

Prolongación de la Línea 2 del FMB tramo: Pep Ventura-Badalona Centro

JUAN JOSÉ DÍAZ LÓPEZ (*) y MANUEL ALPAÑÉS RAMOS (**)

RESUMEN La ampliación de la Línea 2 de Metro de Barcelona entre las estaciones de Pep Ventura y Badalona Centro se realiza al abrigo de pantallas continuas construidas con pantalladoras convencionales e hidrofresa. La excavación se lleva a cabo mayoritariamente en arenas de origen coluvio-fluvial y litoral con un nivel de agua muy somero; las pantallas se empotran en el sustrato mioceno impermeable. Así, las pantallas alcanzan longitudes máximas de 34 m, profundidades de excavación de hasta 27 m y cargas de agua máximas de 15 m. El tramo discurre en un entorno con edificaciones a menos de 2 m de distancia de las pantallas. La corrección del efecto presa que generan las pantallas en el flujo hidrogeológico transversal se ha realizado mediante un novedoso sistema de drenes californianos. En resumen, aunque de modo aislado ninguno de los elementos de esta obra es excepcional, la coexistencia de un nivel freático elevado, la presencia de materiales cuaternarios recientes, la existencia de edificaciones muy próximas y la ejecución de pantallas de longitud muy apreciable, suponen un reto importante (que ha llevado a GISA a clasificar esta obra como la de mayor riesgo de Cataluña) que se ha resuelto con éxito.

EXTENSION OF LINE 2 OF BARCELONA'S METRO SYSTEM: PEP VENTURA-BADALONA CENTRO

ABSTRACT *The extension of Line 2 of Barcelona's Metro System between the stations of Pep Ventura and Badalona Centre is done using continuous diaphragm walls built with conventional equipments and an hydromill. The excavation was done mostly in colluvial-fluvial and coastal origin sands with a very shallow water table and the diaphragm walls are embedded in Miocene impermeable substrate. Thus, the embedded walls reach maximum lengths of 34 m, excavated depths of up to 27 m and water pressures at a maximum of 15 m. The construction had to be done with buildings less than 2 m away from embedded walls. The correction of the dam effect created by the diaphragm walls in the water cross-flow was achieved by using a new system of Californian drains. In summary, none of the elements of this construction is exceptional on its own, but the coexistence of a high water table, the presence of recent quaternary materials, the existence of buildings very close to it and embedded walls of considerable length, pose major challenges (that has led GISA to classify this construction as Catalonia's riskiest) that has been resolved successfully.*

Palabras clave: Hidrofresa, Pantallas, Efecto presa, Cuaternario, Mioceno, Subsistencia.

Keywords: Hydromill, Embedded walls, Dam Effect, Quaternary, Miocene, Subsidence.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de los planes de ampliación de los Ferrocarriles Metropolitanos de Barcelona (FMB), se encuentra la prolongación de la Línea 2 entre la estación de Pep Ventura (existente) y la estación de Badalona Centro, a construir.

El tramo discurre soterrado y se construye mediante el conocido método "cut and cover", realizando la excavación al abrigo de pantallas ejecutadas con hidrofresa y pantalladoras convencionales.

La obra puede dividirse en dos partes, tramo entre estaciones y la estación de Badalona Centro. En la Figura 1 puede

apreciarse un esquema del trazado, que presenta una longitud total de unos 650 m.

La traza discurre por un entorno urbano con una elevada densidad de edificación y servicios. La distancia entre las pantallas y los edificios es, en algunos casos, inferior a 2 m.

En la Figura 2 puede apreciarse la proximidad de las pantallas a las viviendas de la zona.

La excavación entre pantallas se realiza, mayoritariamente, en los materiales cuaternarios recientes que existen en la plana litoral de la margen izquierda del río Besòs, constituidos fundamentalmente por arenas. Las pantallas se empotran en el sustrato impermeable inferior, formado por materiales de tipo arcilloso pertenecientes al Mioceno.

El nivel freático se encuentra relativamente somero (5 a 12 m de profundidad), en el entorno de la cota del nivel del mar, del que la traza se encuentra muy próxima, a menos de 700 m.

(*) Ingeniero de Caminos. Departamento de Geotecnia. Oficina Técnica de OHL.

(**) Ingeniero de Caminos. Director de Oficina Técnica de OHL.



FIGURA 1.

Así, la excavación entre pantallas se ha realizado con desniveles de agua importantes (hasta 15 metros) y profundidades de excavación elevadas (orden de 27 metros en la zona de la estación). Las pantallas han alcanzado una profundidad máxima de unos 34 m.

Las mayores dificultades que ha encarado la obra han sido, por tanto, las siguientes:

- Existencia de edificios muy próximos que, además, tienen en su mayor parte una gran antigüedad (más de 100 años) y un estado de conservación deficiente en muchos casos.



FIGURA 2.



FIGURA 3.

- Nivel freático relativamente alto, lo que supone importantes cargas de agua y un reto para la estanqueidad del túnel.
- Materiales cuaternarios recientes que suponen una potencial fuente de problemas en conjunción con los dos aspectos anteriormente citados.

En la actualidad, la obra civil se encuentra finalizada.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS TÚNELES

Como se ha indicado, el tramo se puede dividir fundamentalmente en dos zonas distintas, área interestaciones (entre Pep Ventura y Badalona Centro) y la propia estación de Badalona.

En la Figura 3 se sitúa en planta la obra y se indican ambas zonas.

El tramo interestaciones está formado por pantallas de 1,0 m de canto y longitud variable entre 18,4 y 26,0 m. La anchura libre entre ellas varía entre 8,5 y 15,5 m.

En cuanto a la estación, las pantallas tienen 1,2 m de canto y su longitud oscila entre 28,5 y 33,8 m, con una anchura libre variable entre 17,34 y 21,8 m.

Las principales características del tramo interestaciones son las que se recogen en la Figura 4.

El tramo interestaciones tiene una longitud aproximada de unos 420 m. Es en esta zona donde nos situamos más próximos a las edificaciones del entorno. La Figura 5 muestra la obra ya ejecutada en esta zona.

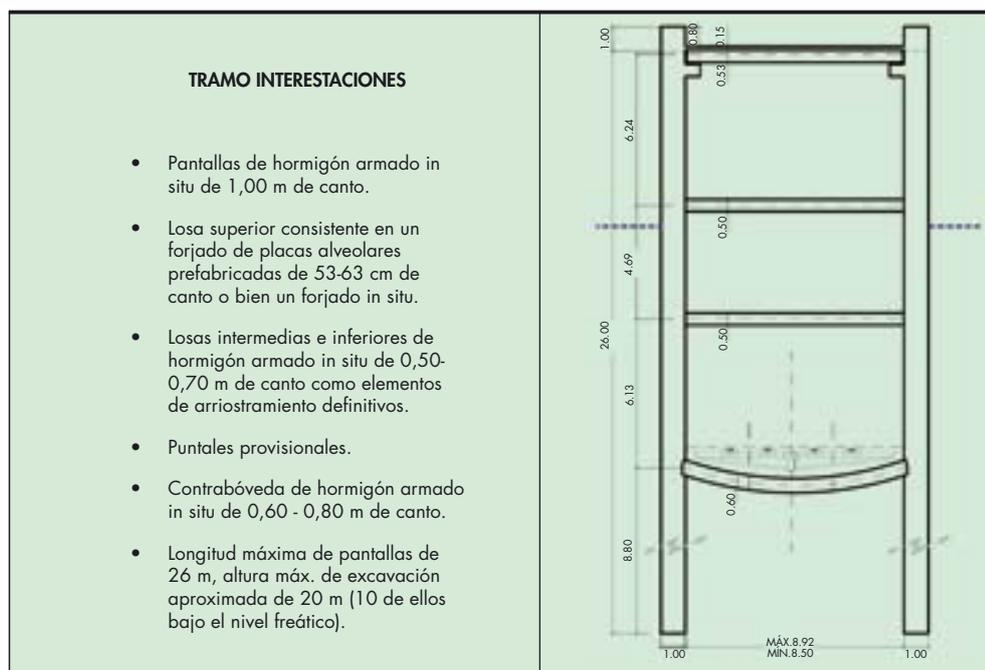


FIGURA 4.



FIGURA 5.

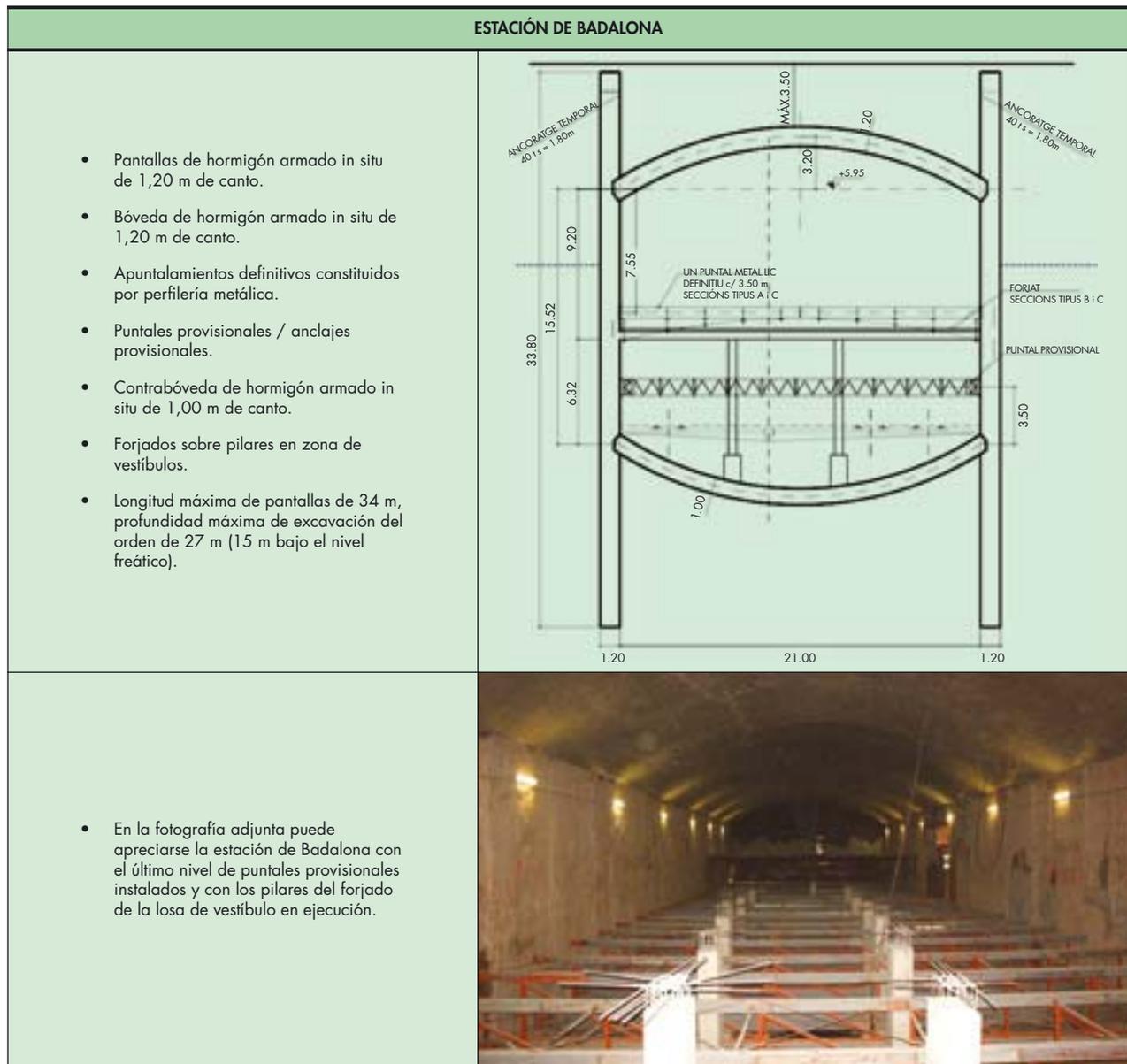


FIGURA 6. Características de la estación de Badalona.

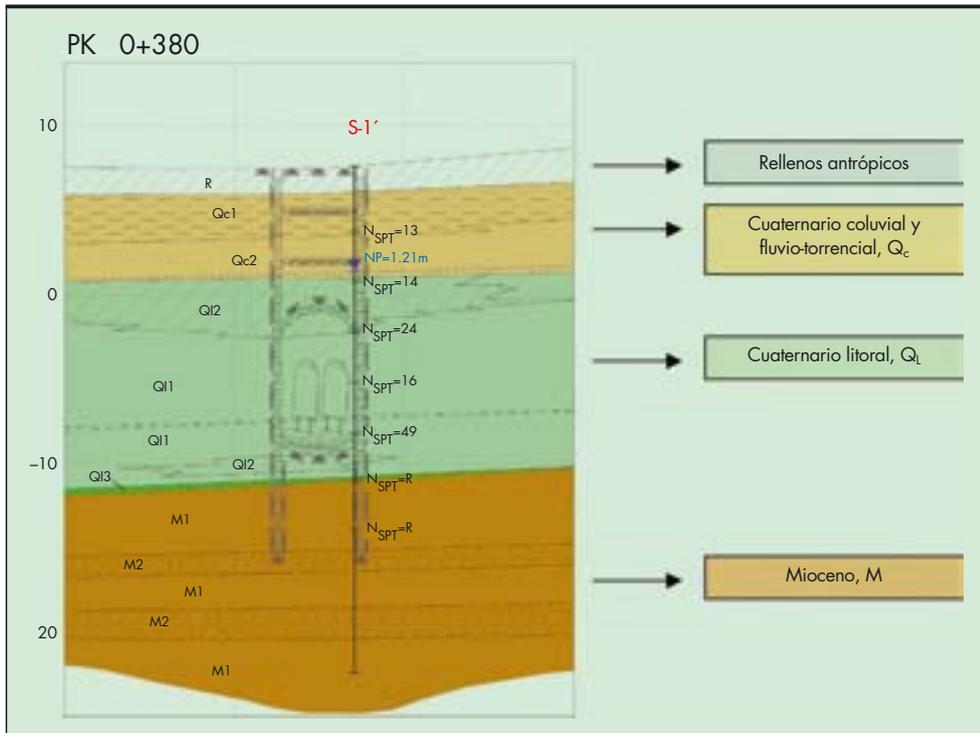


FIGURA 7.

3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICAS E HIDROGEOLÓGICAS

3.1. INTRODUCCIÓN

El tramo se sitúa en la plana litoral asociada a la margen izquierda del río Besòs. El subsuelo está constituido por depósitos cuaternarios, del Holoceno, que se disponen de forma discordante sobre un sustrato del Mioceno.

De techo a base se distinguen materiales coluviales y fluvio-torrenciales (Q_c), materiales de origen litoral (Q_l) y sedimentos del Mioceno (M). Todo el trazado está recubierto, en gran parte, por rellenos antrópicos. El nivel freático se sitúa ligeramente por encima de la cota 0.

En la Figura 7 se muestra una sección transversal geológico-geotécnica representativa.

3.2. LITOLOGÍAS

3.2.1. Rellenos antrópicos

La traza presenta un pequeño recubrimiento superficial de rellenos antrópicos. Se trata de **materiales muy heterogéneos**: arenas, arcillas y limos con un contenido variable en gravas, restos de basura y todo tipo de vertidos antrópicos (plásticos, cables, madera, etc.).

Estos materiales presentan un espesor variable, normalmente entre 1,5 y 2 m, aunque ocasionalmente se han detectado espesores de hasta 5 m en puntos que corresponden a terraplenes de antiguas rieras o de antiguos sótanos.

3.2.2. Cuaternario coluvial y fluvio-torrencial (Q_c)

Estos materiales están constituidos, básicamente, por **arenas con abundante matriz arcillosa**. Su espesor oscila entre 3 y 10 m, situándose siempre por encima del nivel freático.

Estas arenas tienen un contenido muy variable de fracción fina (6 al 65%) constituida por arcillas y limos poco plásticos.

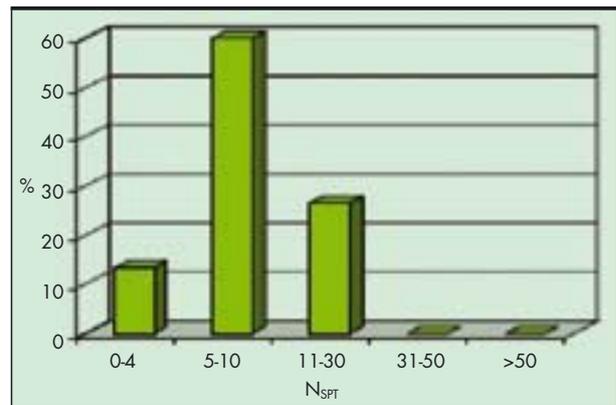


FIGURA 8.

Se han realizado en estos materiales 15 ensayos de penetración estándar (SPT). La mayor parte de valores se sitúan entre 5 y 10 golpes, como se puede apreciar en la Figura 8, por lo que se trataría de un suelo **flojo**.

3.2.3. Cuaternario litoral (Q_l)

Bajo el nivel anterior se sitúa el tramo constituido por **arenas medias a gruesas** (unidad Q_{L1}). Contienen gravas rodadas con poca o ninguna matriz arcillosa. Resulta frecuente encontrar también **arenas con niveles cementados** de orden milimétrico a centimétrico (unidad Q_{L2}). También se han diferenciado niveles más o menos continuos de gravas y bloques que pueden superar los 10 cm de diámetro. El espesor de estos materiales varía entre 10 y 12 m.

Los ensayos SPT realizados para la unidad Q_{L1} han proporcionado un valor medio del golpeo N_{SPT} de 23 (materiales **medianamente densos**). En las arenas parcialmente cemen-

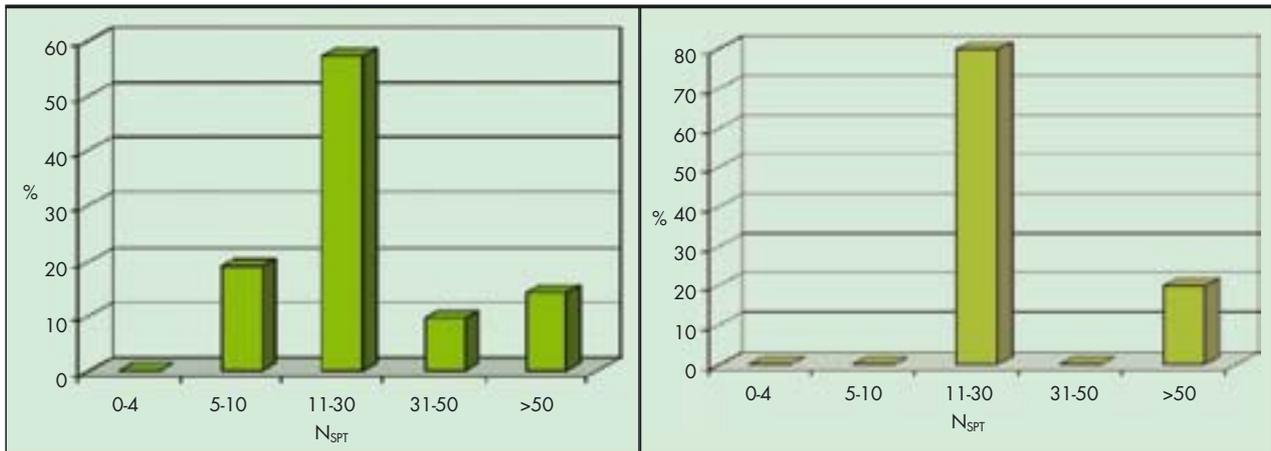


FIGURA 9.

tadas de la unidad Q_{L2} se ha obtenido un golpeo medio de 38, aunque la mayor parte de resultados se sitúan entre los 11 y 30 golpes (también *medianamente densos*). En la Figura 9 se resumen los histogramas de golpeos obtenidos en esta formación (Q_{L1} y Q_{L2}, respectivamente):

En la base de los depósitos litorales se ha reconocido un nivel de **conglomerados y/o areniscas fuertemente cementados** (unidad Q_{L3}) de un espesor que varía entre 0,5 y 1,5 m. Se trata de una roca con un grado de fracturación considerable, con valores de RQD generalmente inferiores al 25%. Lógicamente, los ensayos SPT realizados en estos materiales han proporcionado sistemáticamente valores de *rechazo*.

3.2.4. Sustrato mioceno

Bajo los depósitos litorales se sitúan materiales del Mioceno. Litológicamente se trata de **argilitas** marrón - rojizas, a veces grises, con cierta fracción gruesa constituida por arenas y gravas (unidad M₁), que alternan con tramos de **brechas** de color rojizo (unidad M₂). Los clastos son poligénicos, angulosos y pueden superar los 10 cm de diámetro. Estos sedimentos están consolidados y localmente cementados, teniendo un comportamiento de suelo **muy duro**.

Esta formación se ha detectado en todos los sondeos realizados, que no han alcanzado su base y han perforado un espesor máximo de unos 15 m.

Los ensayos SPT realizados han alcanzado el *rechazo* en estos materiales. Los ensayos de resistencia compresión simple realizados muestran resultados que varían entre 2 a 10,4 Kp/cm², con un valor medio de aproximadamente 6 Kp/cm².

También se han realizado en estos materiales dos ensayos presiométricos que han proporcionado valores de presión límite superiores a 16 MPa y módulos presiométricos de 195 y 257 MPa.

3.2.5 Nivel freático

El nivel de agua se ha detectado en el contacto entre los materiales coluviales y los litorales, entre las cotas 0,4 y 1,8 m.s.n.m. La profundidad del nivel freático respecto a la superficie del terreno natural varía entre un mínimo de unos 5 m en el inicio del tramo (Pep Ventura), hasta un máximo de unos 12 m al final de la estación de Badalona.

3.2.6. Resumen. Parámetros geotécnicos

Los parámetros geotécnicos adoptados para los cálculos han sido los mostrados en la Tabla 1.

4. CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULOS

Los cálculos de Proyecto se realizaron utilizando el programa RIDO v. 4.02, habitualmente utilizado para el cálculo y dimensionamiento de obras de este tipo.

Los principales criterios de diseño que se adoptaron fueron los siguientes:

- Sobre elevación nivel freático aguas arriba: 0,5 m.
- Empotramiento mínimo en el nivel mioceno: 2,0 m.
- Coeficiente de seguridad frente al sifonamiento: 2,0.
- Coeficiente de seguridad movilización empuje pasivo: 1,50.
- Deformación máxima en cabeza de pantallas (en zonas edificadas): 15 mm.
- En todos los casos, para el cálculo, se han considerado las secciones más desfavorables, en cuanto al nivel de tierras y a las cargas de las edificaciones.

LITOLÓGIA	γ (t/m ³)	φ'	c' (t/m ²)	E (MPa)
Rellenos superficiales	1,90	25°	0,0	5
Sedimentos coluviales	2,00	29°	0,2	8
Sedimentos litorales	2,09	34°	0,0	50
Sustrato mioceno	2,35	39°	3,5	120
Rellenos compactados	2,00	30°	0,0	30

TABLA 1.

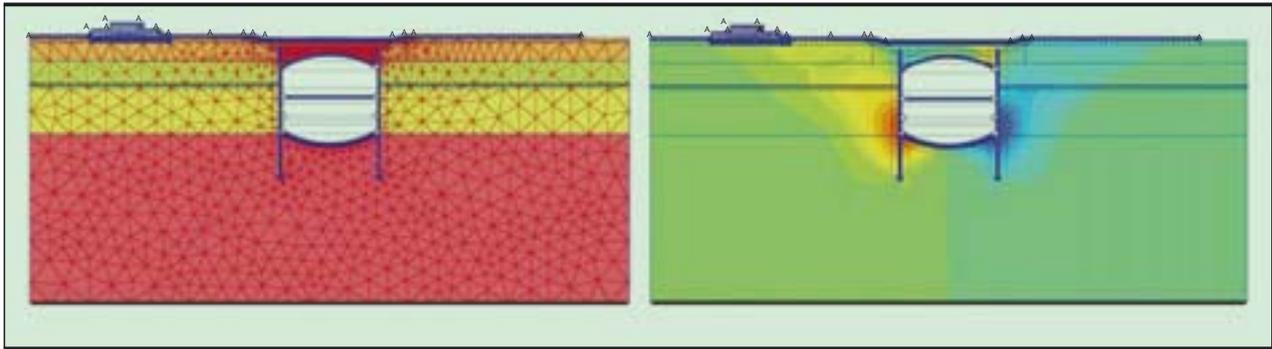


FIGURA 10.

TRAMO	SECCIÓN	P.K.	MOVIMIENTO HORIZONTAL MÁXIMO (mm)	COTA
Interestación	V-A	0+397	16	-4,0 m
Interestación	VII-A	0+537	13	Cabeza pantalla (+9,3 m)
Estación	XII – XIII	0+730	22	Cabeza pantalla (+9,95 m)

TABLA 2.

Durante el desarrollo de la obra se realizaron cálculos de comprobación en elementos finitos mediante el programa PLAXIS¹ con los que se pudo verificar la bondad del diseño realizado con el programa RIDO y evaluar los potenciales niveles de daño de las edificaciones de la traza, mediante los conocidos criterios de Burland y de Boscardin y Cording.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de los cálculos realizados.

Se comprobaron tres secciones, consideradas las más características, que son las que se resumen en la Tabla 2.

A partir de los cálculos efectuados, se han obtenido los resultados siguientes en las evaluaciones de daños realizadas de acuerdo a los criterios de Boscardin y Cording y de Burland (Figura 11 y Tabla 3).

Por tanto, los niveles de daño son claramente admisibles y en la línea de lo empleado en obras de este tipo. En el apartado dedicado a *Auscultación y Control* se recogen los resultados reales medidos en estas secciones características estudiadas.

¹ Anàlisi de les deformacions. Projecte Modificat de Perllongament de la Línia 2 del FMB. Tram: Pep Ventura – Badalona Centre. TEC 4. Marzo de 2008.

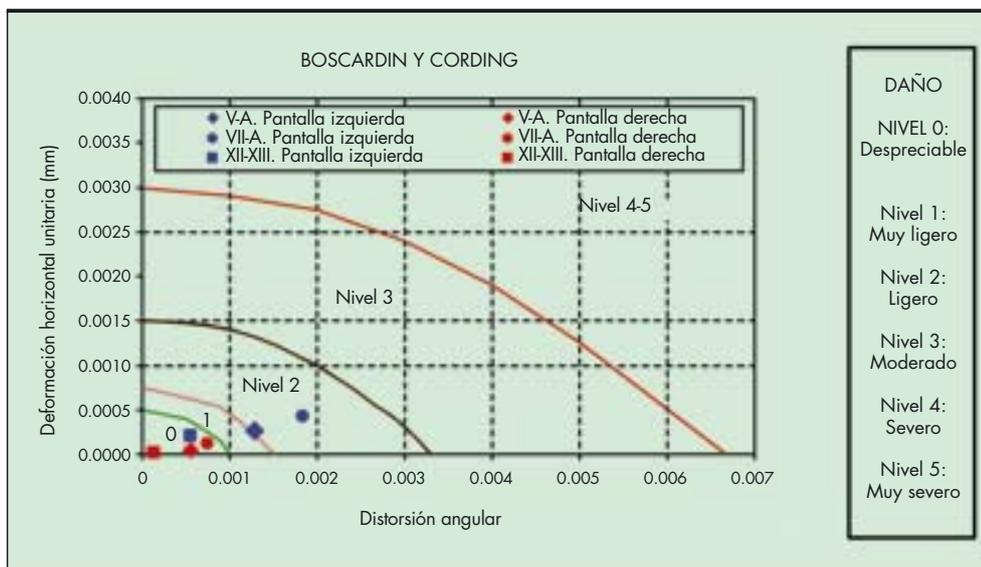


FIGURA 11.

TRAMO	SECCIÓN	LADO	DEFORMACIÓN ESPECÍFICA (%)	NIVEL DE DAÑO
Interestación	V-A	Izquierdo	0,034	Despreciable
Interestación	V-A	Derecho	0,000	Despreciable
Interestación	VII-A	Izquierdo	0,049	Despreciable
Interestación	VII-A	Derecho	0,027	Despreciable
Estación	XII – XIII	Izquierdo	0,021	Despreciable
Estación	XII – XIII	Derecho	0,005	Despreciable

TABLA 3.

5. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

5.1. INTRODUCCIÓN

La ejecución de las obras comenzó a finales de 2005. La ejecución de pantallas se inició, aproximadamente, a partir de Marzo de 2006.

En la zona de la estación la obra estuvo prácticamente parada durante aproximadamente un año por la aparición de restos arqueológicos.

En la actualidad, la obra civil del tramo está finalizada.

La ejecución de las obras ha estado condicionada por la proximidad de las edificaciones próximas, que impedían el trabajo nocturno aproximadamente entre las 23:00 y las 7:00 horas.

5.2. MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

5.2.1. Introducción

La ejecución del tramo se ha realizado entre pantallas, excavadas mediante hidrofresa y pantalladoras convencionales. En la Figura 12 se puede apreciar la zona ejecutada con pantalladoras convencionales (aproximadamente la primera mitad del tramo interestaciones y de la estación de Badalona), y el tramo ejecutado con hidrofresa (las segundas mitades de ambos tramos).

Originalmente la ejecución de las pantallas estaba prevista con cucharas tradicionales. Al iniciar las obras se encontró que los rendimientos de excavación estaban siendo bajísimos, básicamente por dos circunstancias:

- La existencia del nivel de conglomerados y/o areniscas cementados (unidad Q_{L3} ya comentada), que requería el uso intensivo de trépano.

- El empotramiento en los materiales del mioceno se estaba realizando con mayor dificultad de la prevista, lo que alargaba mucho las operaciones de excavación. De hecho, cuando llegó el momento de realizar la excavación de estos materiales para la ejecución de la contrabóveda, hubo de excavar con martillo picador.

Todo ello llevó a rendimientos que llegaron a ser de hasta únicamente un bache por semana. Ante estas circunstancias, se planteó como alternativa el empleo de hidrofresa.

A continuación se describen en detalle ambos tipos de maquinaria de excavación.

5.2.2. Pantalladoras convencionales

Las pantallas realizadas de este modo se han constituido con baches de 3,60 m de longitud (tramo interestaciones, canto de 1,00 m) y 4,30 m (estación de Badalona y espesor de pantallas de 1,20 m). La junta utilizada ha sido la clásica junta tipo tubo (1,00 y 1,20 m de diámetro, tramo interestaciones y estación, respectivamente). En la Figura 13 se muestra el proceso de ejecución de las pantallas (tramo interestaciones), que se realizan secuencialmente de forma continuada tras la ejecución de un bache de inicio. En este tramo la cuchara era de 2,80 m.

En la Figura 14 se muestran fotografías de la pantalladora convencional y de la introducción de la armadura en un bache.

Las juntas entre baches han presentado un excelente comportamiento, sin apenas rezumes de agua. Probablemente la razón lo ha constituido la sistemática seguida en la ejecución de los trabajos. Éstos se realizaban únicamente en horario diurno (7:00 a 23:00 horas) con el fin de limitar, en lo posi-



FIGURA 12.

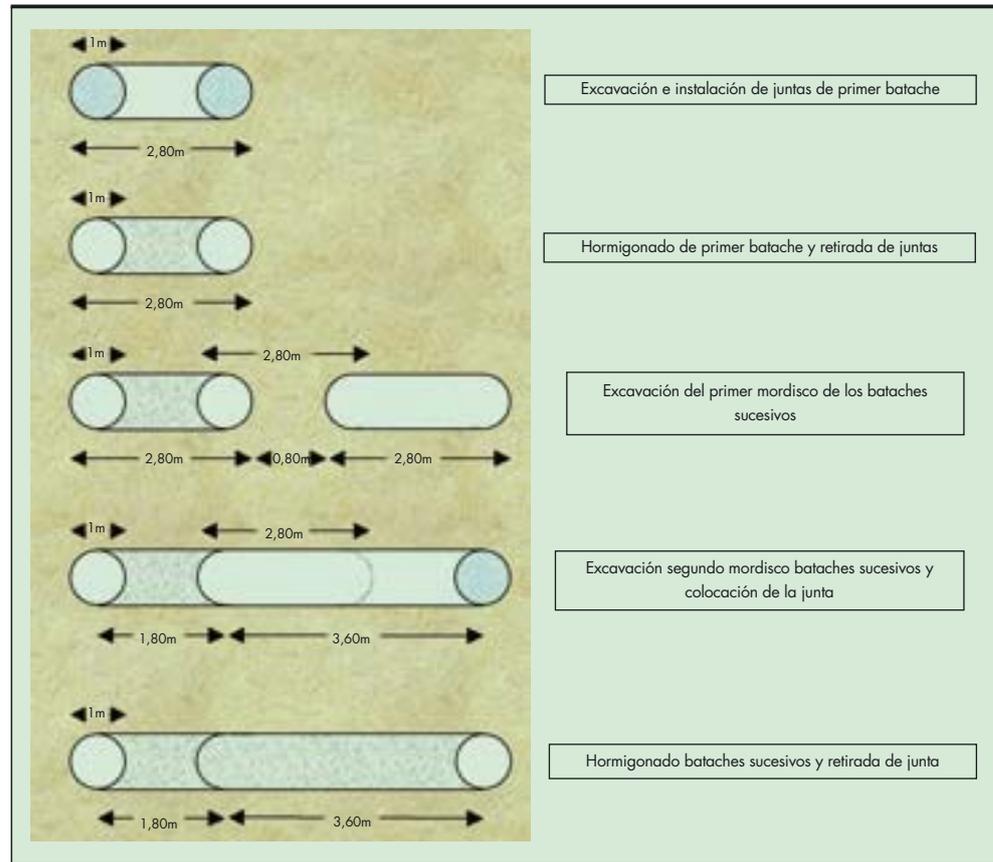


FIGURA 13.



FIGURA 14.

ble, las molestias al vecindario. La secuencia de trabajos para la ejecución de cada batache era la que sigue:

1. Excavación del batache. Como se ha indicado, la duración era muy variable, pero la excavación debía finalizar antes de las 14:00 horas para dar tiempo a

realizar el resto de operaciones de ejecución del batache y finalizar los trabajos antes de las 23:00 h. En caso contrario, la excavación debía continuar al día siguiente.

2. Introducción de la junta tipo tubo.



FIGURA 15.

3. Introducción de la armadura. Esta operación duraba aproximadamente 2 horas.
 4. Hormigonado del batache. Éste se prolongaba unas 3 horas.
 5. Extracción de la junta de 4 a 6 horas después del inicio del hormigonado. Esta operación, que condicionaba el resto, debía finalizar, como se ha comentado, antes de las 23:00.
- La Figura 15 muestra fotografías de las juntas tipo tubo.

5.2.3. Hidrofresa

En este caso los bataches tenían una longitud media de 2,65 m. La ejecución se realizaba siguiendo el sistema de bataches primarios y secundarios. Tras la ejecución de los dos primarios, se realizaba el secundario entre los dos anteriores, “mordiéndolo” la hidrofresa 15 cm en cada uno de los bataches primarios y conformando así una junta hormigón contra hormigón. (Figura 16).

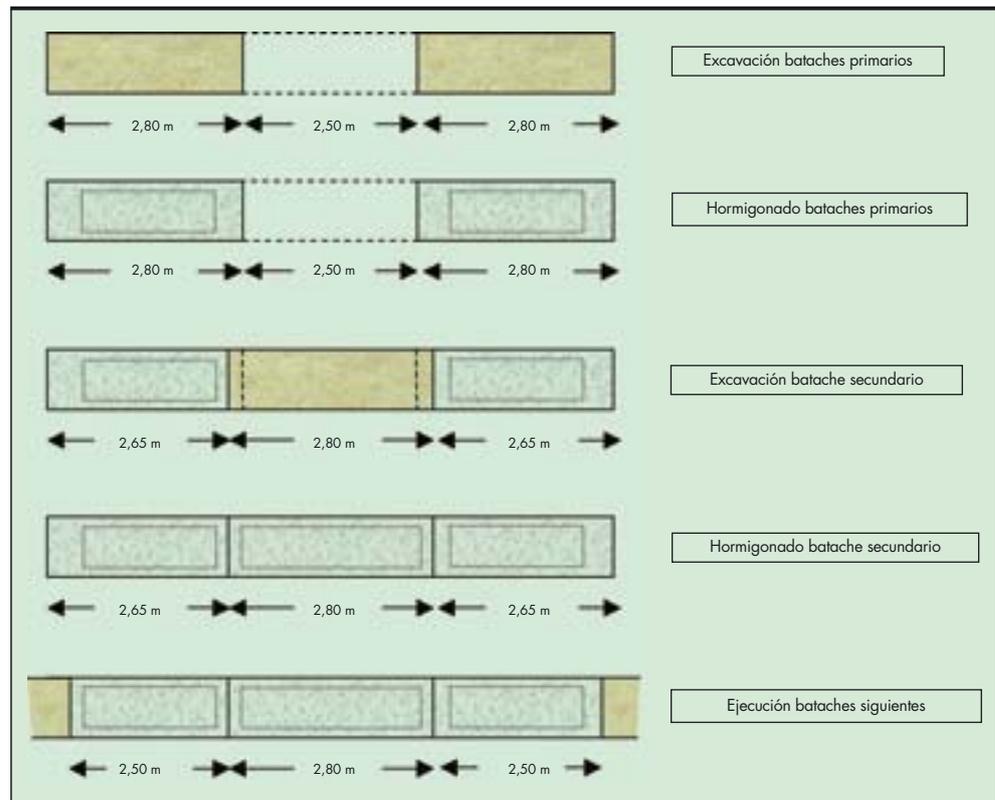


FIGURA 16.



FIGURA 17.

De este modo, el rendimiento alcanzado era de 1 a 1,5 bataches cada día (horario diurno).

En la Figura 17 se adjuntan fotografías de la hidrofresa.

La excavación con hidrofresa proporcionó buenos resultados. Únicamente en ocasiones la excavación en materiales arcillosos generaba una acumulación de material en las picas que disminuían su eficacia, por lo que había que limpiar manualmente la cabeza de perforación de la máquina, como se puede apreciar en la Figura 18.

5.3. FASES DE EJECUCIÓN

De modo simplificado, la secuencia de ejecución de las pantallas era la mostrada en la Figura 19.

Las fases de ejecución de la estación de Badalona se resumen en la Figura 20.

Tanto para el tramo interestaciones como para la estación de Badalona, el esquema de fases constructivas tiene numerosas variantes en función de la sección tipo elegida, que varía en el número de puntales y losas intermedias. Sin embargo, desde el punto de vista conceptual, las fases aquí mostradas son representativas del proceso constructivo.

En las Figuras 21 y 22 se muestra el estado de las obras en su fase final tanto para el tramo interestaciones como para la estación.



FIGURA 18.

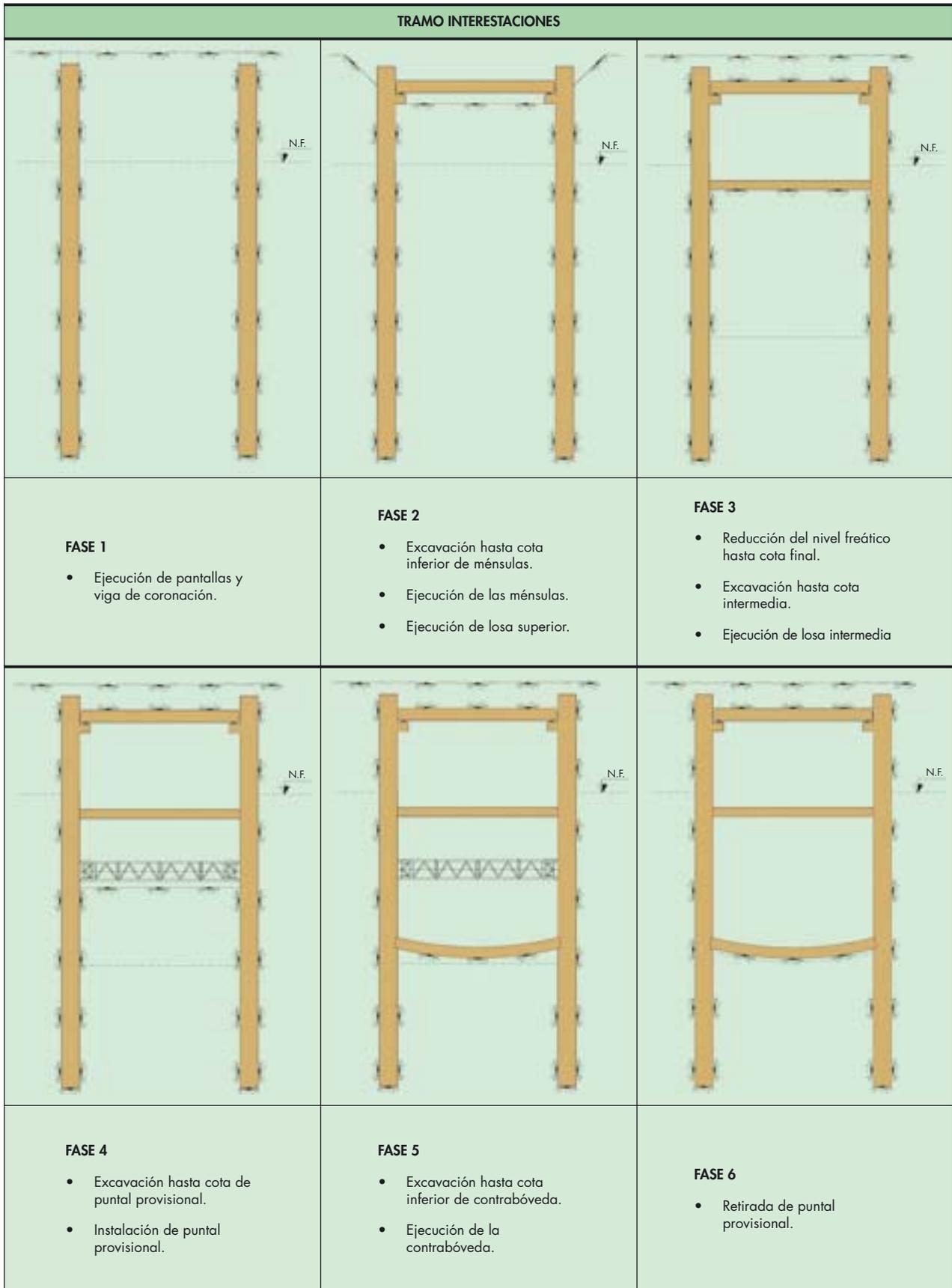


FIGURA 19.

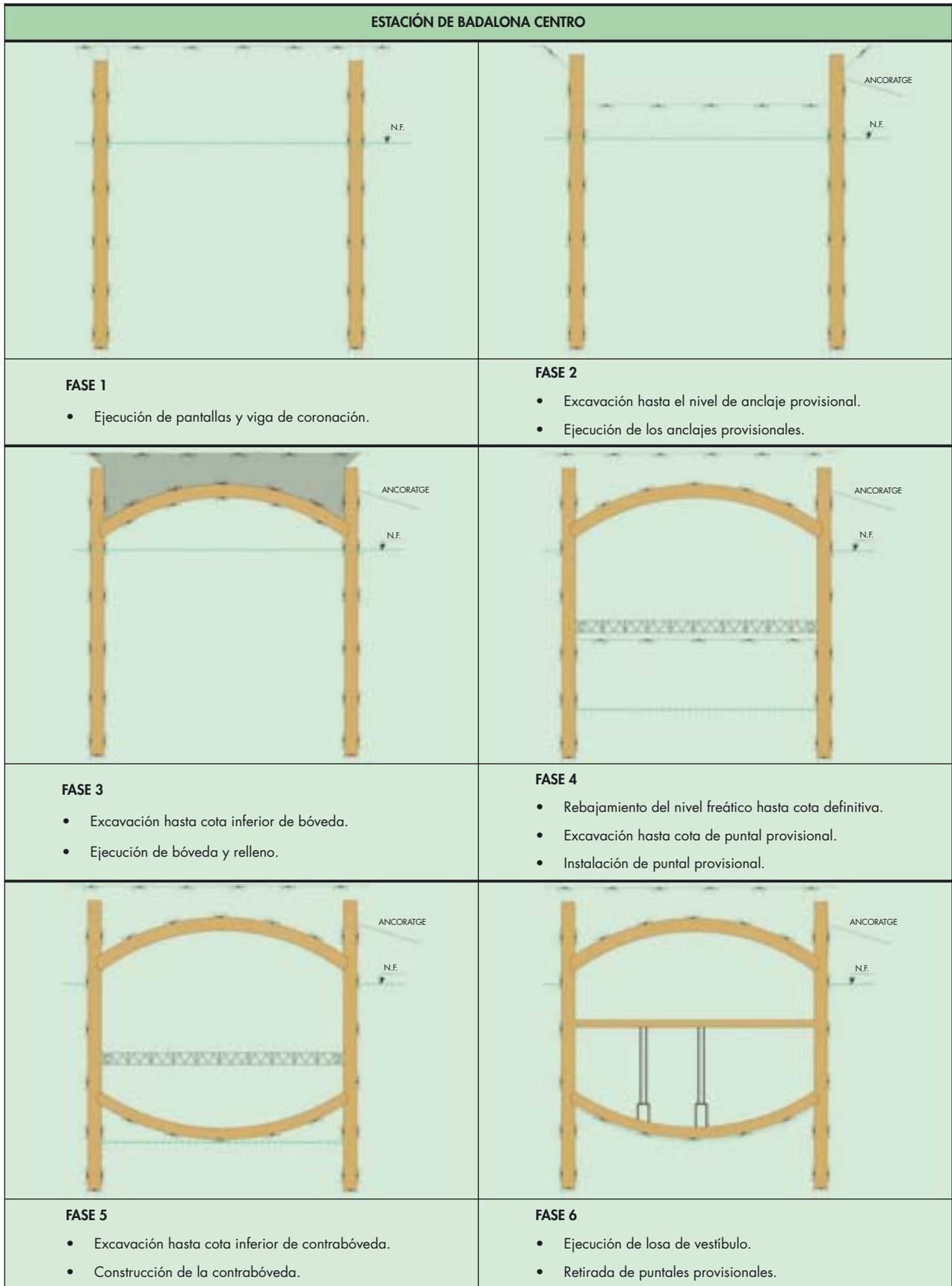


FIGURA 20.



FIGURA 21. Interestaciones.

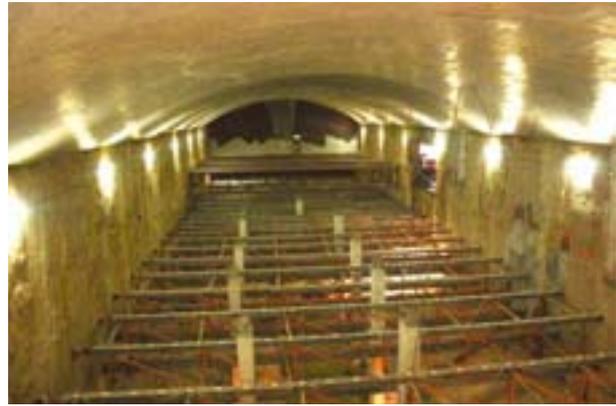


FIGURA 22. Estación de Badalona.

5.4. OTROS DETALLES DE EJECUCIÓN

En la Figura 23 se muestran otros detalles de ejecución de la obra.

6. ASPECTOS HIDRÁULICOS E HIDROGEOLÓGICOS

6.1. CONTROL DE ESTANQUEIDAD DE JUNTAS

Uno de los aspectos básicos de la seguridad en obras de este tipo (junto con la afección a estructuras próximas), es el con-

trol de la estanqueidad de las juntas entre bataches. Esta falta de estanqueidad puede tener varios efectos muy perniciosos:

1. Arrastre de material, especialmente en terrenos de grano fino, que pueden ocasionar socavones en superficie. En la Figura 24 se ilustra este fenómeno.
2. Si el fallo se produce bajo la cota de excavación, pueden producirse fenómenos de sifonamiento, de acuerdo al esquema de la Figura 25.

DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA
Ejecución de los muretes guía. Se puede apreciar la proximidad a los edificios.	
Hormigonado de la bóveda de la estación contra el terreno.	

FIGURA 23A.

DESCRIPCIÓN	FOTOGRAFÍA
<p>Hormigonado de la contrabóveda en el tramo interestaciones.</p>	
<p>Puntales provisionales en zona de estación.</p>	

FIGURA 23B.

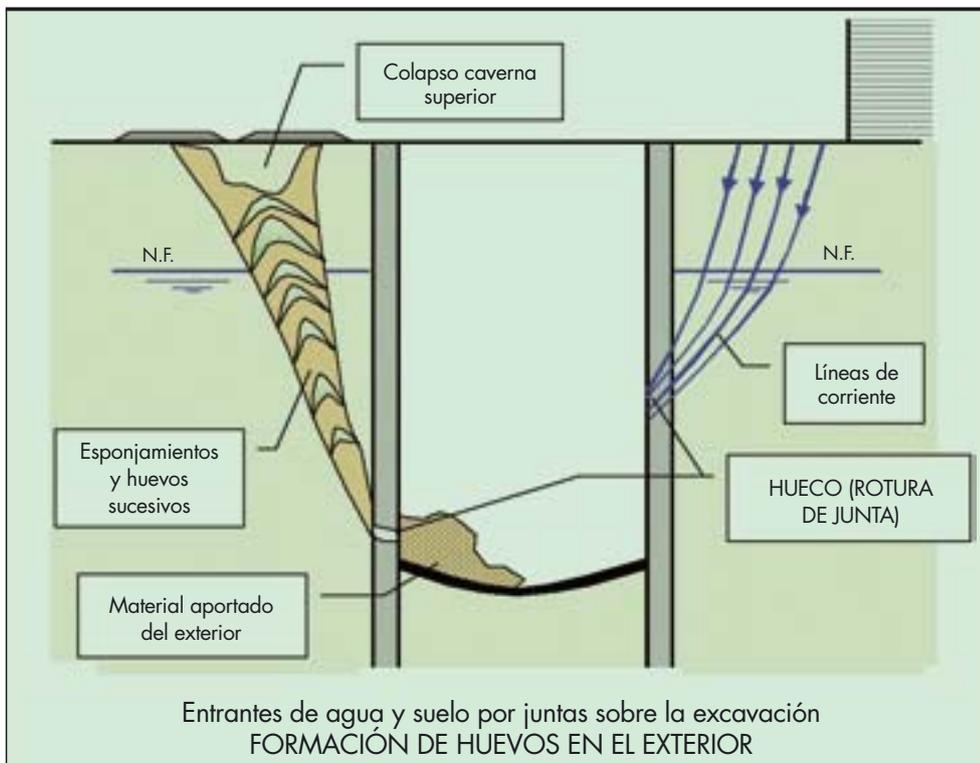


FIGURA 24.

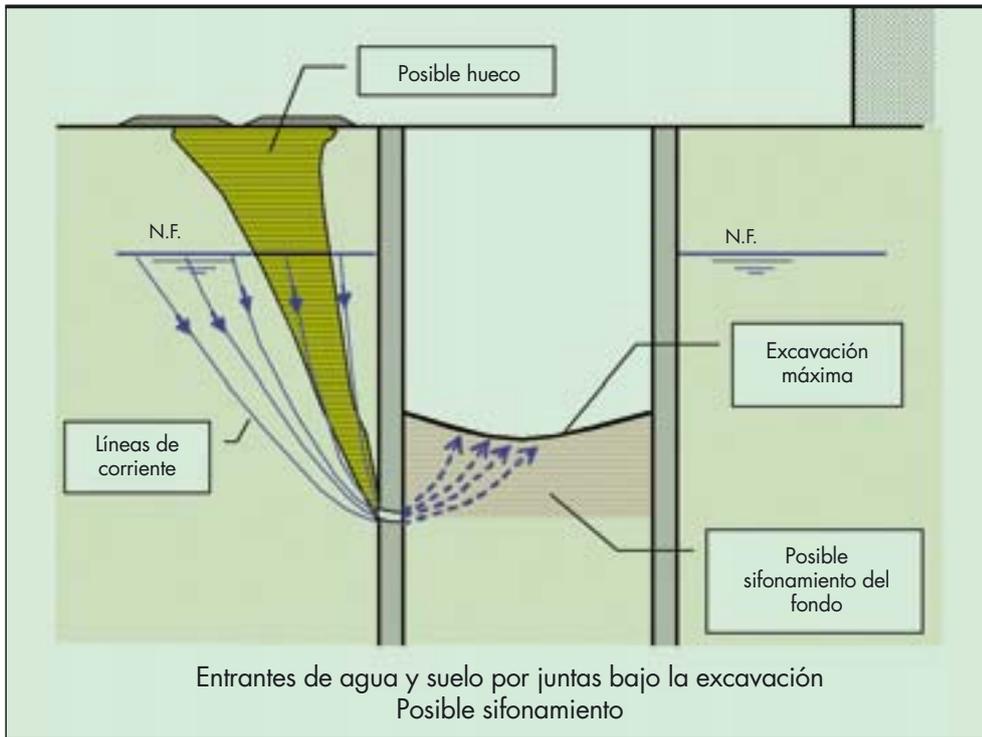


FIGURA 25.

3. Rebajamientos del nivel freático en el exterior de las pantallas que pueden inducir movimientos no admisibles en las estructuras y edificaciones del entorno.
4. La propia entrada de agua (y material) dificulta la ejecución de las obras.

Por ello, es básico tanto el control de estanqueidad de las juntas como el disponer medidas correctoras en caso de que se detecte alguna entrada de agua.

Un primer test de la estanqueidad de las juntas construidas puede realizarse mediante el control del rebajamiento del nivel de agua que se hace en los recintos entre pantallas para ejecutar la excavación. En nuestro caso, este control se hizo del modo siguiente:

- Se instaló una red de piezómetros de control en el interior de cada uno de los recintos, complementarios a los del exterior.

- Antes de realizar las excavaciones se rebajó el nivel de agua hasta la cota de máxima excavación (con un cierto resguardo).
- Se realizó el control del rebajamiento de agua en los piezómetros.

Así, el mejor método para detectar posibles entradas de agua a través de las juntas previamente a la excavación es la ejecución de piezómetros de control, que permitan chequear que el bombeo está produciendo el rebajamiento del nivel de agua que se persigue. En la Figura 26 se muestra el esquema de disposición de piezómetros que se abordó en la obra.

Si en algún punto existe entrada de agua a través de las juntas, no conseguiremos el rebajamiento del nivel de agua, aspecto que detectarán los piezómetros más próximos a la zona defectuosa.

En la Figura 27 se muestra esta idea.

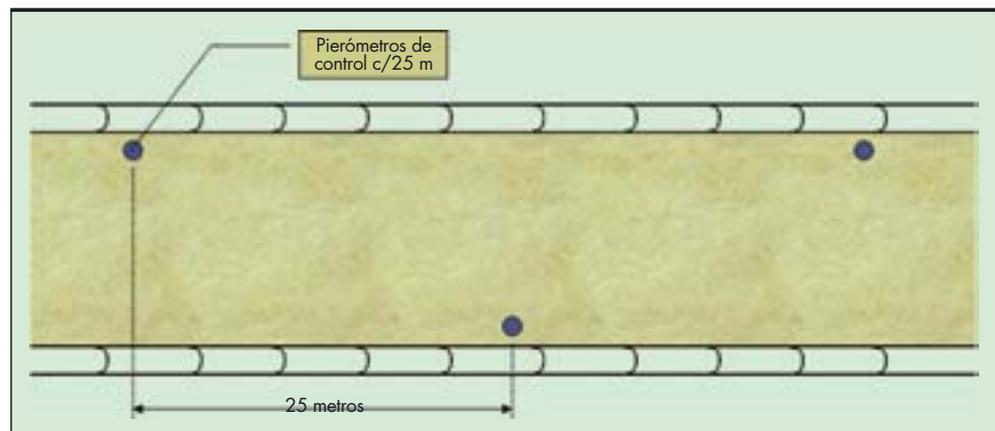


FIGURA 26.

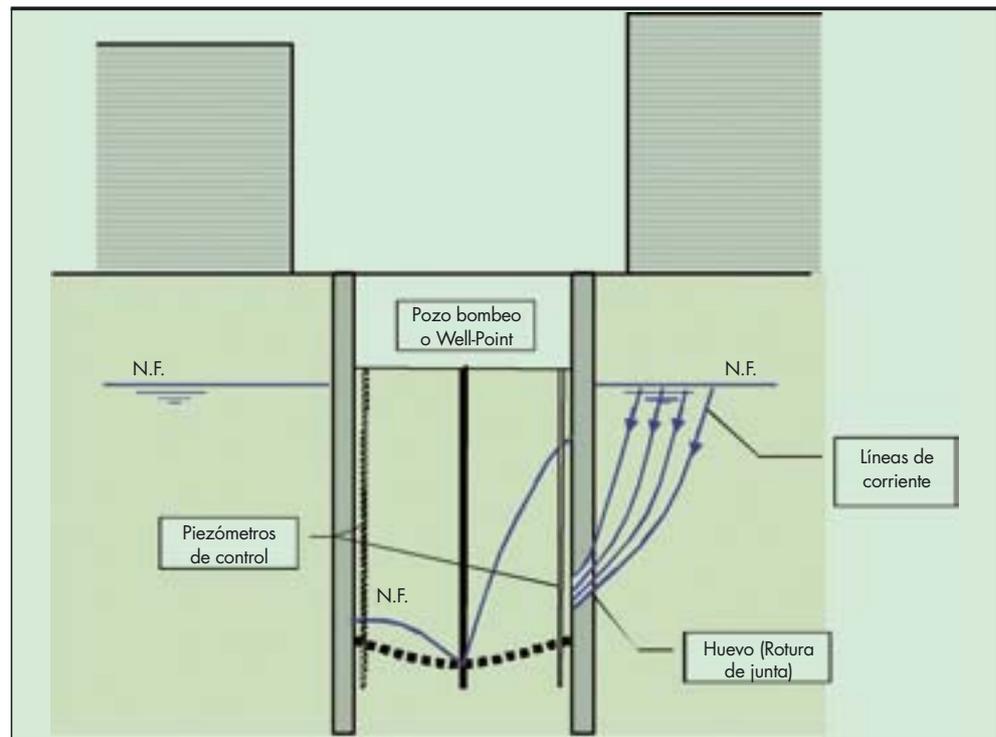


FIGURA 27.

Se observa como el piezómetro de la derecha registra un nivel de agua que se encuentra más próximo al nivel freático exterior que al rebajamiento del nivel de agua buscado con el bombeo interior, que sí se ha reflejado en el piezómetro de la izquierda.

Durante la obra no se detectó ninguna situación de este tipo y el rebajamiento del nivel freático hasta la cota de máxima excavación que se realizó al inicio se produjo sin incidencias. La recuperación del nivel de agua era muy pequeña, del orden de algún centímetro por semana, lo que indicaba que los recintos tenían una muy aceptable estanqueidad.

Estas medidas por sí mismas no garantizan el perfecto estado de las juntas, aunque constituyen un primer paso en la buena dirección. Durante la excavación entre pantallas pueden producirse problemas adicionales entre bataches. Para ello, durante la ejecución de las excavaciones se realizó sistemáticamente el limpiado de las juntas para detectar zonas de debilidad que pudiesen ser fuentes potenciales de problemas. Tampoco tras este limpiado se detectaron juntas defectuosas y únicamente se realizó alguna inyección puntual en alguna de ellas para limitar algún rezume de agua.

6.2. AGOTAMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO

Como se ha indicado, el nivel freático, en el entorno de la cota del nivel del mar, se sitúa bastante por encima de la cota de máxima excavación. Por tanto, resulta imprescindible su rebaje en la zona entre pantallas para la ejecución de las obras, creando recintos estancos.

Estos recintos se consiguen, además de con las propias pantallas y su empotramiento en el sustrato impermeable, mediante la ejecución de pantallas transversales de mortero que subdividan la obra en zonas independientes desde el punto de vista hidráulico. Así, la obra se ha subdividido en 5 recintos estancos.

Para definir los sistemas de agotamiento del freático entre pantallas se realizó una prueba de bombeo en uno de los recintos de la obra. Posteriormente, con los resultados obtenidos, se

realizó un modelo numérico² que permitiese obtener los parámetros hidrogeológicos y diseñar el sistema de agotamiento.

Las características de la prueba de bombeo fueron las siguientes:

- Recinto: N° 4, PK 0+630 a 0+720.
- Dimensiones: 94,4 m x 24,5 m.
- Pozos de bombeo: 2 pozos de 220 mm de diámetro y entubados en 140 mm.
- Cota inferior pozos: -19 msnm (en el interior del mioceno).
- Instrumentación: 16 piezómetros en el Cuaternario y 2 en el Mioceno.

Como se ha indicado, a partir de la prueba de bombeo se realizó un modelo numérico que permitió calibrar los parámetros. En la Figura 28 se muestra la malla empleada.

Los principales resultados obtenidos fueron los siguientes:

- La unidad de arenas cuaternarias se drena sin dificultad.
- Cuando el nivel de agua dentro de los pozos alcanza el Mioceno, los caudales disminuyen un orden de magnitud, de 5 l/s a 0,5 l/s por pozo.

Por tanto, a partir de estos resultados se diseñó un sistema de bombeo muy sencillo que consistía en un único pozo de bombeo por recinto. El agotamiento de los materiales cuaternarios se realizaba en aproximadamente unos cinco o seis días. En los materiales terciarios no era necesario rebajar el nivel, ya que su reducida porosidad y baja permeabilidad hacían que la afluencia de agua a la excavación fuese despreciable.

² Informe de resultats de la calibració dels paràmetres hidrogeològics del terreny corresponents al recinte d'excavació núm. 04 de les obres del perllongament de la L2 entre Pep Ventura i Badalona Centre, utilitzant un model 3D de flux subterrani i a partir de les corbes de descens obtingudes amb la prova de bombament realitzada entre els dies 10 d'abril al 8 de maig del 2008. Geocat. Junio de 2008.

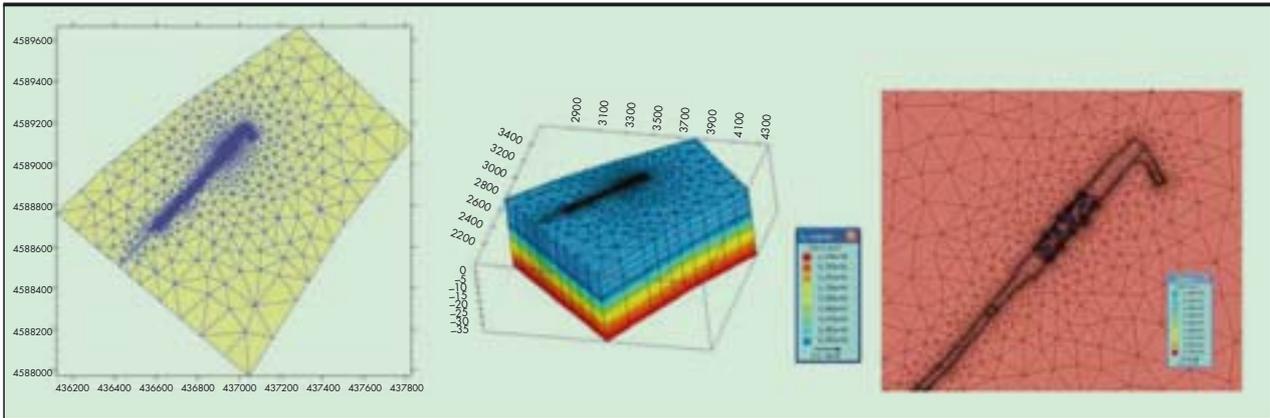


FIGURA 28.

6.3. BY-PASS DEL ACUÍFERO

6.3.1. Introducción

Uno de los aspectos más significativos de esta obra es que las pantallas se sitúan perpendicularmente a las líneas de flujo, que van de montaña a mar. En la Figura 29 puede apreciarse la situación de la obra en relación a estos dos elementos geográficos.

Como hemos visto, las pantallas están diseñadas para empotrarse en el sustrato terciario por lo que, si no se adoptaran medidas correctoras, podrían provocar un efecto barrera al flujo de agua y su consecuente embalsamiento aguas arriba.

Este embalsamiento, además de provocar desequilibrios de empujes en las pantallas del túnel, podría también afectar a otras estructuras enterradas próximas (parkings, sótanos, etc.).

Para evaluar este efecto barrera, se realizó un estudio hidrogeológico en Proyecto³. A partir de él se estimó que, si no se llevara a cabo ninguna actuación para minimizar el efecto barrera, esto comportaría una sobre elevación del nivel freático aguas arriba de hasta +1,20 m en el punto medio de la traza.

6.3.2. Solución de Proyecto

La solución del proyecto constructivo consistía en la apertura en las pantallas de unas ventanas de 2 x 2 metros cada 5,20 metros en un tramo central de 170 ml entre los PPKK 0+390 y 0+560. Estas ventanas se rellenaban de material filtrante.

3 Estudi de modelització tridimensional de flux d'aigua per predir el comportament hidràulic dels by-passos o finestres al flux en les pantalles i avaluar el possible efecte barrera de les estructures complementari al projecte constructiu del Perllongament de la Línia 2 de l'FMB en el tram comprès entre Pep Ventura i Badalona Centre (Clau: TM-99456.1). RSE, Febrero de 2006.



FIGURA 29.

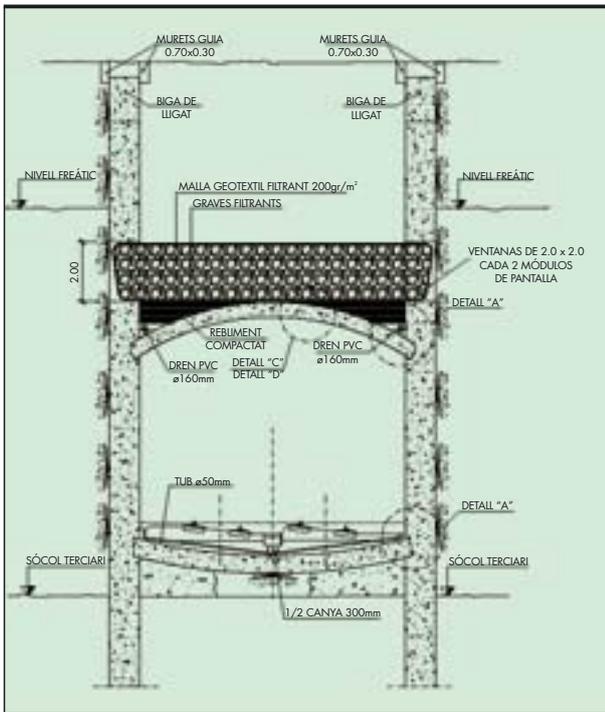


FIGURA 30.

Este material se situaba sobre la bóveda impermeabilizada. La capa filtrante se constituiría a base de gravas, arenas y un geotextil. El esquema de la solución propuesta en Proyecto se muestra en la Figura 30.

6.3.3. Propuesta alternativa

La solución de Proyecto, aunque eficaz desde el punto de vista hidráulico, presentaba importantes dificultades de ejecución. Entre ellas, y fundamentalmente, la ejecución de las ventanas de 2x2 m bajo el nivel freático y en materiales arenosos no estaba resuelta.

Como alternativa, durante la obra se propuso sustituir el sistema de ventanas por un sistema de drenes, aprovechando la existencia de losas intermedias. El esquema de la solución se muestra en la Figura 31.

Básicamente la solución consiste en la instalación de un sistema de drenes, de espaciamiento y longitud variables, que permitan la captación de agua y su trasvase al lado opuesto de las pantallas. Este sistema, basado en la ejecución de perforaciones de diámetro muy reducido, permite su ejecución bajo el nivel de agua.

Para el dimensionamiento de la solución alternativa se realizó un nuevo estudio⁴ que verificó que esta solución de dre-

4 Estudi del comportament hidrogeològic de l'alternativa de bypass del flux subterrani a través de les pantalles mitjançant drenes horitzontals interconnectats i estudi comparatiu amb l'alternativa de projecte mitjançant finestres. RSE. Mayo de 2006.

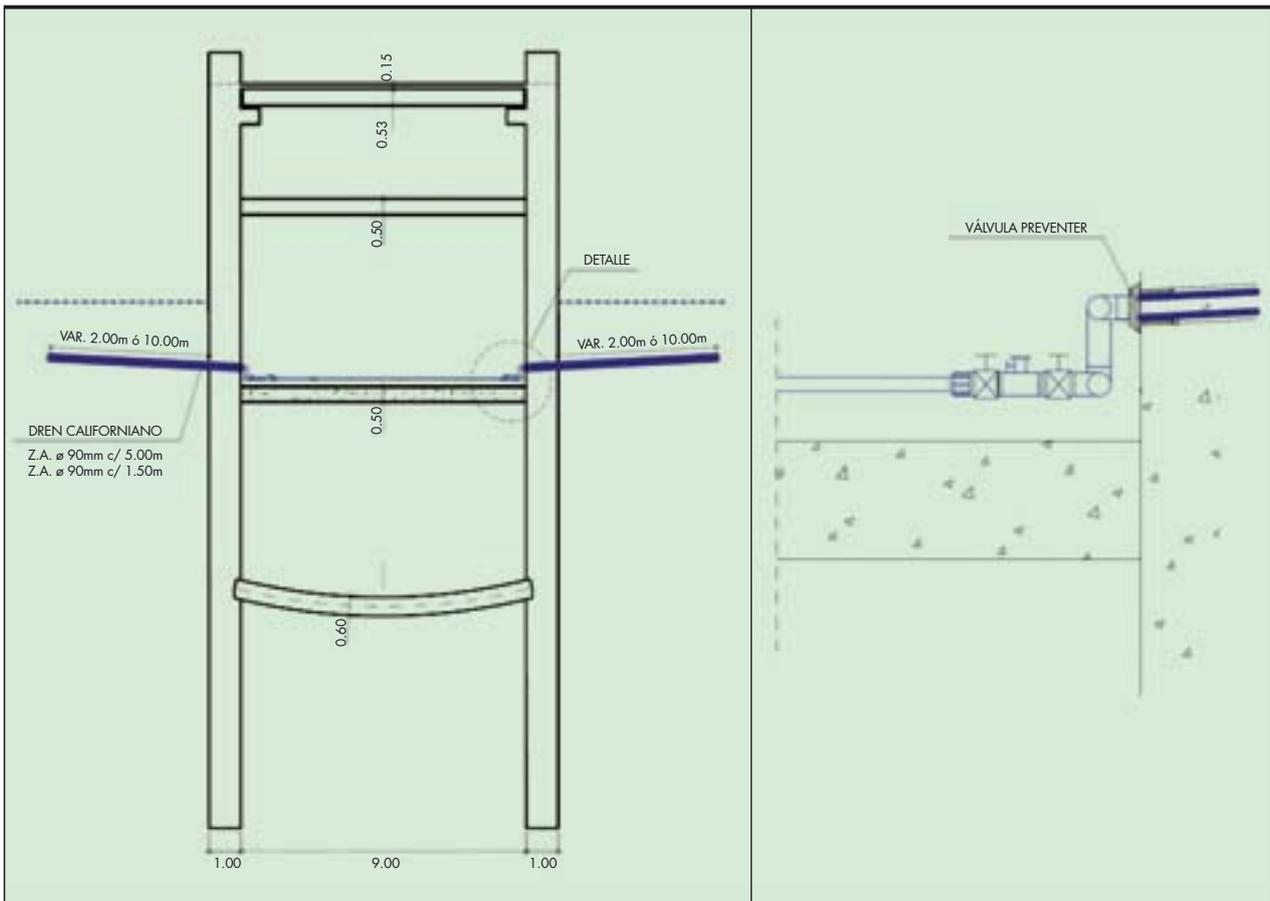


FIGURA 31.



FIGURA 32.

nes californianos presentaba un comportamiento hidrogeológico equivalente a la solución de proyecto.

La longitud de los drenes dispuestos ha sido de 2 o de 10 m, en función de la distancia a las edificaciones. El espaciamiento entre drenes es de 1,5 o de 5 m, respectivamente. La longitud total de actuación con drenes californianos es de 215 metros, entre los PPKK 0+345 y 0+560, siendo el número de drenes a perforar de 96 unidades y la longitud total de drenes a perforar de 336 ml.

El proceso constructivo de este sistema de drenes comienza con la perforación de la pantalla, que se realiza mediante corona de diamante de 150 mm de diámetro y con válvula antirreflujo tipo Preventer para evitar la entrada de agua y material a la perforación.

Tras la perforación de la pantalla, se realiza la excavación del dren en el terreno del trasdós. Para efectuar la perforación se usó una puntaza y una tubería de revestimiento metálica perforada, ambas perdidas. La tubería de revestimiento llevaba incorporada en sus agujeros un compuesto hidrosoluble que desaparecía a las 24-48 horas. De este modo, en ese plazo de tiempo el interior de la perforación permanecía en seco, lo que permitía realizar el resto de operaciones.

Así, se introducía en el interior de la tubería metálica el dren compuesto por un tubo ranurado de PVC de 90 milímetros de diámetro, envuelto con un filtro geotextil.

Una vez ejecutados los drenes y sellada la boca de perforación, se procedió a la conexión de los del lado montaña con los del lado mar, de forma que se conecten los niveles piezométricos y se inicie el flujo. El sistema de cañerías es de polietileno

DN 90 termosoldables. Este material permite asegurar la durabilidad de la instalación.

Como ventaja adicional, esta solución de drenes californianos permite el mantenimiento del sistema garantizando la funcionalidad de la instalación a lo largo de su vida útil, ya que incorpora un sistema de válvulas para limpiar los drenes en caso de posibles colmataciones y también porque dispone de acceso a la red de cañerías que interconectan los drenes de ambos lados de la traza.

En la Figura 32 se muestra la conexión entre ambos lados de las pantallas.

El sistema se encuentra ya en funcionamiento y, hasta el momento, no se han constatado en los piezómetros de control instalados diferencias del nivel de agua entre ambos lados de las pantallas.

7. AUSCULTACIÓN Y CONTROL

7.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más importantes de la obra es el control de movimientos de las edificaciones que, como se ha indicado, estaban muy próximas a las pantallas, a distancias de tan solo 2 m.

Las edificaciones existentes, además, son en una gran parte antiguas (muchas de ellas de más de 100 años, como se puede apreciar en la Figura 33), con cimentaciones muy someras y poco desarrolladas, siendo, por tanto, muy sensibles a los movimientos.



FIGURA 33.

7.2. DISPOSITIVOS DE AUSCULTACIÓN Y CONTROL

Se han instalado dispositivos de auscultación tanto en el terreno como en las estructuras anexas. La instrumentación instalada ha sido la siguiente:

- **Inclinómetros:** se han instalado tuberías inclinométricas dentro de las pantallas y, también en algún caso, a través del terreno del trasdós de la pantalla, para controlar los desplazamientos horizontales que se producen en las pantallas y su entorno próximo.
- **Hitos de control topográfico de edificios:** los puntos de control han sido prismas topográficos colocados en las fachadas de cada uno de los edificios próximos a la traza de la obra y donde se midieron periódicamente desplazamientos verticales y horizontales.
- **Hitos de control de instrumentación:** situados al lado de la boca de las perforaciones inclinométricas y extensométricas con el fin de obtener sus movimientos en cabeza.
- **Clavos de nivelación:** situados en la planta baja de los edificios próximos a las obras con el fin de medir posibles movimientos verticales de los mismos.
- **Distanciómetros:** situados en las plantas inferiores de los edificios con el fin de medir variaciones de las distancias entre fachadas opuestas.
- **Extensómetros incrementales:** se han instalado únicamente en alguna sección específica para medir los movimientos verticales relativos del terreno en profundidad y controlar, de forma más precisa, posibles asentamientos próximos a edificaciones.
- **Piezómetros.** Se han instalado piezómetros abiertos en el trasdós de las pantallas con el fin de controlar la

variación del nivel freático en la zona próxima a las edificaciones durante las excavaciones.

- **Extensómetros de cuerda vibrante.** Estos dispositivos se han colocado en las pantallas para controlar el nivel de tensiones y así realizar un contraste frente a las hipótesis de diseño.

En la Figura 34 se muestra la auscultación instalada entre los PPKK 0+200 y 0+310.

7.3. RESULTADOS DE LA AUSCULTACIÓN

Como resumen puede anticiparse que los resultados de la auscultación instalada han proporcionado movimientos muy reducidos, en general inferiores a los calculados. Consecuentemente con ello, no se han producido afecciones al entorno.

Como la presentación de todos los resultados de la auscultación excedería el objeto y las posibilidades de esta ponencia, se van a resumir los resultados obtenidos en las tres secciones que se investigaron con el programa PLAXIS presentando los resultados de los inclinómetros.

Las tres secciones analizadas eran las mostradas en la Figura 35.

En general, se observa que los movimientos realmente producidos son inferiores a los calculados. Esta pauta se repite con el resto de la auscultación instalada (prismas, niveles, extensómetros, etc.), que han registrado movimientos muy limitados.

8. ARQUEOLOGÍA

Bajo el casco antiguo de la actual Badalona se encuentra la ciudad romana de Baétulo. La ciudad fue fundada «ex novo» hacia el año 100 a.C. con pervivencia documentada hasta el siglo VI d.C. y con continuidad ininterrumpida hasta la actualidad.

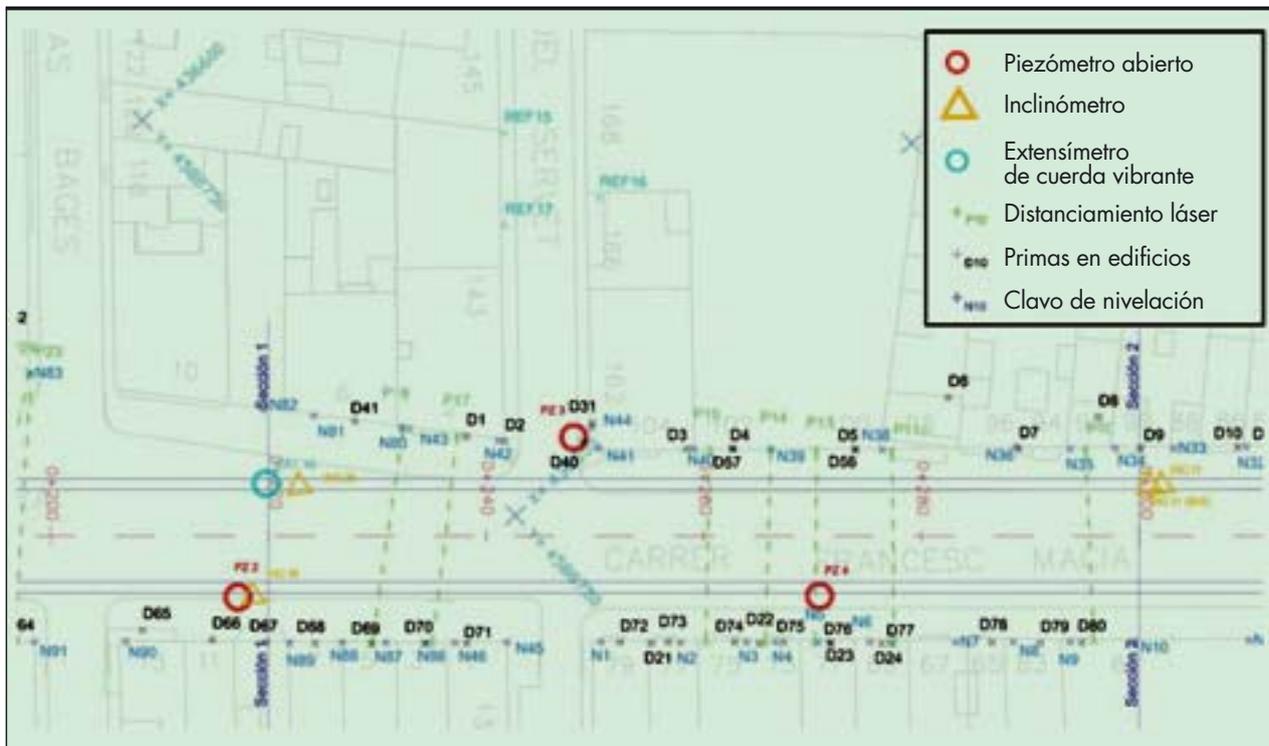


FIGURA 34.

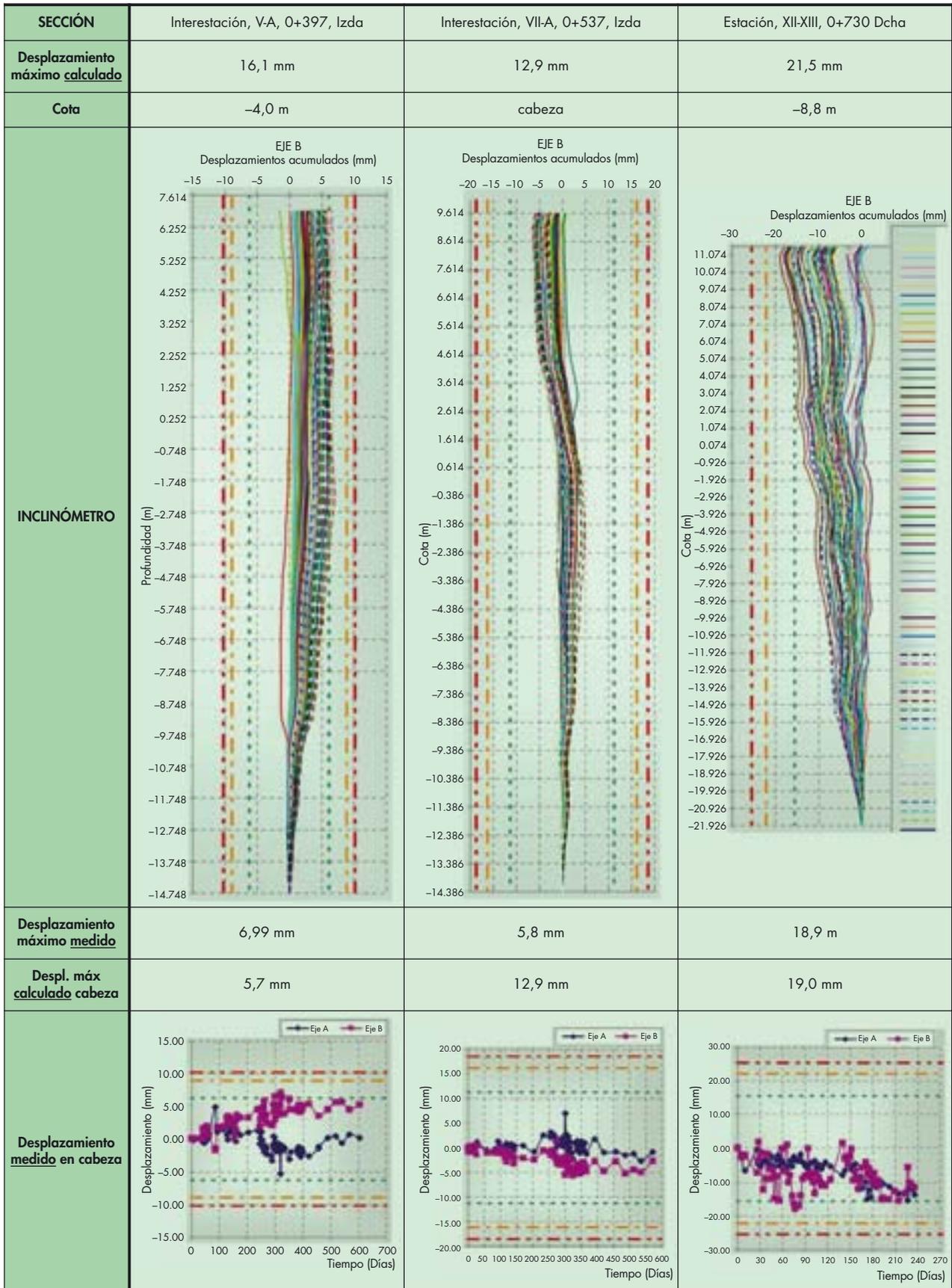


FIGURA 35.



FIGURA 36.

Estaba emplazada en una pequeña elevación entre dos torrentes, el de Folc y el de Matamoros, cercana al mar y con comunicaciones abiertas y buenas posibilidades agrícolas en las cercanías.

La ciudad fundacional tenía una extensión de 10 hectáreas y estaba rodeada de una muralla que alternaba las torres de defensa cuadradas y semicirculares. Su distribución urbanística seguía un plano ortogonal, orientado de noroeste a sureste, con los ejes transversales paralelos a la costa y adaptándose a la topografía del terreno por medio de un sistema de bancales que permitía salvar las pendientes de la colina donde se asentaba la ciudad. El interior estaba distribuido en insulae o islas de casas, con calles de cinco metros de ancho.

Los terrenos afectados por nuestra obra quedan fuera de su trama urbanística, concretamente al sudoeste de la ciudad.

La intervención que se está llevando a cabo en los terrenos destinados para la futura estación de metro de la Línea 2 del FMB, ha permitido localizar un yacimiento arqueológico de unos 5000 m² de extensión. En la Figura 36 pueden apreciarse los trabajos de excavación arqueológica llevados a cabo.

A grandes rasgos, la mayoría de estructuras excavadas han correspondido a las infraestructuras (muros, hornos, balsas de decantación de arcilla, alineaciones de ánforas, edificios...) de un gran centro cerámico que podría haber estado en funcionamiento, como mínimo en dos fases, entre el último

tercio del siglo I a.C. y hasta el último cuarto del siglo I d.C. Aquí se producirían ánforas para el transporte y comercialización del vino producido en la Layetana en este periodo.

Algunas fotografías de los restos encontrados se muestran en la Figura 37.

Se han identificado 4 fases de ocupación en el yacimiento. (Figura 38).

Las excavaciones arqueológicas mantuvieron trabajando hasta a 70 arqueólogos y supusieron la paralización de las obras de la estación de Badalona durante aproximadamente un año.

9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- El tramo correspondiente a la ampliación de la Línea 2 de Metro de Barcelona entre las estaciones de Pep Ventura y Badalona Centro se ejecuta bajo superficie, excavado al abrigo de pantallas continuas construidas con pantalladoras convencionales e hidrofresa.
- La excavación se realiza mayoritariamente en arenas del cuaternario reciente de origen coluvio-fluvial y litoral. Las pantallas de hormigón se empotran siempre en el sustrato mioceno impermeable. El nivel de agua se encuentra muy somero, aproximadamente a cota del nivel del mar.



FIGURA 37.

PERÍODO	ANTIGÜEDAD	ELEMENTOS	FOTOGRAFÍAS
Tardo-republicano	S. I. a.C.	<ul style="list-style-type: none"> Estratos y estructuras de forma discontinua y niveles de circulación. 	
Tardo republicano/ alto imperial	Último tercio S. I a.C.	<ul style="list-style-type: none"> Gran centro alfarero. Entre otros elementos, se han encontrado 6 hornos rectangulares. 	
Alto imperial	Mediados S. I d.C.	<ul style="list-style-type: none"> Estructuras diversas, una vez ha dejado de funcionar el centro alfarero. Entre otros un pozo, depósitos... Espacio de 10 x 20 m dedicado a necrópolis. 	
Alto imperial	S. II d.C.	<ul style="list-style-type: none"> Arrasamiento general de parte de las estructuras descritas y colmatación de todo el solar. 	

FIGURA 38.

- Las pantallas alcanzan longitudes máximas de 34 m, profundidades de excavación de hasta 27 m y cargas de agua máximas de 15 m. El tramo discurre en un entorno fuertemente urbanizado, con edificaciones a menos de 2 m de distancia de las pantallas.
- Las principales dificultades de la obra están constituidas por la proximidad de estas edificaciones y por la presencia de un nivel freático elevado. Para controlar los riesgos que generan estas circunstancias, se ha seguido un doble camino, control de juntas y control de movimientos en el entorno.
- El control de las juntas se ha realizado mediante el seguimiento con piezómetros del rebaje del nivel freático entre pantallas. De este modo, la posible entrada de agua a través de las juntas supondría una elevación del nivel de agua en los recintos que sería detectada. Durante la excavación, además, se ha realizado sistemáticamente y de modo manual la limpieza de las juntas, con el fin de detectar posibles daños y, eventualmente, proceder a su reparación.
- El control de los movimientos en el entorno se ha realizado mediante la intensa auscultación instalada, comprobándose que los movimientos que se estaban produciendo eran admisibles y en línea con lo previsto.

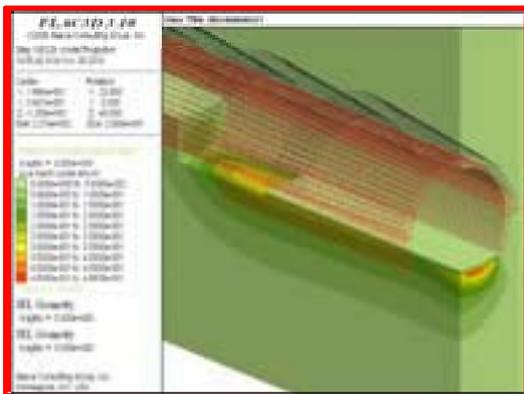
- La corrección del efecto presa que generan las pantallas en el flujo hidrogeológico transversal montaña – mar, se ha realizado mediante un sistema de drenes californianos que permiten simplificar mucho la comunicación entre ambos lados del acuífero respecto a otro tipo de sistemas que implicarían excavaciones bajo el nivel freático.
- En resumen, aunque de modo aislado ninguno de los elementos de esta obra es excepcional, la coexistencia de un nivel freático elevado, presencia de materiales cuaternarios recientes, existencia de edificaciones muy próximas y pantallas de longitud muy apreciable, suponen un reto importante que, gracias al buen hacer de todas las partes implicadas, se ha resuelto con éxito.

10. AGRADECIMIENTOS

Nuestro principal reconocimiento va dirigido a los verdaderos protagonistas de la obra, aquellos que la construyeron. Como sería imposible nombrar a todos los que participaron, citaremos únicamente a Ángel Martín-Aragón, el responsable del equipo gracias al cual se ha podido realizar con éxito esta compleja obra. También queremos reconocer la labor de Amadeu Abril i Catalá, Director de Obra. Por último, debemos agradecer el trabajo, la ayuda y los consejos de nuestros compañeros de la Oficina Técnica.

INGENIERÍA DEL TERRENO

- Cartografías y perfiles geológicos.
- Campañas de investigación geotécnica.
- Hidrogeología.
- Estudios de procedencia de los materiales.
- Análisis geotécnico de desmontes y rellenos.
- Estudios de tratamiento del terreno.
- Estudios de estabilización de laderas



- Geotecnia de cimentación de estructuras.
- Geotecnia de obras hidráulicas.
- Proyectos de túneles viarios e hidráulicos
- Cavernas de centrales eléctricas.
- Geotecnia marina.
- Asesoría geotécnica a obras.

Profesionales especializados, en perfecta coordinación

