EL TÚNEL VIARIO DE MARÍA DE MOLINA EN MADRID. OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LAS SOLUCIONES ESTRUCTURALES ADOPTADAS

(MARÍA DE MOLINA TUNNEL, MADRID. OPTIMIZATION IN THE DESIGN AND DESCRIPTION OF THE STRUCTURAL SOLUTIONS ADOPTED)

Fernando Catalá Moreno, Jorge Presa Matilla
Dirección de obra Ayuntamiento de Madrid

Hugo Corres Peiretti, Julio Sánchez Delgado, Laura Granda San Segundo
FHECOR Ingenieros Consultores

Fecha de recepción: 23-VII-02

ESPAÑA

579-21

RESUMEN

El túnel viario de María de Molina, que unirá el Paseo de la Castellana y la calle VeláZquez con la N-II de Madrid a Barcelona, constituirá la mayor obra municipal de pasos subterráneos. El túnel de un total de 1.171 m de longitud va a absorber una salida de tráfico de 30.000 vehículos diarios.

En los tramos iniciales se han proyectado falsos túneles con pantallas y losas hormigonadas sobre el terreno y excavadas a posteriori, para minimizar los efectos tráfico. Cuando se alcanza una profundidad adecuada se ha planteado la ejecución de un túnel con dos sistemas constructivos diferentes, dependiendo de los condicionantes que se encuentran en cada momento.

El proyecto presenta una serie de puntos singulares en los que las soluciones adoptadas son estructuralmente extraordinarias.

SUMMARY

María de Molina tunnel which will join paseo de la Castellana and Velázquez street with the N-II highway (Madrid – Barcelona) will be the largest municipal underground work in Spain. The tunnel is 1171 meters long and it will absorbe a traffic of 30000 vehicles going out every day.

The initial part of the tunnel has been designed as false tunnels made with foundation walls and slabs. The concrete has been cast over the ground and the tunnel has been excavated afterwards in order to minimize the effect of the work on Madrid traffic. Once a sufficient depth has been reached, two different construction systems have been proposed, depending on the conditions the tunnel finds in each case.

The project presents some singular points in which the solutions adopted are structurally extraordinary.

1. INTRODUCCIÓN

El túnel Viario de María de Molina, que unirá el Paseo de la Castellana y la calle Velázquez con la Autovía N-II Madrid-Barcelona, constituirá la mayor obra municipal en el conjunto de pasos subterráneos, representando una inversión de mas de 42 millones de euros. Su ejecución deberá abordarse en un plazo de tan sólo 16 meses.

Dicho túnel viario se convertirá en un elemento singular dentro de la infraestructura viaria de la ciudad de Madrid. Con sus 2.271 metros, incluyendo ramales será el paso subterráneo urbano más largo de España, y servirá para unir el paseo de la Castellana y las calles de José Abascal y Velázquez con la N-II en la proximidad de la M-30, en Madrid. El túnel viario va a absorber un tráfico de salida de la ciudad de 30.000 vehículos al día, dando fluidez a

las calles de una de las zonas más congestionadas de la ciudad. El tráfico actual, canalizado por la calle María de Molina, tiene varias intersecciones problemáticas con las calles Velázquez, Príncipe de Vergara, Francisco Silvela y avenida de América. Todo este tráfico confluye en un único punto y suele ser lento hasta alcanzar el paso inferior de la calle Cartagena, que salva el último semáforo, a partir del cual ya es absorbido de forma suficiente por la N-II.

El futuro túnel viene a corregir este amplio problema, puesto que el flujo de vehículos ascendentes por María de Molina quedará reducido al de "corto recorrido", siendo absorbido por el túnel, el tráfico que, desde el paseo de la Castellana o la calle de Velázquez, se dirige a la N-II, de tal forma que el último semáforo se sitúa en la Castellana.

Su recorrido bajo calles de gran tránsito (como son María de Molina, López de Hoyos y Velázquez, entre otras), de edificaciones y de líneas de metro, resulta el mayor condicionante para las distintas soluciones estructurales a adoptar en el conjunto de la obra.

El trazado del túnel proyectado comienza en el paso existente de María de Molina, desprendiéndose por la izquierda del ramal de salida a la calle López de Hoyos, con el que comparte un tramo común. Para mantener la funcionalidad de este ramal de salida, de dos carriles, se ha previsto la ampliación en 60 m del paso actual. Desde la entrada hasta la plaza Carlos María de Castro, donde recibe el ramal de Velázquez, el túnel tiene un carril de circulación. Una vez superado el cruce con la calle Velázquez, y ya con dos carriles de circulación, la traza se centra en el bulevar de la calle López de Hoyos, cruza la glorieta del mismo nombre y asciende hasta superar Príncipe de Vergara, introduciéndose en el barrio de Prosperidad donde cruza sucesivamente las calles Padre Jesús Ordóñez, Luis Cabrera, Quintiliano, Canillas, Zabaleta, Cartagena, Constancia, Clara del Rey, Corazón de María y el sentido entrada de la carretera N-II, hasta emerger en los carriles centrales del sentido salida de la CN-II.

En cuanto a la incorporación desde la calle Velázquez, la solución seleccionada por el Ayuntamiento de Madrid tiene su inicio cerca de la confluencia de General Oraa, con el fin de eliminar una parte del tráfico en superficie del conflictivo cruce de la calle Velázquez con María de Molina. La localización en planta de este ramal se centra en la sección transversal actual, para permitir la existencia de un carril de servicio y de acceso de vehículos de emergencia por su derecha.

En sus extremos, tanto desde el inicio del tronco y del ramal hasta la glorieta López de Hoyos y como desde el momento que supera los carriles de entrada en Madrid de la N-II hasta el final, la traza discurre en falso túnel, mientras que el tramo central desde la glorieta López de Hoyos hasta la divisoria de sentidos de la N-II, en túnel en galería.

En la actualidad (noviembre de 2002), la obra se está ejecutando por la UTE TÚNEL MARÍA DE MOLINA (FERROVIAL-AGROMÁN y ACS). La Dirección de obras, está desempeñada por D. Fernando Catalá Moreno, D. Francisco Javier Rodríguez Bernardo, D. Jorge Presa Matilla y D. Jose Manuel Castro Seller, del Área de obras e Infraestructuras del Ayuntamiento de Madrid, siendo el asesor geotécnico D. Carlos Oteo Mazo.

2. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Una obra de esta envergadura requiere unos estudios previos importantes, así como un estudio minucioso de alternativas.

El 26 de septiembre de 2000, el Ayuntamiento de Madrid convocó Concurso Público para la redacción del Proyecto y Ejecución de las Obras de construcción de un túnel viario de conexión de la calle María de Molina y la carretera N-II de Madrid a Barcelona. El 11 de enero de 2001, la Unión Temporal de Empresas Ferrovial-Agromán S.A. y ACS Proyectos, Obras y Construcciones, S.A. presentó su oferta a este concurso dentro de la cual se incluía un Proyecto en el que se desarrollaban 9 soluciones estudiadas tanto desde el punto de vista del tráfico afectado, trazado, sistema constructivo, sección tipo, forma de acceso desde la calle Velázquez y la búsqueda de un óptimo en las soluciones estructurales. Este proyecto de licitación fue redac-

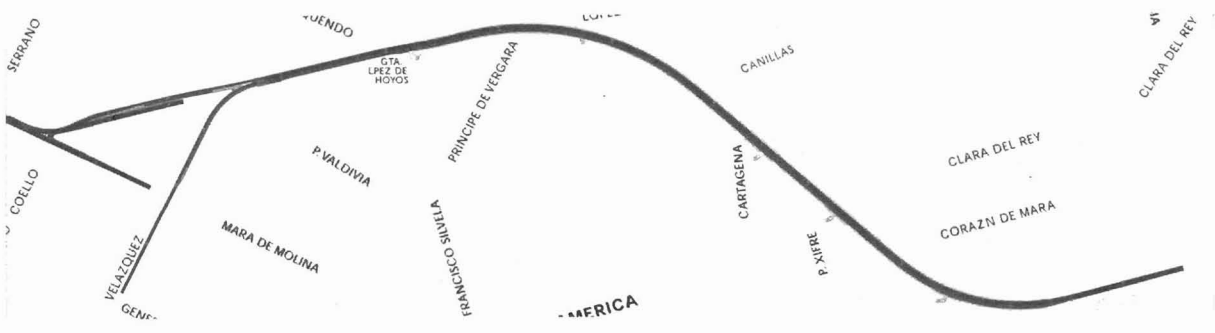

Figura 1.- Trazado en planta del túnel de María de Molina.

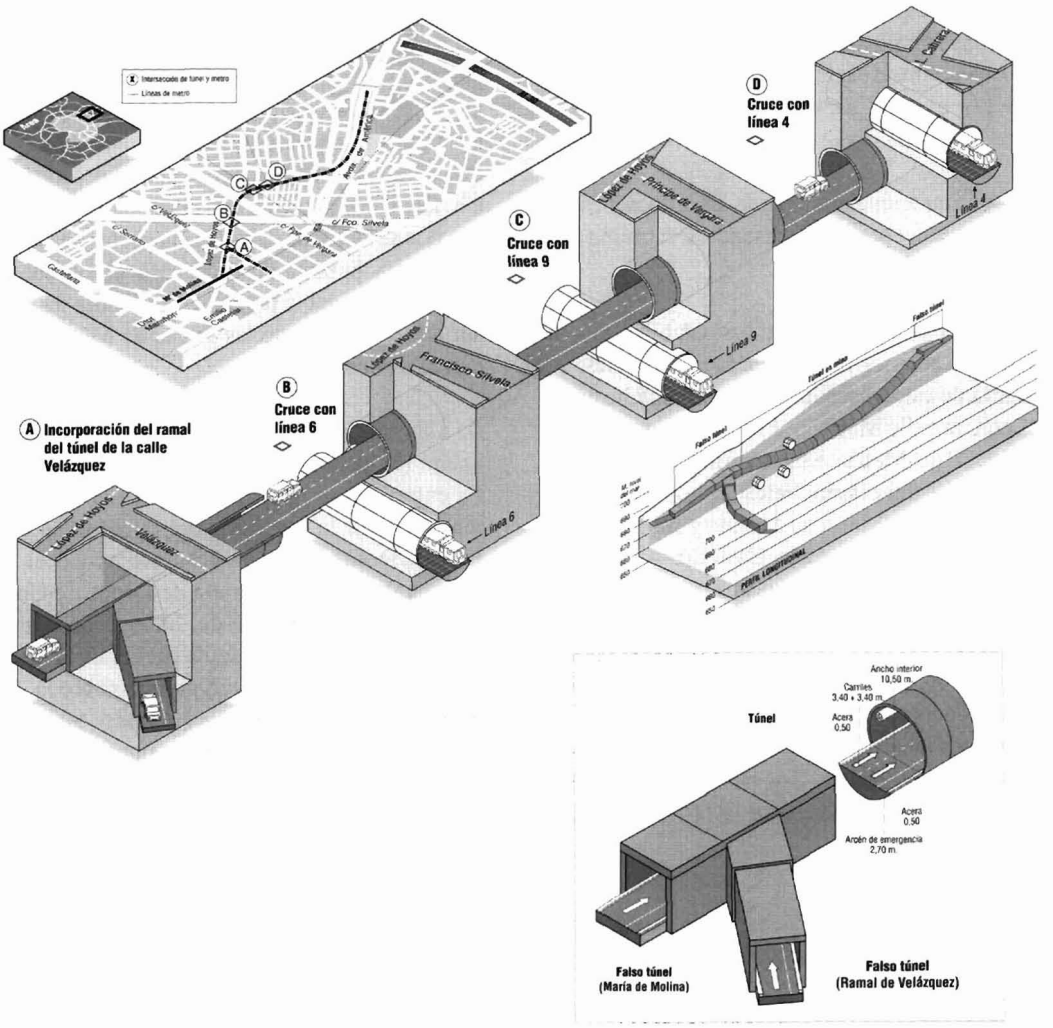

Figura 2.- Características de los distintos tramos del túnel.

tado por las empresas consultoras PROINTEC, INGENIERÍA DEL SUELO (asesor geotécnico) y FHECOR Ingenieros Consultores.

Las 9 soluciones son el resultado de combinar entre sí las diferentes alternativas planteando diferencias en:

- Trazado y sistema constructivo: tres alternativas denominadas "Norte" (elegida), "Sur" y "Centro o Falso túnel", coincidiendo esta última en gran medida, con el trazado de la Calle María de Molina.

- Sección Tipo: dos posibilidades con diferente gálibo horizontal; la primera de ancho básico con un ancho útil de 8.50m y la segunda de ancho ampliado de 10.50m, es decir de 9.00 y 11.00 m entre paramentos interiores.

- Acceso desde la calle Velázquez; combinando tres emplazamientos de entrada con trazados alternativos, se plantearon cinco posibilidades de rampa desde la calle Velázquez, en todos los casos con un ancho útil de 6.50 m (7.00 m de ancho entre elementos estructurales).

En todas las soluciones planteadas, el túnel parte del paso actual de María de Molina, que desde el punto de vista estructural está formado por una losa nervada con vigas transversales cada 7.80 m. Estas vigas son continuas de tres vanos con dos apoyos centrales sobre pilares metálicos y dos apoyos extremos en la coronación de terraplenes laterales, conectados con tirantes de hormigón armado a la base de los pilares. Con esta configuración, la calzada y las embocaduras se sitúan entre los pilares centrales mientras que los vanos laterales están ocupados por el talud de la excavación.

Además todas las soluciones planteadas interceptaban el conflictivo cruce de las calles María de Molina con Velázquez, en cuyo subsuelo se encuentra el "telescopio" de conexión de la línea 7 de Metro con el Ramal de comunicación con la línea 10 de Metro. Este "telescopio" es

una estructura aporticada de hormigón armado formada por losas apoyadas sobre pantallas extremas de pilotes de diámetro 1.50 m y consta de cuatro niveles, pasando el tráfico rodado por el nivel superior (nivel 0) y las líneas de metro por el nivel –3.

Se explican a continuación cada una de las soluciones estudiadas haciendo hincapié en los aspectos estructurales más importantes.

La alternativa Sur se planteó con las dos posibilidades de ancho, la básica sin arcenes y la ampliada con arcenes. El trazado en planta de esta alternativa era coincidente en su tramo inicial con la calle María de Molina, al igual que el túnel de la línea 7 de Metro. Esta alternativa Sur debía pasar por el nivel –2 del citado "telescopio" de Metro y seguir en falso túnel bajo María de Molina y sobre la línea 7 de Metro hasta alcanzar la calle Castelló. A partir de aquí, pasaba a túnel en galería, cuyo trazado se separaba por la derecha de María de Molina, transitando bajo numerosas edificaciones hasta llegar a la escuela de deportes Apóstol Santiago. En este tramo interceptaba sucesivamente las siguientes líneas de Metro pasando: sobre la línea 9, bajo la línea 6, a mucha profundidad bajo la línea 4, bajo el enlace de la línea 6 y 7 y, por último, sobre la línea 7. Ya casi en la embocadura en la N-II, el trazado debía además atravesar los ramales de salida para desembocar en los ramales centrales de dicha carretera. Un aspecto significativo de esta alternativa es la profundidad a la que se situaba en relación con la superficie, alcanzando en algunos puntos coberturas superiores a 40.00 m, lo que condicionaba la ejecución de las salidas de emergencia. En lo que respecta a los ramales Velázquez se estudiaron dos soluciones, la solución corta, desde la calle General Oráa, y la larga desde la calle Diego de León. En ambos casos, se debía perforar la pantalla de pilotes del lado sur del telescopio de las líneas de Metro para conectarse con el tronco.

La alternativa Norte se planteó con las dos soluciones de ancho (la básica sin arcenes y la ampliada con arcenes). La entrada desde el paso actual de la alternativa Norte se realizaba por la izquierda del ramal de la calle López de Hoyos. Desde la salida del paso actual el trazado norte continuaba hasta la glorieta de López de Hoyos debiendo permitir la replantación del bulevar de la calle López de Hoyos, para lo cual se debía prever una cobertura mínima de 2.00 m. A continuación pasaba sobre la línea 6 de Metro y bajo las cimentaciones del paso superior de la Calle Joaquín Costa. A partir de este punto la solución pasaba a túnel en galería siguiendo el trazado de la calle López de Hoyos hasta su intersección con la calle Príncipe de Vergara

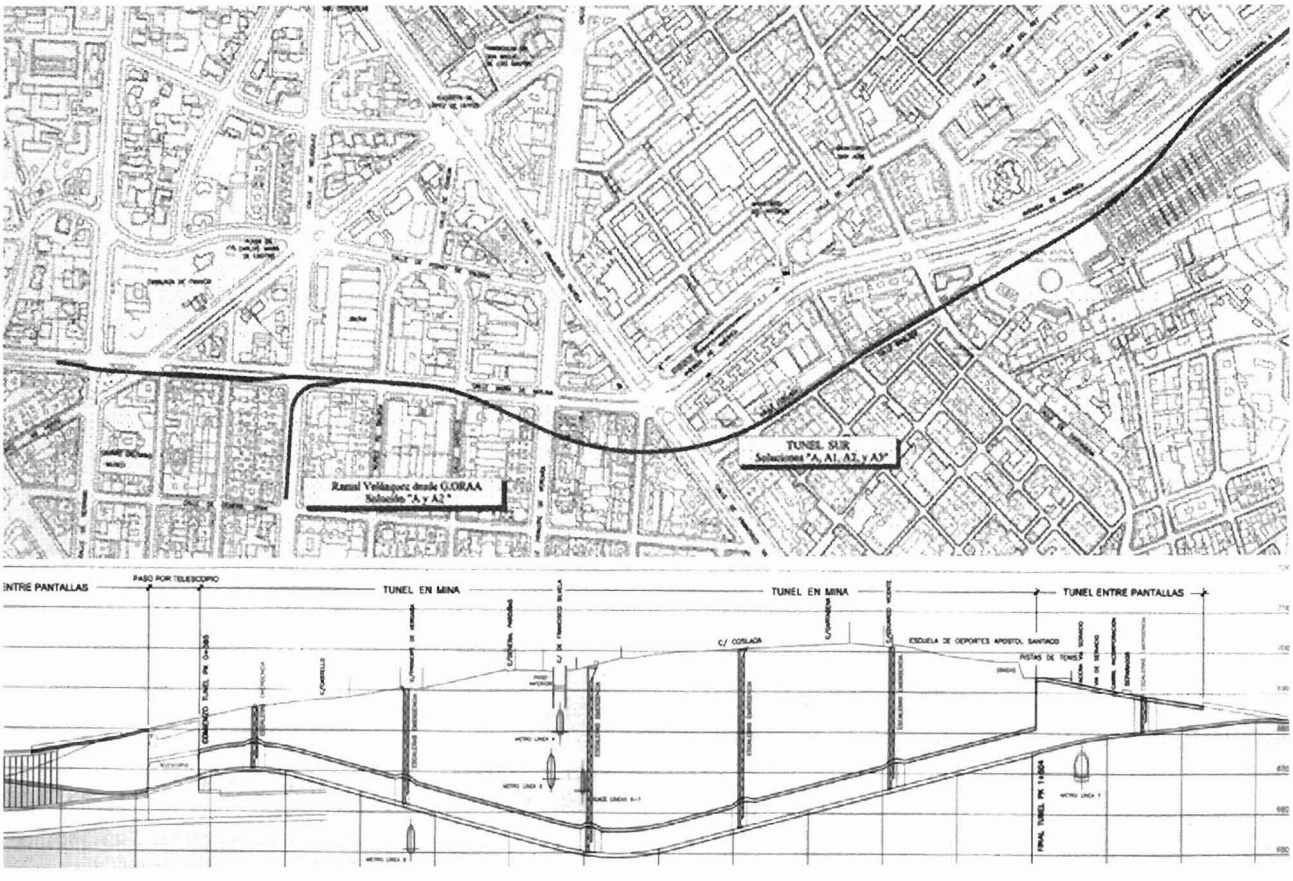

Figura 3.- Solución Sur.

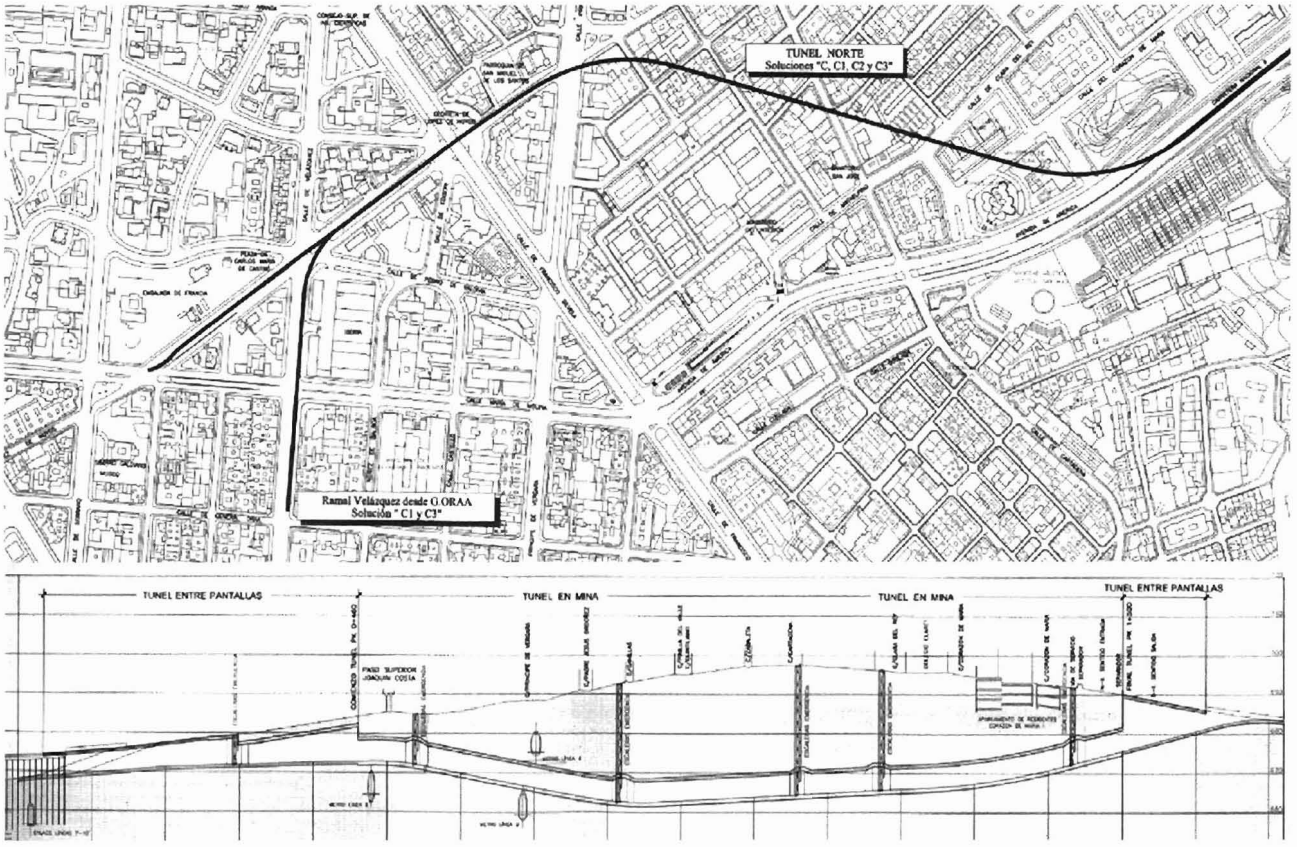

Figura 4.- Solución Norte.

para posteriormente, transitar bajo el barrio de Prosperidad, hasta llegar a la N-II debiendo atravesar los carriles de entrada de dicho vial para desembocar en los carriles centrales de salida. En lo que respecta a la profundidad de la solución, la cobertura también era significativa alcanzando en algunos puntos más de 30 m, lo que condicionaba la solución estructural para la solución de las salidas de emergencia. Por último, en relación con los ramales de la calle Velázquez la solución corta desde María de Molina no afectaba al núcleo del "telescopio", en cambio, la solución larga desde la calle General Oráa, interceptaba el "telescopio" en su nivel -1 lo que exigía la demolición de parte de sus pantallas de pilotes de ambas caras.

Para la alternativa en falso túnel, central, se estudió la solución básica sin arcenes con un ancho útil de 8.50 m, es decir de 9.00 m entre cara interior de pantallas. Respecto al ramal de acceso desde la calle Velázquez se estudió la embocadura a la altura de la calle del General Oráa. El trazado en planta de esta alternativa coincidía con la alternativa Sur hasta la calle Castelló, compartiendo con ella las interferencias más significativas, pero con la salvedad de que en esta alternativa el falso túnel era más superficial e interceptaba el "telescopio" de las líneas de Metro en su nivel -1. Desde la calle Castelló hasta la salida en la N-II la solución central seguía el trazado en planta de Avda. de América, presentando numerosas interferencias con infraestructuras existentes:

- Estación de Metro de avenida de América
- Paso inferior de la calle Francisco Silvela bajo avenida de América y línea 4 de Metro, debiendo pasar el túnel viario entre la clave de la línea de Metro y la solera del paso inferior con un gálibo de paso muy estricto.

- Intercambiador de avenida de América, en el que se veían afectados un acceso provisional de Metro y el actual acceso desde el intercambiador a la estación de Metro de avenida de América. La solución debía adosarse al Intercambiador de Transportes, pasar por debajo del paso inferior de la calle Cartagena y cruzar el ramal de salida de autobuses del intercambiador, debiendo discurrir la traza del nuevo túnel viario, por una estructura prevista al efecto durante la ejecución del citado Intercambiador. La menor profundidad de esta solución posibilitaba una mayor alternativa de procedimientos de ejecución de los pozos de salida de emergencia.

En junio de 2001, se preseleccionó la oferta presentada por la UTE TÚNEL MARÍA DE MOLINA descrita más arriba, en concreto, la solución Norte con arcenes y con 11.00 m de ancho y con el ramal Velázquez desde la calle General Oráa. Con estas premisas de partida, se inició la redacción del proyecto de construcción por el mismo equipo redactor del proyecto de licitación ganador, que pasa a describirse en los apartados siguientes.

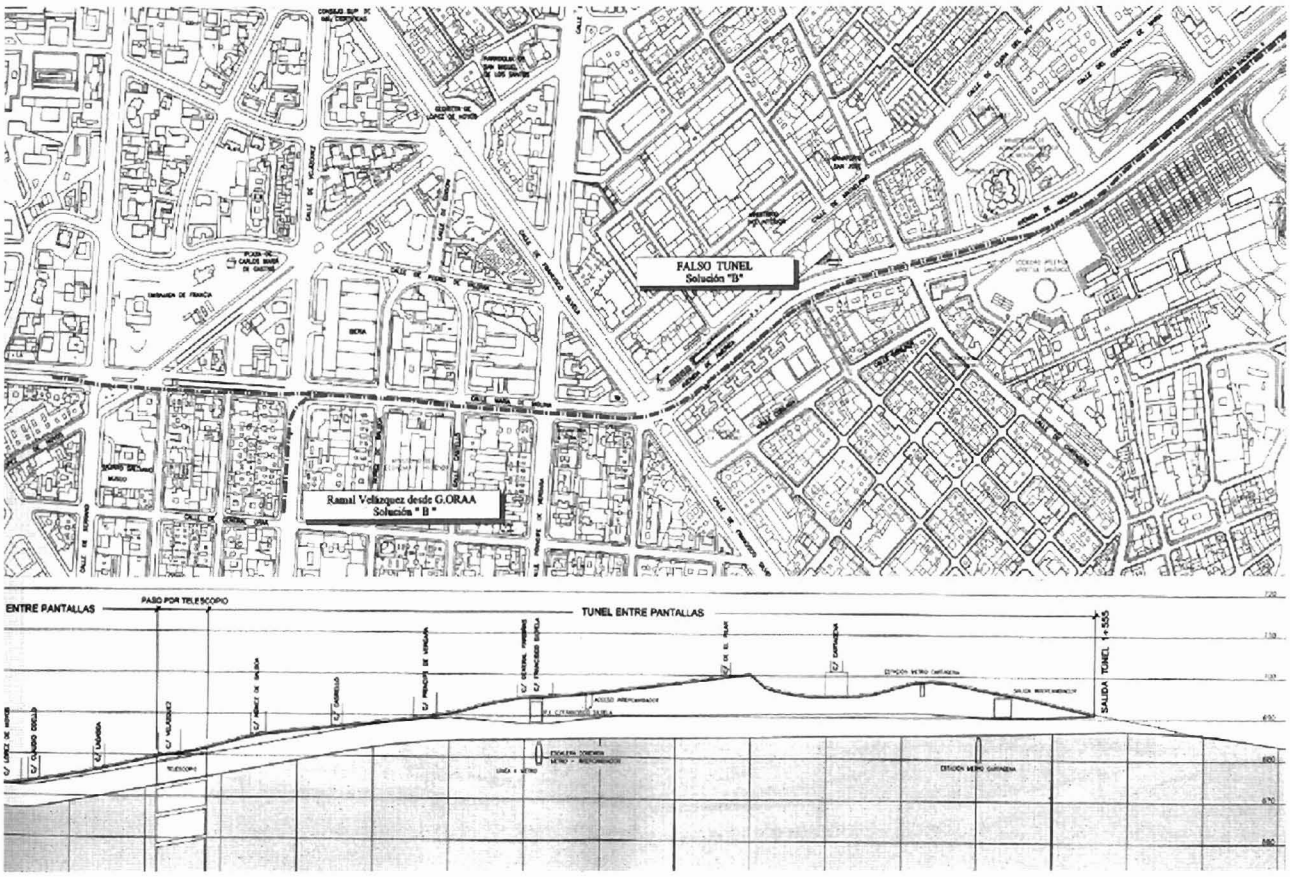

Figura 5.- Solución B o falso túnel.

3. CONDICIONANTES DE UNA OBRA URBANA DE ESTE TIPO

Durante la fase de proyecto constructivo, se revisaron los principales condicionantes ya detectados en la fase de proyecto de licitación, que se resumen a continuación:

Trazado y condicionantes geométricos

- El ancho tipo de calzada del tronco principal es de 10.50 m, es decir, 11.00 m entre elementos estructurales.

- El ancho de tramo con carril único en el tronco principal es de 7.80 m, es decir, 8.30 m entre elementos estructurales.

- El ancho tipo de la calzada del ramal Velázquez es de 4.50 y 6.50 m, es decir, 5.00 y 7.00 m entre elementos estructurales.

- La sección transversal tipo propuesta consiste en ubicar en el interior del paso dos carriles de circulación de 3.40 m de ancho y un arcén de grandes dimensiones 2.70m, destinado a un uso exclusivo para bomberos. Esta sección se acompaña a lo largo de toda su longitud de dos aceras laterales de 0.50m de ancho, lo que totaliza los 10.50 m útiles entre revestimientos.

- Se ha planteado una serie de zonas dotadas de un sobreancho de 1.00 m a modo de crear una cobija para el estacionamiento de un posible vehículo averiado, anchurones coincidentes con cada salida de emergencia peatonal.

- En el bulevar de López de Hoyos en falso túnel, debajo del cuál va la traza, debe permitirse la replantación del arbolado existente, para lo cual se ha previsto una cobertura mínima de 2.00 m

Estructuras existentes

El túnel viario de María de Molina interseca a su paso un sinfín de estructuras existentes como son:

- Rampa de salida a la calle López de Hoyos del paso existente en la calle María de Molina bajo la calle Serrano.

- La traza debe pasar sobre la línea 6 de Metro en la zona de falso túnel.

- Pasa por debajo de las cimentaciones del paso superior de la calle Joaquín Costa. En previsión de posibles asientos del paso superior se ha proyectado el recalce de sus zapatas.

Figura 6.- Paseo bajo puente de Joaquín Costa.

- El túnel continúa siguiendo el trazado de la calle López de Hoyos hasta su intersección con la calle Príncipe de Vergara. Después, debe pasar sobre la línea 9 de Metro y bajo la línea 4 con un gálibo de paso reducido.

- A partir del cruce con la calle Príncipe de Vergara, la solución transita bajo numerosas edificaciones existentes en el barrio de Prosperidad hasta llegar a la Carretera N-II debiendo atravesarla para desembocar en los carriles centrales de salida. Se ha previsto en proyecto proteger las cimentaciones.

Figura 7.- Estudio de subsidencias bajo el túnel en mina en el barrio de Prosperidad.

- En lo que respecta a profundidad de la solución la cobertura es significativa alcanzando en algunos puntos más de 30 m, lo que ha condicionado la solución estructural para el diseño de las salidas de emergencia.

- El ramal de incorporación al túnel viario desde la calle Velázquez salva la Calle María de Molina interceptando el "telescopio" de Metro por su nivel -1, lo que exige la demolición de parte de sus pantallas de pilotes para abrir paso al túnel. Además se refuerza la losa sobre la que transita actualmente el tráfico en la calle Velázquez dejando durante las obras el mínimo número posible de carriles cortados.

Figura 8.- Cruce encima del "telescopio" en Velázquez.

Pasarela existente en la Nacional II

La distribución de carriles de la CN-II y sus vías de servicio a la salida del túnel afecta a uno de los apoyos de la actual pasarela, que permite la comunicación peatonal entre las márgenes de la carretera.

La pasarela existente de 1.80 m de ancho, responde al esquema, frecuentemente utilizado, de pórtico metálico con pilas inclinadas y vanos laterales que recogen las rampas de acceso. Las luces son de 14.50+35.00+14.50, siendo la altura de pila del orden de 5.30 m. Tanto el dintel como las pilas están formadas por secciones metálicas de canto variable (de 670 a 1.100 mm) y ancho constante de 800 mm.

Para poder mantener la comunicación entre márgenes en la nueva configuración viaria se debía ampliar el vano central.

Servicios afectados

Durante todo el trazado se interceptan con la zona de falso túnel dos galerías municipales de servicio s de de telefónica, de gas, de electricidad, de saneamiento y de abastecimiento de agua.

Características geológicas y geotécnicas

El entorno geológico geográfico de la obra se sitúa dentro de lo que se ha venido llamando como Facies Madrid, ampliamente estudiada y conocida. Para su caracterización geotécnica se ha dispuesto de los resultados de las campañas de reconocimiento efectuadas durante los estudios previos y las fases de proyecto de licitación y de construcción.

Figura 9.- Pasarela peatonal a ampliar debido a la existencia de dos carriles más (salida del túnel).

En base a la información obtenida, se ha realizado una división en los siguientes tramos geotécnicamente homogéneos.

TRAMO 1: desde el inicio hasta pasada la plaza Carlos María de Castro

- Túnel con pantallas
- Apreciable espesor de rellenos
- Materiales arenosos
- Nivel piezométrico por debajo de rasante
- Se atraviesa una posible galería con un sondeo practicado un poco antes de llegar a la intersección con la línea 6 de Metro.

TRAMO 2: desde pasada la plaza de Carlos María de Castro hasta la altura de las calles Cartagena, Zabaleta y Constancia

- Túnel convencional con gran recubrimiento
- Materiales arenosos hasta 15-20 m
- Materiales arenosos en zona de destroza
- Niveles tosco-arenosos en la zona de bóveda y por encima
- Niveles de agua colgados por encima de la clave

TRAMO 3: desde la calle Cartagena hasta la Nacional II dónde empieza el sentido salida

- Túnel convencional con gran recubrimiento
- Materiales arenosos hasta 15-20 m
- Niveles tosco-arenosos en la zona de bóveda y por encima
- Materiales arenosos en zona de destroza
- Niveles de agua colgados por encima de la clave

TRAMO 4: desde la Nacional II hasta el paso sobre la calle Corazón de María

- Túnel con pantallas (rampa de salida)
- Rellenos hasta 3.00 m y materiales arenosos
- Nivel piezométrico por debajo de la rasante

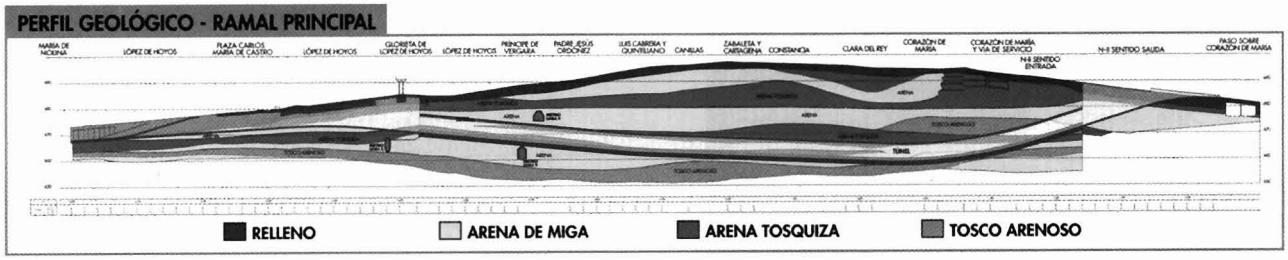

Figura 10.- Perfil geológico del ramal principal.

TRAMO 5: Ramal de acceso c/Velázquez

- Túnel muy superficial con pantallas
- Rellenos hasta 3.00 m o incluso mayores y materiales arenosos hasta por debajo de rasante
- Nivel piezométrico por debajo de fondo de excavación

4. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES PLANTEADAS

La situación de la obra, discurriendo por varias de las zonas de mayor tráfico de Madrid, y sus dimensiones han hecho que el proceso constructivo sea un condicionante absolutamente determinante en la solución estructural adoptada. El procedimiento constructivo debía minimizar la afección al tráfico.

La solución estructural de falso túnel adoptada se ajusta al procedimiento constructivo que se describe a continuación para los 711 m de falso túnel (tramo inicial desde la entrada al paso actual hasta la glorieta López de Hoyos, y tramo final a la salida a la N-II).

La ejecución de los tramos de falso túnel se está realizando de forma tradicional:

- Ejecución de las pantallas longitudinales y transversales

- Ejecución de losa superior hormigonando sobre el terreno

- Excavación del tramo de rampa a cielo abierto y ejecución de los muros

- Excavación bajo la losa superior y colocación, si procede, del arriostramiento de pantallas en cada nivel de excavación. Se procede al apeo de la galería Oeste de la 2ª ronda en su cruce con el túnel.

- Ejecución del arriostramiento de las pantallas transversales en los emboquilles del túnel una vez alcanzado con la excavación el nivel de clave de los túneles

- Una vez alcanzado el nivel de excavación definitivo, se ejecutará la solera.

Para el cálculo de pantallas, existen una multitud de métodos de cálculo que básicamente se suelen agrupar en las siguientes modalidades:

- Métodos analíticos de equilibrio límite, normalmente sólo son aplicables para pantallas en ménsula o con anclaje, son los denominados "método europeo" y "método americano".

- Modelos con muelles que introducen leyes empuje- desplazamiento partiendo de los empujes en reposo y mediante iteraciones sucesivas llegando a la solución final de empuje.

- Pantallas simuladas como vigas elásticas, asimilando el terreno a una serie de muelles, denominado desde sus orígenes, como el "método de Winkler".

- Programas de elementos finitos o elementos de contorno, con modelos elásticos, elastoplásticos.

Últimamente, se ha generalizado entre los consultores el uso del programa de cálculo Francés RIDO para el cálculo de pantallas. Dicho programa fue puesto a punto durante la construcción del Metro de Lyon y utiliza la hipótesis de Winkler con un coeficiente de balasto que puede variar con la tensión vertical.

$$K_h = K_{h0} + \alpha \sigma'_v$$

Los empujes varían linealmente con el desplazamiento horizontal de la pantalla desde su posición de reposo inicial, hasta los valores de plastificación correspondientes a los valores de empuje activo o pasivo. La amplia experiencia de estos cálculos obtenida durante la construcción del Metro de Madrid, ha permitido comprobar que los resultados obtenidos con parámetros habituales conducen a diseños del lado de la seguridad.

En zonas urbanas, las pantallas deben dimensionarse por limitación de movimientos en los edificios o servicios próximos. Éstos son tanto horizontales como verticales y obedecen a los esquemas típicos de la figura 11 (página siguiente).

La deformada convexa o en tímpano es propia de las pantallas en voladizo mientras que la cóncava se da en pantallas con apoyo en cabeza. Algunos inventarios (por ejemplo, Clough y O´Rourke, 1990) sitúan los movimientos de las pantallas en los órdenes siguientes:

- Flechas horizontales $\delta_h \leq 0.20\% H$ con H altura excavada

- Asientos verticales $\delta_h \leq 0.15\% H$

En María de Molina se ha ido a flechas máximas del orden de los 14 mm y no se ha pasado de esta cifra.

Para el dimensionamiento de pantallas se utilizan valores de resistencia al corte y módulos de reacción (coeficientes de balasto) similares a los que se vienen utilizando en los proyectos de Metro de Madrid. Estos parámetros tienen, además, un cierto carácter empírico, pero su validez está confirmada no solamente por ensayos del terreno (cuya representatividad puede ser limitada), sino por la observación, auscultación y correcto comportamiento de las obras proyectadas y construidas partiendo de dichos parámetros. Estos valores de los parámetros en los cálculos de pantallas guardan una cierta interrelación con el método de cálculo empleado como se ha dicho anteriormente.

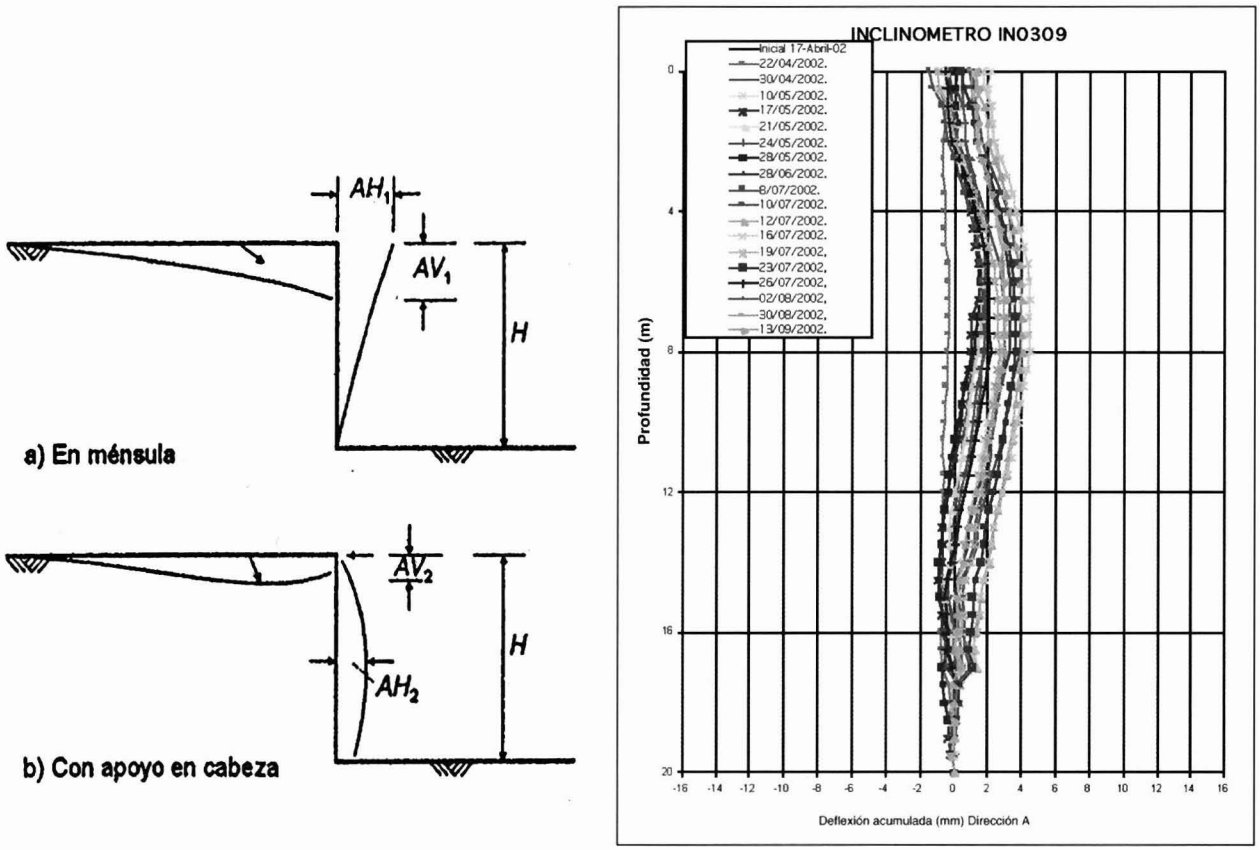

Figura 11.- Deformadas típicas de pantallas y medidas de un inclinómetro instalado en una pantalla del falso túnel.

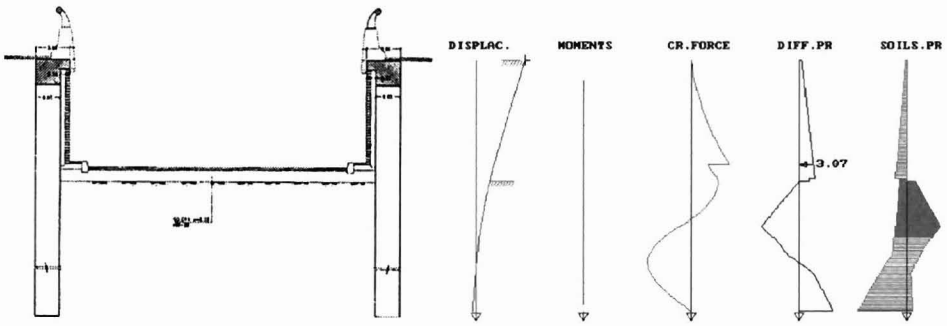

Figura 12.- Resultados del RIDO para una pantalla en voladizo en zona de rampa de salida y/o de entrada.

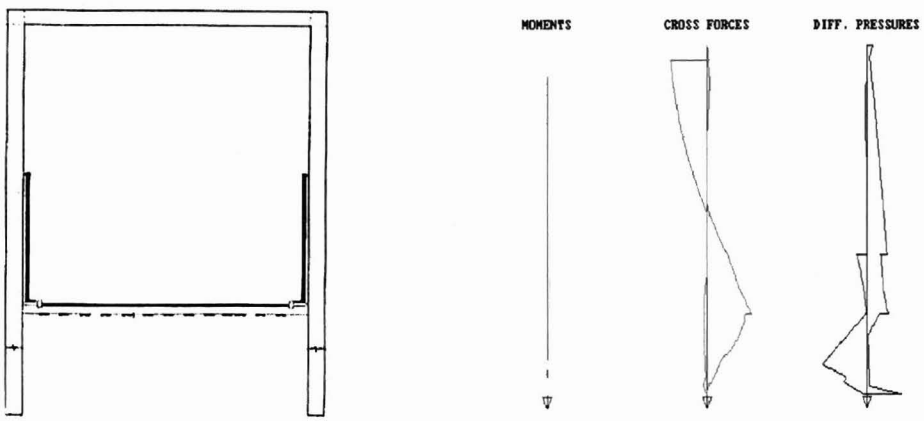

Figura 13.- Resultados para una pantalla arriostrada en cabeza.

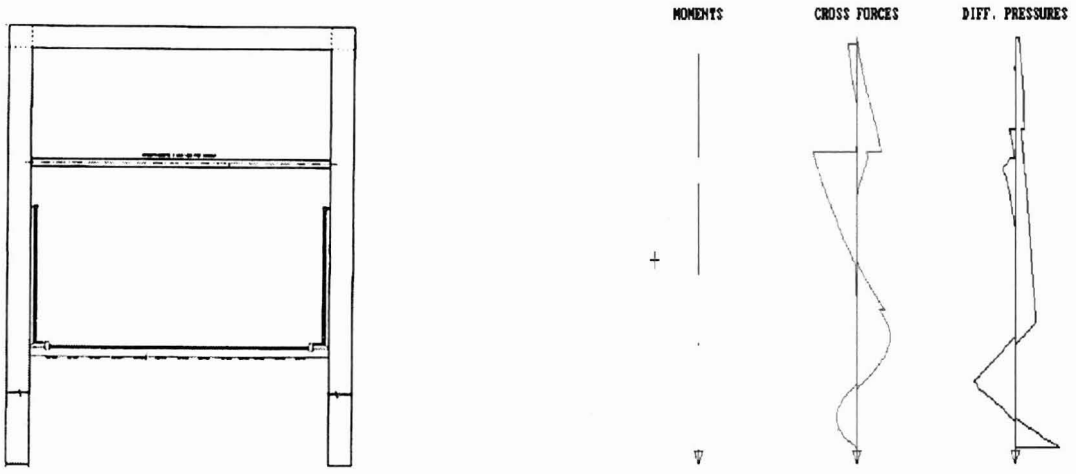

Figura 14.- Resultados de pantallas con estampidor intermedio 1HEB-280 cada 2.50 m, acero S-275.

Figura 15.- Foto de una sección arriostrada en cabeza y otra con arriostramiento intermedio.

En la zona de falso túnel (losa de cobertura y pantallas laterales de retención de tierras y sustentación de la losa superior y rampas con pantallas en voladizo y muros), se dan las siguientes tipologías:

- pantallas de espesores 0.65 m y 0.85 m arriostradas en cabeza
- pantallas de espesores 0.65 m y 0.85 m arriostradas en cabeza y arriostramiento intermedio provisional durante las obras o definitivo dependiendo de la altura libre.

La losa de cobertura se hormigona directamente sobre el terreno una vez ejecutadas las pantallas y su acabado es tal que permite la posterior extensión de la impermeabilización y el pavimentado. De forma excepcional, algunos tramos se ejecutarán cimbrados, como puede ser el caso de las losas de la entrada desde el paso actual y a la nueva salida hacia la calle López de Hoyos. Los espesores de losas varían entre 0.55 m y 0.95 m. El espesor máximo se adoptó para la zona del bulevar de la calle López de Hoyos que debía soportar los 2.00 m de cobertura de tierras encima de la losa.

El estudio geotécnico redactado por Ingeniería del Suelo recogía las siguientes recomendaciones para el proyecto y construcción de las obras del túnel en galería (tramo desde la glorieta de López de Hoyos hasta un poco antes de salir a la N-II):

- A ejecutar por procedimientos habituales en la construcción del Metro de Madrid, bien bóveda-destroza-hastiales (que es el empleado en la mayor parte de la longitud del túnel) o hastiales en galería-bóveda-destroza (a emplear en los puntos delicados como los cruces de las líneas 4 y 9 de Metro y en los anchurones)

- Tratamiento de puntos singulares:

- Túnel bajo la calle López de Hoyos: protección de las cimentaciones próximas mediante pantalla de jet grouting

- Paso bajo la línea 4 de Metro: tratamiento de inyecciones del terreno, tanto desde la superficie como desde una galería de avance desde el propio túnel

- Medidas correctoras de asiento en puntos singulares mediante inyecciones de compensación

También, el estudio incluía un estudio de asientos que pueden producirse en superficie por subsidencia. Dichos asientos pueden considerarse moderados, habiéndose previsto, en todo caso, la posibilidad de realizar inyecciones de compensación con lechada de cemento si fuera preciso.

El cálculo del túnel ha sido realizado por la consultora Ingeniería del Suelo con un programa de elementos finitos FLAC que permite modelizar el proceso constructivo y el comportamiento elastoplástico del terreno. Por un lado, estos cálculos se han contrastado mediante un modelo sencillo con muelles y barras y un cálculo iterativo, y, por otro, con el estudio de asientos indicado anteriormente.

Para el proceso constructivo del túnel en galería, se emplean algunos de los dos procedimientos habituales en la ejecución de las obras subterráneas en Madrid:

Método A:

- excavación (en galerías) para hastiales
- hormingonado de galerías
- excavación y hormigonado de la bóveda
-destroza
- inyección de trasdós
- hormigonado de contrabóveda

Método B:

- excavación (o entibación) de la bóveda
- hormigonado de la bóveda
- excavación en destroza (dejando tacones de tierra para el apoyo de la bóveda)
- excavación y hormigonado de hastiales
- hormigonado de contrabóveda
-inyección de trasdós

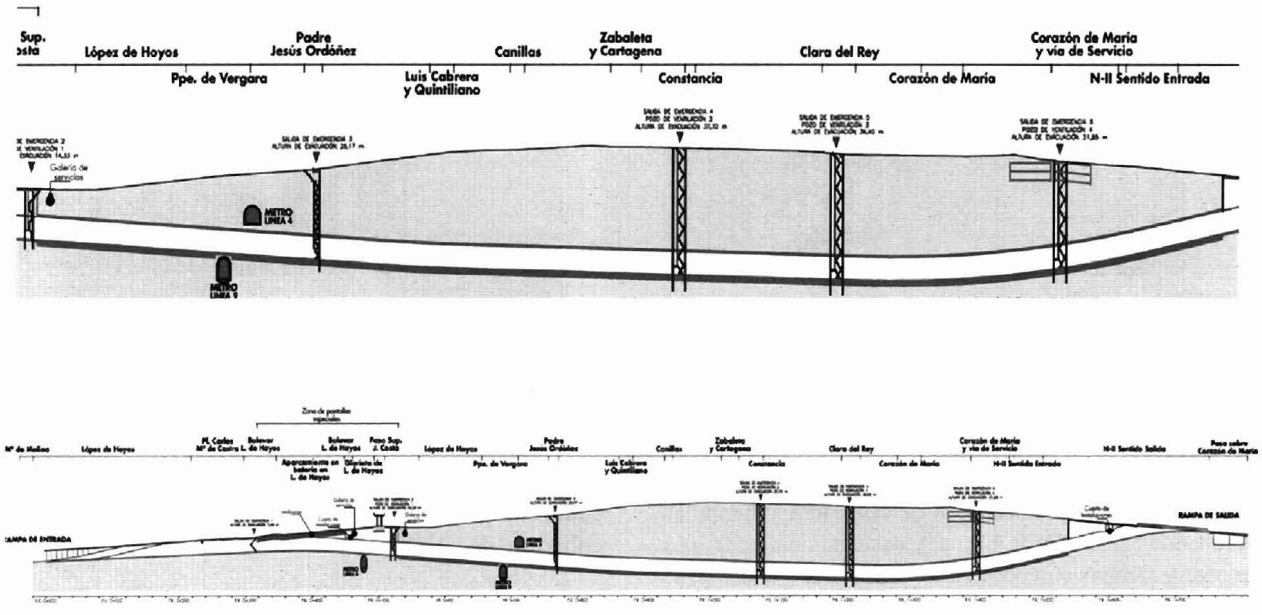

Figura 16.- Alzado de la zona de túnel y alzado general del túnel viario.

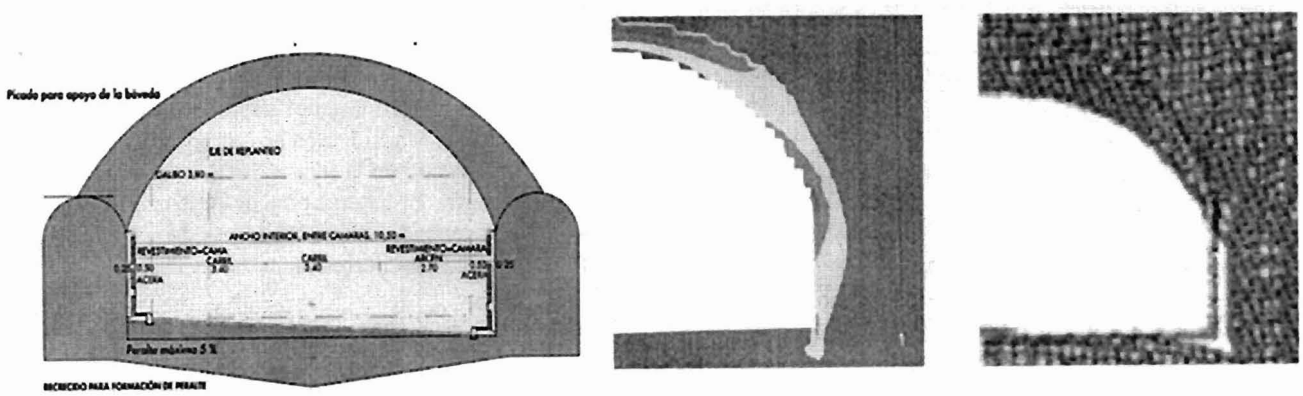

Figura 17.- Sección tipo de túnel en hormigón en masa, ejecutado por el Método A, resultado del modelo de elementos finitos FLAC.

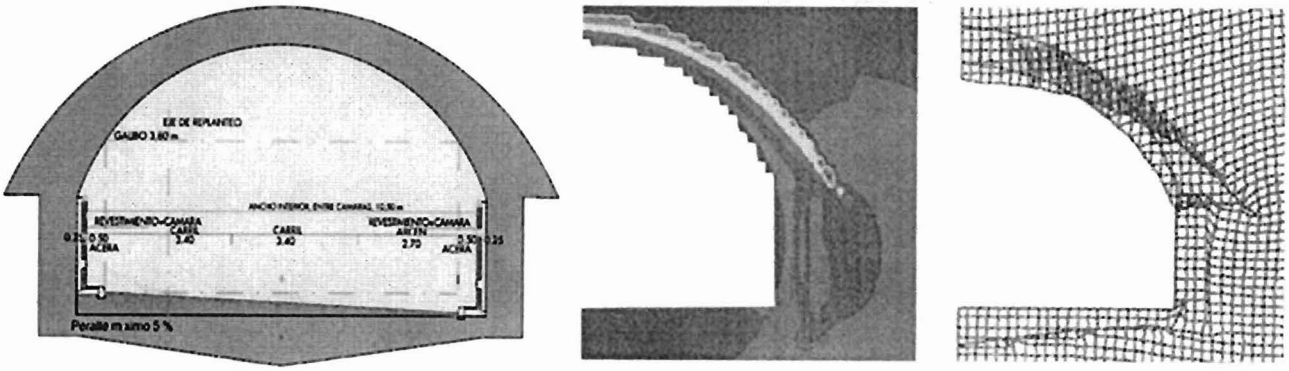

Figura 18.- Sección tipo de túnel en hormigón en masa, ejecutado por el Método B, resultado del modelo de elementos finitos FLAC.

5. ESTRUCTURAS ESPECIALES

Teniendo en cuenta los condicionantes descritos anteriormente, se ha optado por una solución óptima estructuralmente en los puntos singulares que se describe a continuación para el trazado propuesto:

Entrada desde paso actual:

Para esta losa, se ha respetado el mismo espesor que la del paso existente, es decir 0.55 m. La nueva configuración de la salida hacia la calle López de Hoyos, coincidente en el tramo inicial con la entrada al nuevo túnel hacen, que en esta zona, la losa tenga dos vanos de luces de 16.50 y 5.00 m que se apoya en la pantalla, en unos pilares intermedios y unos pilotes en el lateral derecho, que están traccionados debido a la descompensación de luces.

Para ejecutar la entrada al paso actual, se ha realizado una pantalla por la izquierda del trazado, mientras que por la derecha, la losa sólo se apoya en los pilotes. Esto hace que los empujes de la pantalla izquierda deban ser compensados por los pilotes de la derecha, lo que ha condicionado el número de pilotes a disponer en esta margen.

Debido a la esbeltez de la losa (relación canto/luz del orden de 1/30), se consideró oportuno realizar un estudio de vibraciones siguiendo la metodología recogida en las Recomendaciones para estructuras mixtas y metálicas (inspiradas en la Norma DIN 4150/2 1975) basada en el índice de las percepciones tolerables KB. En este método, se relaciona KB con el valor límite de la flecha estática, en función del primer modo de vibración fijando un valor límite para KB de 12.

La obligada coordinación entre la ejecución de las pantallas, la demolición del paso existente y la ejecución de los nuevos pilares, ha obligado a excavar la entrada del túnel con berma por la izquierda y a ejecutar la losa sobre cimbra.

Figura 19.- Entrada al paso actual antes de las obras, en el ramal a López de Hoyos (donde empiezan las obras). La salida a la calle Maria de Molina actual no se toca.

Figura 20.- Ramal a López de Hoyos, entrada al túnel por el carril izquierdo y salida a López de Hoyos por el derecho, dejando por detrás los pilares del paso antiguo.

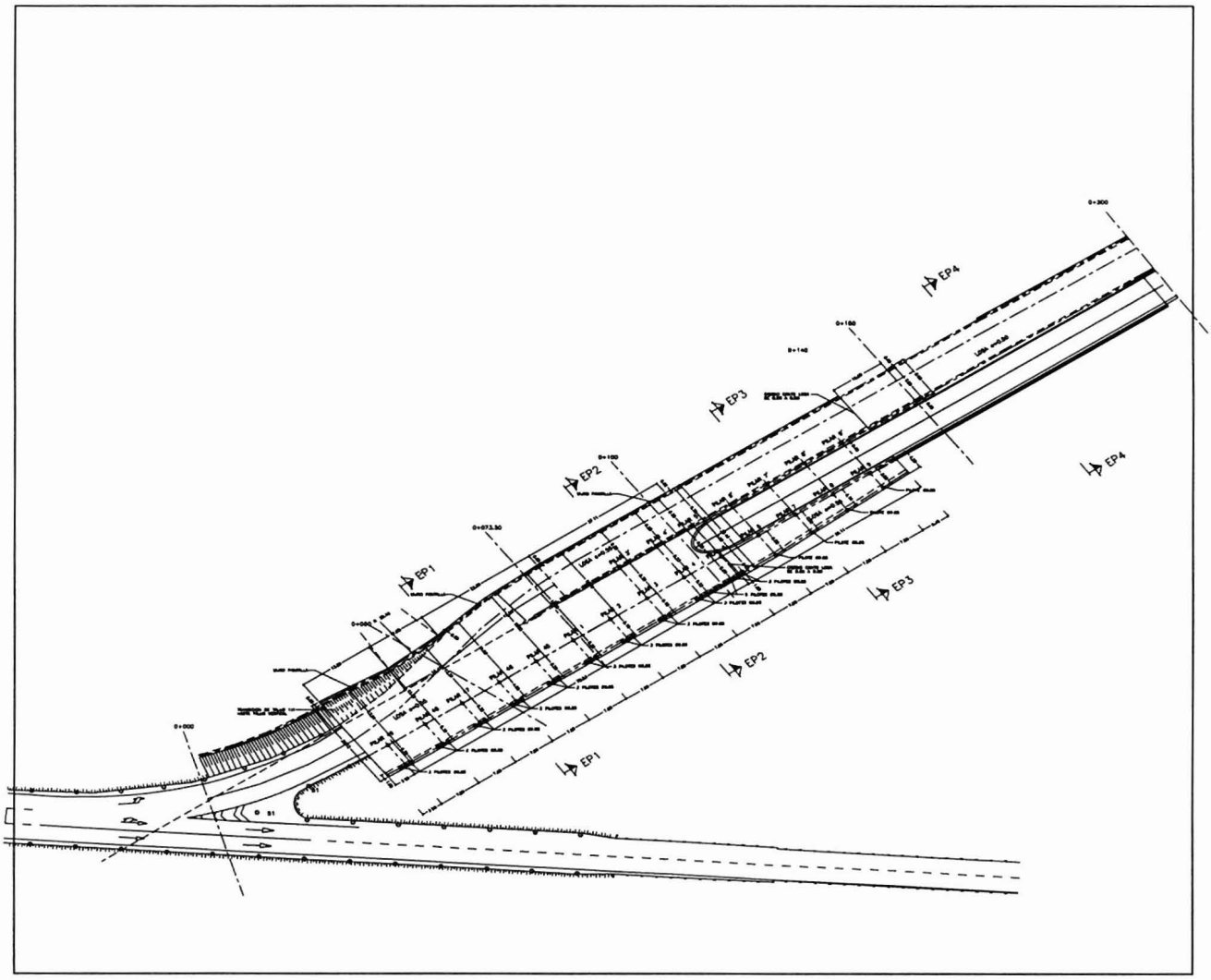

Figura 21.- Planta de la entrada al túnel y nueva salida a la calle López de Hoyos.

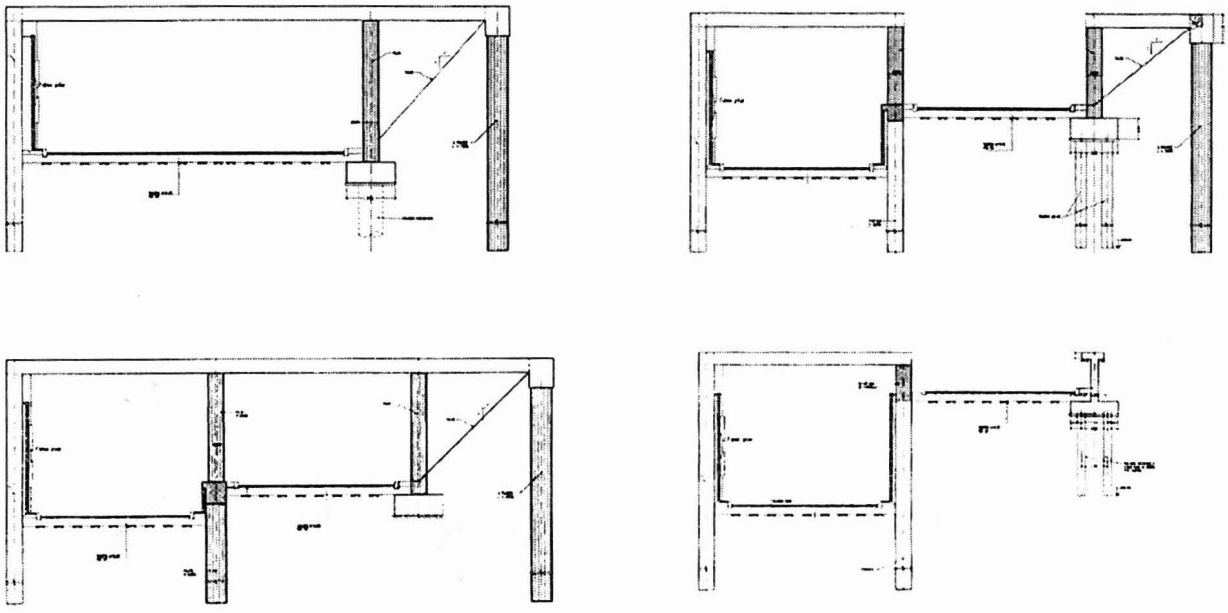

Figura 22.- Distintas secciones en la losa de la entrada al túnel de María de vMolina.

Paso por el Telescopio de la calle Velázquez

El ramal de Velázquez desde General Oraa atraviesa el "telescopio" de Metro de María de Molina por su nivel -1, interfiriendo con las pantallas longitudinales de pilotes de ambos extremos. El proceso de demolición de dichas pantallas ha sido:

- apeo del nivel 0
- corte de pilotes entre los niveles 0 y -1 en una de las pantallas
- ejecución del refuerzo del nervio de borde de la losa de nivel 0 en la zona dónde se suprimen pilotes.
- retirada del apeo de nivel 0

repetición de la secuencia para el lateral opuesto

Posteriormente, se ha ejecutado un recrecido de losa mediante tabiques longitudinales conectados a la losa existente y losa superior de rodadura.

Paso sobre la línea 6 de Metro

El túnel viario de María de Molina pasa sobre la línea 6 de Metro en la zona de falso túnel. Para evitar cargar sobre la bóveda del túnel de Metro (circular con revestimiento prefabricado de 0.30-0.35 m) es necesario "puentear" las

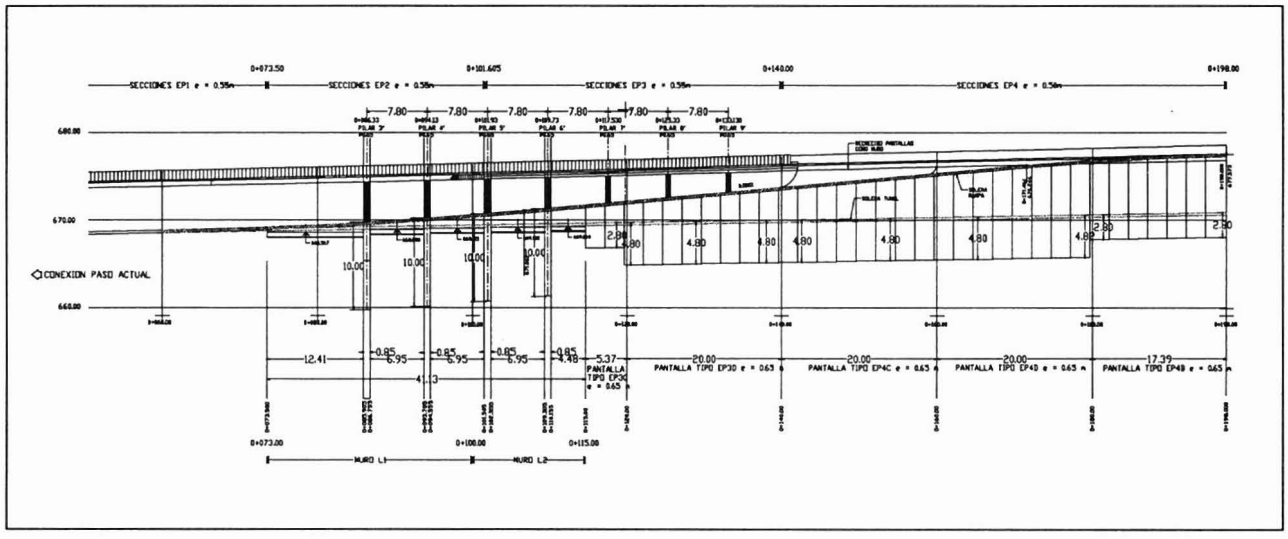

Figura 23.- Alzado central de la entrada al túnel.

Figura 24.- Embocadura de la salida nueva a López de Hoyos a la derecha y a la izquierda entrada al túnel viario de María de Molina.

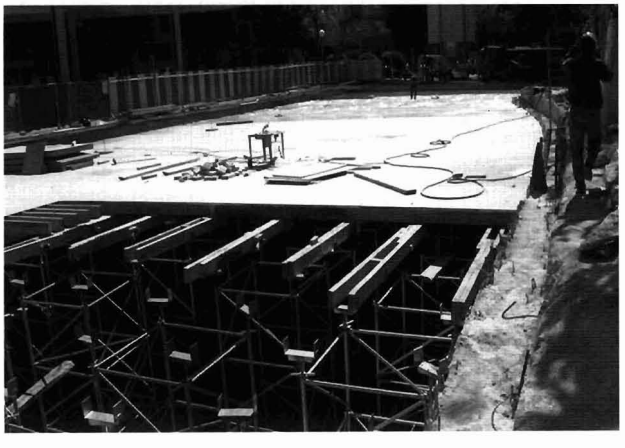

Figura 25.- Cimbrado de la losa de la entrada al paso.

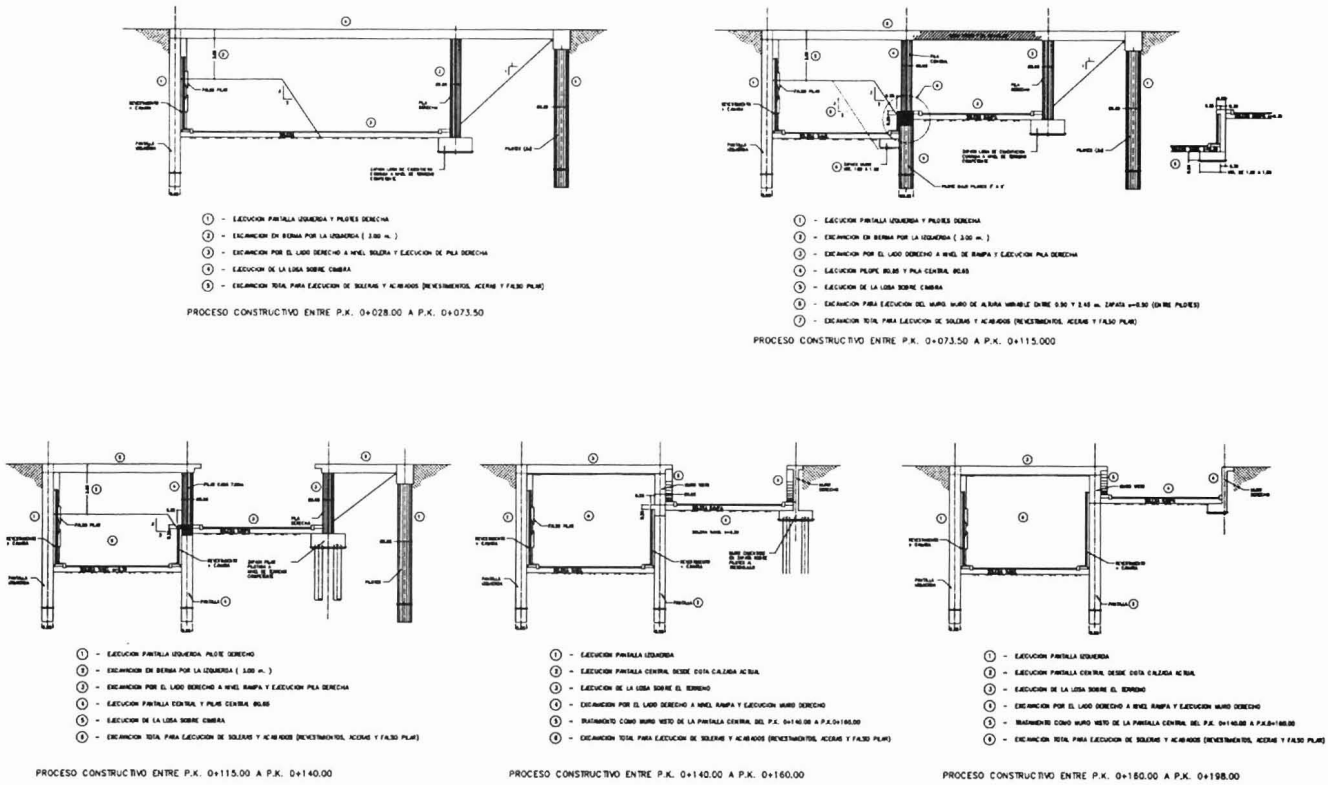

Figura 26.- Proceso constructivo en la entrada al paso.

Figura 27.- Demolición dela rampa de salida a López de Hoyos.

Figura 28.- Zona de pilares en la salida a López de Hoyos, en la margen izquierda sentido avance hacia López de Hoyos el carril del túnel avanza hacia López de Hoyos, a la altura de las secciones EP2 y EP3 de la planta de la figura 21.

cargas de tráfico del túnel mediante una losa que se apoya en módulos de pantallas a ambos lados de la bóveda del Metro.

Dada la proximidad de la bóveda de Metro a la solera del túnel viario, las pantallas laterales no están empotradas. Además para evitar que éstas le transmitan las cargas a la losa de cubierta se han colgado de una viga superior apoyada en las pantallas adyacentes.

Paso bajo Francisco Silvela

Con objeto de limitar los posibles asientos que se podrían producir en el cruce del falso túnel bajo el paso elevado de Francisco Silvela, y teniendo en cuenta el reconocimiento del terreno realizado bajo las cimentaciones del puente en el que se ha detectado una escasa capacidad de soporte del mismo, se ha optado por el refuerzo de dichas cimentaciones mediante la ejecución de pantallas de

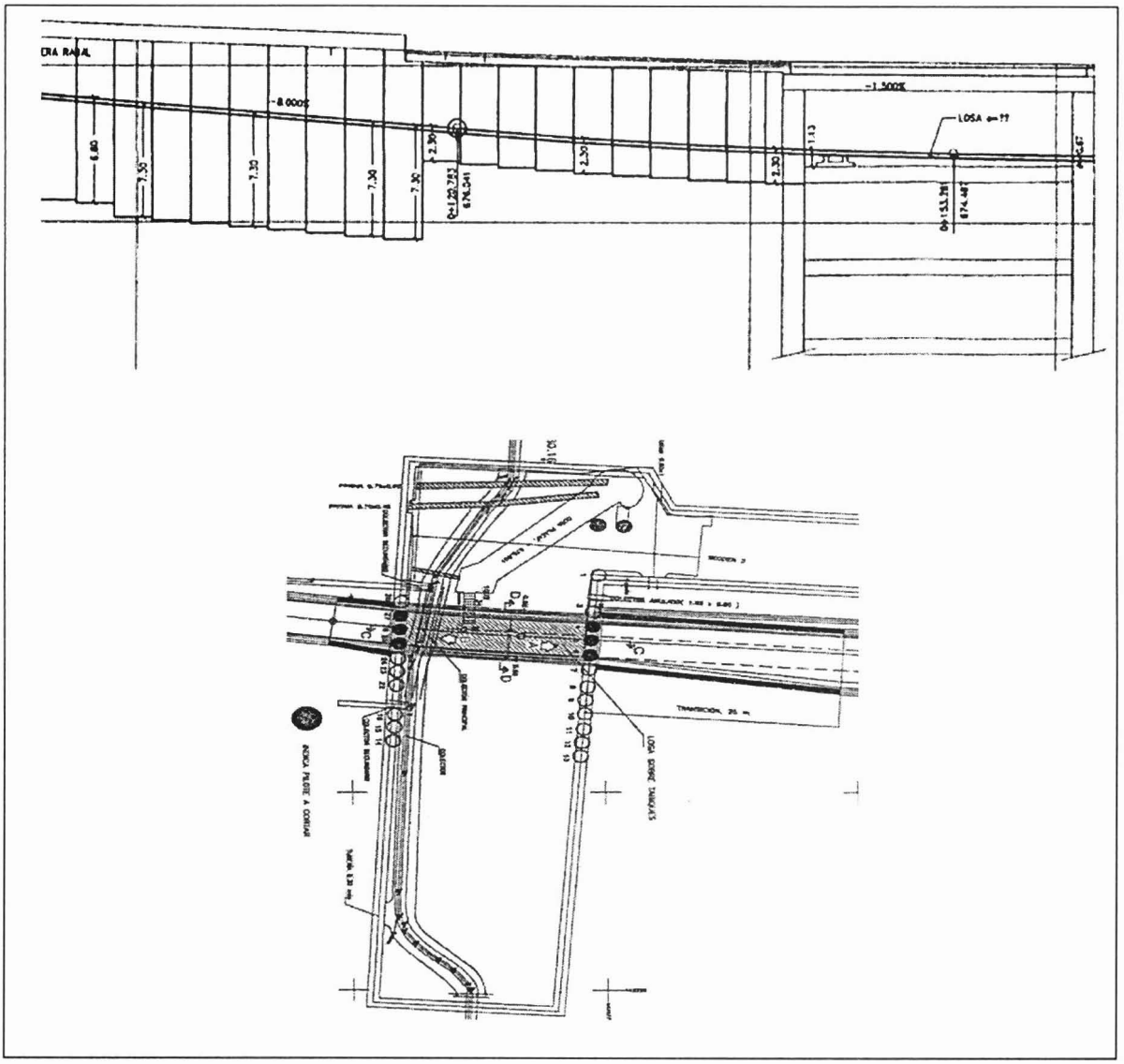

Figura 29.- Alzado y planta de la actuación en el "telescopio" existente de la intersección de las calles de María de Molina con Velázquez.

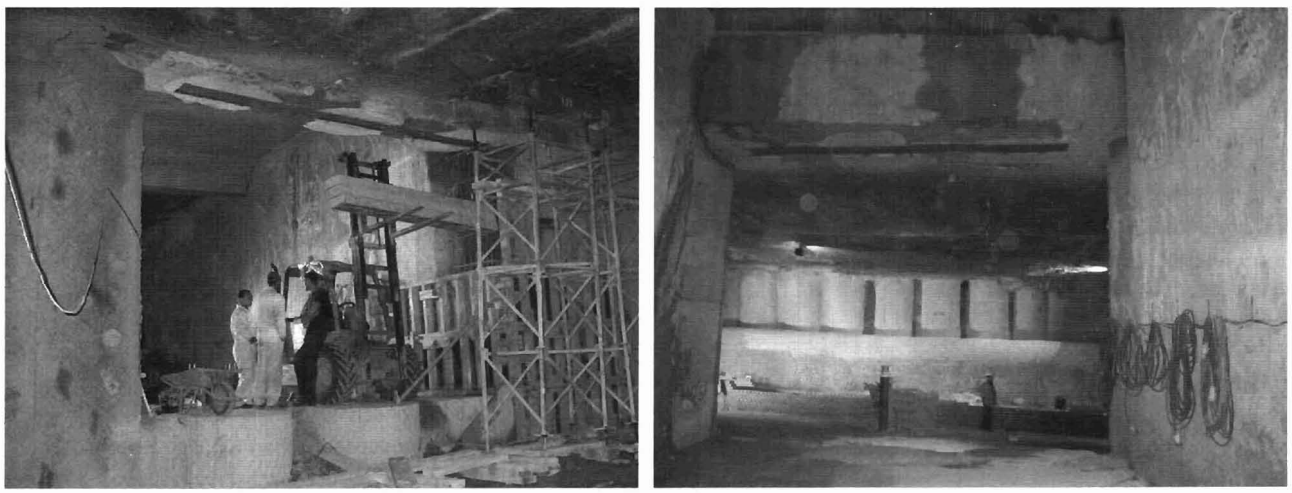

Figura 30.- Corte de los pilotes de 1.50 m de diámetro en el "telescopio" de María de Molina. Paso del ramal de Velázquez por el primer nivel del "telescopio". En la foto de la izquierda se observan los pilotes de la cara norte de salida cortados, así como el refuerzo de la losa sobre la que transita el tráfico de la calle Velázquez. En la foto de la derecha, se observan los pilotes que faltan por cortar en la cara sur de la entrada al "telescopio".

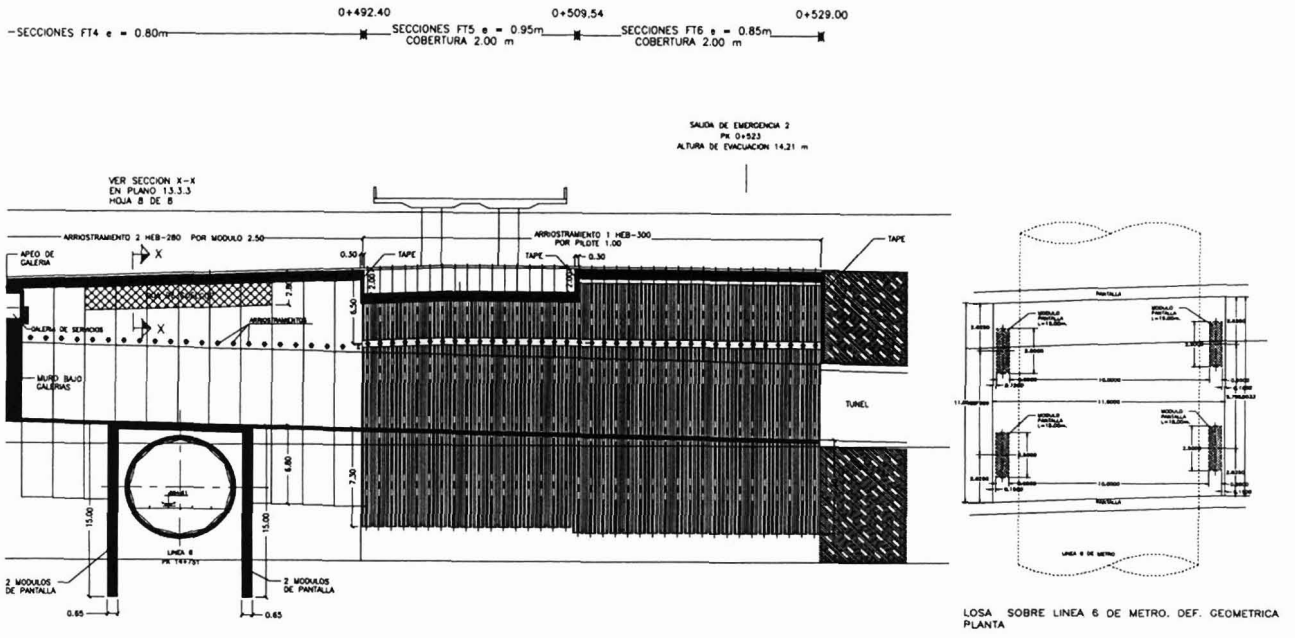

Figura 31.- Paso sobre la línea 6 en falso túnel.

micropilotes, que permitan transmitir las cargas, de forma segura, hasta un estrato profundo.

Túnel bajo la calle López de Hoyos:

En esta zona, el aspecto más importante es la protección de las cimentaciones de los edificios más próximos para minimizar el efecto de asientos producidos por la construcción del túnel. Dada la longitud del tramo en el que hay que actuar y la posición relativa entre túnel y edificios, la solución más adecuada es disponer una pantalla que corte la cubeta de asientos inducido por el túnel. Para este tipo de pantallas se eligió el sistema de inyecciones de alta presión (jet-grouting), dada su versatilidad, ya que permite realizar los taladros con la inclinación requerida por la disposición relativa de los servicios, túnel y cimentaciones.

Además, se han previsto inyecciones de compensación de asientos por subsidencia en esta zona, a base de lechada de cementos, colocación de paraguas pesado (dos filas) de micropilotes en los emboquilles del túnel en galería y el tratamiento con inyección química de impregnación a base de silicatos, cuando sea preciso proporcionar cohesión a los materiales granulares para aumentar la seguridad en la excavación de la bóveda del túnel.

Además, el túnel pasa sobre la línea 4 de Metro y bajo la línea 9 con muy poco gálibo.

Paso sobre la línea 9 de metro:

El túnel de María de Molina cruza sobre la línea 9 de Metro en las inmediaciones de la intersección de las calles López de Hoyos y Príncipe de Vergara.

Para evitar que las cargas concentradas transmitidas por los hastiales del túnel viario puedan producir daños en el revestimiento del túnel de Metro, se consideró necesario "puentear" dichas cargas. Para ello, se decidió armar los hastiales, construyendo éstos en galería previamente a la excavación de la bóveda (método A). Estas vigas armadas que forman los hastiales deberán apoyarse sobre cimentaciones profundas (pilotes ejecutados previamente desde la superficie), situados a ambos lados del túnel de Metro, para transmitir las cargas por debajo de la contrabóveda del túnel a proteger. Esta protección se completará con el armado de la solera del túnel viario, que se apoyará sobre pilotes dispuestos transversalmente al eje del nuevo túnel.

Paso bajo la línea 4 de Metro:

La escasa distancia entre la contrabóveda del túnel de la línea 4 y la clave del túnel de María de Molina (prácticamente tangentes) exige la adaptación de un proceso constructivo especial y la puesta en práctica de medidas complementarias:

- Los hastiales en galería, para cruzar sobre la línea 9, se prolongarán hasta superar el cruce bajo la línea 4. La finalidad de adoptar este procedimiento (hastiales en galería-bóveda-destroza) es doble: por un lado garantizar un adecuado apoyo a la bóveda, eliminando el riesgo de descenso de la misma durante la destroza y por otro lado permite llevar la inyección del trasdós lo más cerca posible del frente para contribuir a disminuir los asientos.

- Desde el frente de avance (espejo de la excavación en avance de la bóveda) se realizará un paraguas pesado de

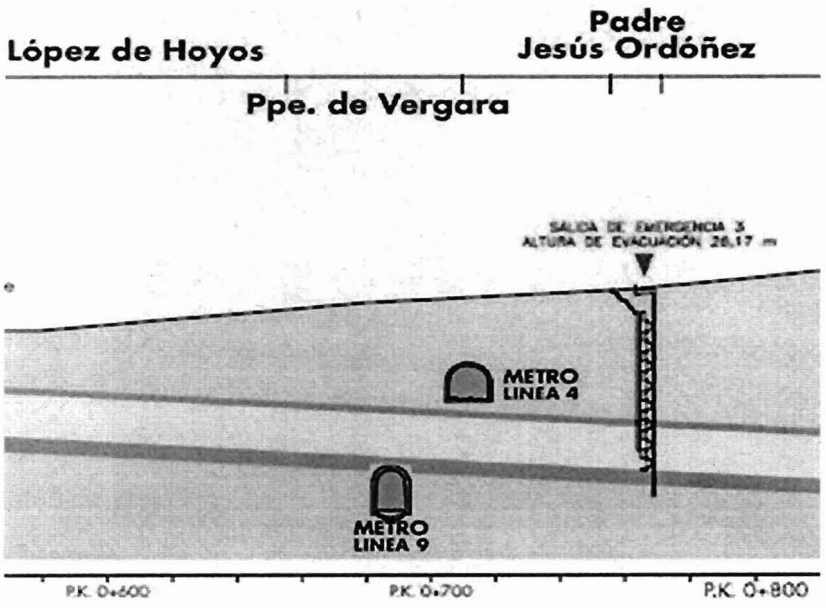

Figura 32.- Problemática de las soluciones cen el paso bajo la línea 4 de Metro y sobre la línea 9.

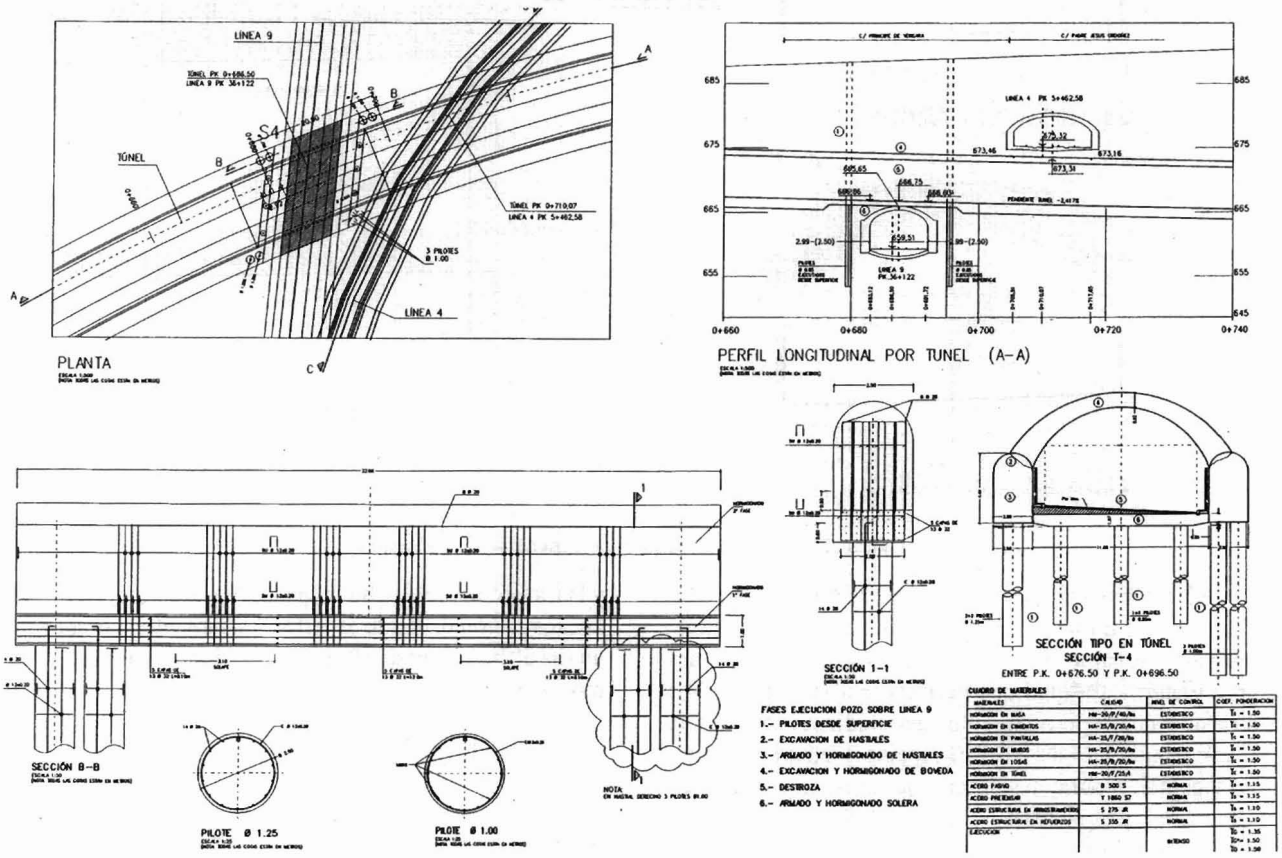

Figura 33.- Tratamientos en el cruce con la linea 9. Detalle del armado del hastial apoyado sobre pilotes de diámetro 1.25 m puenteando la línea 9 de Metro.

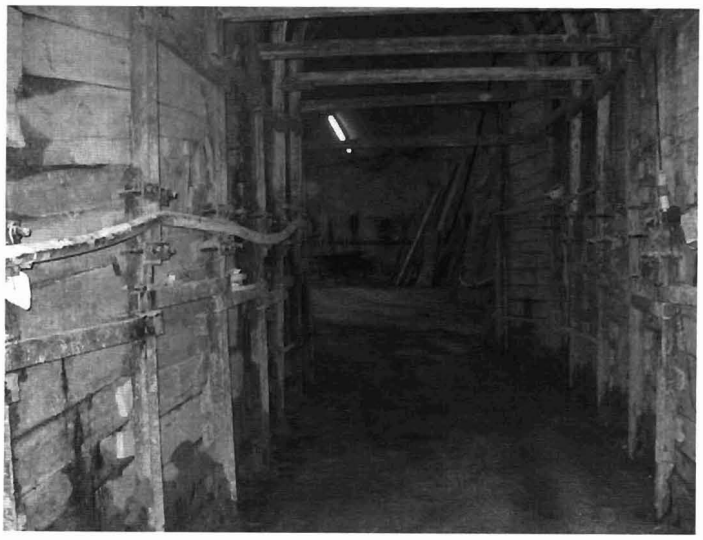

Figura 34.- Ejecución del hastial armado que puentea la línea 9 de Metro que va apoyado en pilotes de diámetro 1.25 m.

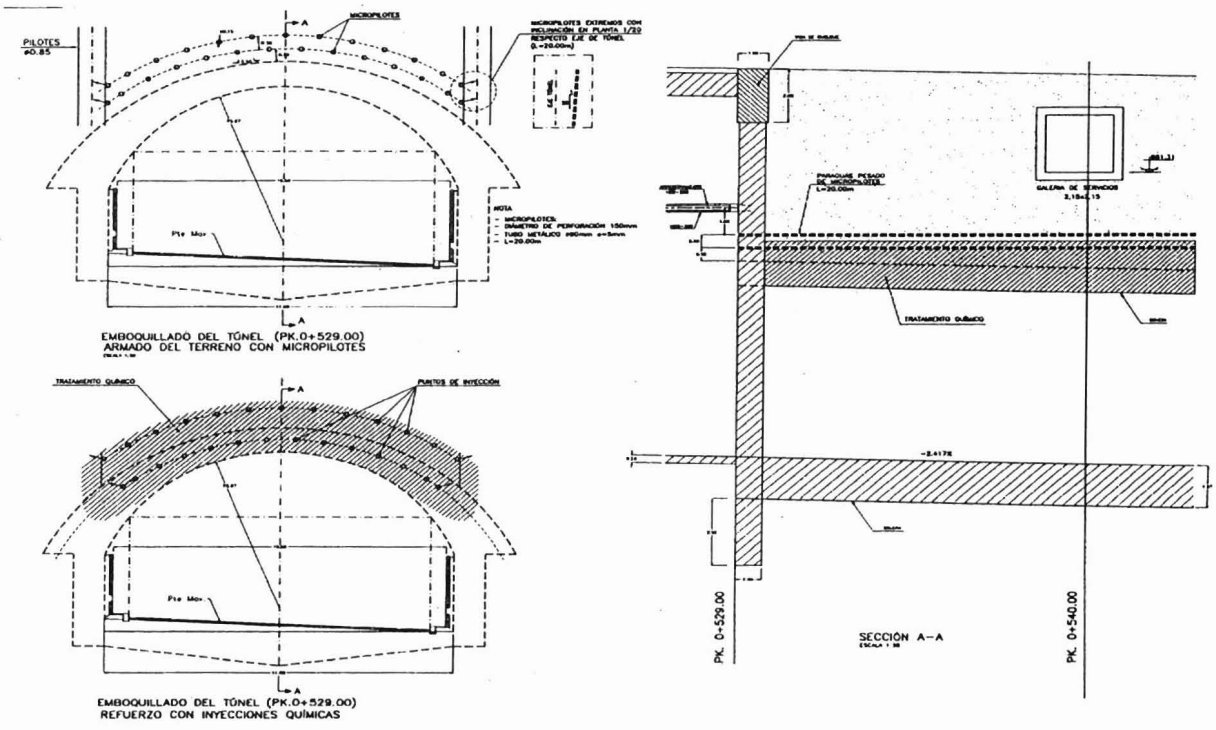

Figura 35.- Paraguas pesado de micropilotes de los emboquilles.

micropilotes horizontales, así como, si fuese necesario, una inyección química, mediante silicatos, para proporcionar a los posibles niveles de arenas gruesas una cohesión e impermeabilidad que permita realizar los trabajos sin riesgos de desprendimientos que pudieran afectar a la línea 4. Con objeto de crear el espacio vertical necesario para ejecutar el paraguas de micropilotes, se procederá a realzar la bóveda en los 4 o 5 avances (8 a 10 m) anteriores al cruce bajo la línea 4.

- También se ha previsto el refuerzo de la entibación en esta zona (doble tabla, mayor número de tresillones, etc.) y la reducción del ancho de paso, llevando muy "cerrada" la excavación (estando abiertos únicamente la mina y primeras al hormigonar el anillo anterior) y, en caso extremo, reducir el avance.

Salidas de emergencia

Salvo la primera salida de emergencia situada en el centro del bulevar de la calle López de Hoyos, que se resuelve mediante una pasarela colgada del techo del falso túnel, el resto de las salidas de emergencia precisa la ejecución de pozos que incorporan la ventilación de emergen-

cia del túnel. Dichas salidas tienen unas dimensiones en planta del orden de 11.00 x 6.00 m. Los pozos están formados por pantallas de pilotes de 0.85 m de diámetro para los pozos de menor profundidad (hasta 15.00 m) y de 1.00 m de diámetro para los pozos de mayor profundidad (hasta 37.00 m). Para garantizar la estabilidad y reducir la deformación de los pilotes, se han dispuesto marcos de arriostramiento con un espaciamiento decreciente con la profundidad. Estos marcos, de hormigón armado, con unas dimensiones de 1.00 x 0.65 m, se han conectado a los pilotes mediante pasadores.

El cálculo se ha realizado con el programa RIDO, teniendo en cuenta la flexibilidad media de los marcos de arriostramiento, cuyas dimensiones y espaciamiento se han ajustado para no superar las condiciones de deformacio-

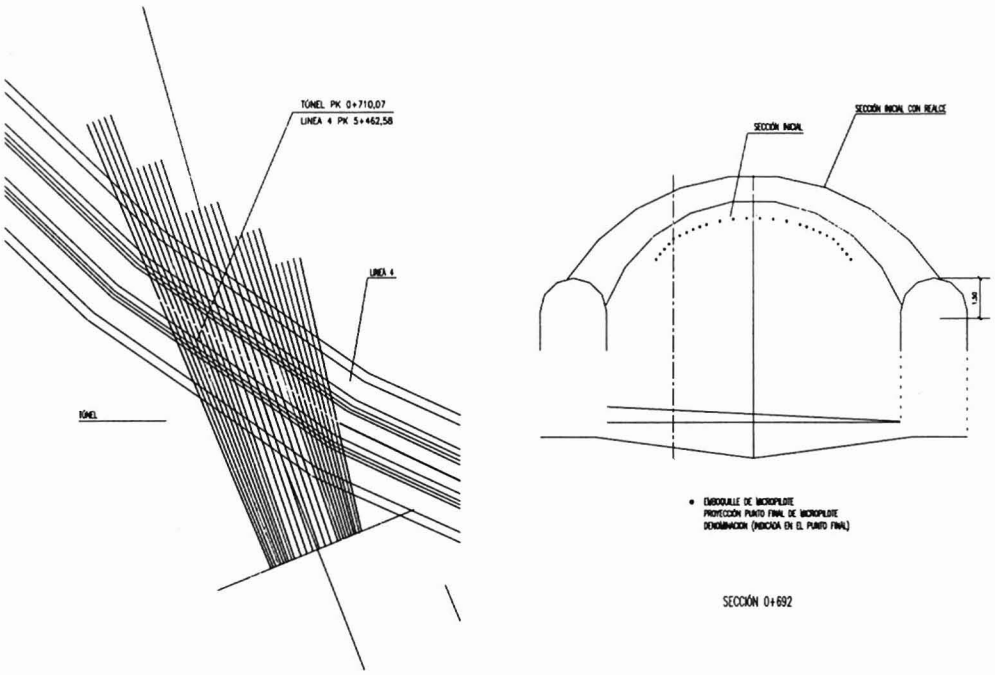

Figura 36.- Detalles de tratamientos en el cruce del túnel con la línea 4 de Metro.

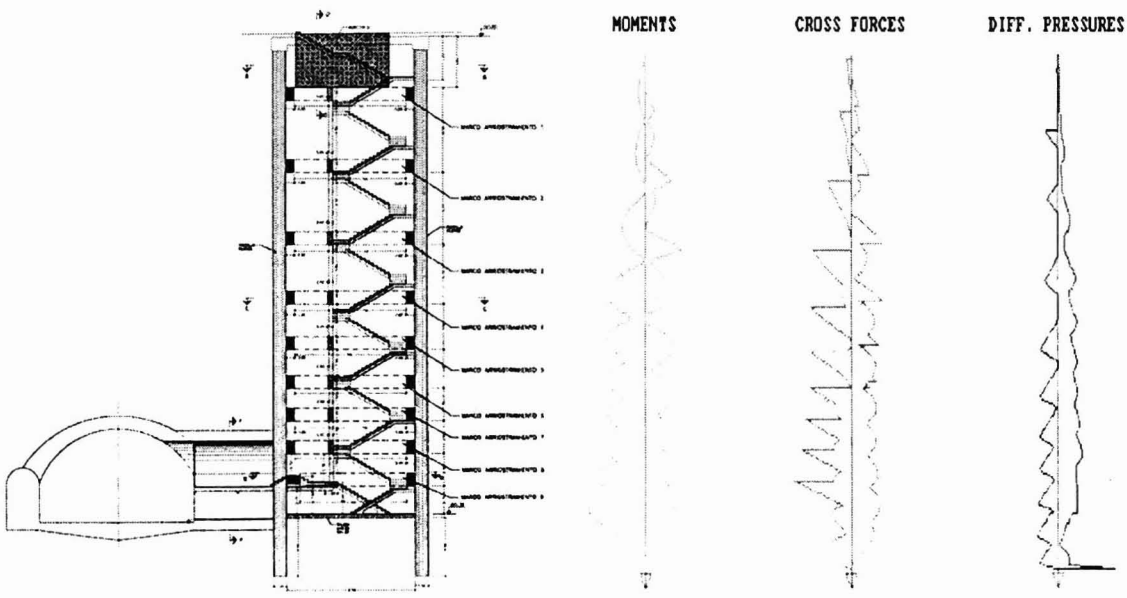

Figura 37.- Croquis del pozo de la calle Constancia y resultados de cálculo con el programa RIDO.

Figura 38.- Ejecución, excavación y fase estructural terminada de un pozo, pilotes de 1.00 m de diámetro y marcos de arriostramiento.

nes requeridas. Los empujes del terreno han sido minorados de forma heurística y avalada por la experiencia por un factor 0.70.

El procedimiento constructivo previsto es:

- Ejecución de los pilotes
- Excavación hasta cota del arriostramiento o marco más próximo
- Montaje de armadura del marco y hormigonado del mismo
- Excavación hasta el marco siguiente... etc.

Pasarela sobre la CN-II

Se analizaron diversas soluciones para ampliar el vano central de la pasarela, afectada por el nuevo trazado, que se concretó en dos alternativas: o bien ampliación por el centro de vano o bien ampliación por un lateral. En ambas alternativas era preciso modificar la posición de la pila de la margen derecha. Se eligió la segunda alternativa porque minimizaba la afección al tráfico durante la ejecución.

Se programó y realizó una campaña de caracterización de la pasarela: geometría, espesores de chapa, características mecánicas del acero, dimensiones de la cimentación y condiciones geotécnicas del apoyo.

Con estos datos, se proyectó una ampliación del vano central que pasaba de 35.00 a 38.50 m de luz. Lo que se conseguía sustituyendo la pila inclinada por una nueva vertical, siguiendo el siguiente proceso constructivo:

- Recalce de la cimentación mediante micropilotes inclinados en dos direcciones perpendiculares
- Anclaje a la cimentación de la base de la nueva pila
- Apeo del vano lateral sin interrumpir el tráfico de la vía de servicio
- Apeo del vano central, ocupando el arcén de la CN-II. Suspensión con grúa de dicho vano y corte del tablero en secciones próximas a la pila
- Montaje de la nueva pila vertical y con carrete de tablero y conexión del mismo con el vano central y lateral apeados
- Formación de la zona pisable, retirada de apeos, acabados y terminación

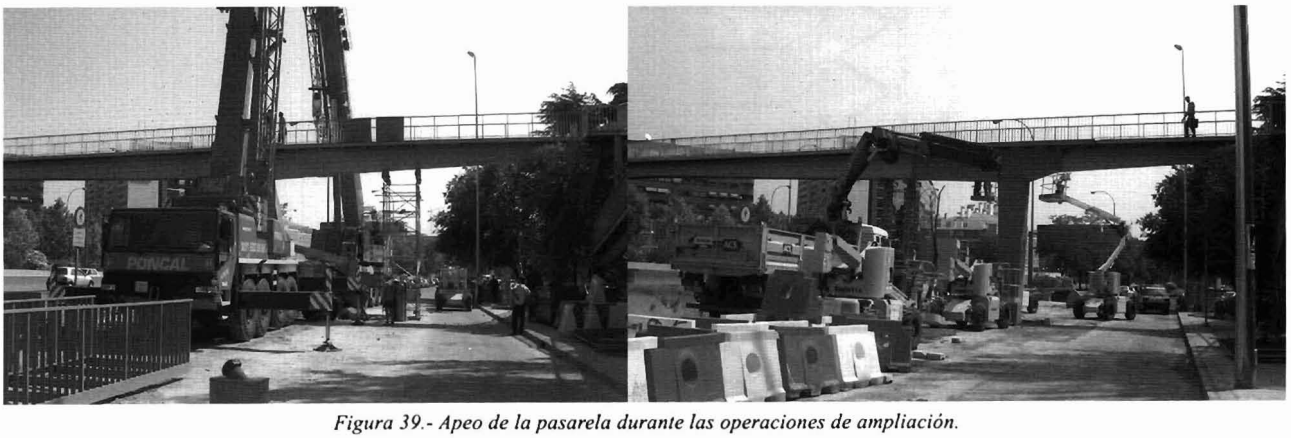

Figura 39.- Apeo de la pasarela durante las operaciones de ampliación.

Figura 40.- Alzado general de la pasarela ampliada.

6. CONSIDERACIONES FINALES

El proyecto de una obra de esta entidad, un túnel de más de 2.000 m en zona urbana, ha exigido tanto el análisis global de los aspectos que condicionan las alternativas de trazado, como el estudio detallado de las condiciones de contorno que condicionan las soluciones estructurales a adoptar en cada caso concreto.

La participación coordinada de los equipos técnicos de la Administración, las empresas constructoras y las oficinas de proyecto implicadas, permitirá al Ayuntamiento de Madrid poner a disposición de los ciudadanos esta singular obra de infraestructura viaria en la primavera del 2003.

* * *