUCION.

Hemos empleado fundamentalmente cuatro procedimientos de ejecución, de los cuales los dos primeros son los normales en la obra, bien sea de túnel de vía doble o de estación. Los otros dos procedimientos son especiales y corresponden al cruce de capas freáticas o al cruce con el río Manzanares. Estos dos últimos van a ser tratados en unos capítulos diferentes. Aparte hemos realizado algunas variantes en el caso de cruce bajo edificaciones, lo que era preciso al ejecutar previamente hastiales.

En este capítulo vamos a tratar, como hemos dicho, de los procedimientos normales de ejecución de túnel y estación con los equipos de maquinaria y medios auxiliares que se emplearon.

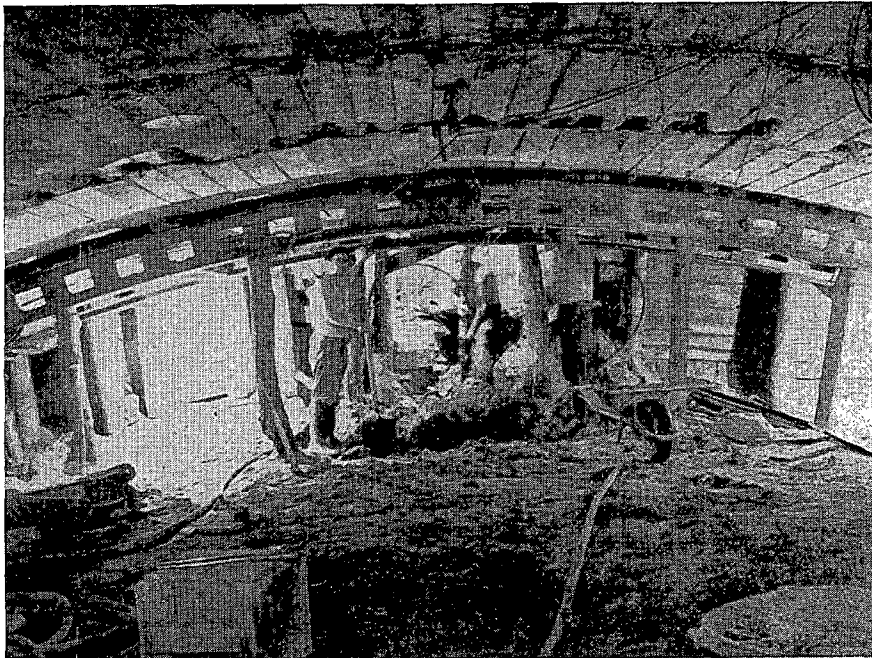
Sección normal del túnel.

La sección normal del túnel era excavada habitualmente por el procedimiento belga. La parte superior se excavaba a mano ayudados por martillos neumáticos de 9 Kg., provistos de piqueta. La entibación que se hacía era de madera por procedimiento clásico. Primero se excavaba la galería de avance; a continuación el ensanche, siendo la profundidad del anillo 2,50 m.; concluida la excavación se encofraba por medio de cimbras y de tablonés el anillo y se hormigonaba con bomba neumáti-



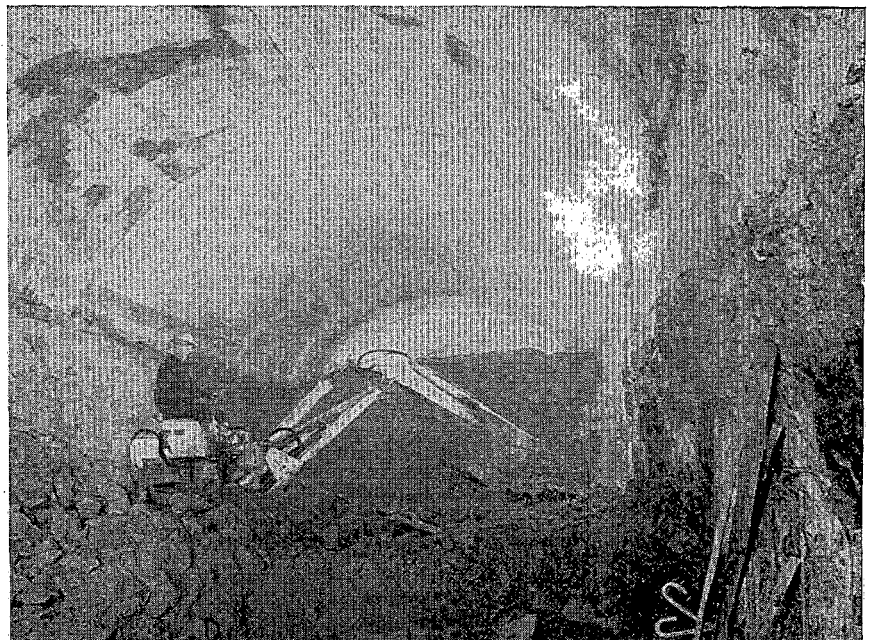
Excavación parte superior y entibación.

Encofrado en estación y al frente galería de avance.





Bomba de hormigonado y cinta de extracción.



Excavación de destroza.

ca. Se disponía en cada tajo de un compresor eléctrico de 125 CV. que daba aire, tanto a la excavación, como a la bomba de hormigón.

Tras de la parte superior venía la excavación de la parte inferior. La destroza era ejecutada por una excavadora John Deere de 52 CV. provista de equipo de retro. Simultáneamente hacía la excavación por puntos de los bataches siendo éstos de 2,50 y apoyando cada uno dos mitades de dos anillos. El rendimiento medio de avance en la parte superior fue de 40 m. mensuales y el máximo de 62,5 m. en un mes. En la parte inferior el rendimiento medio fue de 100 m. mensuales y el máximo de 140 m.

No se comenzó la excavación de la parte inferior hasta haber perforado totalmente la parte superior en cada tajo. Al avanzar el hormigonado en la parte superior se perdía el forro de madera de la entibación para lo cual y asimismo para evitar huecos posibles, se procedía a un taladro de la bóveda con diversos orificios por los que se inyectó en sucesivas pasadas, lechada de cemento a baja presión, es decir, a un máximo de dos atmósferas. Así se consiguió colmatar estos huecos, evitar la putrefacción de la madera que queda en un ambiente de humedad constante, y evitar los asientos que se producirían de quedar los huecos vacíos.

La solera era hormigonada, o bien posteriormente a la destroza y bataches, o levemente retrasada respecto a ésta.

Como medios de transporte horizontal dentro del túnel se emplearon primeramente cintas de 15 m. dispuestas en cascada, y posteriormente fueron desplazadas por el uso de pequeños dumper de medio m.³ que se movían con gran agilidad dentro del túnel.

Como medios de elevación se emplearon en las zonas profundas skips de 8-10 m.³/h. El cubo del skip volcaba automáticamente en superficie sobre la tolva. Sin embargo, este procedimiento frenó el avance de la destroza. En las zonas más superficiales se dispuso de rampas de 32° provistas de cintas de 500 ó 700 mm. de ancho de banda y con un gran motor sobredimensionado que las capacitaba para subir hasta 30 m.³/h. Antes de las cintas se disponían otras más grandes que actuaban de alimentadores y sobre las que con una pequeña tolva, volcaban los dumper antes citados. El final de estas cintas era la tolva de superficie.

Para el transporte a vertedero se empleaban camiones de 20 Tn. En invierno y con las lluvias fue preciso preparar los vertederos con una motoniveladora para el vertido de tierras y para que no se tuviese que detener el trabajo en el túnel.

Los frentes de ataques solían ir uno en cada estación y uno intermedio. La sección de estación se realizó de un modo diferente. Primeramente construimos los estribos haciendo galerías recubiertas de ladrillo a media altura, en toda su longitud. Después en una segunda fase se rebajaban estas galerías hasta alcanzar toda la altura del estribo. Una vez terminado se hormigonaba totalmente el interior de las galerías quedando macizos todos los pies derechos de la estación. Es entonces cuando se comenzaba a excavar por el mismo procedimiento clásico del túnel, la galería de avance y el ensanche en la parte superior de la sección de la estación. La entibación de madera era clásica y se diferenciaba de la del túnel, aparte de su profundidad que era de 2 m., en su mayor ancho.

Antes de hormigonar cada anillo de bóveda se rompía la parte de ladrillo que correspondía a su asiento, para que dicha bóveda se apoyase directamente sobre el hormigón de los estribos. Posteriormente se realizaba la destroza de la estación teniendo en cuenta que en este caso los bataches estaban ya hechos.

El objeto de este sistema es dar un apoyo previo a la bóveda, pues, debido a su

gran luz serían de temer los asientos en la misma que podían provocar su ruptura. El avance desarrollado era de un anillo de 2 m. cada dos días, es decir, de unos 20 a 25 m. de bóveda por frente y mes. Los medios de trabajo eran iguales a los descritos en la sección de túnel.

Un sistema parecido al de estación se empleaba en algunos casos especiales bajo edificios en la sección del túnel normal. Se procedía previamente a la ejecución de los bataches antes que de la bóveda, así cuando se acometía ésta bajo algunos edificios, se apoyaba directamente sobre los estribos de hormigón.

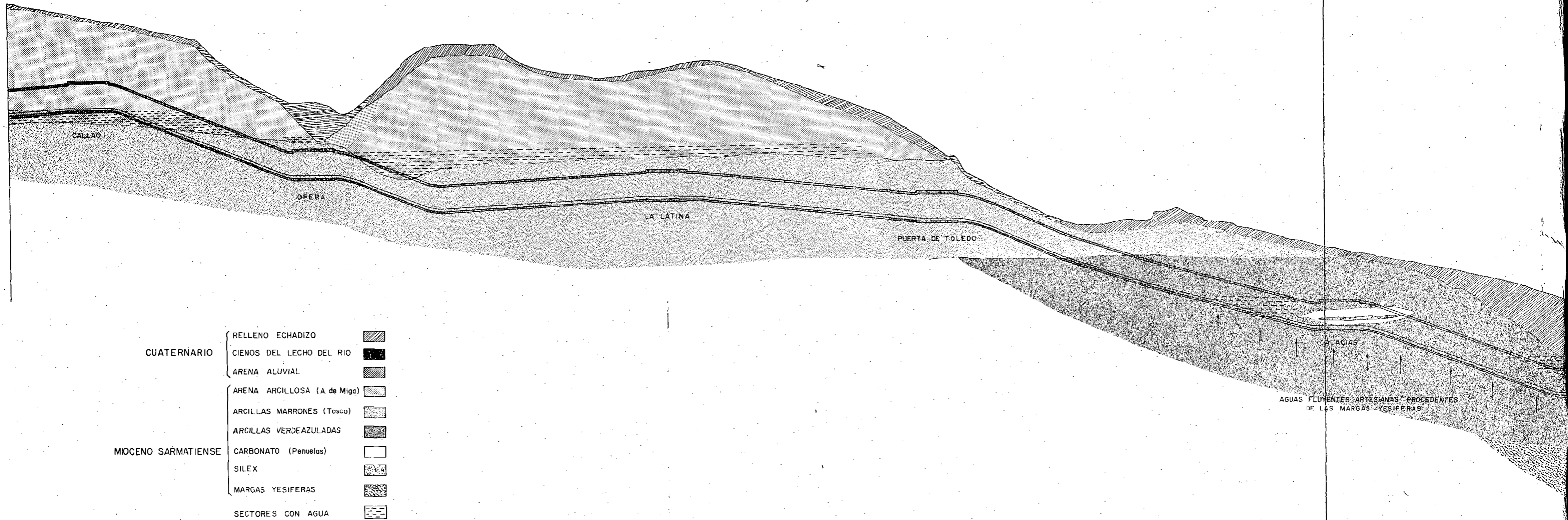
Capítulo III.—INFORME GEOLOGICO.

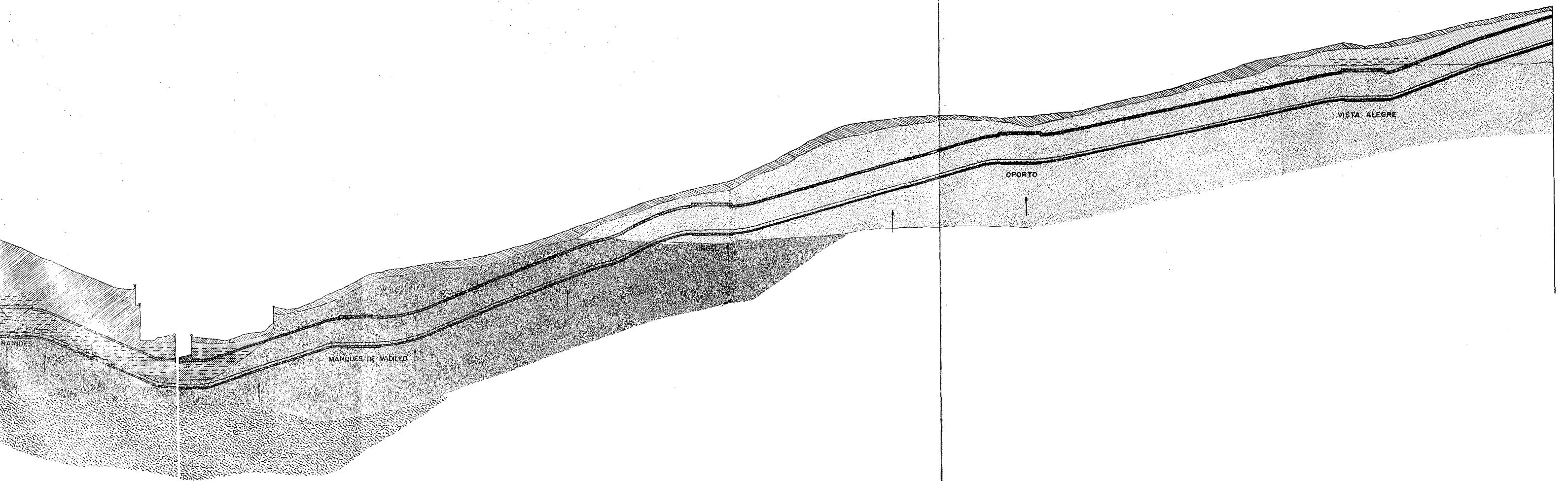
Diversos informes geológicos se han realizado a lo largo del transcurso de las obras desde su proyecto hasta su terminación. Para proceder al proyecto se solicitó por parte del Ministerio de Obras Públicas un informe al Servicio Geológico de dicho Ministerio, que fue realizado por el Ingeniero don Antonio del Aguila. Dicho informe suministró una información muy importante sobre el subsuelo, aunque resultó no suficiente para las obras. En él se analizaron también los terrenos con los sondeos, pero no las aguas que se llevaban en estos terrenos. Se hicieron determinaciones de las capas freáticas durante bastantes meses, previos a la ejecución total del proyecto.

Posteriormente, al cabo de unos meses del comienzo de las obras fue preciso cambiar el longitudinal profundizando la estación de La Latina para evitar el desvío importante en 700 m. de una gran arteria del Canal de Isabel II, metida dentro de una galería a unos 14 m. de profundidad. También era razón de peso la inestabilidad de las arenas en esta zona que había provocado a lo largo de siglos, daños en las cimentaciones de sus viejos edificios. Dado que en la profundización el longitudinal se cruzaba con capas freáticas, se pidió al mismo Servicio y al mismo Ingeniero antes citado, un informe complementario de las profundidades superiores a las anteriormente por él sondeadas. Como consecuencia de este informe la línea se profundizó entre la estación de Opera y la de Puerta de Toledo, metiendo o profundizando el túnel en las arcillas a 3 m. bajo la capa de agua, y reduciendo el problema de su cruce a la mínima zona que quedó concretada al sector de la calle Escalinata a la Plaza de Comandante de las Morenas.

Pequeño encuentro con la capa freática también lo era la zona de la calle de Campomanes, entre Callao y la Plaza de Opera. El tercer informe geológico se realiza al cabo de año y medio de comenzar las obras, pues, la aparición de sales en los hormigones constituyó un aviso sobre posibles ataques. Además un conocimiento geológico más profundo, como consecuencia del desarrollo de los trabajos, nos avisó de la presencia de aguas que afloraban en el túnel, procedentes de capas inferiores que analizadas arrojaron unas cantidades que alcanzaban los 2 gr./l. de ión sulfato y los 0,2 gr./l. de ión magnesio. La combinación de ambos iones es profundamente agresiva para el hormigón, por lo cual se encargó al Servicio Geológico un informe nuevo para sondear los terrenos analizando el agua que se encontraba en los mismos, y también *a posteriori*, se solicitó la opinión del Instituto Eduardo Torroja, sobre la posibilidad de estos ataques de aguas agresivas y las soluciones a tomar en obra.

Creemos que es interesante recordar aquí brevemente el corte geológico que se encuentra en los estratos del subsuelo de Madrid. Según la clasificación más usual y que parece consagrada por la mayoría de los autores que han estudiado el subsuelo de nuestra ciudad, vamos a dar dicho corte desde su parte superior a su parte inferior dentro de los espesores en que se mueven nuestras obras subterráneas.





MARQUES DE VADILLO

OPORTO

VISTA ALEGRE

En la parte superior se encuentra una capa de una potencia de 25 a 30 m. de arenas, más o menos arcillosas, conocido en Madrid por arena de miga. Bajo ella se halla un estrato de arcillas algo arenosas marrones, denominada comúnmente tosco y que alcanza profundidades bajo la capa de arena que oscilan entre los 20 y 25 m. El estrato inferior que le sigue está formado por arcillas margosas verde-azuladas de 30 a 40 m. de profundidad que presentan lentejones excepcionalmente de carbonato y de sílex. Estas arcillas margosas se encuentran fracturadas. Debajo nos encontramos con unas margas yesíferas que se incrustan en vetas alternadas con la capa superior de unos 2 m. de espesor y que más abajo alcanzan profundidades superiores a los 20 m.

Aparte de estos estratos que hemos descrito nos encontramos en las orillas del Manzanares con arenas del Cuaternario, con una permeabilidad superior a 10^{-3} cm./seg. y que hoy siguen depositándose por la descomposición de los granitos de la sierra próxima a Madrid. También nos hemos encontrado con rellenos recientes de un siglo y hasta de dos siglos de antigüedad, citaremos el de la Plaza de Isabel II que fue ejecutado por orden de José Bonaparte al urbanizar la misma, así como el relleno de la Plaza de las Pirámides realizado al construir el Puente de Toledo, bajo el Rey Felipe V que le hizo exclamar al Embajador francés: "O venden Vds. puente, o compran Vds. río". En el primer caso las profundidades del relleno alcanzan más de 10 m. y en el segundo sobrepasan los 20. Diversos rellenos superficiales encontramos en la calle de General Ricardos, con huellas incluso de la guerra, y en el desvío de alcantarillado de la calle de Toledo se encontraron enterramientos.

Dentro de estos estratos dos son las capas acuíferas que tienen importancia. La primera se encuentra en el contacto de arenas y arcillas, con un espesor de 2 a 4 ó 5 m. de profundidad y que lava las arenas, siendo su coeficiente de permeabilidad el de 10^{-5} ó 10^{-6} cm./seg. hasta por encima de 10^{-3} . El segundo nivel freático se encuentra en las margas yesíferas pero con la particularidad de que es un nivel artesiano. El agua a presión asciende a los estratos superiores aprovechando el que las arenas verde-azuladas margosas están fracturadas. Así, si bien éstas no tienen más que indicios de yesos, el agua que se encuentra en ellas es fuertemente agresiva, como luego veremos, hasta cantidades francamente altas. La presencia de estos niveles artesianos es de sobra conocida en Madrid, pues, con los sondeos de la Presa de El Pardo realizados en el año 39 y actualmente previos a la construcción a la presa que sobre el Manzanares se está ejecutando, hacían que de las capas inferiores aflorase el agua en manantiales hasta el nivel del río. También en el informe geológico previo a este proyecto, a la altura del Puente de Praga se localizó el nivel freático artesiano en un sondeo en el que alcanzaba su altura la cota de dicho puente.

Debido a la topografía especial de Madrid, el Norte y Oeste en su parte superficial está constituido por las citadas arenas arcillosas. Como dijimos, en nuestra línea las cruzamos desde Callao hasta Escalinata. Las arcillas marrones constituyen una transición y las atravesamos desde la calle de Escalinata hasta la Puerta de Toledo. Todo el Sur y Oeste de Madrid presenta los afloramientos de las arcillas verde-azuladas y en la zona de Vallecas y parte inferior del río Manzanares se encuentran las margas yesíferas del estrato inferior. Ya dijimos que estas capas nos las encontramos en todo el resto de la obra desde Puerta de Toledo a Urgel, y la de las arcillas marrones hasta Vista Alegre, en que rozamos las arenas arcillosas.

Capítulo IV.—PROBLEMAS ESPECIALES QUE SE HAN PRESENTADO EN LA CONSTRUCCION DE ESTA LINEA DE METRO.

Este capítulo lo vamos a dividir en tres apartados:

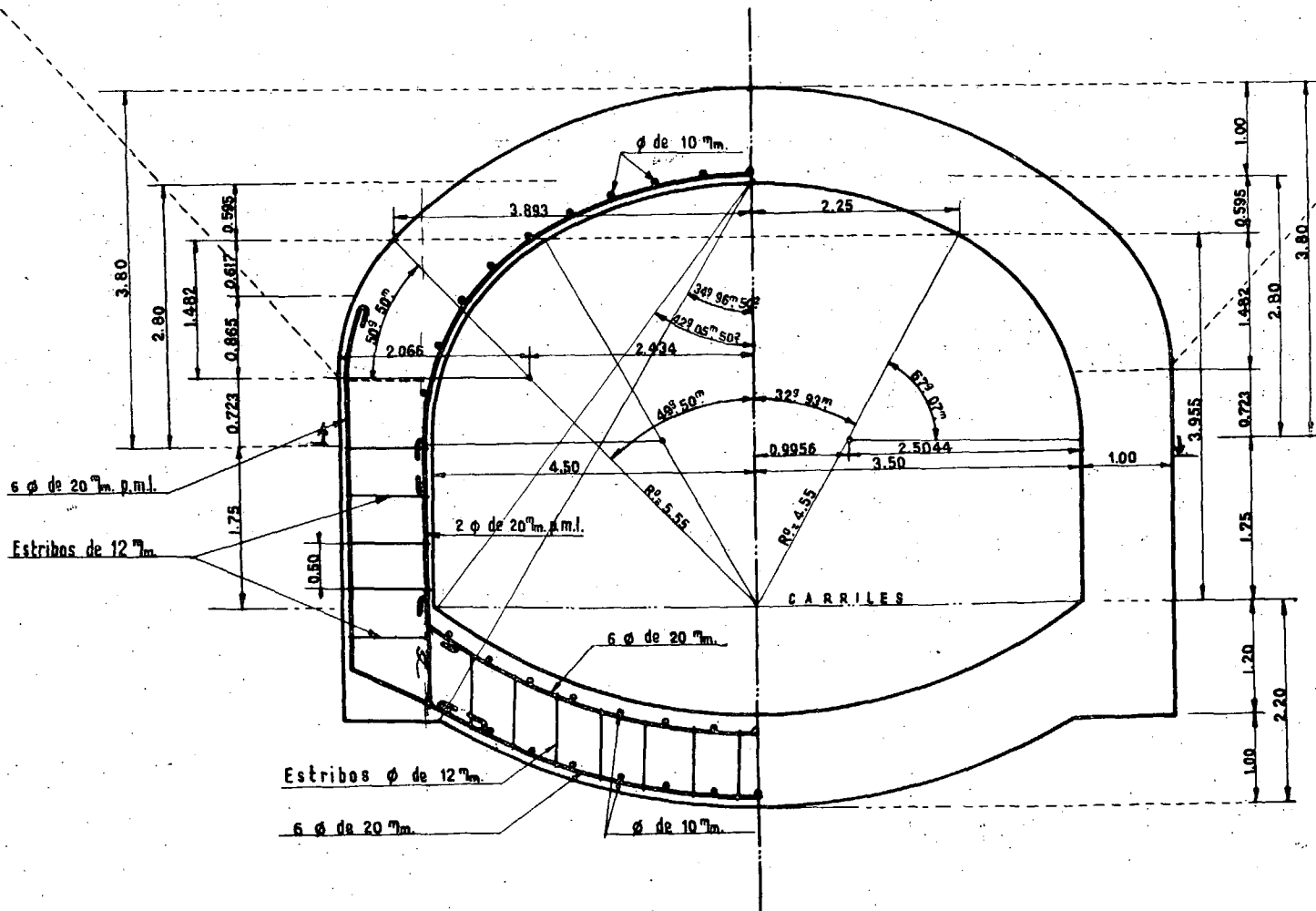
4.1. Cruce con el río Manzanares.

El cruce con el río Manzanares estaba previsto en el Proyecto hacerlo ejecutando primero los muros por medio de tablestacas hasta apoyarlos en las arcillas verdeazuladas. Después se haría la bóveda, extrayendo parte de las tablestacas, y por último, por dentro del túnel la destroza y la contra-bóveda de solera.

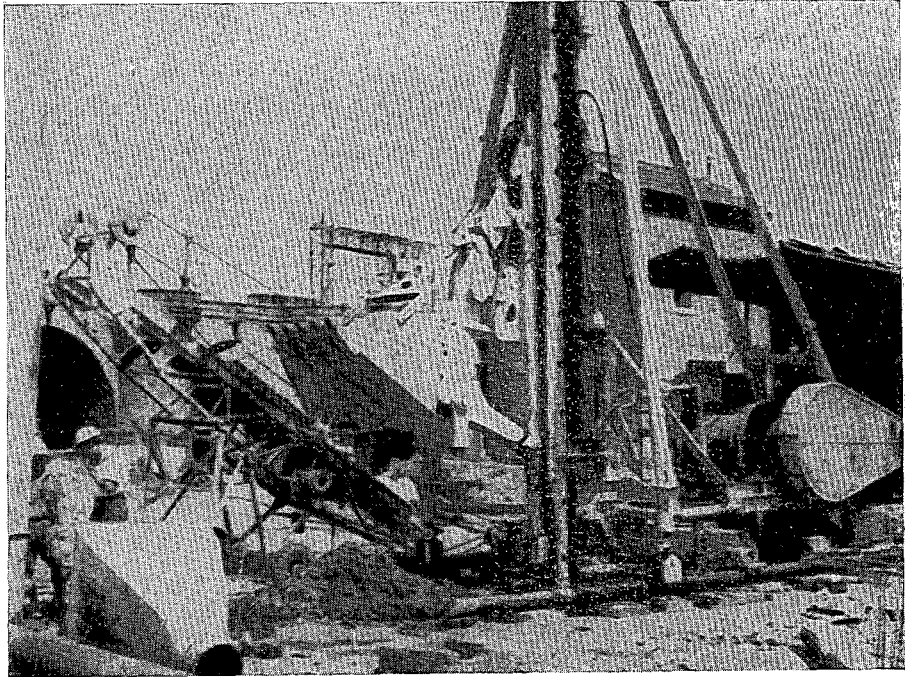
Antes de comenzar la obra conocimos las técnicas de la excavación sostenida con lechada de bentonita, empleadas en la Avda. Luis de Bruselas y que casi simultáneamente se ejecutaban en la Línea I de Milán. Así, pues, elegimos el sistema Else-Lorenz, una de las patentes de esta excavación, para hormigonar los hastiales del túnel. Esta decisión fue consecuencia de dos hechos. El primero es que los ingenieros de Canalización del Manzanares que habían trabajado en el río y especialmente nuestro compañero Juan Herrera, tenían una mala experiencia del uso de las tablestacas. El segundo hecho fue el éxito de este sistema en otros países y en una obra en España, la de un azud construido en el complejo de Mequinenza. Pero primero procedimos a ejecutar cuatro pantallas de prueba de las cuales el Instituto Torroja extrajo muestras de hormigón *in situ* que dieron resistencias características superiores a las pedidas en el Pliego de Condiciones de la obra para los hastiales del túnel. La rapidez de ejecución de los estribos nos permitió concluirlos en un verano y hacer la bóveda bajo el río, previos los desvíos del mismo. Efectivamente, para poder trabajar la máquina excavadora de los hastiales hicimos un canal de desvío del río fuera de sus muros de encauzamiento y terraplenamos el cruce de nuestro túnel entre los dos muros. Terminados los estribos y su hormigonado procedimos al vaciado de la zona de la bóveda, sosteniendo el agua con bombas a ambos lados de nuestros bataches. Delante del hormigonado de bóveda se aplicaba una capa de resina epoxi para el pegado de la misma con los bataches. Previamente se picaban éstos para dejar el hormigón sano en contacto con el de la bóveda. Antes de cubrirla se le dio un tratamiento de resina epoxi; una vez cubierta se terraplenó y se volvió el río a su sitio. Hicimos las bóvedas de las márgenes cuyos hastiales estaban hechos por el mismo procedimiento y luego por debajo se llevó a cabo la destroza y solera en contra-bóveda.

Hemos de notar como curioso el que los hierros sobresalientes de los bataches del hormigón los curvábamos para enlazar con la bóveda y así mismo que las armaduras en el estribo estaban dobladas para que después de la destroza fuésemos picando un poco del hastial en su parte inferior, extrayendo del mismo los hierros que enlazaban con la solera enderezándolos y recibéndolos con el hormigón de la misma. En el interior del túnel las juntas fueron tratadas con el producto llamado Hermetic. Más de 3 000 m.² de bataches hormigonados por el sistema Else-Lorenz con un metro de espesor, fueron ejecutados por una sola máquina en unos tres meses. Este sistema se dio a conocer en España a todos los técnicos en sucesivas conferencias que se organizaron en una oficina al pie del mismo sitio de trabajo por la casa especialista.

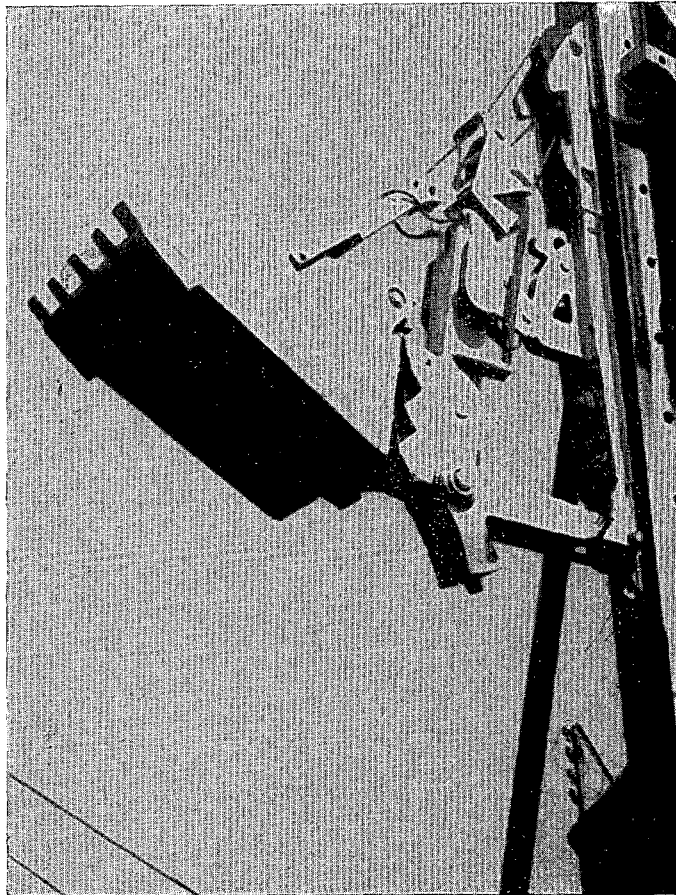
Ciertas dificultades se añadieron por el cruce de una arteria del Canal de Isabel II que pasa en una galería provista de un sifón cortando nuestro túnel, o mejor dicho que nosotros cruzamos con él. Hemos de agradecer la colaboración del Ca-



Sección del túnel en el cruce del río Manzanares.



Excavación de hastiales en el río Manzanares con el sistema Else-Loren.



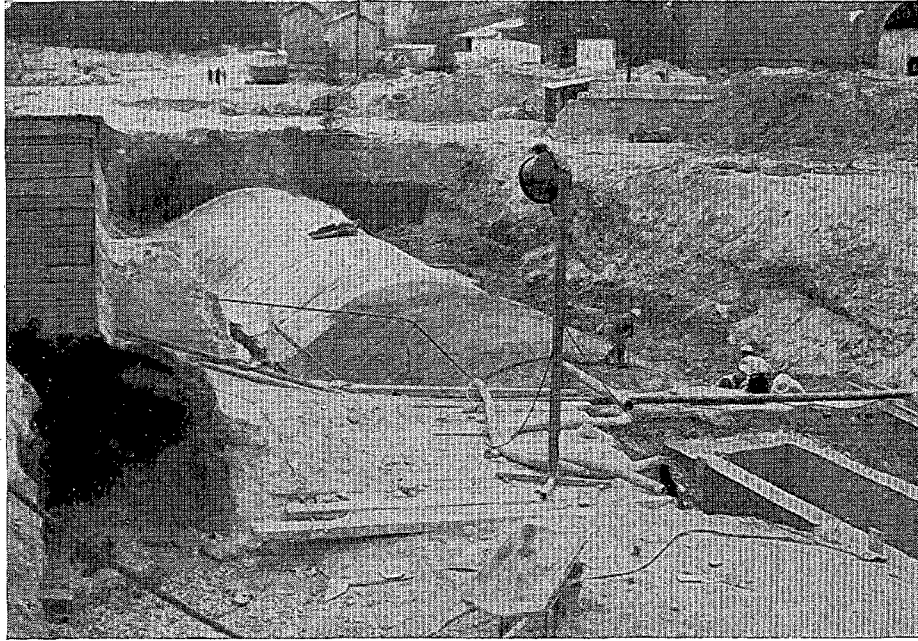
Excavadora Else-Lorenz.



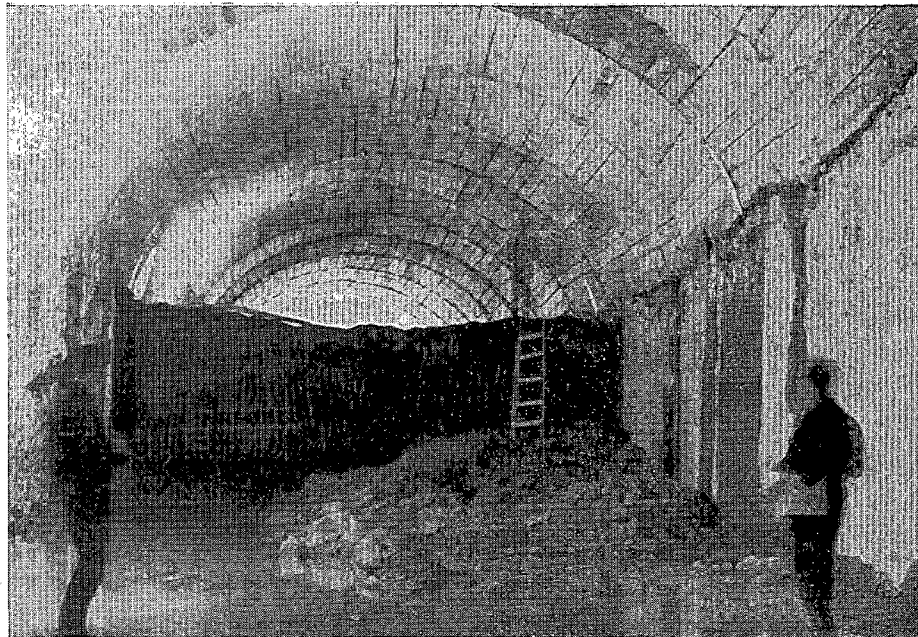
Encofrado de bóveda en el cruce con el río Manzanares.

Hormigonado de bóveda en el Manzanares.





Acabado del túnel del Manzanares.



Destroza bajo el río Manzanares. Por las huellas de los dientes de la excavadora se aprecia la dureza del terreno.



Túnel bajo el río, terminado. Se ven los hastiales excavados con el sistema Else-Lorenz en el primer plano.

nal de Isabel II y la Canalización del Manzanares, y en especial, la de nuestros compañeros Jesús Arcenegui, Antonio Renedo y Juan Herrera, cuyos conocimientos del problema nos fueron muy útiles.

4.2. *Agresividad de las aguas conteniendo sulfatos.*

Como hemos dicho, desde la Puerta de Toledo hasta Carabanchel nos encontramos con aguas procedentes del estrato inferior con contenidos de sulfatos que alcanzaban el máximo en la estación de Pirámides hasta de 2 gr./l. de ión sulfato y hasta de 0,2 gr./l. de ión magnesio.

Debido a nuestro contacto en la cátedra de Materiales de Construcción en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, con el especialista del Instituto Eduardo Torroja, don Francisco Arredondo, mantuvimos una estrecha colaboración con su equipo en el Instituto Eduardo Torroja. Hemos de agradecer el trabajo que llevó a cabo el Dr. en Química señor Soria, así como los trabajos realizados por el Dr. Calleja y el Dr. García Paredes que nos dieron toda su experiencia sobre este problema, bajo la dirección del Ilmo. Sr. D. Juan Batanero.

El conocimiento de la norma alemana oriental sobre el ataque de sulfatos nos fue muy útil, así como el estudio que conjuntamente don Francisco Arredondo y el señor Soria nos hicieron, comparativo del comportamiento de distintos cementos a un ataque agresivo empleando los sistemas conocidos que permitiesen prever el comportamiento de los hormigones ante dichos ataques.

Como un anejo figura este estudio comparativo de cementos. Como consecuencia de este estudio comparativo de los cementos ante el ataque de los iones sulfato

Y magnesio comprobamos que la muestra de cemento puzolánico se comportaba tan mal como la de cemento Portland. La muestra de cemento de escorias resistía bien los iones sulfatos, pero se desmoronaba ante el ataque del ión magnesio. Sólo el cemento tipo PAS resistía bien para nuestro caso. De ellos elegimos el tipo Sulfadur, muy conocido tanto en España como en Alemania, y que tiene acreditada su resistencia ante este tipo de ataques. Es cierto que las muestras que enviamos pudieran no ser representativas totalmente, pero nos atuvimos al único cemento puzolánico que había próximo a nuestra zona centro de Madrid, y como repito, unimos al resultado del estudio, el resultado de las experiencias durante bastantes años en las obras realizadas en España en zonas yesíferas. En esta opinión participó tanto el Instituto Eduardo Torroja, como el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas. Posteriormente, el Instituto Eduardo Torroja para los nuevos Proyectos de Metro a dado un informe que difiere de estos resultados, defendiendo las propiedades del cemento puzolánico. Lo cierto es que en nuestro caso no dio un resultado aceptable.

En toda la zona afectada, es decir, en la zona que cruzábamos de arcillas verde-azuladas, cambiamos el cemento Portland por el Sulfadur, y esto lo hicimos no sólo en los hormigones, sino también en las inyecciones de cemento.

4.3. Problemas encontrados en el cruce de capas freáticas.

Aquí nos referimos al primer nivel freático del que hablamos en el estudio geológico que se encuentra en el contacto de las arenas arcillosas con las arcillas marrones. Este problema lo tuvimos localizado en dos puntos, en lo que respecta al túnel, en otro punto para descender con las escaleras mecánicas, y por último, en un cuarto punto se trató con la capa freática del río Manzanares. Vamos a ver uno por uno estos casos.

En el primer caso nos hallamos bajo la calle Campomanes y bajo edificios, y sobre todo, en la zona del pozo de ataque que hicimos al lado del aparcamiento de Santo Domingo. Aquí la capa freática que aparece a un metro o metro y medio bajo nuestra solera de Callao va descendiendo y se pierde hacia la estación de Opera, porque hemos comprobado que baja por la zona de la calle de la Cuesta de Santo Domingo y no hacia Opera como creíamos. Su camino se puede seguir por la presencia de edificios agrietados que terminan en la Plaza de Oriente. El problema en nuestro caso no fue grave por dos razones. La primera es que la permeabilidad de la arena era del orden de 10^{-4} cm./seg., y por ello, la cantidad de agua que se tenía al excavar no era muy grande. La segunda porque la capa de agua nos cogía bajo la cota de asiento de cimbras, permitiéndonos cómodamente realizar la parte superior del túnel, mucho más difícil de hacer cuando se encuentra en ella misma el agua. Así pues, ningún medio en especial empleamos, salvo el forro con madera de todos los bataches, que se quedó perdido al hormigonarlos. Asimismo, aumentamos la dosificación del hormigón, y una vez terminado el túnel completamente inyectamos en varias pasadas, no sólo la bóveda, sino los hastiales y solera también. Tras de estas inyecciones hicimos un tratamiento de juntas con productos Sika.

El segundo punto se halla bajo la calle de Escalinata en su parte final, mejor dicho, en su comienzo de numeración y entre los callejones de Mesón de Paños y Bonetillo. Se trata de unos 100 m. de longitud de túnel entre Escalinata y la plaza de Comandante de las Morenas. Hicimos que el trazado del túnel desde la plaza de Isabel II descendiese a la máxima pendiente permitida, con objeto de evitar este contacto con la capa acuífera al máximo. Pero en estos 100 m. de túnel en

arcillas marrones nos cogía del lado de Opera la sección hasta asiento de cimbras en arenas cargadas de agua, y del lado de Comandante de las Morenas esta arena quedaba unos 30 cm. más alta en la sección del túnel, pero el agua se abría camino e irrumpía en el túnel en grades vetas. Era preciso no permitir el drenaje, puesto que al caer arrastraba consigo un 40 por 100 de arena. Y así lo hicimos, no fue preciso el empleo de bombas en el túnel. Al llegar allí conocíamos el problema y estábamos preparados para él con los correspondientes ensayos. Hicimos un pozo de ventilación que luego fue preciso cerrar, en la calle de Escalinata, en su comienzo. En él, por medio de bombeo, determinamos la permeabilidad de las arenas. Nos dio un coeficiente de 3×10^{-2} cm./seg. y habíamos hecho pruebas previamente del tipo de tratamiento a seguir. No obstante, encomendamos a dos casas especializadas cada uno de los frentes de trabajo. En uno de ellos, el de Opera, se ensayaron productos con nombres comerciales y cuya composición química desconocemos. En el otro, se hicieron inyecciones de silicato sódico y bicarbonato cálcico. Ambos forman un gel cuya velocidad de gelificación varía con el pH del agua, con la temperatura de la misma y, sobre todo, con la proporción que existe entre el bicarbonato y el silicato. Según la penetración de la muestra, tres tipos de geles se emplearon, geles de un cuarto de hora, de media hora y de tres cuartos. La presión de inyección estaba entre las tres y cuatro atmósferas. El sistema de trabajo era el siguiente:

Cerrado el frente con hormigón se inyectaban en unos casos cuatro coronas de taladros o cinco, batiendo un ancho superior en 2 m. al túnel y una altura también superior en la misma cantidad. Los taladros en el terreno quedaban separados en una cuadrícula de 0,75 m., y tenían una profundidad de 7,50 ó de 5 m. Se trataba, pues, de tres anillos en unos casos y de dos en los otros. El taladro hecho con supermartillo se envarillaba. Este varillaje se iba retirando de 30 en 30 cm. tras de colmatar esta profundidad. Una vez terminado un taladro se taponaba. Terminada la inyección química se hacían taladros de prueba para comprobar que no quedaban fallos en la zona tratada. Se abría el frente de hormigón y se excavaban dos anillos en unos casos y uno en otros, dejando siempre como resguardo un anillo por delante tratado. Rápidamente se excavaba y se hormigonaba, y con el segundo anillo, o en otros casos como hemos dicho con el primero, se volvía a cerrar el frente hormigonándolo. Antes de proceder a la inyección química se hacían unos taladros para inyectar cemento que impidiesen el que tuviesen que inyectar con gel los posibles agujeros que quedasen entre hormigón y terreno.

Este circuito de trabajo nos llevaba, por dos anillos o por uno, entre un mes y un mes y medio, así que podemos decir que nuestra velocidad de avance era de unos 7,50 m. por mes y medio uniendo ambos frentes. También tuvimos que interrumpir en dos ocasiones los trabajos para inyectar desde superficie al encontrarnos con que independientemente de nuestros trabajos había movimientos en la misma, cuyas causas comprobamos. Efectivamente, dentro del túnel se evitó todo asiento y la prueba de lo mismo la hicimos comprobando que el alcantarillado se conservó intacto durante los trabajos. El alcantarillado de la calle estaba encima de nuestro túnel a la mitad de distancia entre las casas y el túnel. Pero al ir a inyectar en superficie, previa rotura del pavimento para reconocer servicios, encontramos tres acometidas de alcantarillado en estado ruinoso, produciendo unos socavones y enviando todas sus aguas sucias al terreno. El estado de estos socavones indicaba que su historia era superior a más de diez años. Levantamos acta notarial de los mismos y procedimos, de acuerdo con los servicios del Ayuntamiento, a su repara-

ción. El estado de abandono de estas edificaciones, en su mayoría alquiladas, y de sus desagües y servicios, provoca dos o tres roturas anuales a las tuberías del Canal de Isabel II, y éste fue uno de los casos.

Para evitar el daño que producían en las tuberías, el Canal tomó la medida de meterla en galerías registrables. Estas acometidas son difíciles de localizar porque a veces vienen desaguando edificios cuya fachada da a otras calles y no las hubiésemos encontrado si no hubiese sido por la rotura del pavimento, previa a las inyecciones. En todo caso, cortamos unos movimientos que se producen en todo este viejo Madrid, debido a su capa freática y a su estado ruinoso de abandono. Más de la mitad de los edificios de todo el viejo Madrid se encuentran agrietados y, en algunos casos se sostienen por apoyarse unas casas en otras, como varias del trazado, de las que levantamos la pertinente acta notarial antes de comenzar las obras, incluyendo unas cuantas de la calle Escalinata.

Terminado el proceso de excavación de esta parte del túnel procedimos a la destroza, habiendo antes previamente hecho los bataches por puntos desde el túnel, con lo que la obra tras la solera quedó terminada sin que tuviésemos una vía de agua.

El punto tercero, en que nos encontramos agua, corresponde a las escaleras mecánicas de la estación de La Latina. Dicha estación se encuentra a 28 m. de profundidad bajo la superficie en su cota de carriles. El subsuelo en que se aloja esta estación es el estrato de arcillas marrones, y a unos 12 m. de la superficie, todos estos metros en arena de miga, se encuentra la capa freática de unos 4 m. de espesor. Era preciso descender con el túnel de escaleras mecánicas, atravesar las arenas con agua, e incrustar dicho túnel en las arcillas marrones. Para ello nos vimos forzados a consolidar e impermeabilizar las zonas de terreno en las que ejecutábamos tanto los bataches como la bóveda de dicho cañón de escaleras. Este cañón tiene dos tramos, y en el descansillo intermedio nos comenzó la aparición del agua. Tratamos las arenas de la capa en que estaba el agua. El mismo procedimiento utilizamos que en el caso de la calle de Escalinata, es decir, la inyección del gel de silicato sódico y bicarbonato cálcico. El estribo izquierdo, según descendíamos, quedaba debajo en vertical del actual teatro de La Latina. El éxito del tratamiento fue total y no tuvimos la suerte de que se cayese una corista al túnel.

Por último, el cuarto punto en que nos encontramos agua en mucha cantidad fue en la zona de túnel bajo la plaza de las Pirámides, ya hemos hablado de que el Puente de Toledo fue realizado durante los años del reinado de Felipe V, entre 1717 y 1735. La cota de relleno en la plaza de las Pirámides es de 21 m. Este relleno se apoyó sobre las arenas de las márgenes del río, arenas del Cuaternario, incluso de nuestros días, procedentes de la descomposición del granito en la sierra de Madrid. Su coeficiente de permeabilidad casi alcanza los 10^{-2} cm./seg. El relleno está contenido por los muros complementarios a la obra del puente. Dichos muros pudimos comprobar que tenían una cimentación de madera que, pese a estar dos siglos enterrada y debido a la humedad uniforme en que se hallaba, se encontraba en perfecto estado. Al ser extraída por nosotros, al cabo de unos meses, se descompuso. La sección del túnel pasa bajo los muros de contención de la plaza de las Pirámides, quedando los hastiales metidos en la arena con agua y parte incluso de su bóveda. Hay que darnos cuenta que el terreno en que el túnel se apoya es exactamente el mismo del que hemos hablado al referirnos al cruce con el río Manzanares. Imposible hubiese sido el extrapolar a esta zona la técnica de excavación por medio de lodos bentoníticos sin destrozar estos muros que tienen un va-

lor histórico y real indudable. Así pues, el mismo mal terreno y las mismas dificultades de cimentación subsistían, con la diferencia de que sobre él gravitaban 20 metros de relleno echadizo.

Comenzamos excavando la bóveda con una sección especial armada para resistir los empujes del relleno. Inútil fue intentar hacer los bataches desde la parte superior del túnel por un procedimiento normal. Al primer intento la excavación se cerraba fluyendo la arena con el agua. Recurrimos a hacer una falsa solera en los laterales que taladramos y desde cuyos taladros inyectamos el gel de silicato. Como la duración de vida del gel de silicato es de unas ocho semanas, tras de tratar cada batache procedíamos a su excavación y hormigonado. Así construimos todos los bataches de esta zona de túnel, prolongándolos hasta cimentarlos en las arcillas verde-azuladas del estrato inferior. De esta forma igual que en el río, cuando procedimos a la excavación de la destroza con la excavadora nos encontramos prácticamente sin agua, ya que las arcillas verde-azuladas son casi impermeables. La cantidad de agua del nivel freático de las margas yesíferas es muy pequeña y puede dominarse en los trabajos del túnel. Así procedimos, detrás de la excavación de destroza a pocos metros de la misma, a ir cerrando la solera en contra-bóveda. En todos estos casos podríamos haber procedido a hacer otro tipo de inyecciones de gel, ¿por qué elegimos el de silicato sódico y el de bicarbonato? Primero porque sólo precisábamos una resistencia en el terreno de 1 a 2 Kg./cm.². Los geles que dan una resistencia mayor son mucho más caros, como, por ejemplo, el empleado en París en el Réseau Express Regional, en que se utilizó silicato sódico y acetato de etilo. Segundo, porque queríamos un gel que envejeciese con el tiempo y éste desaparece su acción a las ocho o diez semanas.

Si hiciésemos una inyección que quedase permanente al terreno inyectando 100 metros de túnel, habríamos creado un dique a la capa freática que alteraría sustancialmente su cota y con ello la estabilidad del subsuelo, razón que a toda costa queríamos evitar. La experiencia por otra parte, como hemos dicho, dio unos excelentes resultados. También, cuando estudiamos el cruce de Escalinata-Comandante de las Morenas pensamos en diversas soluciones. Podíamos haber pensado en recalzar las casas por debajo de la cota del túnel. Esta solución hubiese sido muy difícil dado el estado ruinoso de las casas. Hubiésemos tenido que hacer los recalces viviendo en dichas casas los inquilinos, desconociendo sus cimentaciones en muy mal estado y deficientes, y llegando hasta cotas superiores a los 20 m. de profundidad. En todo caso, además, no hubiésemos impedido la creación de oquedades que indudablemente habrían dañado a estos edificios. El coste de estos recalces también habría sido muy alto, tan alto o más que las inyecciones, y con unas molestias que no hubiesen compensado el utilizar este procedimiento.

Quizá el sistema más sencillo hubiese sido quitar de en medio las casas. El que conozca el régimen jurídico de la Ley de Arrendamientos comprenderá que la expropiación y el echar a los vecinos hubiese sido muy lento, muy caro y muy impolítico, aparte de que afectaría a una gran zona, ya que el trastorno de la capa freática habría hecho de las suyas en bastante distancia a la redonda, y sobre todo aguas arriba.

Otra solución más que pensamos fue el uso de sistemas de congelación. Contra ella teníamos dos cosas: la primera, que los costes que estimamos eran superiores a los de las inyecciones; la segunda, que la congelación provoca un hinchamiento en el terreno que podría haber dañado las partes superiores.

También pensamos en el uso del aire comprimido. Es de sobra conocido el

problema que plantea este uso de aire comprimido en túneles horizontales o con pequeña inclinación. Si se da la presión de la parte superior, el agua penetra en el túnel por la parte inferior. Si se da la presión de la parte inferior hay peligro de que se forme una chimenea porque el aire escape por la parte superior. Hallándonos bajo edificios era este procedimiento muy peligroso y también caro.

Tal vez lo más fácil hubiese sido escapar del agua bajando la estación de Opera, pero esto no era posible, puesto que Opera es un punto bajo y el túnel tiene que subir a la cota máxima permitible hasta la estación de Callao que está mucho más alta.

Nuestra experiencia ha sido que hasta mes y medio el gel de silicato sódico y bicarbonato impermeabiliza el terreno, le da cierta consistencia, de 1 a 2 Kg./cm.², y permite la excavación sin tener que recurrir a bombeos y agotamientos que pudieran causar hundimientos. Sin esta técnica, con las dificultades de la zona que hemos atravesado: cargada de casas en ruina, con arenas inestables en la parte superior, con acometidas particulares a los alcantarillados hundidas, con todos los servicios eléctricos, telefónicos, de agua y de gas, que una ciudad trae consigo, creemos que nos hubiese sido imposible el realizar hasta casi medio kilómetro de túnel bajo casas, teniendo la clave entre 6 y 25 m. bajo la superficie, que no es lo mismo que bajo las cimentaciones o los sótanos de los edificios. Estos acortan esta distancia en unos 4 m.

Dada la longitud de este artículo resumimos el contenido de los anejos 1 y 2, que en el caso de ser solicitado el autor del artículo podrá enviarlo al compañero que se lo pida.

ANEJO 1

Este anejo, presentado al Congreso de Urbanismo Subterráneo, está constituido por unos estudios realizados por el Instituto Eduardo Torroja a petición del autor de este artículo, siguiendo la norma del ASTM C/452/60 T sobre mortero confeccionado con arena de Ottawa.

Con estas probetas se midieron la expansión de las probetas experimentales a siete, catorce, veintiuno, veintiocho, sesenta y noventa días. También se hicieron ensayos de inmersión de prismas de mortero poroso en medios agresivos con el método de Koch y Steiniger midiendo las roturas a catorce, veintiocho, cincuenta y seis, ciento ochenta y doscientos cuarenta días. Por último, los cementos ensayados fueron un cemento Portland P-250, un cemento Sulfadur PAS-250, un cemento de alto horno y un cemento puzolánico.

Las consecuencias de dicho ensayo se describen en el artículo.

ANEJO 2

Está constituido por el estudio de la transformación química de 100 gr. de cemento Portland utilizado en el túnel una vez aplicadas las ecuaciones de Bogue para determinar los compuestos mineralógicos, aplicación sucesiva de las fórmulas de hidratación del cemento y aplicación de las fórmulas de ataque del sulfato magnésico.

Así se llegó a una composición del cemento hidratado y atacado que se asemeja extraordinariamente a un producto blanquecino obtenido en el túnel al cabo de dos años de estar en un medio agresivo, realizado con el citado cemento Portland, lo que demuestra el camino seguido por la agresión en dicho material.