

# Nuevo túnel de Pío XII: Cajones Empujados bajo la Estación de Chamartín

## New Pío XII Tunnel: Jacked Boxes at the Chamartín Railway Station

**Javier Maestro Aznar.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Director de Obra. maestroaj@munimadrid.es

**Carlos Oteo Mazo.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Asesor Geotécnico. carlosoteo@telefonica.net

**Francisco Javier Laguna Pereira.** Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Jefe de Unidad de Asistencia Técnica. UTE Incoydesa-Ingeniería Básica. pacolaguna@gmail.com

**Resumen:** El nuevo túnel de Pío XII forma parte del nuevo sistema de túneles que desarrolla las conexiones este-oeste de Madrid por el norte de la ciudad. El tramo central de dicho túnel debía atravesar una playa de 30 vías, manteniendo en todo momento el servicio de trenes, pasajeros, e instalaciones. El cruce de las 18 vías electrificadas de más tráfico se ejecutó por el método de cajones empujados, aplicado a gran escala. La longitud de empuje total es de 150,80 m, con una sección exterior de los cajones de 15,20 x 7,90 m, pasando a 1,05 m bajo la cabeza de carril de todas las vías. Se ejecutaron dos fosos de empuje, uno a cada lado de la estación. En el lado Este la falta de espacio obligaba a la adopción del método « revólver » (construcción en paralelo). En el lado Oeste se diseñó una gran estructura pilotada de reacción, para evitar movimientos en túneles y estructuras existentes, contiguas al muro de empuje.

**Palabras Clave:** Pío XII; Cajones empujados; Pasos subterráneos; Cajones hincados

**Abstract:** The new Pío XII tunnel is part of the recently opened tunnel system that develops the east-west communications of northern Madrid. The central part of the tunnel runs under the Chamartín Railway Station under 30 tracks, 18 of which were crossed by the box jacking method, applied on a very large scale. The total length of the jacking was 150.80 m, with an exterior box section of 15.20 x 7.90 m, crossing the 18 electrified tracks with largest amount of traffic, at 1.05 m below the rails. Two jacking pits were dug, one on each side of the Station. Two boxes were built in each pit. On the East side, lack of space was solved by the "revolver" method (two boxes built side by side). On the west side, a large reaction pier structure was designed to avoid movement in existing tunnels, scarcely separated from the thrust wall.

**Keywords:** Pío XII; Jacked boxes; Artificial tunnels; Railworks

### 1. Introducción

El nuevo túnel de Pío XII forma parte del desarrollo de los ejes este-oeste de comunicación por el norte de la ciudad de Madrid, enlazando la M-30 con el Distribuidor Subterráneo alrededor del nuevo centro de negocios de las 4 Torres, y las calles Sinesio Delgado y Monforte de Lemos.

### 1. Introduction

*The Pío XII new tunnel forms part of the development of the East-West communication axes through the North of the City of Madrid, linking the urban motorway M-30 with the Subterranean Distributor around the new 4 Towers Business Area, and the Sinesio Delgado and Monforte de Lemos streets.*

Fig. 1. Planta general/Ground plan.



El proyecto contempla la prolongación del túnel existente de Pío XII hacia el este (M-30) y hacia el oeste (c/Monforte de Lemos), y la construcción de un nuevo túnel paralelo, por el lado sur. De este modo, tanto la prolongación del túnel existente como el nuevo túnel se convierten en unidireccionales (Fig. 1).

El tramo más singular del nuevo túnel es el que discurre bajo la estación de Chamartín, atravesando 30 vías ferroviarias y los recintos anejos a la estación, así como multitud de antiguas estructuras soterradas bajo la misma, algunas todavía en uso (Maestro et al., 2007).

Las 18 vías de mayor tráfico se atravesaron por el método de cajones empujados. El resto de las zonas de obra discurren por viales, teniendo especial importancia los cruces con los túneles y estaciones

*The project includes the extension of the existing Pío XII tunnel towards the east (M-30) and towards the west (Monforte de Lemos street), and the construction of a new tunnel, on the south side. In this way, both tunnels become uni-directional (Fig. 1).*

*The most unique stretch of the New Tunnel is that which runs below the Chamartín Railway Station, crossing 30 railway tracks and the premises attached to the Station, as well as many old subterranean structures, some of them still in use (Maestro et al., 2007).*

*The 18 tracks with the greatest amount of traffic were crossed by the driven box method. The rest of the tunnel sections run under roadways and built up areas, in some cases crossing only several centimetres away from complex METRO tunnels and stations.*

*In Fig. 1 we can observe the trace of the two mentioned tunnels, in the part ranging from the Paseo*

de METRO situadas a escasos centímetros del nuevo túnel.

En la figura 1 se observa el trazado de los dos túneles mencionados, en el tramo situado entre el paseo de la Castellana (donde conectan con el Distribuidor Subterráneo del área de las 4 Torres) y la avenida de Pío XII (donde enlazan a su vez con el proyecto de remodelación del enlace de La Paloma y con la M-30).

A continuación describiremos los tramos ajenos a la estación de Chamartín más significativos, para desarrollar después el cruce bajo vías:

Entre el paseo de la Castellana y la estación, el nuevo túnel se ha ejecutado por medio de pantallas de pilotes y losas a distintas alturas, discuriendo el trazado del túnel bajo el vial de acceso a la estación desde la Castellana (Figs. 2, 3 y 4).

Dentro de este tramo, tenía especial importancia el retranqueo de las grandes conducciones de abastecimiento de agua a Madrid por el norte (2 tuberías de 2.000 mm de diámetro y una galería in situ de diámetro equivalente 2.200 mm), que por su dimensión y geometría representaban una dificultad notable (Figs. 3, 4 y 5).

Además de esta actuación, el resto de condiciones de contorno, y especialmente las relacionadas con el proyecto del futuro intercambiador de transportes de Chamartín, exigían un trabajo de coordinación importante.

En el tramo que nos ocupa, la estructura a ejecutar conformaba un doble túnel (Fig.3). Es decir:

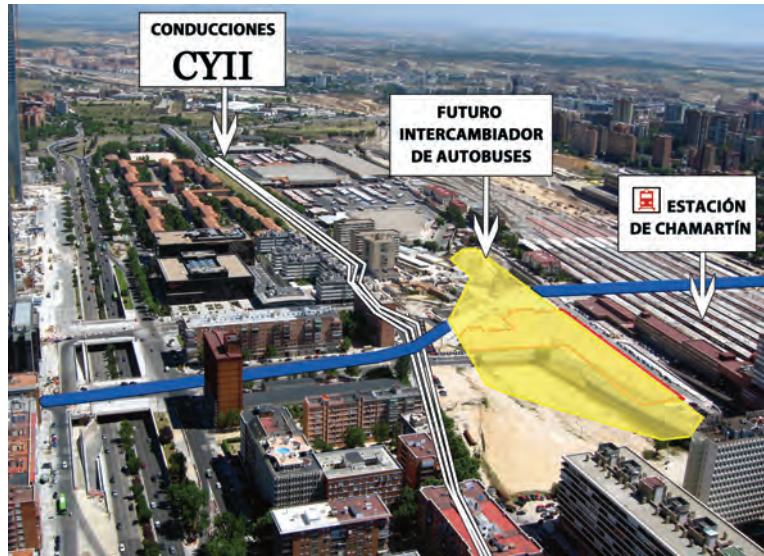


Fig. 2. Nuevo túnel de Pío XII. Cruce con futuro Intercambiador/ New Pío XII Tunnel. Crossing with the future transport interchange.

de la Castellana (where both tunnels connect with the Subterranean Distributor) to the Pío XII Avenue (linking with the La Paloma junction and the M-30 Motorway).

We will firstly briefly describe the main sections of the tunnels built in the areas not occupied by the railway station, concentrating then on the part concerning the crossing of the tracks.

Between the Paseo de la Castellana and the Station, the new tunnel has been built by the cut and cover method, with piles and slabs at different levels as the tunnel runs below the access roadway to the Station from the West. (Figs. 2, 3 y 4).

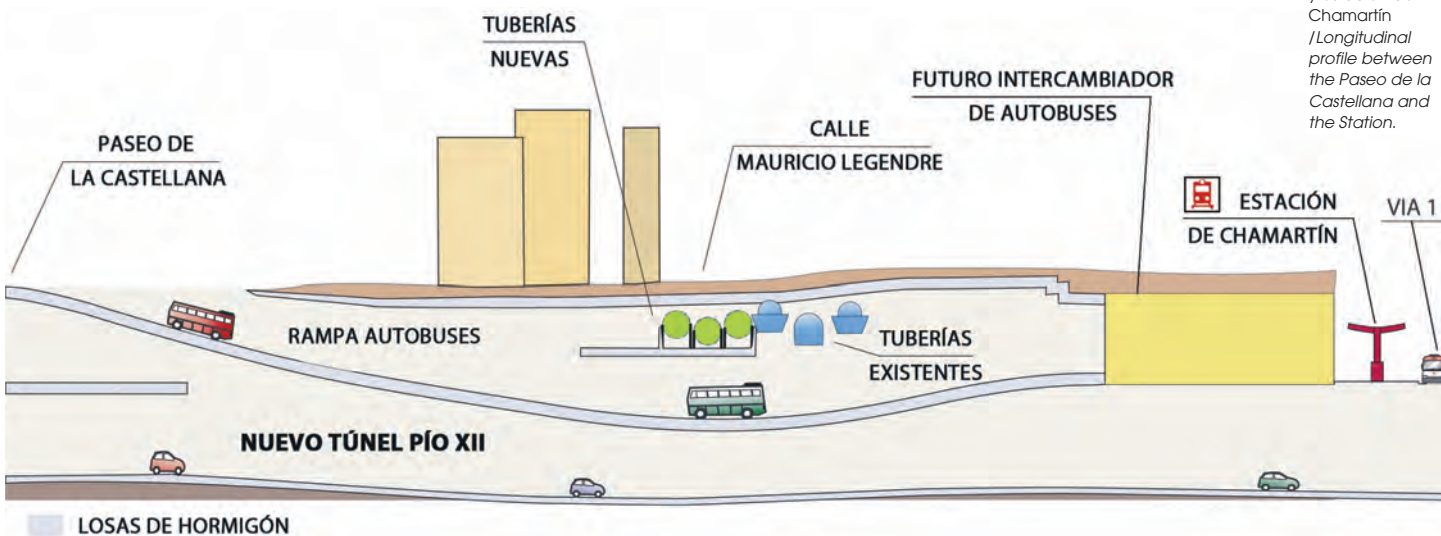


Fig. 3. Perfil Longitudinal entre Castellana y estación de Chamartín /Longitudinal profile between the Paseo de la Castellana and the Station.

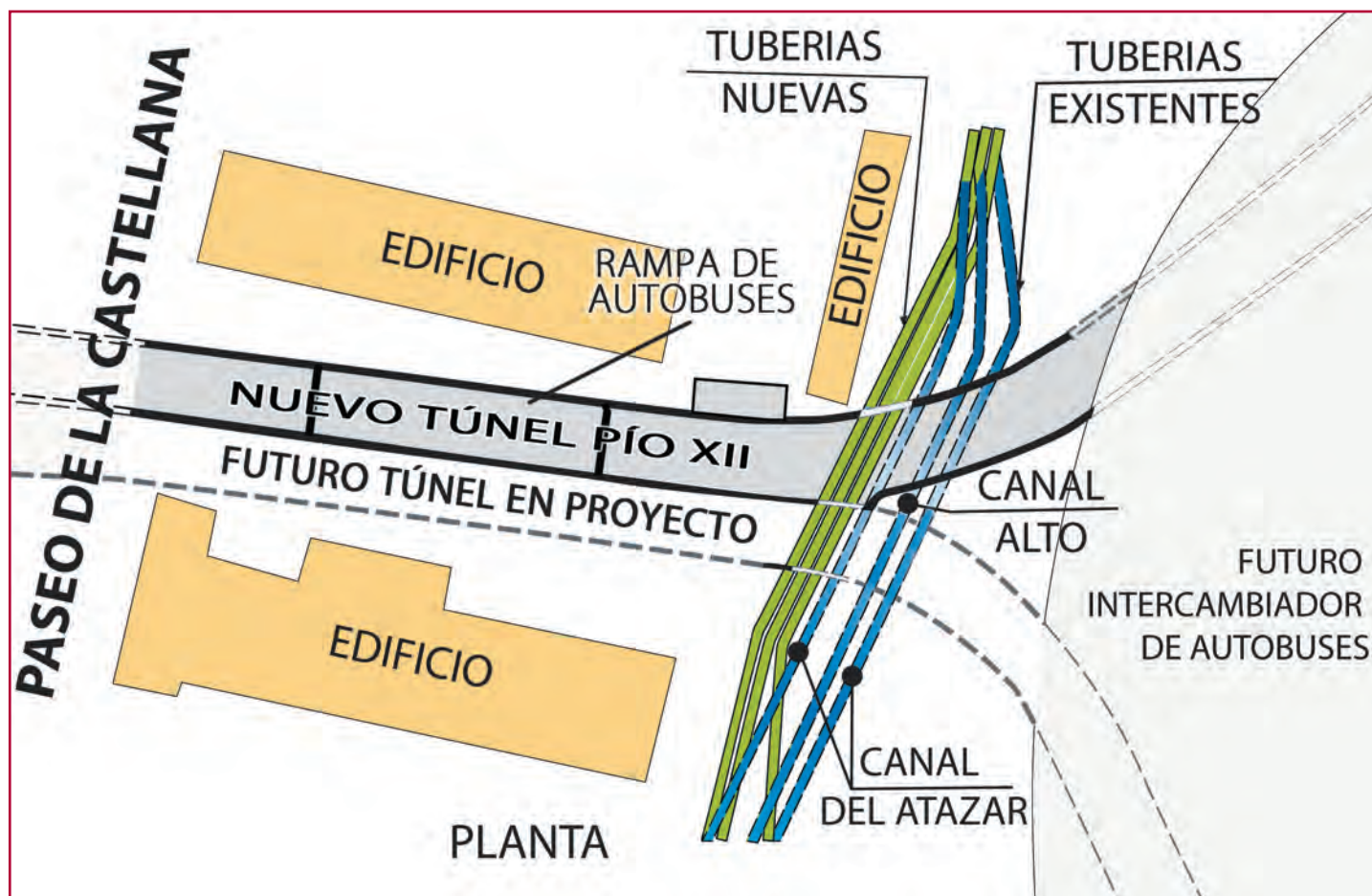


Fig. 4. Planta. Trazado entre Castellana y futuro Intercambiador / Ground plan between the Paseo de la Castellana and the Railway Station.

La rasante del nuevo túnel de Pío XII discurre a una profundidad de unos 20 metros, pero las pantallas se aprovecharon de manera que cumplieran dos funciones:

- a) Por un lado, permitir una rampa de acceso superpuesta al nuevo túnel de Pío XII, que en el futuro dará acceso al intercambiador desde la superficie del paseo de la Castellana.
- b) Por otra parte, la pantalla sur se ejecutó de modo que en un futuro sirva también como pantalla del túnel paralelo proyectado, como parte de los accesos subterráneos al intercambiador (Fig. 4).

En cuanto al retranqueo de las conducciones del Canal de Isabel II, presentaban una geometría y recubrimientos de hormigón de muy variables características, siendo la posición relativa de una conducción respecto de otra absolutamente determinante del proceso constructivo.

*Special importance had to be given to the required setting back of the major northern water supply pipes to Madrid (2 pipes of 2000 mm diameter and an in situ gallery with a diameter equivalent to 2200 mm), that because of the dimensions and geometrical position of the pipes represented a major challenge. (Figs. 3, 4 y 5).*

*The rest of the conditioning factors, especially those concerning the development of the future transport interchange and the future expansion of the Station, represented an important coordination task.*

*The structure in this section was constituted by a double tunnel. As we can see in Fig. 3, the new Pío XII tunnel runs at about 20 metres of depth at this point, but the piles and slabs were designed for a double goal:*

*On the first hand, the level just on top of the new Pío XII tunnel will serve as an access ramp from the surface of the Paseo de la Castellana to the future transport interchange.*



En el tramo de entronque al norte, las tres tuberías estaban hormigonadas en conjunto, separadas entre sí no más de 45 cm en planta y unos 2,0 m en alzado. Además se encontraban embebidas en un dado de hormigón armado a lo largo de unos 50 metros. Esto incrementó de forma notable la dificultad de la actuación, especialmente al tener que ceñir cada actuación a una única tubería, mientras las otras dos debían seguir en servicio.

En cuanto a la prolongación del túnel actual, ejecutado también por medio de pilotes y losas, se debe destacar la actuación de descontaminación de suelos con presencia de hidrocarburos en las proximidades de una gasolinera. El trazado discurre por zona de viales.

## **2. Descripción del terreno y antiguas estructuras atravesadas**

La zona que es objeto de estudio se localiza en la zona norte de Madrid, dentro del predominio de

*On the other hand, the south piles were designed and built in order to be able to use them for the future execution of a parallel tunnel (Fig. 4), that will complete subterranean accesses to the future transport interchange.*

*As for the mentioned water pipes, the existing ones had a significantly variable geometry and concrete coating. Thus, the displacement of each of them called for varied solutions, in most cases needing very important auxiliary processes, in order to solve the complicated geometry of their relative position.*

*In the north connection, the three pipes were held in a massive concrete coating, with scarcely 45 cm between the pipes in the horizontal axis, about 2,0 meters on the vertical one, and kept covered in reinforced concrete for about 50 m. This situation demanded a very special demolition process and made working conditions extremely difficult, as each pipe had to be displaced while the other two were kept in service.*

Fig. 5.  
Colocación de tuberías CYII  
/ Installation of the new water pipes.

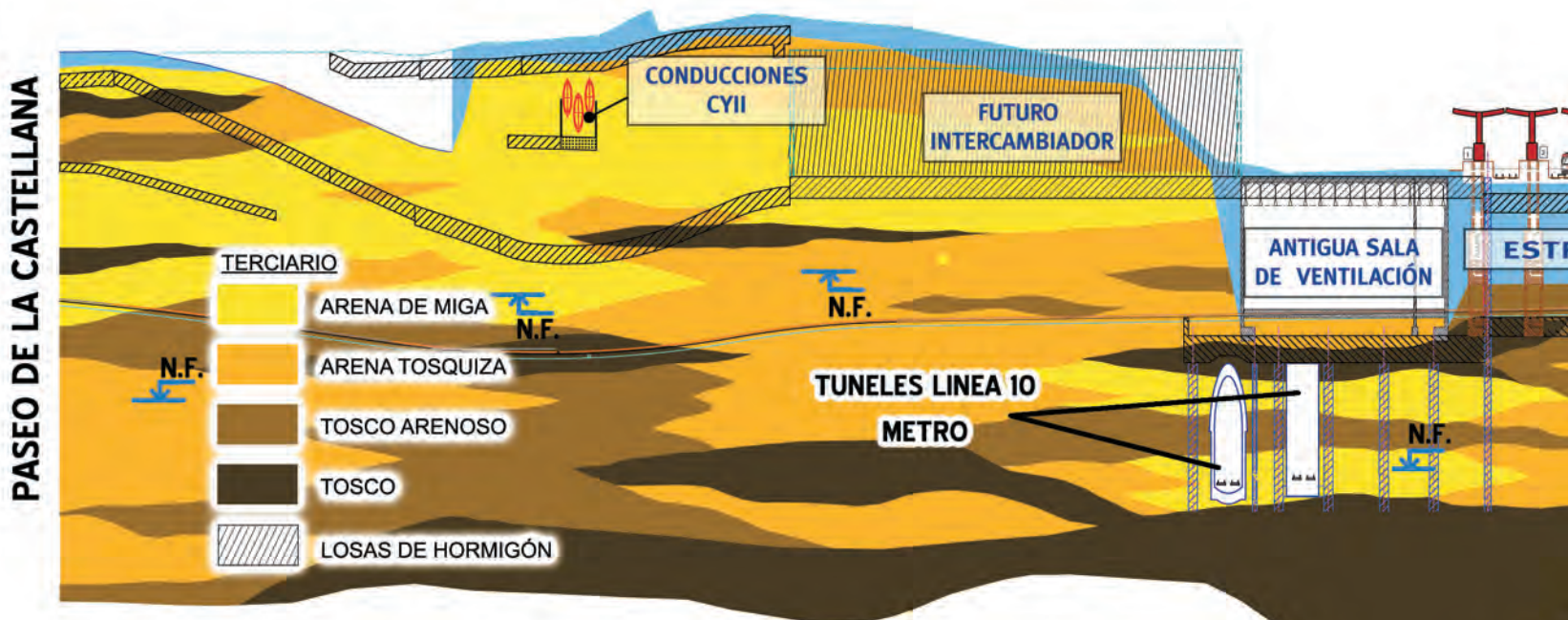


Fig. 6. Perfil longitudinal geotécnico/Geotechnical longitudinal profile.

la facies Madrid constituida por arenas de miga y suelos tosquizos. El sustrato terciario está compuesto por materiales detríticos cuya litología varía desde arcillas hasta arenas, siendo los más característicos las arenas tosquizas, el tosco y arenas arcillosas. Por otro lado, la zona de estudio aparece muy antropizada debido a su ubicación, estando constituidos los rellenos antrópicos por materiales heterogéneos de arenas, arcillas, cascotes, etc., procedentes de vertidos, y obras (Figs. 6 y 7).

En la zona de obra, el terreno se encuentra situado a la cota 720 m aproximadamente. Debido a las obras para la construcción de la actual estación, aproximadamente entre 1965 y 1985, existían varios antiguos vestíbulos soterrados, galerías, etc. de la estación, con sus correspondientes excavaciones y posteriores rellenos. Estas estructuras y rellenos son las que actualmente ha sido necesario atravesar.

En la mitad oriental y en la parte inferior del túnel aparece el terreno natural formado por los depósitos miocenos típicos de Madrid, que en esta zona están formados por arena tosquiza y tosco arenoso.

La arena tosquiza está constituida por arenas densas (cuarzo - feldespáticas) de tamaño medio –

*The extension of the existing tunnel, executed also by means of piles and slabs, was preceded by an important hydrocarbon decontamination process, in the surroundings of a nearby gas station.*

## 2. Ground and old structure conditions

*As to the geotechnical setting, the zone subject to study is located in the Northern area of Madrid, within the prevailing area of the Tertiary Madrid Facies, formed by "miga" sand (sand with 25% fines or less) and clayey sand layers ground (known locally as "tosquiza" sand) and stiff clay ("Tosco"). On the other hand, the area is recovered by anthropic fills due to its location within the Metropolitan area of Madrid, being formed by anthropic fillings of heterogeneous materials of sand, clay, rubble, etc., from landfills, works and levelling (figs.6 and 7)*

*In the working site, the ground surface is located at the level of approximately 720 m. Due to construction of the present Chamartín station, approximately between 1965 and 1985, several old underground vestibules, galleries, etc. of the Station were built, with their relevant excavations and subsequent fillings.*



fino con un contenido limo-arcilloso comprendido entre el 25 % y el 40 %. Presenta intercalaciones más arenosas. Los valores obtenidos en el ensayo SPT son siempre superiores a 30 y con frecuencia a 50. El tosco arenoso presenta sin embargo un mayor contenido de finos (entre el 40% y el 60%), por lo que está constituido por materiales que van desde arenas arcillosas hasta arcillas arenosas. Aparece siempre duro con valores de la resistencia a la compresión simple del orden de 0,4 - 0,5 Mpa. En ambos casos la plasticidad de los finos era moderada.

La composición de los rellenos aparecidos es muy variable y se han encontrado desde materiales miocenos recolocados más o menos compactados hasta restos de materiales de construcción y escombros varios. En general, presentaron granulometrías muy heterogéneas, constituidas por arenas, arcillas y escombros principalmente, hasta tamaño grava gruesa. En los ensayos SPT el resultado medio ha sido de 13 golpes, aunque con un mínimo de 3 y un máximo de 25.

Sin embargo, hubo que atravesar multitud de estructuras soterradas situadas bajo los andenes de

*In the eastern half and lower part of the new tunnel, there is the natural ground formed by the typical Miocene deposits of Madrid, that are formed by clayey sand and sandy clay in this zone.*

*The clayey sand is formed by dense sand (quartzfeldspatic) of medium-fine size, with a mud-clay content ranging from 25% to 40%. It has more sandy intercalations. The values obtained in the SPT test are always higher than 30 and frequently than 50. However, the sandy clay has a greater content of fine material (between 40% and 60%), so it is formed by materials ranging from clayey sand to sandy clay. It is always hard, with figures of resistance to simple compression within the range of 0.4 – 0.5 Mpa. In both cases, the plasticity of the fine materials was moderate.*

*The composition of the fillings encountered is highly variable and the materials found range from Miocene materials replaced and more or less compacted, to remains of construction materials and assorted rubble. These materials generally have very heterogeneous grading, mainly formed by sand, clay and rubble, up to coarse gravel size. In SPT testing, the average result*

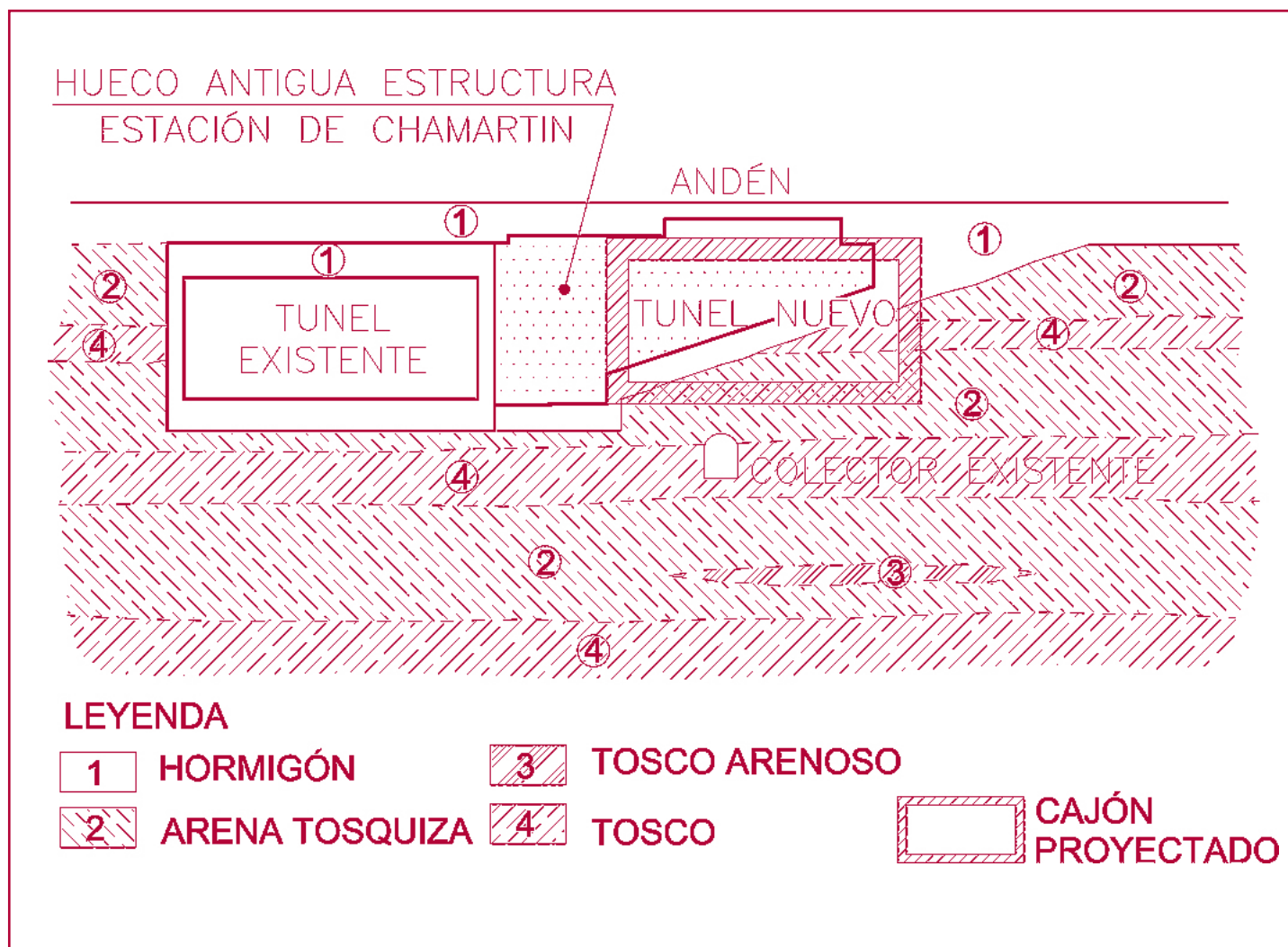


Fig. 7. Corte geotécnico transversal por andén nº9 / Transversal geotechnical section through platform nº9.

la estación, constituidas por antiguas galerías y rampas de acceso a superficie desde los vestíbulos, así como las galerías de enlace, servicios y emergencia, todas ellas de hormigón armado.

Estas galerías, de características complejas, afectaban al trazado de manera variable. También se atravesaban los rellenos antrópicos colocados tras la construcción de dichas estructuras en el trasdós de los muros (Fig. 6).

Los muros de estas estructuras estaban formados por espesores importantes de hormigón, en general de buena calidad, con armadura heterogénea. Sin embargo, se han encontrado zonas de rellenos importantes de hormigón, y algunas masas muy disgregadas. No hay que olvidar que las estructuras soterradas tenían una configuración compleja, al ser parte de la antigua estructura de

was 13 blows, although with a minimum of 3 and a maximum of 25.

The mentioned underground structures located under the platforms of the Station, formed by old galleries, access ramps to the surface from the vestibules, and the linking, service and emergency galleries, had to be crossed by the new tunnel.

These galleries, with highly random characteristics, affected the route in a variable manner. The tunnel also had to cross through the anthropic backfill behind the walls (Fig. 6).

The walls of these structures were formed by major thicknesses of concrete, generally of good quality, with heterogeneous reinforcement. However, several zones were found with large amounts of mass concrete filling and some highly broken up masses. We must not forget that the underground structures



Fig. 8. Vista del interior de las estructuras atravesadas / View of underground existing structure.

la estación, reformada a lo largo de muchos años.

En la mitad occidental la situación es análoga, con una configuración de terrenos y estructuras antiguas algo distinta, de origen más reciente. El nivel freático no tuvo influencia significativa en la zona de cajones empujados.

Los dos casos más singulares se encontraron entre las vías 17 y 19, y entre las vías 10 y 11. En el primer caso, la estructura antigua a atravesar, con forma de pozo vertical, afectaba de lleno al trazado de forma especialmente asimétrica, con riesgo de producir desprendimientos del material de relleno.

Entre las vías 10 y 11 se encontraba una gran galería doble de peculiar configuración, que antiguamente unía los vestíbulos de largo recorrido y el de cercanías, ambos soterrados (Fig. 11).

*had a complex configuration as they were part of the old structure of the Station, reformed over many years.*

*In the western half, the situation was very similar, though the underground structures had a significantly different geometry. As for the water table, the influence in the area of the jacked boxes was not significant.*

*The two most unique cases were found between tracks 17 and 19, and between tracks 10 and 11. In the first case, the old structure to be crossed, in vertical shaft form, fully affected the route in a very asymmetric way, in a place where the chaotic filling material could collapse.*

*Between tracks 10 and 11, there was a double gallery, that many years ago linked the long distance vestibules and those of the local railway, both underground (Fig. 11).*

Fig. 9. Vista del nuevo túnel bajo vías FFCC / General view of the new tunnel under the Station.



El resto de estructuras presentaban un problema similar: Se trataba en general de marcos cerrados bajo cada andén, con la losa superior en superficie; por lo que al demoler esta losa, se podía producir el colapso de la estructura (Figs. 11 a 14).

Fig 10. Empuje de cajones. Vista general / Box Jacking. General View.



*The rest of the structures had a similar problem: they were generally formed by closed frames under each platform, with a top slab at surface level. Thus, the frames could collapse if the top slabs were simply demolished without any precautions (Figs. 11 to 14).*

### **3. Chamartin Railway Station: Fundamental conditioning factors**

*As to the setting of the Station, we will include under the denomination of "Station" the existing parking lot to be found right beside track nº1 to the west, and the 30 tracks that existed as the building of the tunnel began.*

*In the west side, the interference with Station services, the existing Pío XII tunnel, and above all the tunnels of the new METRO lines of Line 10 (barely separated by a few centimetres from the new tunnel) posed major difficulties. The tunnel route was very conditioned by the existing tunnel and several office*

**Nuevo túnel de Pio XII: Cajones Empujados bajo la Estación de Chamartín**  
**New Pio XII Tunnel: Jacked Boxes at the Chamartín Railway Station**

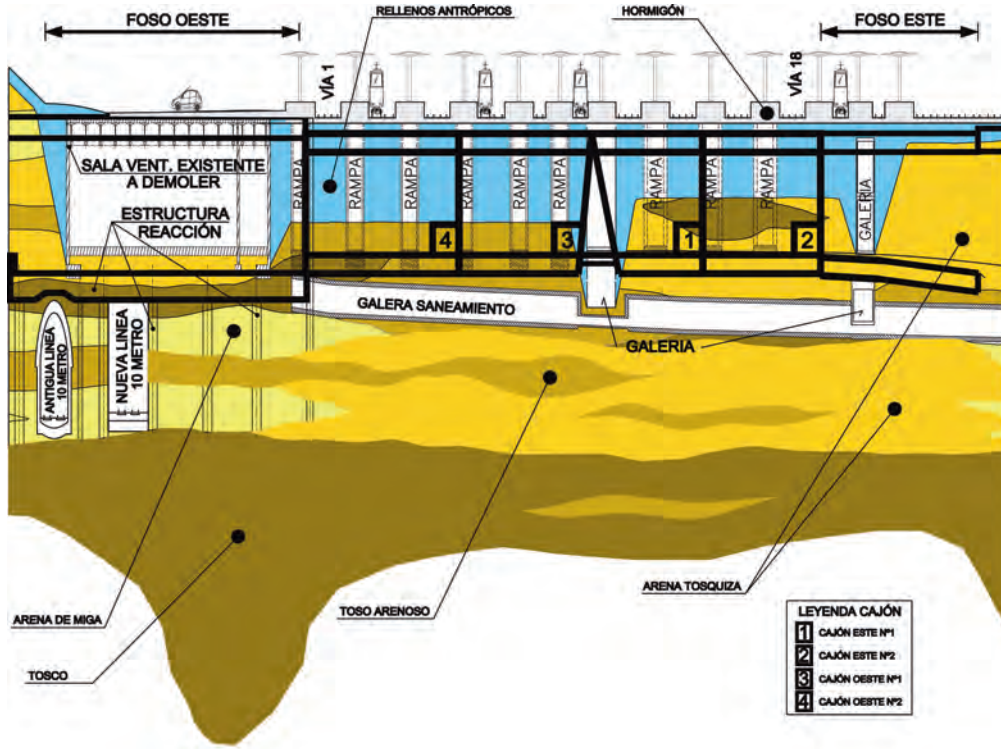


Fig. 11. Perfil longitudinal geotécnico bajo vías FFCC / Longitudinal geotechnical profile under the tracks.

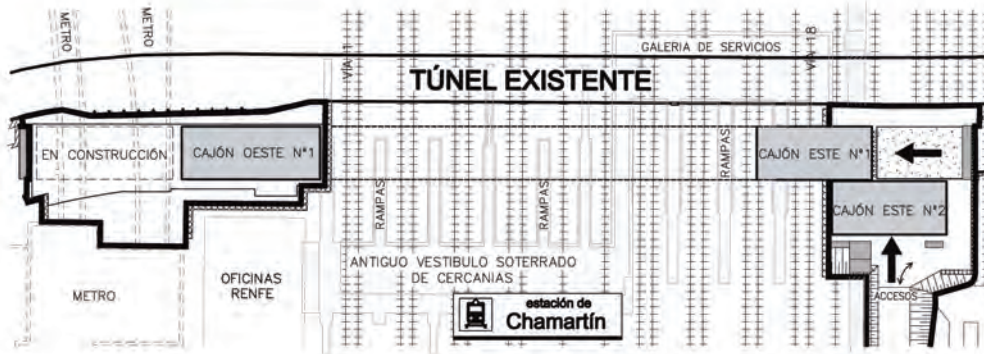


Fig. 12. Cajones empujados. Planta Empuje Este / East jacking.

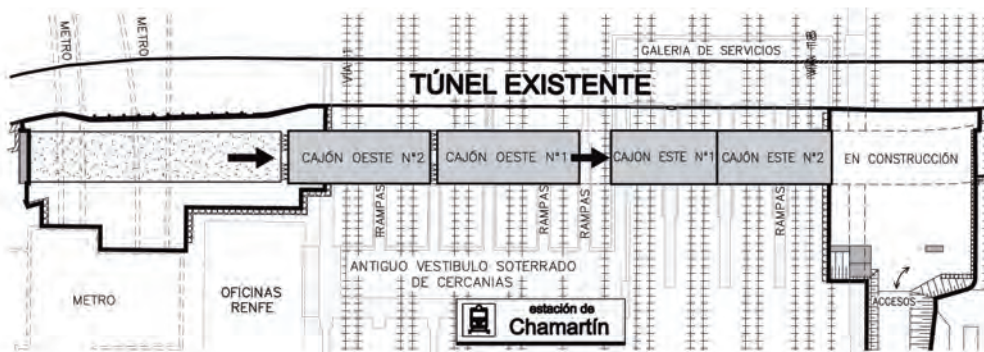


Fig. 13. Cajones empujados. Planta Empuje Oeste / West jacking.

### 3. Estación de Chamartín: Condicionantes fundamentales

A los efectos de este artículo, englobamos en la estación de Chamartín el denominado parking de cercanías al oeste, y las 30 vías que existían al comenzar las obras.

Por el oeste, se debía resolver la interferencia con servidumbres de la propia estación, y sobre todo con las líneas antigua y nueva de la Línea 10 de METRO (con la clave muy cercana a la rasante del nuevo túnel). El trazado estaba además muy condicionado por el túnel existente y edificios de oficinas, y por las estaciones de METRO cuya construcción coincidía en el tiempo.

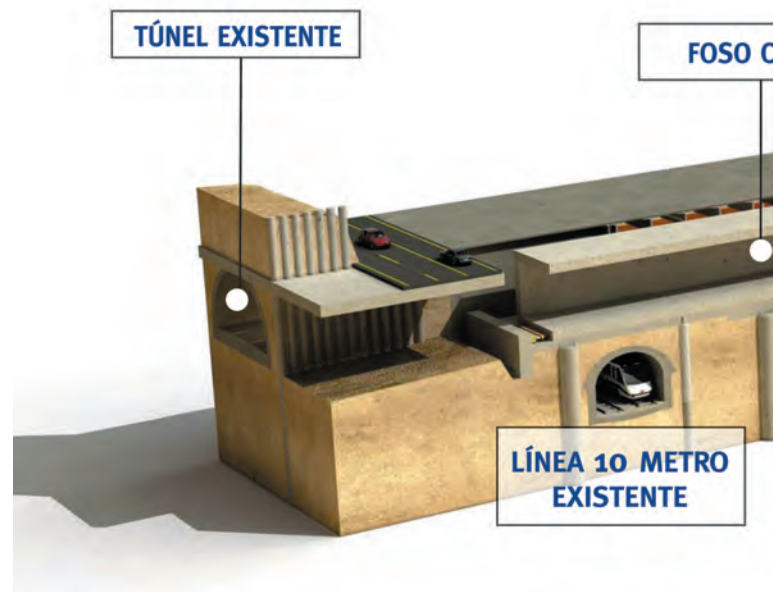
En cuanto a la playa de vías y las interferencias con el corazón de la estación de FFCC, las condiciones fundamentales pueden resumirse como sigue:

- a) 21 vías electrificadas en placa, y otras 9 en balasto (vías auxiliares y Auto-Expreso)
- b) 13 andenes, con tráfico en superficie de peatones y maquinaria.
- c) Catenarias, instalaciones y cableados en andenes, drenajes, etc. a mantener.
- d) Estructura pesada de grandes marquesinas sobre andenes.
- e) Estructuras antiguas (en general marcos de hormigón armado) bajo cada andén.
- f) Galerías de servicios cruciales para la estación, perpendiculares al trazado del túnel.
- g) Edificios de oficinas condicionantes del trazado a ambos lados de la estación.

Al tratarse de un entorno tan delicado como la estación de Chamartín, cobraba especial importancia la ejecución de la obra garantizando la frecuencia de circulación de trenes, así como la minimización del impacto global: Especialmente en cuanto a seguridad de las personas; mantenimiento y garantía de los servicios, y plazo mínimo de ejecución.

### 4. Soluciones adoptadas

Inicialmente, se había contemplado la ejecución del túnel por el método de "cut and cover", en 13 fases de 6 semanas cada una para el paso de las vías. Analizada esta solución en detalle con los operado-



*buildings, as well as by the two new METRO Stations, built at the same time as the tunnel.*

*As for the crossing of the tracks through the heart of the Station, the basic conditioning factors can be summarised as follows:*

- a) 21 electrified tracks on slab and another 9 on ballast (auxiliary tracks and those for car transport)*
- b) 13 platforms, with above ground pedestrian and machinery traffic.*
- c) Catenaries, installations and cabling on platforms, drainages, etc. to be maintained.*
- d) Heavy structure of large canopies over platforms.*
- e) Old structures (reinforced concrete frames) buried under each platform.*
- f) Crucial service galleries for the Station, perpendicular to the tunnel route.*
- g) Office buildings that conditioned the route on both sides of the Station.*

*As Chamartín Station is such an important railway centre, special importance was given to execution of the works, guaranteeing the frequency of traffic on the railway and always looking for minimisation of the*

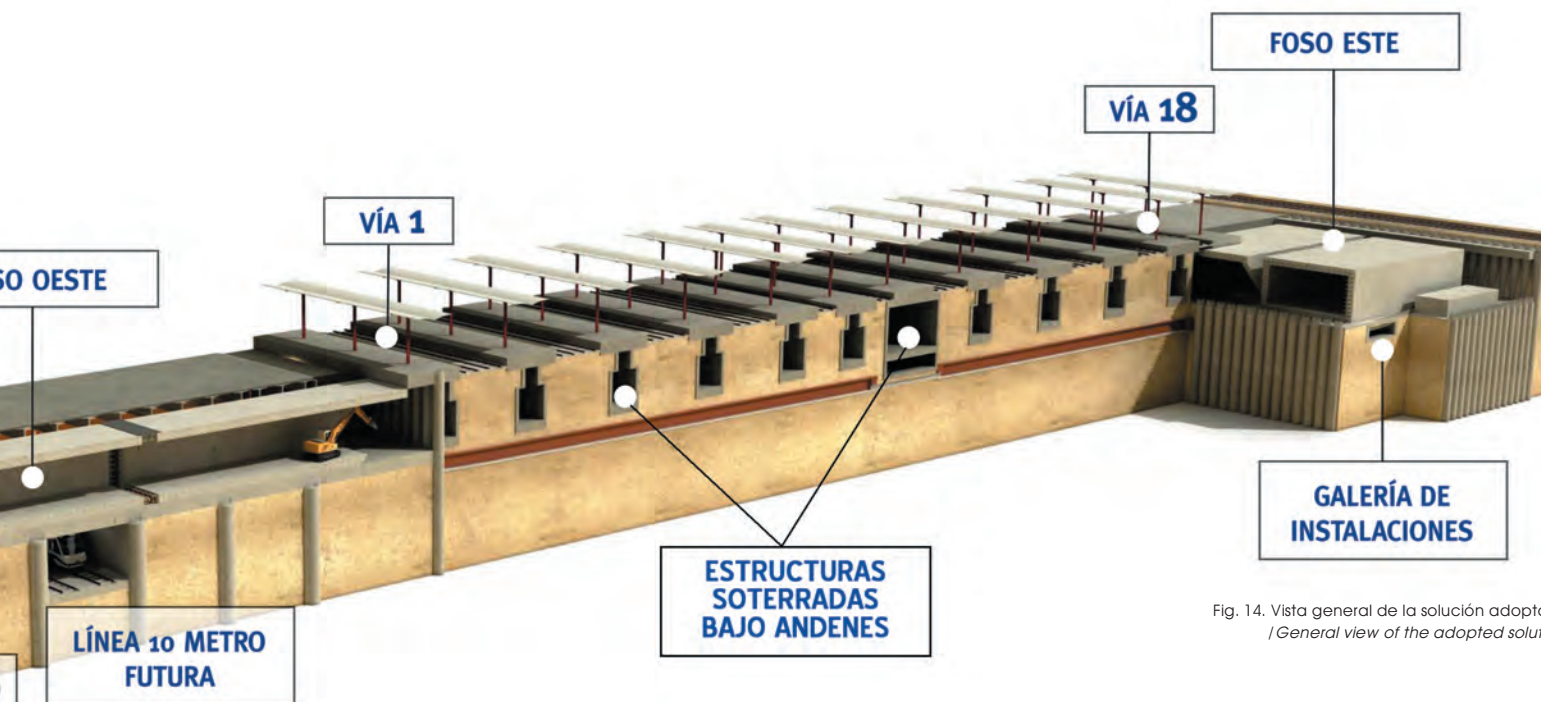


Fig. 14. Vista general de la solución adoptada  
/ General view of the adopted solution.

res, planteaba problemas graves de circulación de trenes, además de la peligrosidad de las actuaciones para la obra y los usuarios de la estación.

Se estudió también una solución en mina, por el método Madrid tradicional, para una sección de 12 m entre hastiales. Finalmente, se escogió como más adecuada la solución por el método de cajones empujados (Fig. 14), que se resume cualitativamente a continuación:

- La solución por medio de cajones empujados permitía minimizar el plazo de afección a la circulación de trenes; garantizar la calidad del servicio, y sobre todo garantizar la seguridad de las personas.
- La continuidad de los andenes se aseguró por medio de pasarelas metálicas provisionales de 22 m de luz, que permitían su uso por pasajeros y pequeños vehículos de servicios (hasta 1.500 kgs/eje).
- Para el mantenimiento integral de servicios (galerías de instalaciones, catenarias, actuaciones en andenes y marquesinas, etc.) se diseñaron retranqueos en múltiples fases de ejecución, limitando los cortes puntuales de servicios a la banda de mantenimiento (01:00 – 04:00 am). La galería principal de instalaciones, de 8,0 x 4,0 m de sección, se retranqueó 5,27 m en altura a lo lar-

overall impact; especially with regard to personal safety, maintenance and guarantee of the services, and minimum execution time.

#### 4. Adopted solutions

Initially, execution of the tunnel by the "cut and cover" method had been considered to cross under the tracks, in 13 phases of 6 weeks each one. Detailed analysis with the train operators revealed severe problems of railway traffic, in addition to the hazard of actions for the works and users of the Station.

A shield tunnel solution was also studied, using the Madrid traditional method, for a section of 12 m between side walls. Finally, the most adequate solution chosen was the box jacking method (Fig. 14), that is summarised in qualitative terms as follows:

- The solution of four jacked boxes allowed the time train traffic that was affected to be minimised, guaranteeing the quality of the service and, above all, personal safety.
- The continuity of the platforms was assured by means of provisional metal walkways with a span of 22 m, which allowed them to be used by passengers and small service vehicles, of up to 1,500 kg/axis.
- For integral maintenance of utilities (installation galleries, catenaries, actions on platforms and

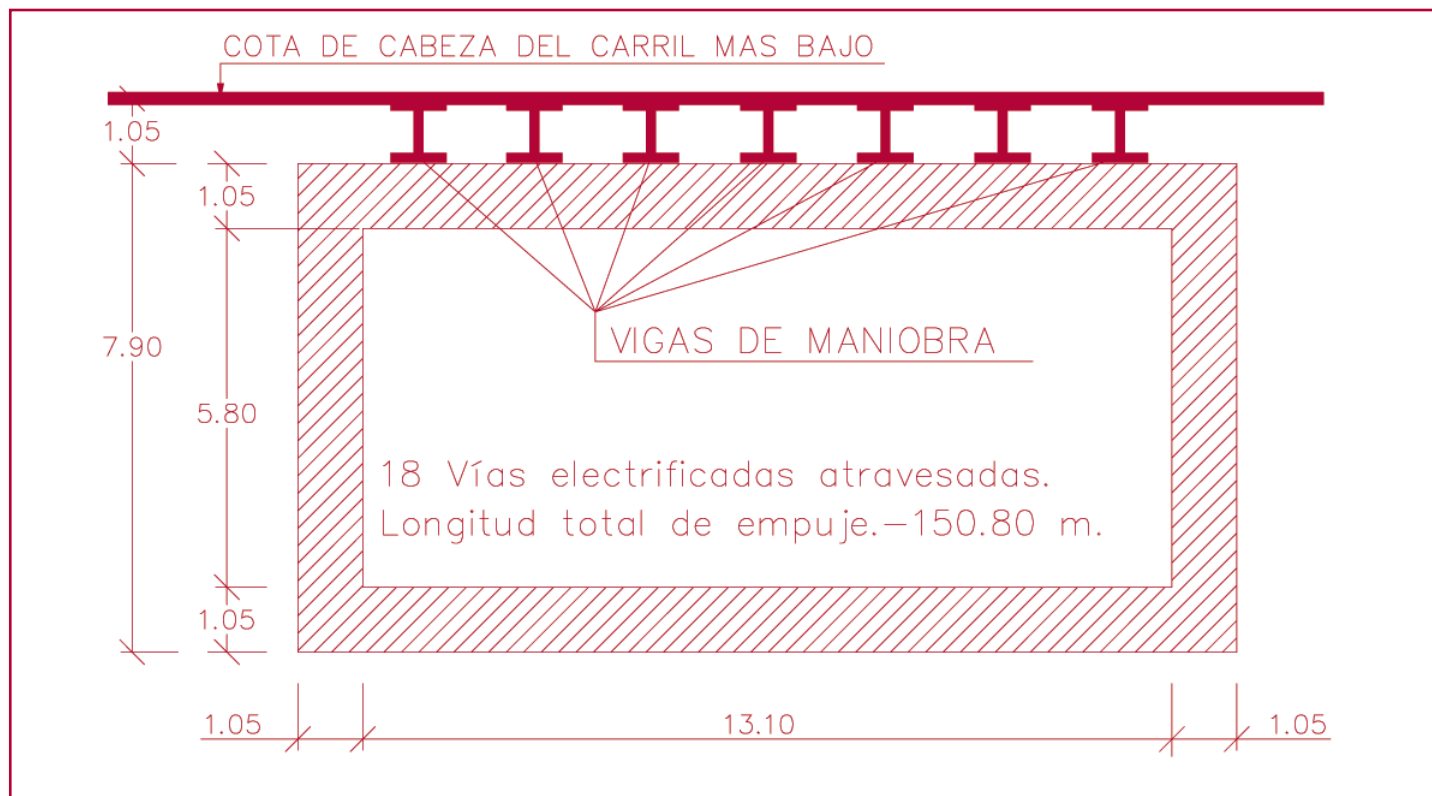


Fig. 15. Sección transversal de cajones / Cross section of boxes.

go de 50 metros, sin cortar ni empalmar ninguno de los cientos de cables que discurren por ella.

- d) La multitud de estructuras soterradas, tras un exhaustivo y muy completo estudio de sus características, se precortaron y rellenaron por fases con morteros pobres, para evitar su colapso al paso de los cajones. Esta solución, junto con el acertado diseño del mortero, de características muy especiales, demostró ser uno de los aspectos clave para el éxito del procedimiento empleado.
- e) La falta de espacio físico se resolvió acordando dejar 18 vías electrificadas operativas, apurando al máximo las dimensiones al oeste, limitadas por el propio túnel existente, y construyendo al este un foso estilo "revólver" (Fig. 14). Se dejaron también 4 vías convencionales libres para transporte de coches (Figs. 12 y 13).

Para el foso oeste, se diseñó una estructura trifuncional que evitara la transmisión de esfuerzos a estructuras cercanas, y cumpliera una función estructural para METRO y el propio túnel (Fig.17)

En todas las estructuras soterradas que debían ser rellenadas, para luego ser demolidas con seguridad,

canopies, etc.) offsets were designed in multiple phases of execution, limiting the specific cuts in services to the maintenance schedule (01:00 – 04:00 am). The main utility gallery, 8.0 x 4.0 m in section, was offset 5.27 m in height for a length of 50 metres, without cutting or joining any of the hundreds of cables that run through it.

- d) The multitude of underground structures, after a very detailed study of characteristics, were filled in phases with a special weak mortar, to avoid their collapse as the boxes were jacked. This solution, with a correct design of the mortar, was crucial for the success of the jacking.
- e) The lack of physical space was solved by leaving 18 of the first 21 electrified tracks always operational, adjusting the dimensions to the west and building a "revolver" type pit in the east (Fig. 14). Four conventional tracks were also left free in the east part, for car transport (Figs. 12 and 13).

In the west pit, a trifunctional structure was designed, in order to avoid the transmission of stresses to nearby underground structures, as well as fulfilling a structural function both for the new tunnel as for the new METRO Line 10 (Fig. 17).

se escogió un mortero que debía cumplir las siguientes condiciones:

- Ser bombeable desde muy gran distancia.
- Endurecer rápido para permitir rellenos de unos 8-9 metros de altura en pocas y muy rápidas fases.
- No desarrollar una resistencia elevada a largo plazo (para evitar una demolición costosa durante el empuje).
- Permitir taludes casi verticales de excavación, y, de acuerdo con lo anterior, tener una dosificación de cemento muy pobre.

Se desarrolló por tanto un mortero con cemento II/A M 42,5 R (100kg/m<sup>3</sup>); mezcla de finos inferiores a 0,063 mm (cenizas volantes y finos del cemento) 400 kg/m<sup>3</sup> y aditivos para mejorar la cohesividad, tixotropía y bombeabilidad.

En el resto de zonas, la estructura del túnel consiste fundamentalmente en losas in situ sobre pantallas de pilotes, con tipologías distintas y varias fases de ejecución debido a la escasez de espacio disponible, la presencia de estructuras soterradas, y las afecciones en superficie.

*In all underground existing structures that had to be filled with mortar, in order to be then safely demolished, a mortar was designed to fulfil the following conditions:*

- *To be pumpable from a very long distance;*
- *Harden quickly to allow subsequent filling of about 8-9 metres height in few, very quick phases,*
- *Not develop a long term resistance (to avoid costly demolition during the jacking);*
- *Allow nearly vertical excavation slopes and, according to the above, to have a very poor cement dosage.*

*Thus, mortar was developed with II/A M 42.5 R cement (100kg/m<sup>3</sup>); mix of fine material under 0.063 mm (fly ash and fine cement) 400 kg/m<sup>3</sup>; and additives to improve cohesion, thixotropic and pumping qualities.*

*In the rest of the tunnel sections, the structure consists fundamentally of slabs on cast in situ pile walls, with different types and several execution phases, due to the scarcity of available space and the presence of buried structures and surface affections.*



Fig. 16. Empuje Oeste. Vista de vigas de maniobra / West jacking. Manoeuvre beams.

Para los cálculos de asiento en estructuras próximas se utilizó el método Madrid (Oteo et al, 1999), basado en la hipótesis de Peck (1969) sobre la forma de campana de Gauss.

## 5. PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Se diseñó un foso a cada lado de las primeras 18 vías electrificadas de la estación. (Figs. 12 a 14). Estas vías tienen tráfico intenso, y no admiten cortes largos. Especialmente las vías 1 a 6, destinadas al servicio de Cercanías.

### FOSO OESTE

Por el Oeste, el espacio estaba limitado longitudinalmente entre la vía 1 y el antiguo túnel de Pío XII, en un tramo delicado al tratarse de la transición hacia una sección en mina de gran diámetro (de hormigón en masa). El contorno del Foso Oeste en planta quedó por tanto limitado por pantallas de pilotes al este, al sur y al oeste (las del propio túnel), aprovechando estas últimas para hacer una rampa de acceso.

El empuje desde este foso debía evitar transmitir esfuerzos sobre las líneas de METRO y el túnel existente de Pío XII. En alzado, en esa zona, la rasante del nuevo túnel de Pío XII discurre a muy escasa distancia de la clave de la Línea 10 existente (Fig. 17).

Se diseñó una gran losa cimentada sobre pilotes de diámetro 2.500 mm y varias pilas-pilote, que debía tener una triple función:

- En primer lugar, debía servir como estructura de empuje para los cajones.
- Posteriormente, serviría como solera de cimentación de los pilares y losa superior que constituyen, en esa zona, la estructura del nuevo túnel de Pío XII.
- Finalmente, serviría como estructura de túnel de la nueva Línea 10 de METRO en su zona de influencia.

Para ejecutar todos los pilotes del foso, la maquinaria pesada no podía disponerse encima de una gran sala de ventilación existente soterrada (Fig. 17), cuya estructura no soportaba los esfuerzos transmitidos por la maquinaria necesaria.

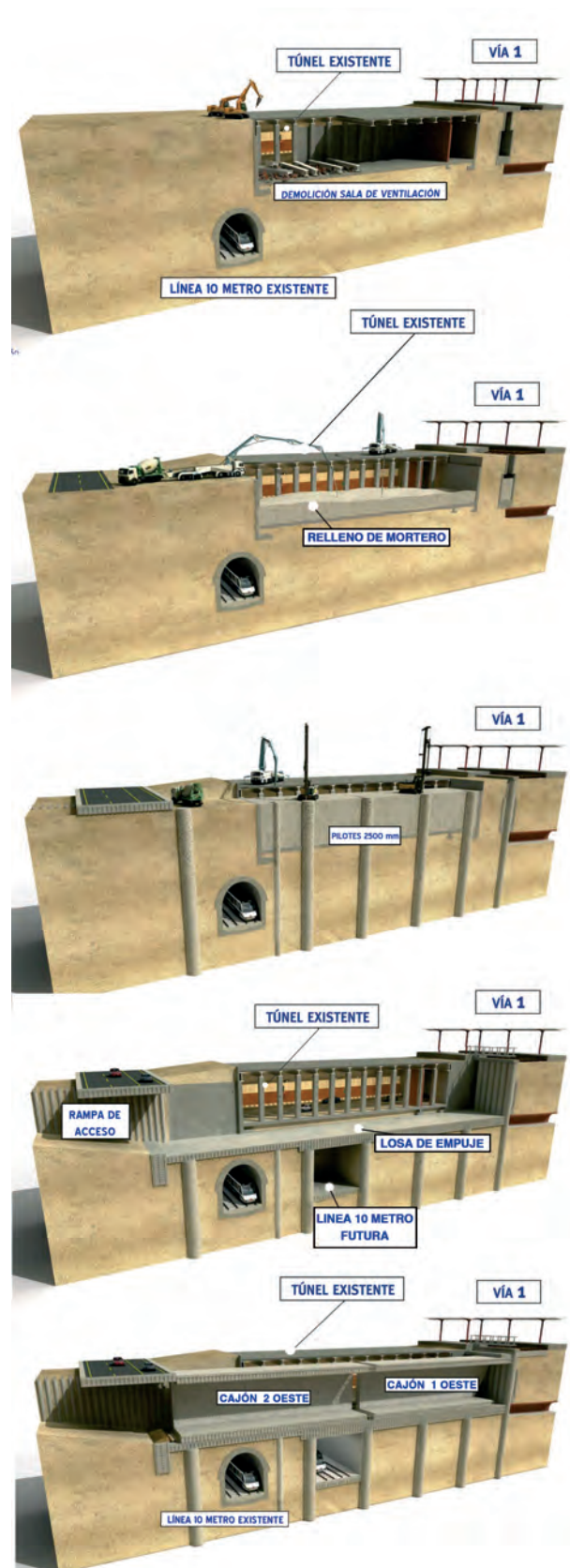


Fig 17. Proceso constructivo Foso Oeste/Construction of West pit.



Este aspecto, que constituye uno de los muchos ejemplos de casos en que fue necesario adecuar la solución al procedimiento constructivo más adecuado, fue analizado en detalle.

Para garantizar la seguridad y evitar múltiples afectaciones a las estructuras colindantes se descartaron los rellenos convencionales optando por demoler el forjado de la sala por fases, rellenar con morteros pobres especiales, y ejecutar todos los pilotes –incluidos los de 2.500 mm– y las pilas pilote (cuya función era evitar

*To calculate the influence of excavations in nearby structures, the Madrid Method was used (Oteo et al, 1999), based on the Peck hypothesis (1969) about the Gauss distribution form.*

Fig 18. Foso Oeste.  
Homigonado de hastiles:  
Cajón nº1  
// West pit.  
Construction of box nº1.

### **5. Construction Procedures**

*A pit was designed on each side of the first 18 electrified tracks of the Station. (Figs. 12 and 14). These*

transmitir tensiones horizontales al túnel de la Línea 10 de METRO) desde la plataforma así creada (Fig 17).

### FOSO ESTE

Por el Este se escogió una solución tipo "revólver", para evitar la partición del recinto de la Dirección General de ADIF y la afección a algunas edificaciones, además de reducir plazo (Figs 12 y 13).

El foso consistía en un espacio aproximadamente cuadrado en planta, atravesado por dos galerías superpuestas en sentido sur-norte. Estaba limitado al norte por el túnel existente, al este y al oeste por pantallas de pilotes, y al sur por la rampa de acceso. El túnel existente se analizó para comprobar si podía soportar esfuerzos descompensados de tierras, y especial importancia tuvieron las actuaciones y refuerzos para no afectar a la principal galería de instalaciones de la estación.

Para la ejecución de las pantallas de pilotes (de 1.800 mm) se reforzaron las galerías por el interior para soportar los esfuerzos transmitidos por la maquinaria pesada, y posteriormente se diseñó un proceso singular para el retranqueo de la galería principal de instalaciones sin interrumpir los servicios de la estación.

Una vez empujado el primer cajón, el segundo se desplazó lateralmente apoyado en los muros transversales de empuje contruados al efecto, ajustando la alineación. Para esto, se tuvieron en cuenta las desviaciones ya sufridas por el primer cajón, para evitar el tecteo.

Tras el empuje lateral, y una vez encajado el segundo cajón dentro del escudo metálico de la cola del primero, se continuó el empuje de los dos cajones, ya alineados, de forma similar al proceso desde el foso oeste.

### EMPUJE DE CAJONES

El túnel a realizar bajo las vías de la estación de Chamartín debía salvar, como hemos comentado, la distancia entre las vías 1 y 18, todas electrificadas, sin interrumpir el tráfico ferroviario; con una longitud total de empuje de 150,80 m (la longitud total de la estructura de los cajones era de 145,14 m).

La solución se compone de 2 estructuras dobles a empujar: Una construida en el lado Oeste de 80,64 m, y otra construida en el lado Este de 64,50 m de longitud. Cada estructura estaba formada por dos cajones de igual longitud (es decir, dos cajones de 40,32

*tracks have intense traffic, and long interruptions are not allowed; especially tracks 1 to 6, used by the local railway.*

### WEST PIT

*On the west, the space was limited lengthwise between track 1 and the existing Pío XII tunnel, stretch assigned to a large diameter mine section (of mass concrete). The contour of the West Pit on ground plan was limited by the old tunnel on the north, and by cast in situ pile walls to the south, east and west (those of the new tunnel), taking advantage of the latter to form an access ramp.*

*Jacking from this pit had to avoid stress on the METRO lines and the existing tunnel of Pío XII. In section, in that zone, the level of the Pío XII New Tunnel runs at a very short distance from the crown of the existing Line 10 (Fig. 17).*

*A large cemented slab was designed, on piles of 2500 mm diameter that was to have a triple function:*

- Firstly, it was to act as a thrust structure for the boxes.*
- Subsequently, it would act as the foundation floor for the pillars and upper slab that form the structure of the Pío XII New Tunnel in that zone.*
- Finally, it would act as the structure of the tunnel of the new Line 10 of the METRO in its catchment zone.*

*To execute all the piles of the pit, the heavy machinery could not be set out above an existing large ventilation room (Fig. 17), the structure of which could not bear the stress transmitted by the necessary machinery. This problem, that shows one of the many examples of situations where the solution must be especially adapted to the construction method, was analysed in detail.*

*The priority of security issues, and the need to reduce the effects on adjoining buildings and tracks, led to the solution of rejecting conventional filling, opting for demolition of the room top slab by phases; filling with weak special mortars, and execution of piles – including those of 2500 mm – from the platform thus created (Fig. 17).*

### EAST PIT

*In the east, a "revolver" type solution was chosen to avoid splitting the premises of the General*

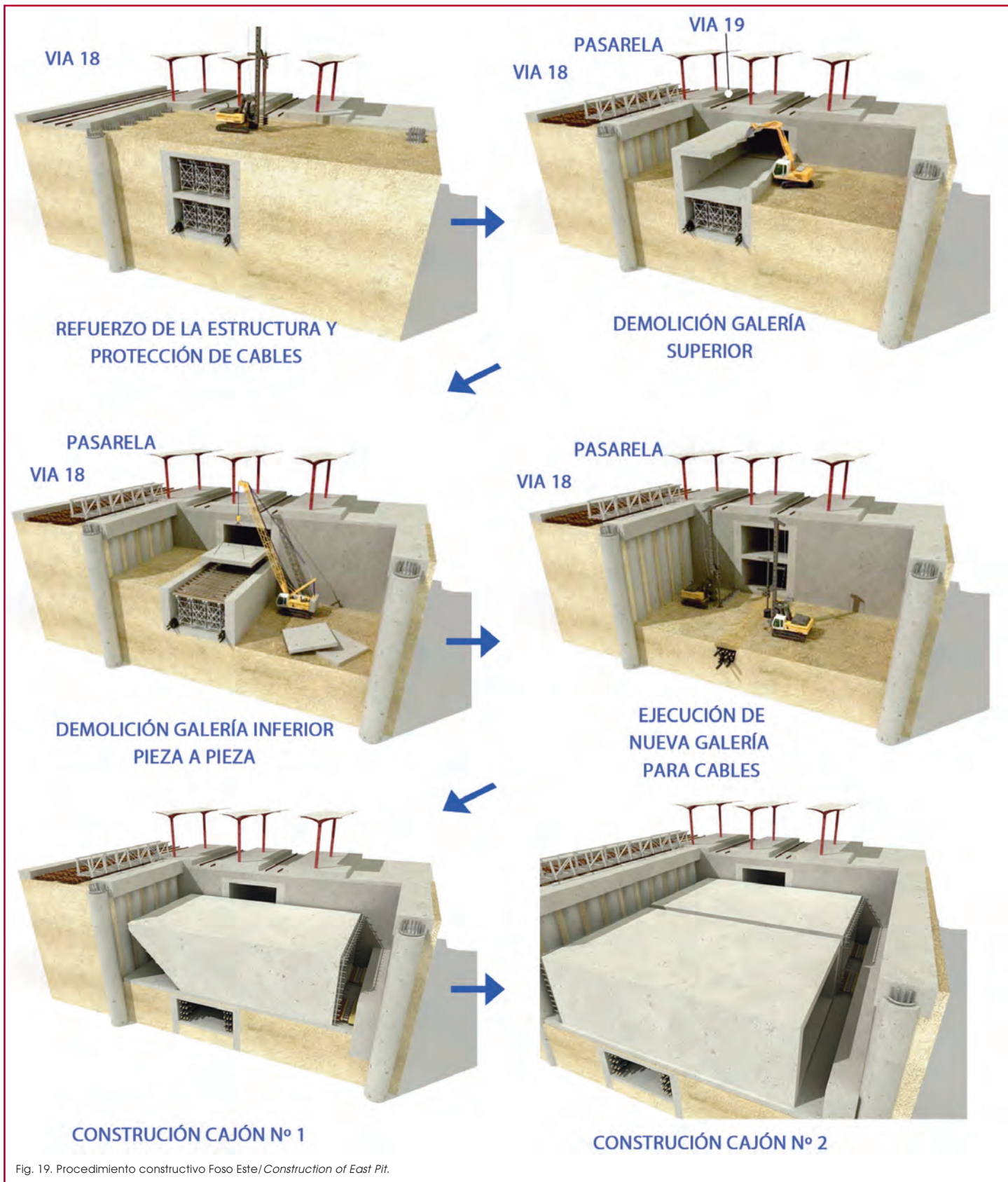


Fig. 19. Procedimiento constructivo Foso Este/Construction of East Pit.

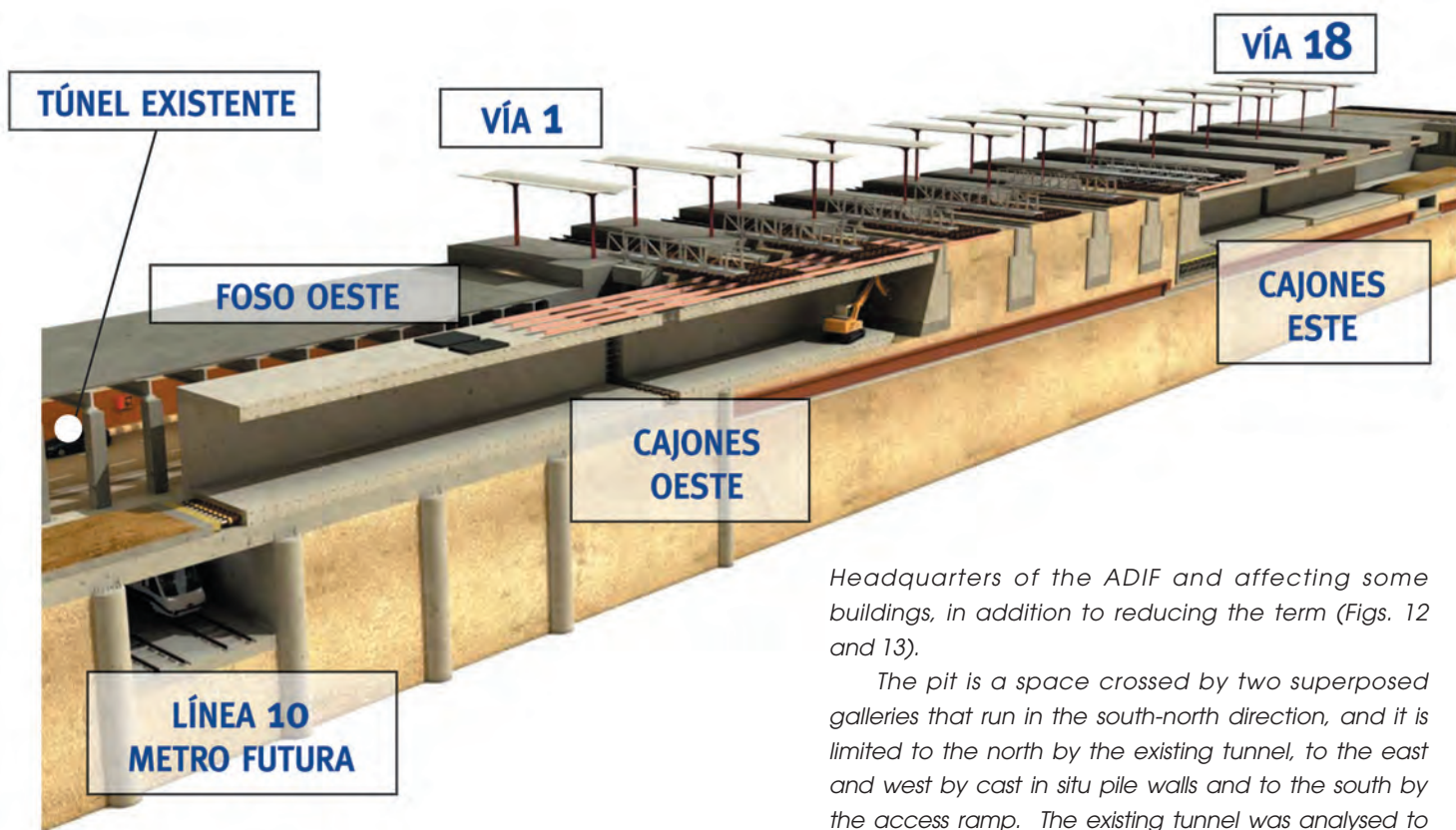


Fig. 20. Empuje Oeste. Vista 3D / West jacking. 3D view.

m y otros dos de 32,25 m respectivamente), como se observa en la fig. 20.

Los trabajos habituales en empujes de sustituir la placa de vías por vía en balasto, estaban fuertemente condicionados por tratarse del centro neurálgico de la estación de Chamartín.

Antes de iniciar trabajos en vía, hubo que desmontar la estructura de marquesina de los andenes en la franja de empuje, demoler los propios andenes, y construir por fases unas grandes pasarelas metálicas que los sustituyeran.

Estas pasarelas eran de 22 m de luz libre, y sustituían al andén sin penalizar su uso.

Una vez construido el primero de los cajones del lado este, y a la vez que se terminaba de construir el segundo (así como los cajones del lado oeste, ver Figs. 12 y 13), se procedió a realizar el apeo de las vías, y el empuje del primer cajón hasta una posición intermedia.

A continuación, se desplazó lateralmente el segundo cajón y se prosiguió según lo comentado más arriba, hasta su encaje final.

Headquarters of the ADIF and affecting some buildings, in addition to reducing the term (Figs. 12 and 13).

The pit is a space crossed by two superposed galleries that run in the south-north direction, and it is limited to the north by the existing tunnel, to the east and west by cast in situ pile walls and to the south by the access ramp. The existing tunnel was analysed to check whether it could bear uncompensated stress (due to the excavation only on one side) and special importance was granted to the actions and reinforcements to avoid affecting the main utilities gallery of the Station.

To execute the cast in situ pile walls (of 1800 mm diameter) the interior of the galleries were reinforced to bear the stress transmitted by the heavy machinery, and subsequently a unique process was designed to offset the main utilities gallery without interrupting the Station utilities.

Once the first box was jacked, the second was displaced laterally, supported on the transversal jacking walls built for that purpose, and adjusting the alignment. To do so, the deviations already suffered by the first box were taken into account to avoid keying.

Once the second box was fitted into the metal shield at the tail of the first, the process was similar to the one carried out in the west pit.

#### BOX JACKING

The tunnel to be built under the tracks of Chamartín station, as we have seen, had to cover the distance between tracks 1 and 18, all electrified,

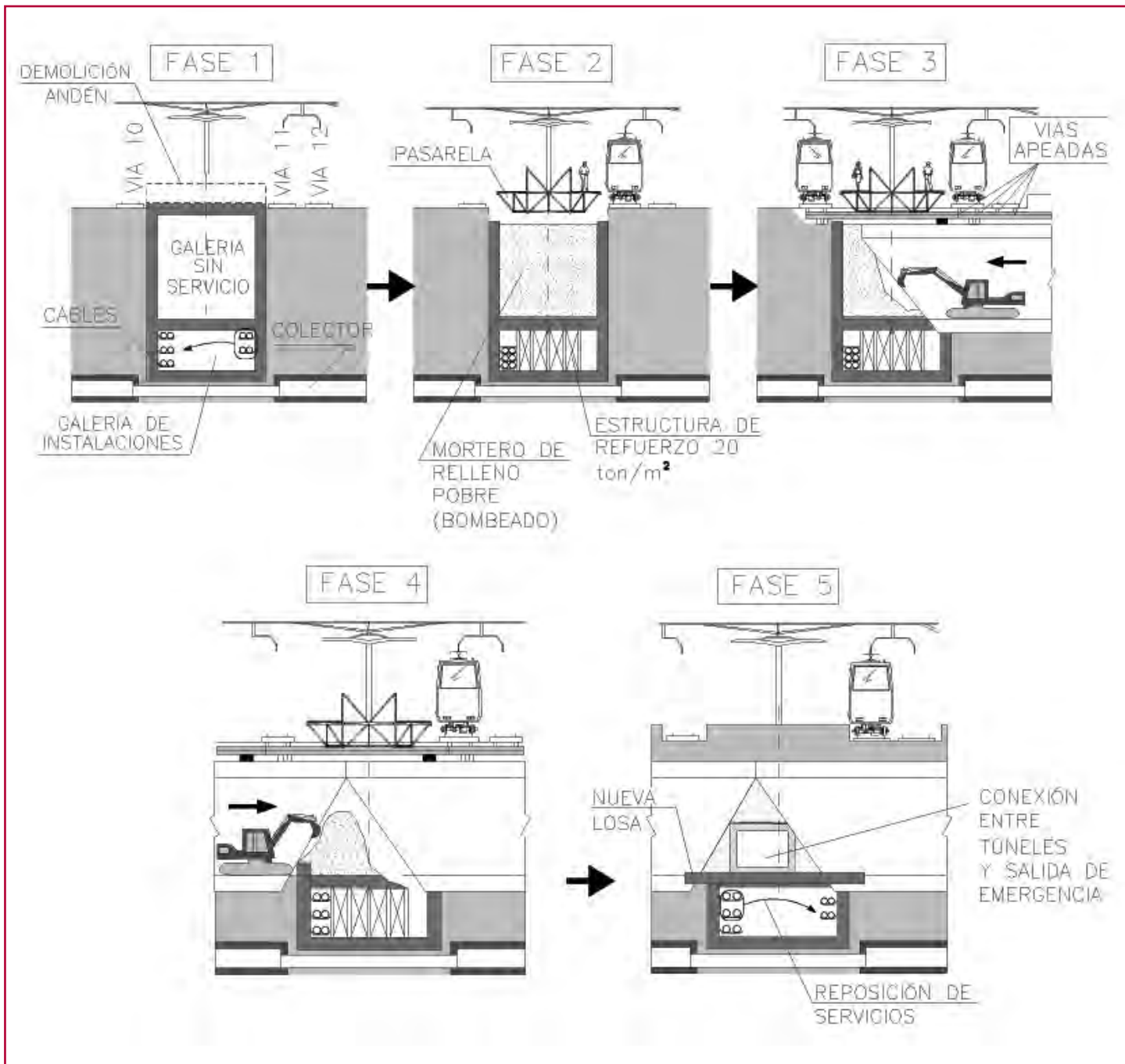


Fig. 21. Croquis de encuentro de cajones / Box meeting sketch.

Como se ha comentado, el caso más singular se producía entre las vías 10 y 11, donde existía una doble galería de 9 metros de anchura y unos 8+4 m de altura.

En la Fig.21 se puede observar cómo se diseñó un refuerzo de la galería inferior para 20 ton/m<sup>2</sup>, por ser el forjado intermedio débil, y común a las dos galerías. La galería inferior y sus múltiples servicios

without interrupting the railway traffic; with a total jacked length of 150.80 m (being the total length of the boxes 145.14 m).

It was comprised of 2 double structures to be jacked: one built on the west side of 80.64 m, and another built on the east side 64.50 m long. Each structure consisted of two boxes of the same length (that is, two boxes of 40.32 m on the west side, and



Fig. 22. Vista del empuje oeste  
/ General view  
of West jacking.



Fig. 23. Foso Este.  
Construcción  
cajón nº2  
/ East pit.  
Construction of  
box nº2.



debían mantenerse en servicio en todo momento, por contener servicios vitales para la estación.

Con el refuerzo inferior hecho, se pudo proceder al relleno de la galería superior, que garantizaba la seguridad del proceso de empuje.

Tras el empuje Este se procedió a empujar la estructura del lado Oeste, hasta su posición final.

Es importante observar que se dispuso de vigilancia permanente para los trabajos de empuje a 24 horas, coordinando los empujes con momentos en que ningún tren se encontrara sobre las vías. Para analizar posibles afecciones a la vía, se dispusieron varias secciones de electroniveles, como se explica más adelante.

Una vez finalizado el empuje de las estructuras se procedió a restituir la zona de vías y andenes a su situación inicial, restituyendo la configuración de vía en placa, así como los andenes y marquesinas.

En la figura 25 se presentan los rendimientos obtenidos. En el empuje Este, se puede observar el tramo vertical del gráfico, que corresponde al tiempo empleado en desplazar lateralmente el segundo cajón.

*another two of 32,25 m on the east side), as we can see in figure 20.*

*The usual jacking works concerning the replacement of the track on slabs by track on ballast were highly conditioned, this being the neuralgic centre of Chamartín Station.*

*Before commencing the work on the tracks, it was necessary to remove the canopy structure over the platforms in the site zone, demolish the actual platforms and build large metal walkways to replace them.*

*These walkways had 22 m free span, and substituted the platform, so that passengers could use them at all times.*

*Once the first of the boxes was built over the east side and while finishing construction of the second one, as well as the boxes on the west side, the tracks were shored up and the first box jacked to an intermediate position (Figs. 12 and 13).*

*Immediately after, the second box was jacked sidewise, and the process continued as described above until fitted into its final position.*

*As stated, the most unique case arose between tracks 10 and 11, where there was a double gallery, 9 metres wide and about 8+4 m in height.*

Fig. 24. Foso Este. Empuje cajón nº1 / East pit. Jacking of box nº1.

Fig. 25.  
Rendimiento de empuje / Thrust performance.

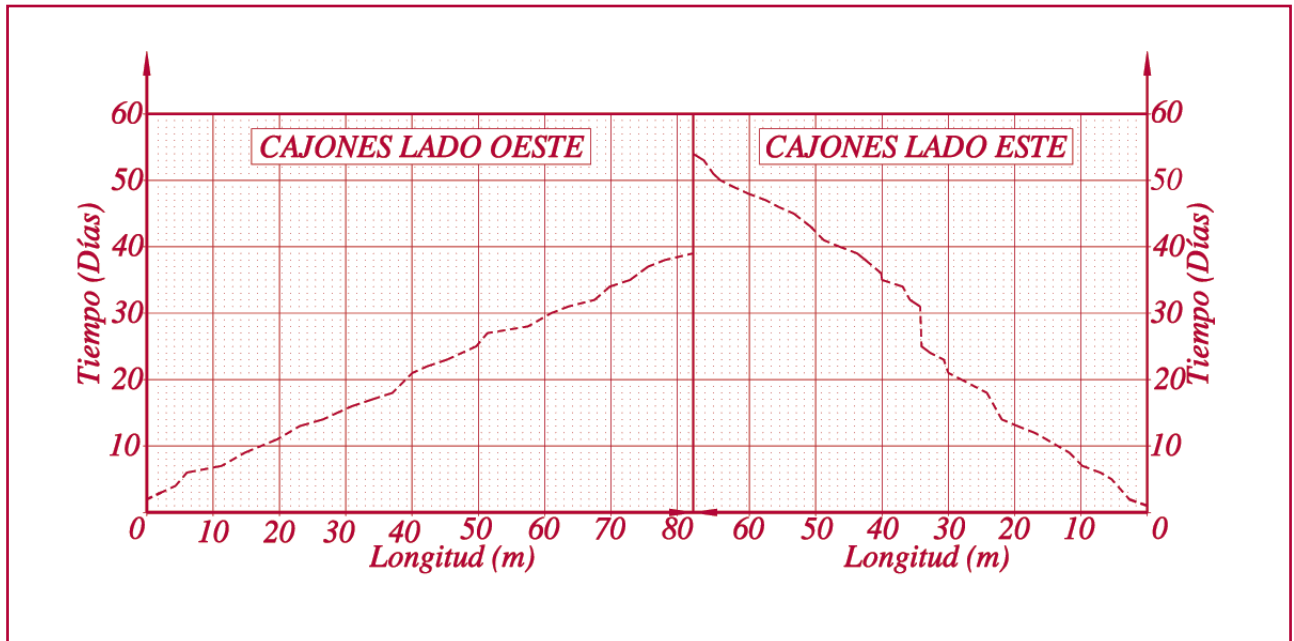
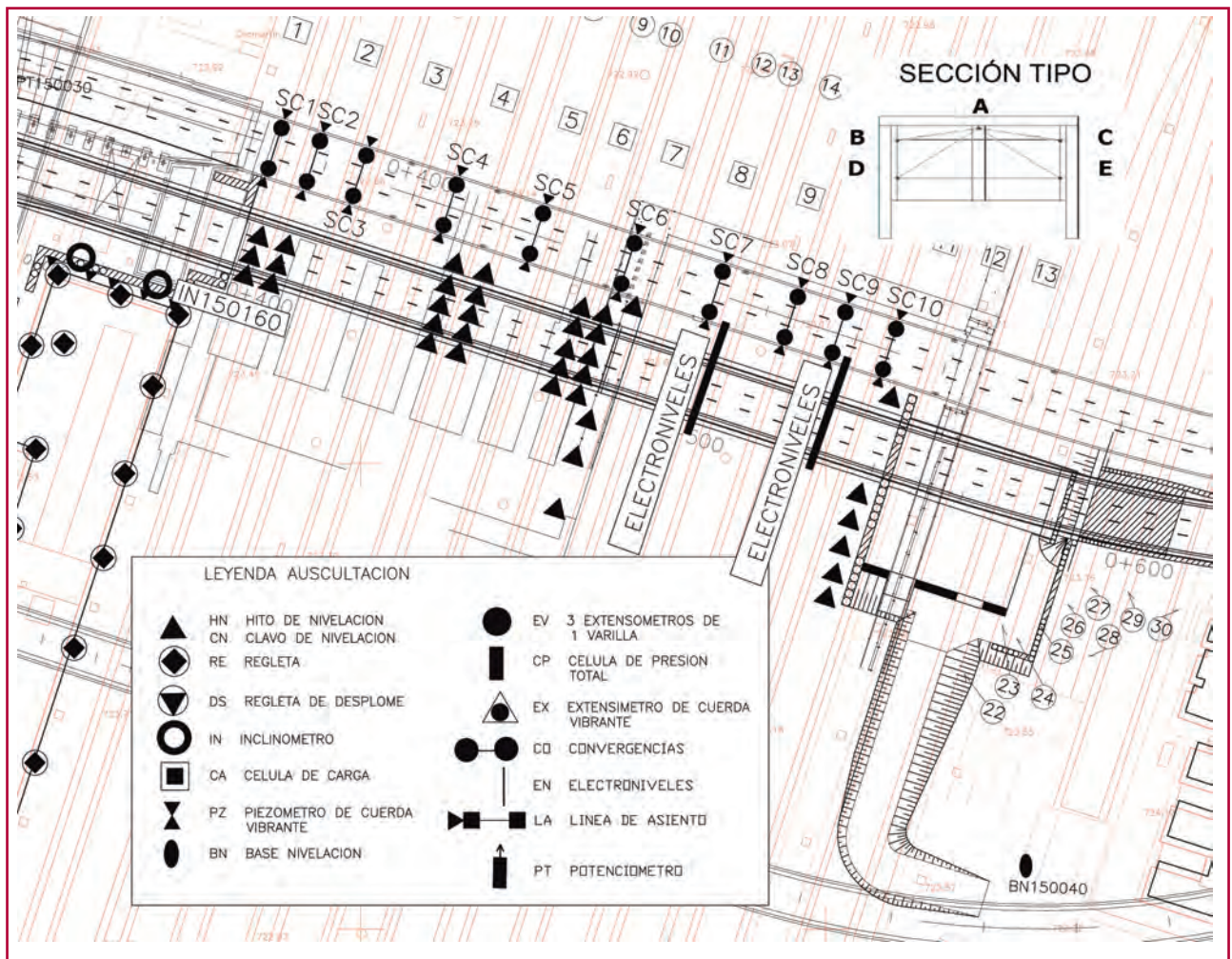


Fig. 26. Planta de instrumentación / Instrumentation ground plan.



También observamos que la estructura más pequeña (con curva más vertical) resultó la más compleja de empujar, debido a la mayor heterogeneidad de los materiales atravesados (reellenos, hormigón armado, terreno natural, etc.). Especialmente complejo fue el empuje a través de la primera estructura soterrada atravesada, que producía empujes laterales notablemente asimétricos sobre el cajón.

Las desviaciones resultaron muy inferiores a los márgenes de seguridad que se habían adoptado durante el diseño de las estructuras (25 cm tanto en planta como en alzado), y suponen una desviación del 0.08% en planta y 0.05% en alzado)

Por último, después del empuje se restituyeron los servicios de la estación a su estado original.

## 6. Instrumentación y resultados

Durante el empuje, se produjo una desviación máxima en cabeza del primer cajón Este de hasta 17 cm en planta. Esto se debió a la presencia de materiales de deshecho en el interior de una de las

In Fig. 21 we may see how a reinforcement was designed for the lower gallery for the 20 ton/m<sup>2</sup> transmitted by the mortar filling, as the intermediate floor was common to both galleries. The lower gallery and its multiple utilities had to remain in service at all times, as it contains vital utilities for the Station.

Having performed the interior reinforcement, it was possible to proceed to fill the upper gallery with mortar, guaranteeing safety during the jacking process.

After the east jacking, the structure on the west side was jacked to its final position.

It is important to note that permanent surveillance was conducted during the jacking work, 24 hours a day, co-ordinating the jacking with moments when there were no trains on the tracks. To analyse possible impact on the track, several electrolevel sections were set out, as explained further down.

Once the structure jacking was completed, the track and platform zone was restored to its initial state, returning it to the track on slab configuration, as well as restoring the platforms and canopies.

In Fig. 25, the field performance is presented. In the east jacking, we can observe the vertical line that represents the lateral jacking of box n°2.

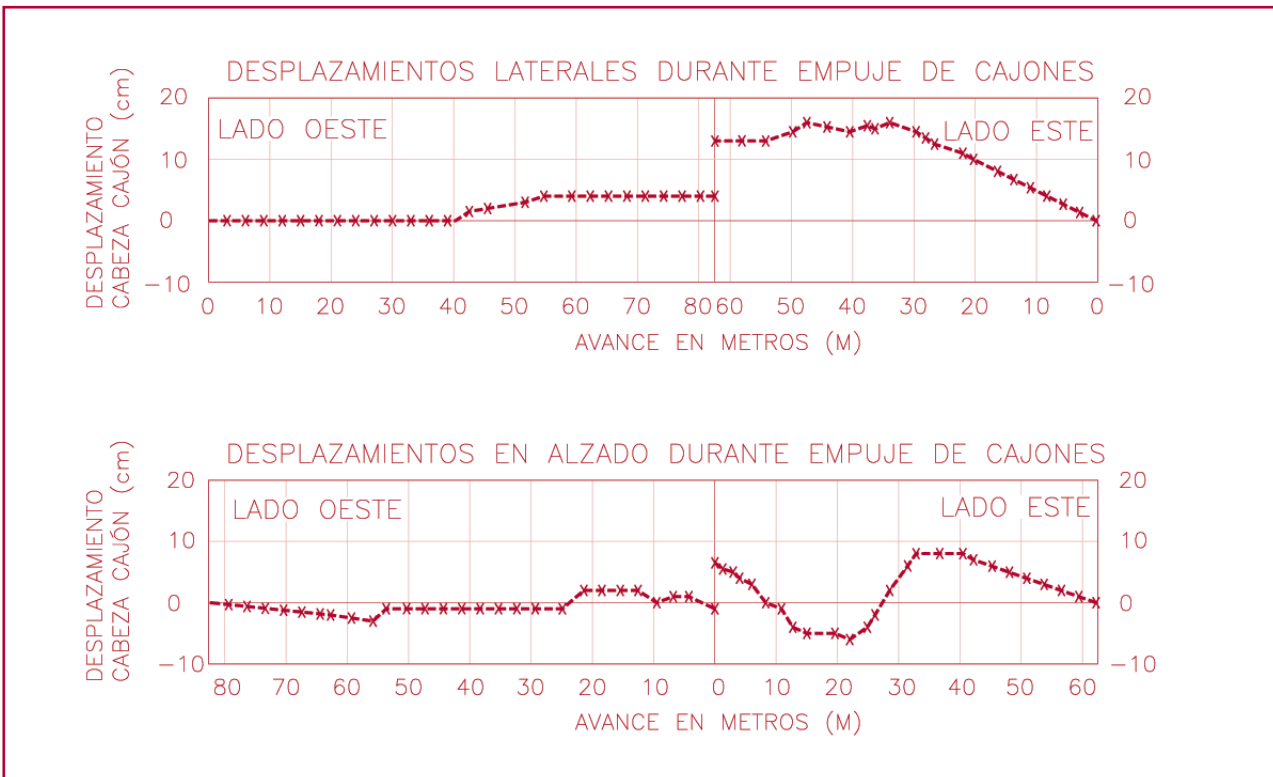


Fig. 27. Desplazamientos en cabeza de cajón / Displacements in box heads.

# Número monográfico de la ROP

## La Ampliación del Museo del Prado

[The Extension to the Prado Museum]

5

### EDITORIAL

La Ingeniería Civil en la Ampliación del Museo del Prado  
[Civil Engineering in the Extension of the Prado Museum]

6-21

Notas sobre la Ampliación del Museo del Prado  
[Notes on the Extension to the Prado Museum]

Rafael Moneo

22-41

Cimentación y estructura de la zona del Claustro  
[Foundations and structure in the area of the Cloisters]

Jesús Jiménez Cañas, Eduardo Gimeno Fungairiño, M<sup>a</sup> Mercedes Madrid Ramos, Antonio Tabera García

42-51

Otros espacios: auditorio, vestíbulo de acceso y ábside  
[Other areas: auditorium, foyer and apse]

Jesús Jiménez Cañas, Eduardo Gimeno Fungairiño, M<sup>a</sup> Mercedes Madrid Ramos, Antonio Tabera García

52-63

La restauración del Claustro de Los Jerónimos: un largo recorrido, una polémica artificial  
[The restoration of the Cloister of Los Jeronimos: a long journey an artificial controversy]

Luis Carbajosa Pérez

65-93

Fichas técnicas de materiales e instalaciones  
[Technical notes on materials and installations]

Marta Sánchez Martín, Luis Carbajosa Pérez



25 €

Pedidos Revista de Obras públicas  
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Almagro 42. 28010 Madrid  
Teléfono: 91.308.19.88. Fax: 91.319.15.3. rop@ciccp.es



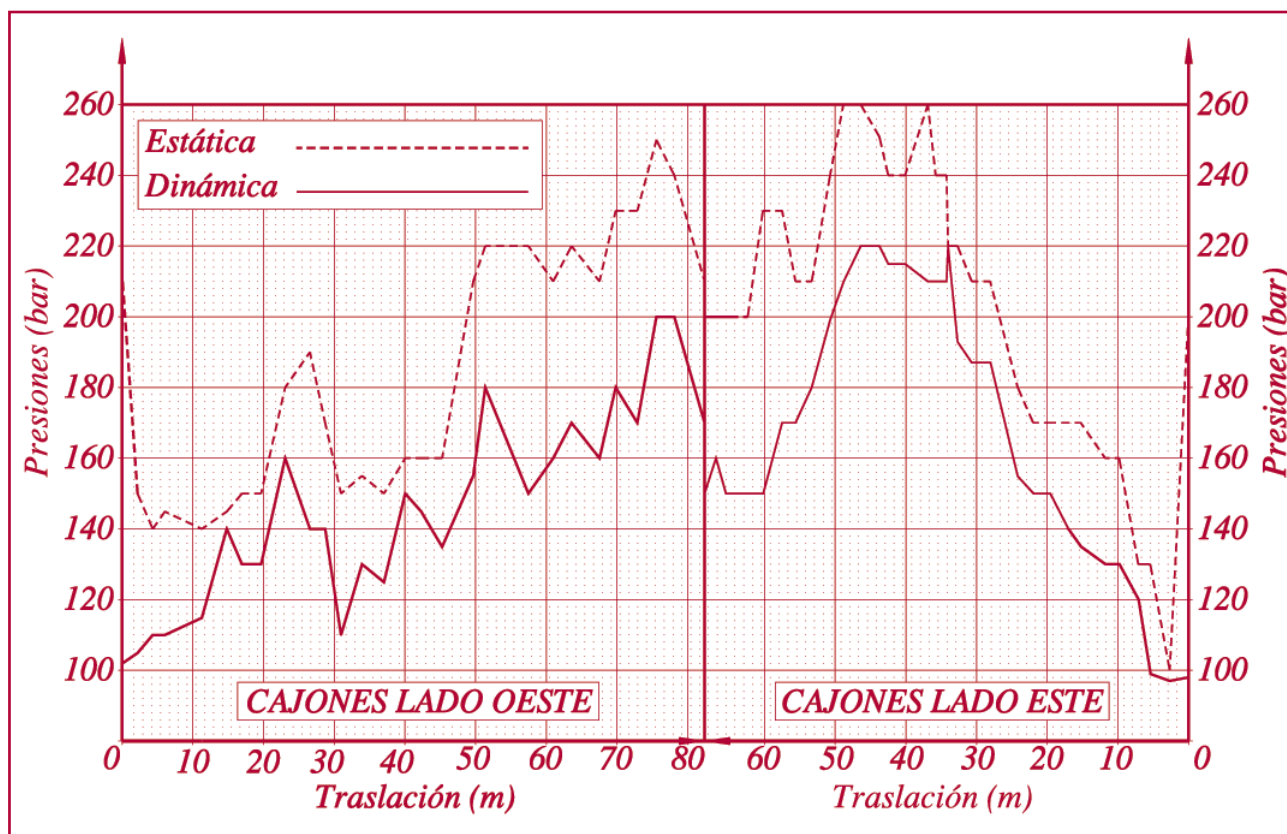


Fig. 28. Presiones estáticas y dinámicas de empuje de gatos / Static and dynamic pressures of the jacks.

estructuras a atravesar, bajo la vía 17, que obligaron a un avance lento en ese tramo.

En cuanto a las presiones provocadas por el rozamiento, se presenta gráfica de presiones estáticas y dinámicas durante el empuje (Fig. 28).

Curiosamente, la presencia de materiales de relleno más heterogéneos en el lado Este ofreció más resistencia por rozamiento, y en general la estructura de este lado, aún siendo más pequeña que la del Oeste, provocó proporcionalmente un empuje mayor.

Uno de los objetivos buscados con los rellenos de mortero también era minimizar los empujes laterales, especialmente en las zonas de configuración más heterogénea. Este aspecto demostró ser una medida que favorecía mucho el control y la calidad del empuje.

Con objeto de analizar las posibles consecuencias que pudieran surgir en el túnel existente en la fase de ejecución del empuje, se instalaron 10 secciones de control de convergencias en aquél, conformada cada una de ellas por 6 cuerdas fijadas en clave y hastiales mediante pernos, según la sección presentada en la Fig. 26.

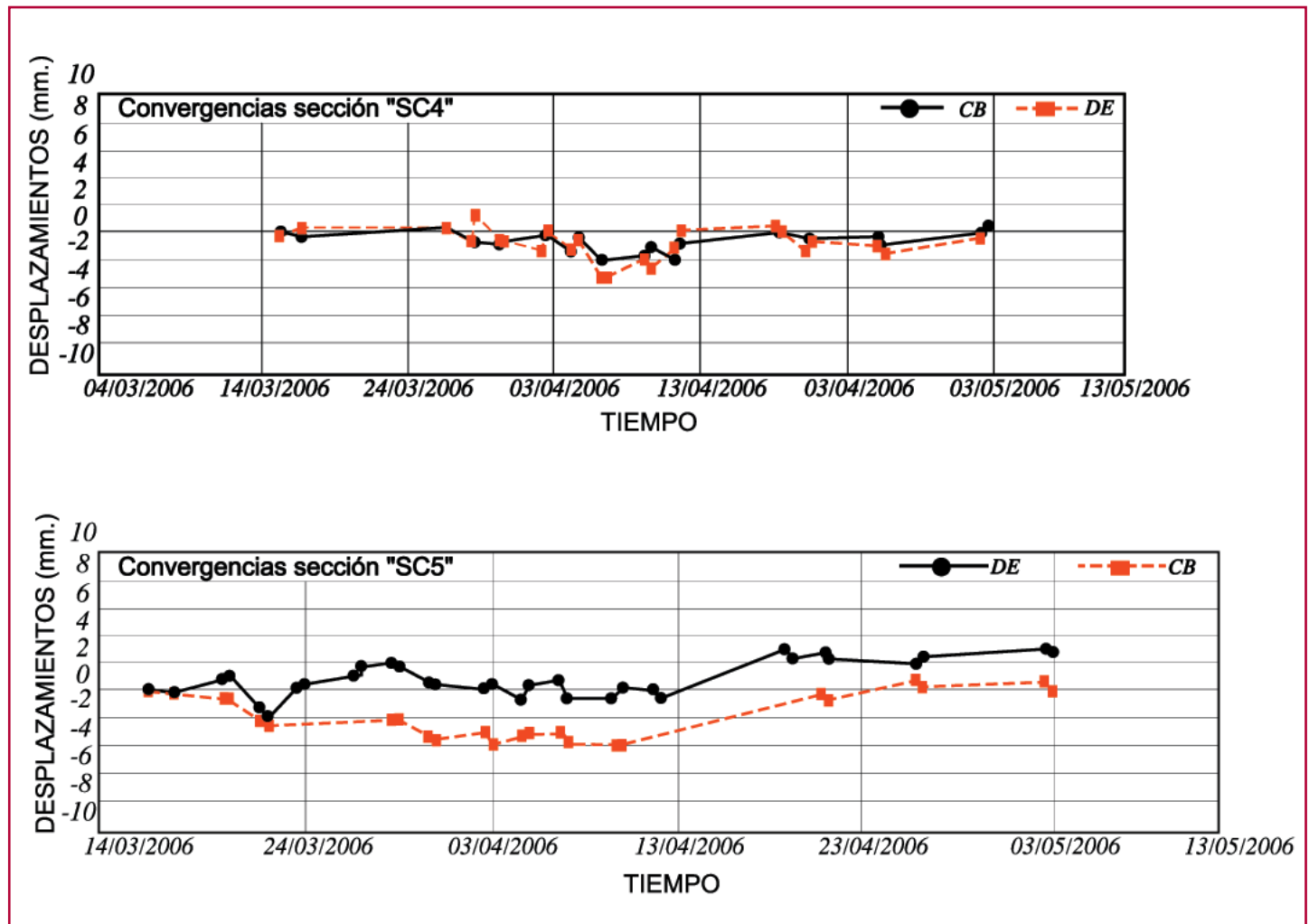
*We may note that the smallest structure (with a more vertical curve) was the more complex, due to the greater heterogeneity of the materials crossed (filling, reinforced concrete, natural ground, etc.). Jacking through the first underground structure crossed was especially complex, as there were notably asymmetric thrusts on the box.*

*The deviations were much lower than the safety margins that had been adopted during design of the structures (25 cm on ground plan as well as section), and the real ones amount to a deviation of about 0.08% on the ground plan and 0.05% on section (Fig. 27).*

*After the jacking, the utilities in the Station were restored to their original situation.*

## 6. Instrumentation and results

*During the jacking, there was a maximum deviation in the head of the first east box, of up to 17 cm on ground plan. This was due to the presence of waste materials inside one of the structures to be crossed, under track 17, that led to a slow advance in this part.*



Figs. 29 y 30. Convergencias en túnel existente / Convergences in existing tunnel.

Se han escogido dos de estas secciones –la "SC4" y la "SC5"- como las más representativas del control llevado a cabo. Su ubicación se encuentra en el plano de situación, y se adjunta la representación gráfica de las lecturas en las figuras 29 y 30. Las lecturas realizadas se presentan en mm. y el convenio de signos adoptado es: (+): Divergencia, (-): Convergencia.

La convergencia máxima en la sección SC4 ha sido de unos 6 mm (con 2 mm de convergencia elástica), y de unos 5 mm en la sección SC5. Por tanto, no se han producido convergencias importantes

En cuanto a los electroniveles, es importante anotar que el seguimiento se hacía electrónicamente, teniendo en cuenta que durante las continuas labores de recalce y renivelación los datos quedaban falseados. Esto obliga a tener muy en cuenta

As to the pressure caused by rubbing, a graph is provided of static and dynamic pressure during jacking. (Fig.28).

Curiously, the presence of more heterogeneous filling materials on the east side produced more resistance due to rubbing, and this east structure, even being smaller than the other one, found higher resistance.

One of the goals sought for with the mortar fillings was also to minimise lateral rubbing; especially in the areas with accused heterogeneity. This aspect proved to be a very effective measure for adequate control and quality of the jacking.

In order to analyse the possible consequences that might arise in the existing tunnel during the execution phase of the thrust, the installation of 10 convergence sections was undertaken in it, each one formed by 6 cords set on the crown and side walls by bolts, according to the section presented in Fig. 26.

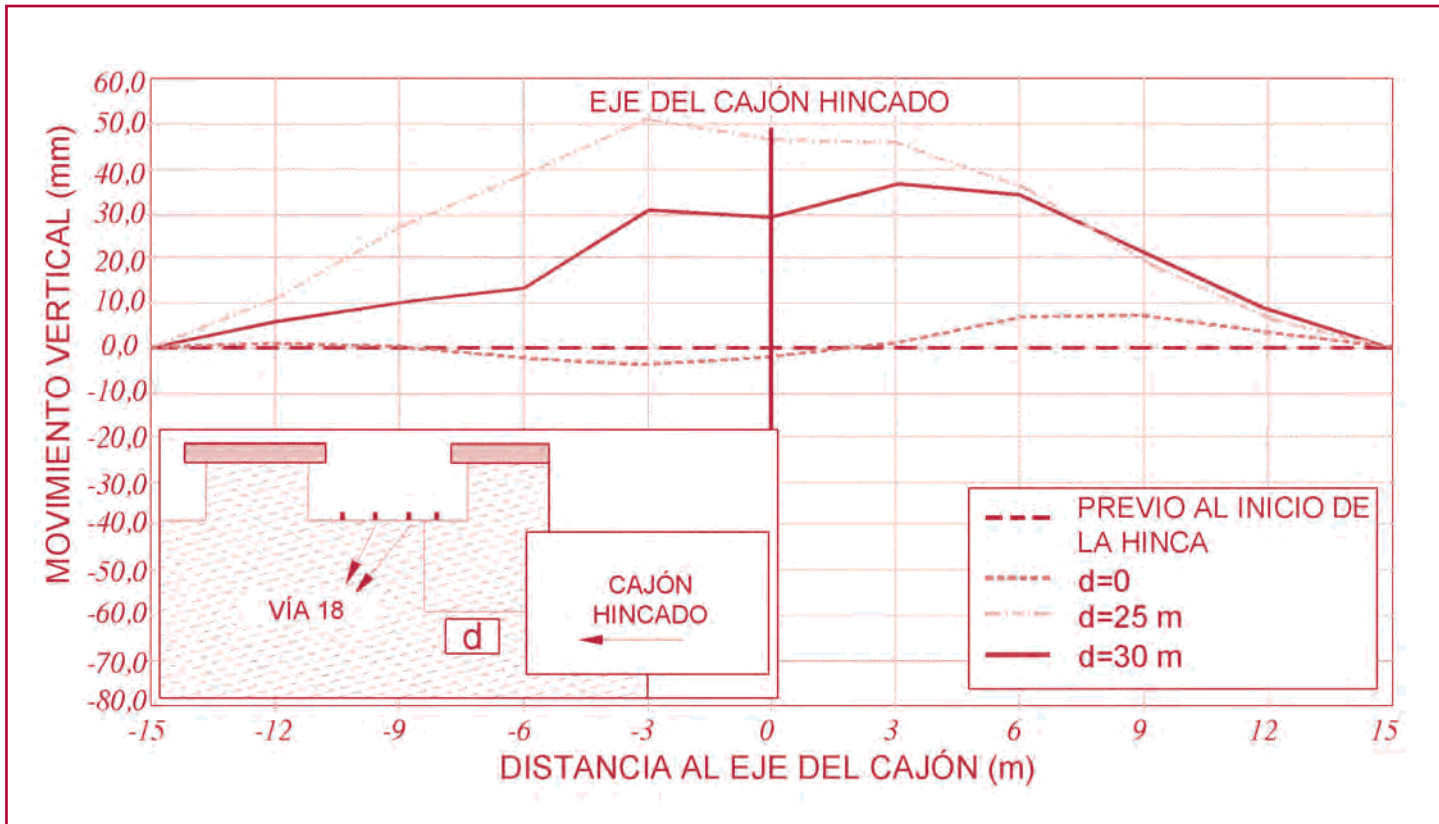


Fig. 31a.  
 Electroniveles  
 en vía 18.  
 Deformadas  
 /Electrolevels in  
 track 18.

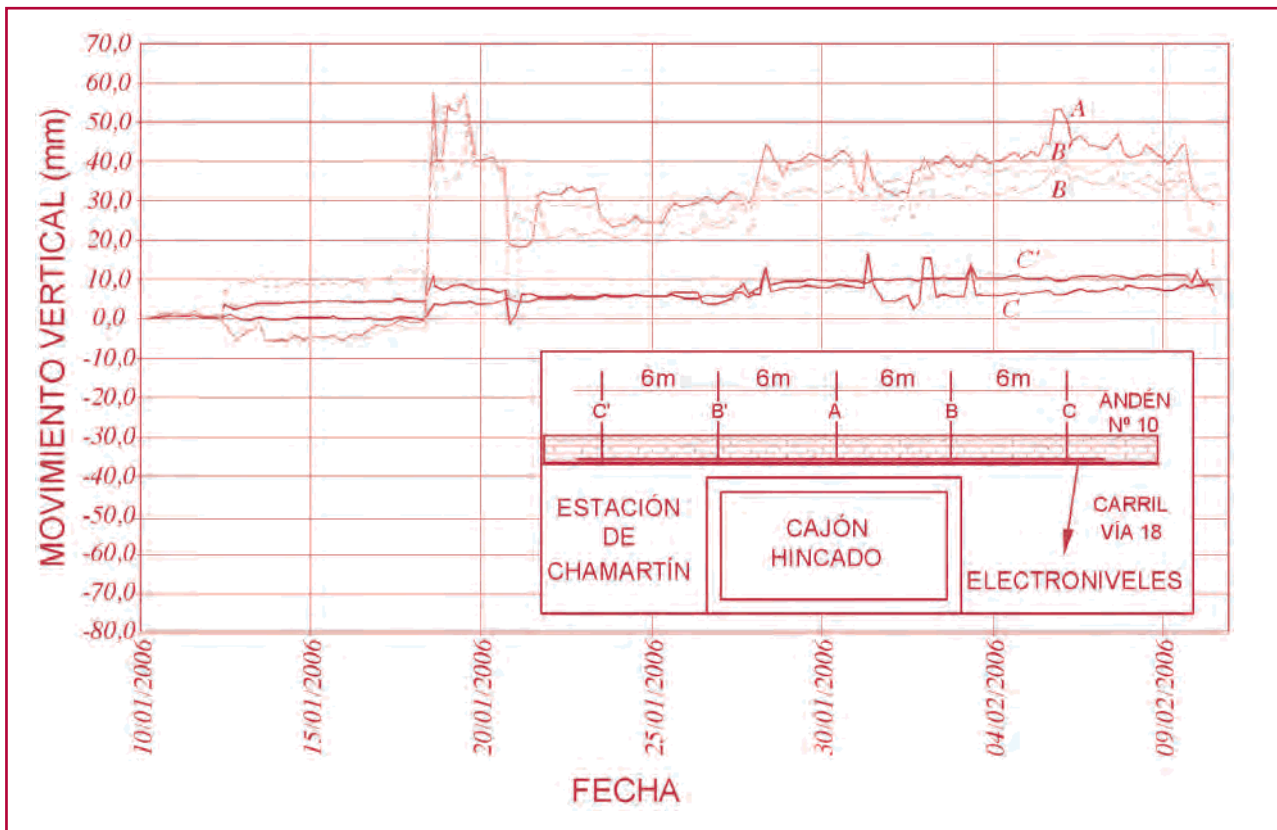


Fig. 31b.  
 Electroniveles  
 en vía 18.  
 Movimientos  
 /Electrolevels in  
 track 18.  
 Movements.

estos aspectos, sobre todo en cuanto a que los movimientos registrados deben entenderse como relativos y no absolutos. Con esta salvedad, los electroniveles han permitido asegurar que en ningún momento del empuje se producían movimientos imprevistos importantes, resultando en una gran calidad de las alineaciones alcanzadas.

### Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Excmo. Ayuntamiento de Madrid por el permiso para publicar este artículo; y a D. Manuel Melis y D. Manuel Arnáiz, máximos responsables de las infraestructuras realizadas en Madrid durante la última legislatura, así como a D. Francisco Javier Rodríguez Bernardo, responsable a su vez de esta obra.

Igualmente, quieren expresar su reconocimiento a los técnicos de la empresa constructora OHL, así como de Euroestudios.y Aepo, por su decisiva intervención tanto en la construcción como en el desarrollo del proyecto de ejecución, redactado por Ineco.

Por último, no se puede olvidar la eficazísima ayuda de D. Luis Miguel Barroso y la contribución de D. Gerardo Santiago, del Ayuntamiento de Madrid; así como la colaboración de Alberto Lozano Ingeniería y los servicios de control del Ayuntamiento de Madrid (SECOIM). Ha sido también especialmente importante la gran labor de INCOPE Consultores en materia de Coordinación de Seguridad y Salud.

Finalmente, es preciso agradecer la fundamental colaboración prestada en todo momento por ADIF-RENFE, absolutamente imprescindible para la realización de esta obra necesaria. ♦

*Two of these sections have been chosen, the "SC4" and the "SC5", as the most representative ones of the control carried out, the location of which is on the location plan (Fig. 29 and 30), as well as the readings, in mm. The sign convention adopted is: (+): Divergence, (-): Convergence.*

*Maximum convergence in the SC4 section was about 6 mm (with 2 mm of elastic convergence), and about 5 mm in section SC5. We can thereby confirm that no important convergences were produced during the jacking.*

*As for the electrolevels, it is important to note that they were electronically monitored, bearing in mind that the data was skewed during the continual tasks of wedging and relevening. This aspects must be taken always into account, particularly because the registered movements must be read more as relative than absolute. With this precaution, the electrolevels have efficiently monitored the influence on rails at all times, helping to obtain a very high quality of the final alignment.*

### Acknowledgements

*The authors of this paper wish to Express their gratitude to the Excmo. Ayuntamiento de Madrid, for its permission tu publish these results, and to D. Manuel Melis and D. Manuel Arnáiz, heads of the infrastructure plan carried out in Madrid in the last four years, as well as to D. Francisco Javier Rodríguez Bernardo, directly in charge of this project.*

*They also wish to express their recognition and gratitude to OHL (main contractor), Euroestudios and Aepo, for their indispensable contribution both during the construction and the development of the project, initially prepared by Ineco.*

*Special consideration must be dedicated to the very efficient contribution of D. Luis Miguel Barroso and D. Gerardo Santiago, from the Excmo. Ayuntamiento de Madrid, as well as to the collaboration of Alberto Lozano Ingeniería and SECOIM, for its detailed monitoring of all instrumentation. The contribution of INCOPE Consultores has also been fundamental to ensure the safety of workers and construction procedures, at all times.*

*Finally, the collaboration of ADIF-RENFE is especially acknowledged, as a a key part of the success of this necessary project. ♦*

#### Referencias/References:

- MAESTRO, J. ; OTEO, C. ; LAGUNA, F.J. Y BECERRIL, A. (2007). "Large sized jacked boxes at the Chamartín Railway Station". Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol. 4, pp. 1917-1925.
- OTEO, C. ; ARNAIZ, M. ; TRABADA, J. Y MELIS, M. (1999). "The Madrid model: A semi-empirical method for subsidence estimations". Proceedings of the World Tunnel Congress '99, Oslo, Vol.1, pp 163 – 170.
- PECK, R.B. (1969). "Deep excavations and tunnelling in soft ground". Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico. State of the Art Volume.