

High Speed 2 entre Londres y Birmingham. Túneles de Londres. Pozos de intervención y ventilación (y lanzamiento y extracción de las tuneladoras)

High Speed 2 between London and Birmingham. London Tunnels. Intervention and ventilation shafts (and tunnel boring machines launch and extraction)

Luis LOMBERA FERNÁNDEZ^a, Marcos DE LA IGLESIA RECIO^b, José María LORENZO ROMERO^c, Ramón CAMPOAMOR GÓMEZ^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPSA. Responsable de proyectos de estructuras. llombera@typsa.es

^b Chartered Structural Engineer CEng MStrucE. TYPSA. Responsable de proyectos de estructuras. mdelaiglesia@typsa.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPSA. Director adjunto del departamento de estructuras. jmlorenzo@typsa.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPSA. Jefe de sección del departamento de estructuras. rcampoamor@typsa.es

RESUMEN

Desde 2016, la “Design House”, formada por TYPSA, ARUP y STRABAG, está involucrada en el diseño de la nueva línea ferroviaria de alta velocidad conocida como High Speed 2 entre Londres y Birmingham. En particular, en los dos lotes sur, que discurren entre la estación de Euston (situada en el centro de Londres) y el noroeste de Londres y que consisten, fundamentalmente, en obra subterránea. Esta comunicación se centra en los pozos de intervención y ventilación asociados a dicha obra subterránea.

ABSTRACT

Since 2016, the Design House, TYPSA together with ARUP and STRABAG, has been involved in the design of the new high speed rail line between London and Birmingham known as High Speed 2. Specifically, in the southern lots, running from Euston station (central London) to northwest London and mainly involving underground works. This communication focuses on the intervention and ventilation shafts associated to these underground works.

PALABRAS CLAVE: pozo circular, interacción suelo-estructura, London Clay, proceso constructivo

KEYWORDS: circular shaft, soil-structure interaction, London Clay, construction process

1. Introducción

Los lotes sur de la alta velocidad ferroviaria entre Londres y Birmingham consisten, principalmente, en obra subterránea en torno a los nuevos túneles de Euston y Northolt, cuyo trazado discurre paralelo a líneas de ferrocarril existentes. El túnel de Euston, de 7200 m de longitud y 7.55 m de diámetro interior, discurre entre las estaciones de Euston y Old Oak Common, mientras el túnel de Northolt, de 13500 m de longitud y 8.80 m de diámetro

interior, arranca en la estación de Old Oak Common y termina en West Ruislip Portal. Ambos túneles bi-tubo están siendo excavados por seis tuneladoras. Dos de ellas excavarán el túnel de Euston desde la estación de Old Oak Common y serán extraídas en las aproximaciones a Euston. Las otras cuatro han sido lanzadas, por parejas, desde el pozo de Victoria Road y desde West Ruislip Portal y serán extraídas en el pozo de Greenpark Way.

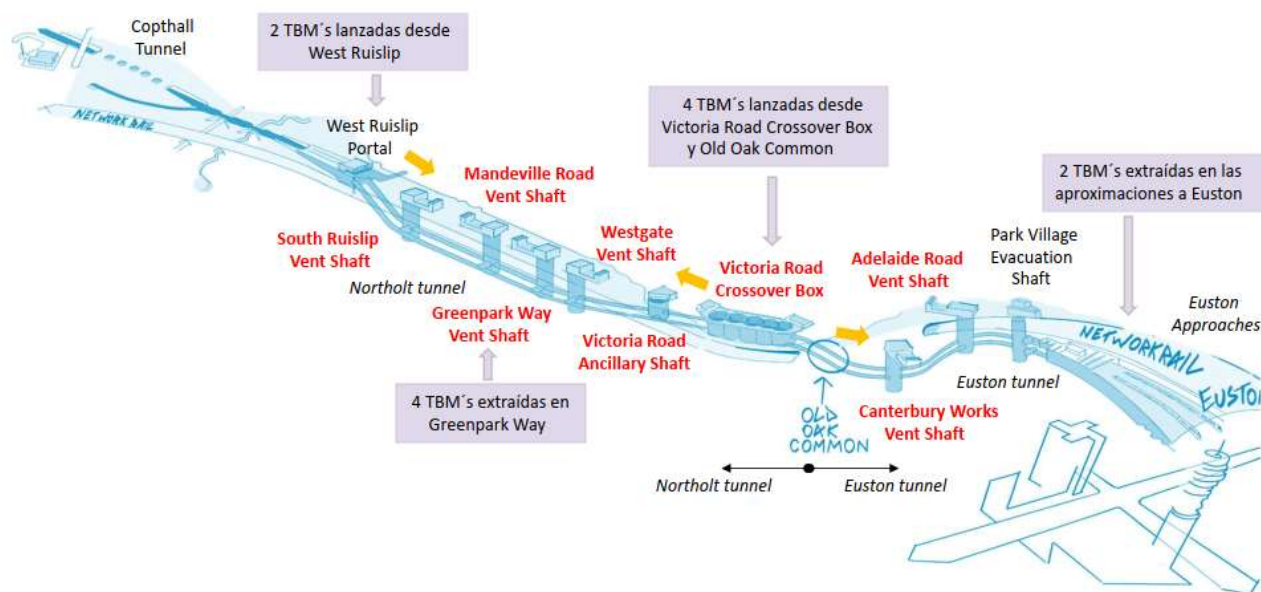


Figura 1. High Speed 2. Lotes S1 y S2. Túneles de Euston y Northolt. Pozos de intervención y ventilación (en rojo)

Para asegurar el correcto funcionamiento de los túneles y proporcionar seguridad en caso de incidencia, a lo largo del trazado se han dispuesto siete pozos de ventilación e intervención que son el objeto del presente artículo (figura 1). Dos de ellos (Adelaide Road y Canterbury Works) están localizados en el túnel de Euston y los cinco restantes (Victoria Road, Westgate, Greenpark Way, Mandeville Road y South Ruislip) en el túnel de Northolt. La tabla 2 incluye un resumen de las principales características de cada uno de estos pozos.

Finalmente, es importante señalar que, si bien la obra civil de estos pozos se completa con sus conexiones a los túneles (galerías de intervención y ventilación) y las estructuras interiores y los edificios de control de los pozos, dichos elementos no forman parte y quedan fuera del alcance de esta comunicación.

London Clay. Es el caso de los pozos de Adelaide Road, Canterbury Works, Victoria Road y Mandeville Road.

El London Clay es una arcilla, con baja permeabilidad, cohesiva y estable en el corto plazo. Aspectos que la convierten en un material ventajoso para la excavación y la ejecución del sostenimiento. Por el contrario, en el largo plazo carece de cohesión y presenta un ángulo de rozamiento interno reducido.

Tabla 1. London Clay. Parámetros geotécnicos de diseño

Densidad (kN/m ³)	Angulo de rozamiento interno ϕ' (°)	Cohesión c' (kPa)	Resistencia al corte no drenada c_u (kPa)
20	Largo plazo		Corto plazo
	25	0	$c_u = 50 + 5z$ ≤ 200 kPa

(*) siendo z la profundidad medida desde la superficie del terreno

2. Geología

Como tónica general, los pozos se encuentran completamente embebidos en el estrato de

Tabla 2. Resumen de las características principales de los pozos

Pozo	Adelaide Road	Canterbury Works	Victoria Road	Westgate	Greenpark Way	Mandeville Road	South Ruislip
Función	Ventilación e intervención	Ventilación e intervención	Ventilación, intervención y evacuación	Ventilación e intervención	Ventilación e intervención	Ventilación e intervención	Ventilación e intervención
Diámetro	15 m	15 m	25 m	15 m	Pozo principal – 20 m Pozo satélite - Variable entre 15 m y 18 m	Pozo principal – 20 m Pozo satélite - Variable entre 15 m y 18 m	Pozo principal – 20 m Pozo Satélite - 20 m
Profundidad	40 m	48 m	31 m	41 m	45 m	39 m	35 m
Geología	London Clay	London Clay	London Clay	River Terrace Aluvium London Clay	London Clay Harwich Formation Lambeth Group Chalk	London Clay	London Clay Harwich Formation Lambeth Group Chalk
Relación entre túnel y pozo	El túnel NO atraviesa el pozo	El túnel NO atraviesa el pozo	El túnel atraviesa el pozo	El túnel NO atraviesa el pozo	El túnel atraviesa el pozo	El túnel atraviesa el pozo	El túnel atraviesa el pozo
Vida útil	120 años						
Sostenimiento primario	Dovelas prefabricadas (“underpinning”)			Dovelas prefabricadas (“caisson sinking”) y hormigón proyectado	Dovelas prefabricadas (“underpinning”) y hormigón proyectado		Muro pantalla (hidrofresa)
Profundidad sostenimiento dovelas prefabricadas	11 m	18 m	11 m	11 m	Pozo principal: 16 m Pozo satélite: 8 m	Pozo principal: 16 m Pozo satélite: no aplica	No aplica
Profundidad sostenimiento hormigón proyectado	29 m	30 m	20 m	30 m	Pozo principal: 29 m Pozo satélite: 37 m	Pozo principal: 23 m Pozo satélite: no aplica	No aplica
Revestimiento secundario	Hormigón armado						
Losa de fondo	Semi bóveda de hormigón armado con tacón para movilización del terreno						Plana
Estrategia de estanqueidad para obtener de acuerdo con la British Tunnelling Society (BTS) Specification for Tunnelling [1]	Clase 3 Requerimiento de proyecto: una medida de impermeabilización o gestión del agua Zona de sostenimiento con dovelas prefabricadas: control de fisuración y juntas de estanqueidad entre dovelas Zona de revestimiento de hormigón armado: No aplica al haberse alcanzado siempre Clase 1 Clase 1 Requerimiento de proyecto: dos medidas de impermeabilización o gestión del agua Zona de sostenimiento con dovelas prefabricadas: control de fisuración y juntas de estanqueidad entre dovelas más cámara bufa Zona de revestimiento de hormigón armado: membrana impermeable compartimentalizada más control de fisuración en el revestimiento						

Estos aspectos, unidos a la sobreconsolidación que presenta debido a sus registros históricos de carga y descarga, resultan en el diseño de sostenimientos y revestimientos muy solicitados. Como ejemplo, en la figura 2, se muestra el coeficiente “inicial” de empuje al

reposo del terreno obtenido en uno de los pozos. En la imagen se muestra un análisis comparativo entre datos in situ obtenidos mediante presiómetros y predicciones teóricas (siendo la línea roja los valores propuestos para el diseño de sostenimiento y revestimiento).

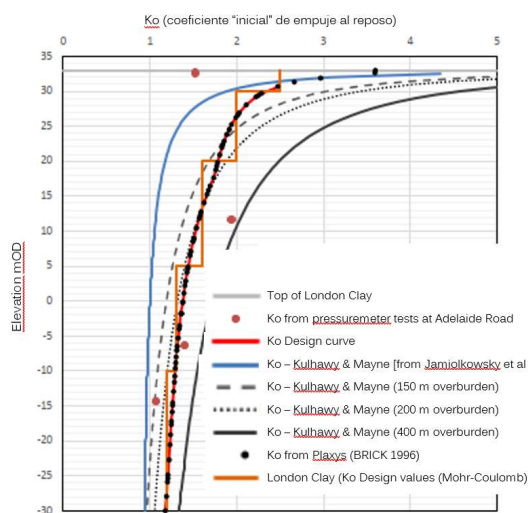


Figura 2. London Clay. Coeficiente “inicial” de empuje al reposo

Se puede observar que para las zonas superficiales se alcanzan coeficientes de empuje al reposo “iniciales” de entre dos y tres. Sin embargo, el terreno sufre una relajación al ser excavado para la ejecución del sostenimiento. Este efecto se ha capturado mediante análisis que contemplan la interacción suelo-estructura y el proceso constructivo, reduciendo ese coeficiente de empuje “inicial” a valores más realistas, que son los que efectivamente actúan sobre sostenimiento y revestimiento ejecutados.

En el caso de Westgate, la parte inferior del pozo discurre también por el estrato de London Clay, sin embargo, los 10 m superiores del pozo transcurren a través de rellenos y depósitos aluviales que, como se comentará más adelante, han influenciado el proceso constructivo.

Greenpark Way (figura 3) y South Ruislip discurren también, en su parte superior, a través del London Clay, aunque, a partir de una cierta profundidad, el estrato arcilloso de London Clay transiciona a arcillas arenosas y arenas arcillosas (Harwich Formation y Lambeth Group) con menor cohesión y mayor permeabilidad. Además, en su parte inferior, ambos pozos alcanzan el estrato calizo (Chalk) por el que discurre un acuífero. Mientras que en Greenpark Way se han podido mantener tipos de sostenimiento y procesos constructivos

similares a los pozos que se encuentran embebidos completamente en el London Clay —no sin dificultades debido a la presencia de agua y la mayor permeabilidad del terreno—, en South Ruislip se ha tenido que modificar el tipo de sostenimiento ante la imposibilidad de rebajar el nivel freático durante la construcción si no se ejecutaba con un recinto estanco.

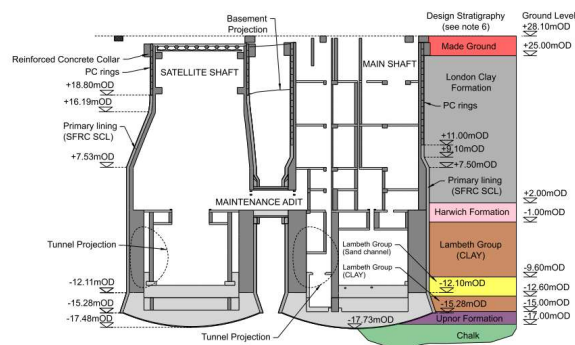


Figura 3. Greenpark Way. Sección del pozo extraída del modelo BIM con la estratificación del terreno incorporada

3. Geometría de los pozos

3.1. Forma

Durante el estudio de soluciones realizado en las fases iniciales del proyecto, diferentes alternativas fueron analizadas desde múltiples puntos de vista como: aspectos funcionales, integrar el edificio de control en la parte enterrada del pozo o disponerlo sobre rasante, minimizar la necesidad de arriostramientos provisionales durante la construcción, aspectos relacionados con el programa de construcción como independizar la ejecución del pozo de la de los túneles, aspectos relacionados con el lanzamiento, mantenimiento y extracción de las tuneladoras, etc.

Desde el punto de vista puramente estructural, es importante señalar que debido a la profundidad a la que discurren los túneles (hasta casi 50 m de profundidad), las características geológicas y geotécnicas del terreno, con una sobreconsolidación importante, y la presencia del nivel freático en superficie, las presiones que

reciben tanto el sostenimiento como el revestimiento son muy importantes. Si esto se une a la altura libre requerida entre potenciales elementos de arriostramiento, el diseño de los elementos estructurales de contención, trabajando fundamentalmente a flexión, presentaba dificultades tanto de diseño como constructivas.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el estudio de alternativas resultó en una selección extensiva de la forma circular que, además de maximizar la eficiencia estructural al trabajar por forma (convirtiendo las presiones radiales del terreno y del agua en esfuerzos de compresión en sostenimiento y revestimiento), eliminaba la necesidad de arriostramientos con las consiguientes ventajas constructivas.

3.2. Relación entre túnel y pozo durante la construcción. Pozo simple vs pozos gemelos. Diámetro

En lo que refiere a su relación con el túnel, se pueden distinguir dos tipos de pozo: aquellos que no son atravesados por el túnel y aquellos que sí lo son.

3.2.1. Pozos que no son atravesados por el túnel

En general, donde ha sido posible, se ha optado por desligar túnel y pozo. Es el caso de Adelaide Road, Canterbury Works y Westgate. Es importante señalar que los túneles en estas zonas discurren íntegramente en el estrato de London Clay (no siendo esperable en este estrato la necesidad de mantenimiento de las tuneladoras) y que ninguno de los tres pozos tiene requerimientos logísticos del túnel durante la construcción. Son, por tanto, pozos que dan servicio al túnel únicamente durante la fase de operación de la línea de alta velocidad.

Por ello, en estos pozos, con el fin de evitar el interfaz túnel-pozo, los tubos del túnel han separado su trazado ligeramente para luego volver a unirse, dejando espacio suficiente para insertar el pozo entre ambos tubos (figura 4). Para que esto fuera viable, el diámetro del pozo

debía ser el menor posible, presentando los tres pozos, en este caso, un diámetro interior de 15 m. Desde el punto de vista estructural, además de haberse eliminado aberturas importantes en los elementos resistentes, se han optimizado indirectamente sostenimiento y revestimiento al reducirse el diámetro del pozo por ser los esfuerzos solicitantes proporcionales al mismo.

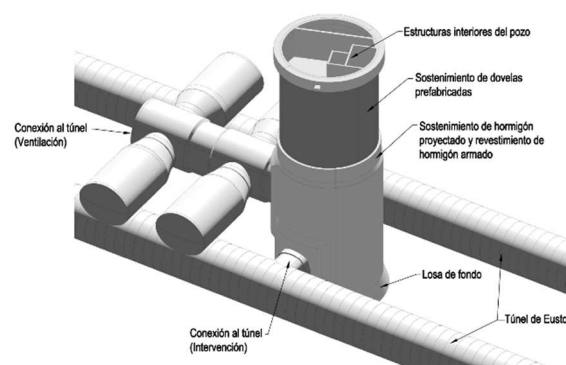


Figura 4. Canterbury Works. Vista 3D del modelo BIM

3.2.2. Pozos atravesados por el túnel

En los pozos restantes, bien sea por motivos técnicos o constructivos, el diseño ha optado por que el túnel atravesase los pozos.

En el caso de Victoria Road el motivo principal es el lanzamiento de una de las tuneladoras del túnel de Northolt desde su interior. En Greenpark Way se produce la extracción de las cuatro tuneladoras que construyen el túnel de Northolt. Finalmente, en Mandeville Road y South Ruislip se debe a que, al transcurrir el túnel de Northolt parcialmente en el estrato de roca caliza, se ha optado por disponer puntos de mantenimiento de las tuneladoras en ambos.

Dado que un único pozo circular que envolviera los dos tubos resultaba ineficiente y habría generado un gran impacto en el entorno inmediato, tres de estos cuatro pozos están formados por dos pozos gemelos cada uno, principal y satélite, cubriendo uno de los tubos del túnel el pozo principal y el otro tubo el pozo satélite. De manera simplificada, y tomando Greenpark Way como representativo (figuras 5 y

6), el pozo principal presenta un diámetro interior de 20 m, mientras que el satélite presenta un diámetro interior entre 15 m (en su parte superior) y 18 m (en su parte inferior) que es el mínimo requerido para el paso de las tuneladoras. En la parte intermedia, un acampanamiento permite la transición entre esos dos diámetros. El motivo de este acampanamiento es minimizar o evitar los impactos a la anteriormente mencionada línea de ferrocarril existente que discurre prácticamente en la vertical de uno de los tubos del túnel de Northolt.

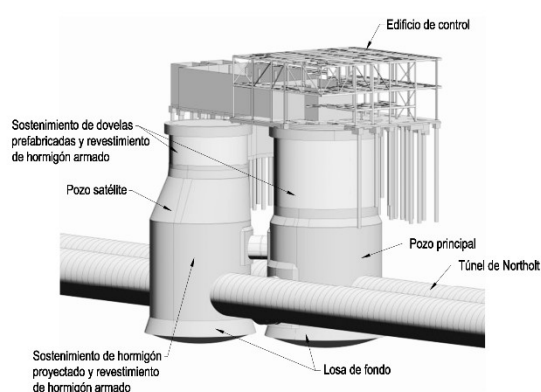


Figura 5. Greenpark Way. Vista 3D del modelo BIM



Figura 6. Greenpark Way. Pozos principal y satélite

4. Sostenimiento y revestimiento

Tres tipos de sostenimiento (dovelas prefabricadas, hormigón proyectado y pantallas de bataches) y un único tipo de revestimiento (hormigón armado) han sido utilizados en los pozos.

4.1. Dovelas prefabricadas

Las dovelas prefabricadas han sido utilizadas en la parte superior de los pozos y se han mantenido en todos los casos por encima de las aberturas de conexión a los túneles.

Si bien las dovelas prefabricadas han sido utilizadas como sostenimiento en los pozos de Greenpark Way y Mandeville Road, donde las condiciones de contorno estructurales y de estanqueidad lo han permitido, también se han utilizado como elemento de contención permanente sin necesidad de revestimiento adicional. Es el caso de los pozos de Adelaide Road, Canterbury Works, Victoria Road (figura 7) y Westgate.



Figura 7. Victoria Road Ancillary Shaft durante su construcción

Las dovelas prefabricadas utilizadas son, en lo que a la geometría se refiere, elementos estándar con dimensiones fijas en función del diámetro del pozo y del fabricante. La calidad del hormigón utilizado en las dovelas prefabricadas es C45/55, siendo los espesores 0.35 m (para pozos de 15 m de diámetro) y 0.45 m (para pozos de 20 m y 25 m de diámetro). Se han diseñado dovelas reforzadas con fibras de acero y, donde el uso de fibras no ha sido posible, se han diseñado dovelas armadas.

Es importante señalar que el comportamiento general de los anillos de dovelas no habría requerido dotar de armadura a las dovelas. Sin embargo, la discontinuidad de los anillos en las juntas radiales, la existencia de elementos de contención con desniveles importantes situados al lado de los pozos y la

disposición de sobrecargas superficiales asimétricas han hecho necesario introducir armadura en las juntas en algunas dovelas. Con el fin de minimizar estos casos, se han realizado modelos de elementos finitos de las juntas que tienen en cuenta la no linealidad y la tenacidad del hormigón reforzado con fibras de acero, resultando necesario incluir armadura únicamente en Adelaide Road y Victoria Road.

El método constructivo para las dovelas prefabricadas ha sido, en general, el “underpinning” (figura 8): a cada excavación de 1 m de profundidad le sucede la colocación de un anillo completo de dovelas prefabricadas y el relleno del trasdós de las mismas con grout asegurando el contacto entre el terreno y la dovela, para posteriormente repetir excavación, colocación de dovelas y grouting sucesivamente.



Figura 8. Canterbury Works. Ejecución de las dovelas prefabricadas. “Underpinning”

Únicamente en Westgate (figuras 9 y 10), debido a la existencia de un nivel freático alto junto a una potente capa de rellenos y terreno aluvial superficial, el “underpinning” ha sido reemplazado por la hincada de anillos completos de dovelas (“caisson sinking”) tanto para asegurar la estabilidad del terreno, como para controlar los flujos de agua.



Figuras 9 y 10. Westgate. Ejecución de las dovelas prefabricadas. “Caisson sinking”

4.2. Hormigón proyectado

Por debajo de las dovelas prefabricadas, y hasta el fondo de excavación (ver tabla 2 para más información), se ha utilizado el hormigón proyectado con fibras, con un espesor entre 450 mm y 500 mm, como sostenimiento. Además, en el caso de los pozos con aberturas limitadas en número y tamaño, el hormigón proyectado ha formado parte del sistema estructural resistente permanente en el largo plazo compartiendo carga con el revestimiento (“load share”). Para ello, como consecuencia del proceso constructivo (las excavaciones de las conexiones a los túneles se han realizado con anterioridad a la ejecución del revestimiento) y al no estar conectados estructuralmente revestimiento y sostenimiento, ha sido necesario disponer recrecidos locales de hormigón armado en el sostenimiento alrededor de las aperturas de conexión (figura 11).

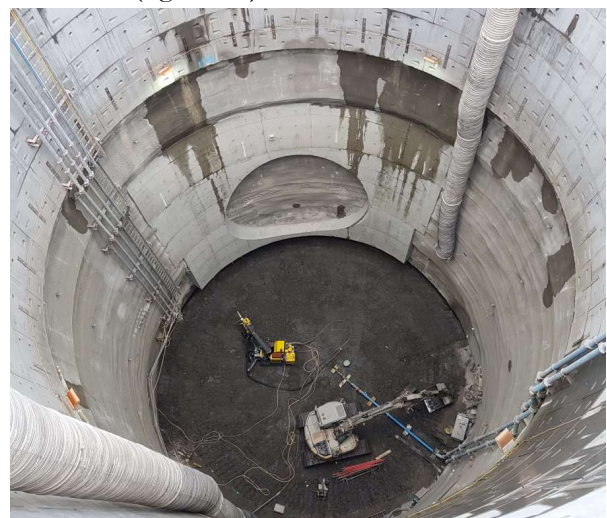


Figura 11. Sostenimiento de hormigón proyectado y recrecio de hormigón armado en la conexión de ventilación con el túnel

4.3. Muros pantalla

El uso de muros pantalla se ha limitado al pozo de South Ruislip debido a los condicionantes hidrogeológicos del mismo. Al encontrarse el nivel freático casi en superficie, unido a la presencia de un acuífero discurriendo por el estrato calizo en el que está situada la parte inferior del pozo, ha sido necesario disponer una barrera impermeable mediante muros pantalla provistos de juntas de estanqueidad para controlar el nivel de agua en el interior del pozo durante la construcción. Las pantallas, de 45 m de profundidad, 1.20 m de espesor y hormigón C50/60, se han ejecutado con hidrofresa para garantizar el cumplimiento de las tolerancias de verticalidad (1/350) que aseguren el contacto mínimo necesario entre bataches para transferir los esfuerzos de compresión circunferenciales.

4.4. Revestimiento de hormigón armado

El revestimiento se ha diseñado, en todos los casos, con hormigón armado C40/50 y espesor constante (variable en profundidad en función de los requerimientos de diseño) con recrecidos locales en torno a los huecos que conectan los pozos con los túneles (figura 12).

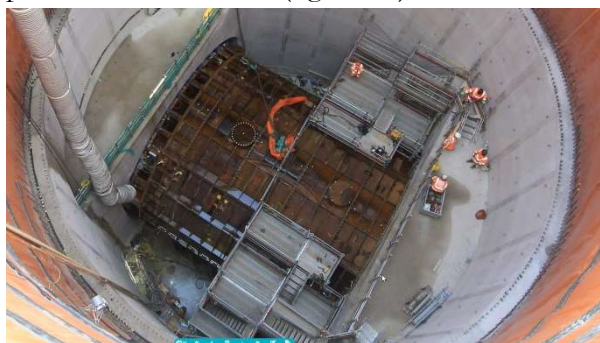


Figura 12. Greenpark Way durante su construcción.

Como se ha comentado anteriormente, una presión radial sobre una forma circular genera esfuerzos circunferenciales de compresión. Sin embargo, las numerosas aberturas requeridas en sostenimiento y revestimiento distorsionan esos esfuerzos de compresión por una doble vía: por un lado, se producen desvíos de esas compresiones por

encima y debajo de los huecos que generan concentraciones de tensiones en esas zonas y, por otro, aparecen flexiones importantes en las zonas adyacentes a dichas aberturas al reducirse la rigidez del tubo con las mencionadas aberturas. Simplificadamente, se pasa de un trabajo frente a esfuerzo axial de compresión (prácticamente) puro a una combinación de axil (de tracción o compresión según la zona) y flexión.

Estas distorsiones resultan en la necesidad de incrementar espesores localmente en torno a las aberturas de conexión con los túneles: para dotar de mayor capacidad de compresión por encima y por debajo de la abertura y para incrementar el brazo mecánico y poder así controlar la armadura necesaria en los laterales de la abertura.

4.5. Losa de fondo

Como se ha comentado anteriormente, el nivel freático está situado prácticamente en superficie, siendo la profundidad de los pozos de entre 30 y 50m. Esto implica unos valores de subpresión sobre el pozo y su losa de fondo muy importantes. Además, al ser el London Clay un material sobreconsolidado, al descargarse durante la excavación, tiende a expandirse. Sin embargo, una vez la losa de fondo y el pozo están ejecutados, esta expansión queda restringida y genera unas fuerzas ascendentes sobre la losa, adicionales a la subpresión, conocidas como “heave”. En la figura 13 se muestra el esquema de fuerzas movilizadas (pesos que gravitan sobre el pozo (D), peso de tierras que gravita sobre el talón (W) y rozamiento o cohesión del propio terreno (Q_{ss}) para contrarrestar la subpresión (U) y heave (H)).

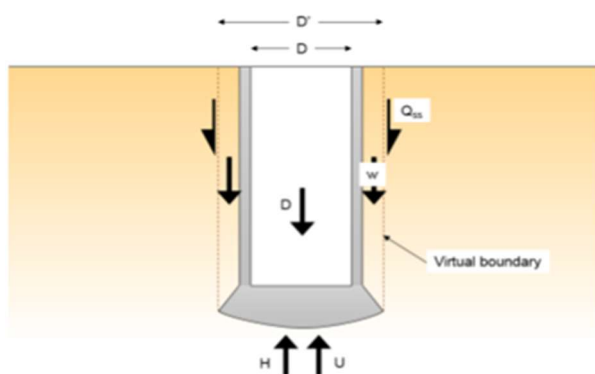


Figura 63. Losa de fondo. Diseño frente a subpresión y heave

Después de analizar las posibles alternativas para la losa de fondo, se optó por el diseño de una bóveda de hormigón armado, de espesor constante 1.20 m, que maximizaba las características resistentes del material al estar trabajando fundamentalmente por forma. Sin embargo, durante el desarrollo del diseño, con el fin de facilitar la ejecución, el contratista optó por transformar esa bóveda en una semi bóveda, manteniendo curva la cara inferior en contacto con el terreno, pero convirtiendo en plana la cara superior.

5. Modelos de cálculo

El diseño de elementos enterrados cuyos esfuerzos dependen tanto de las características intrínsecas del terreno como del proceso constructivo planteado requiere la consideración de la interacción suelo-estructura.

Sin embargo, los requerimientos normativos y de diseño demandan una flexibilidad en los análisis que es difícil de abordar, hoy en día, únicamente con estos modelos de interacción suelo-estructura. Aspectos como las combinaciones de carga, la distribución y consideración o no de las sobrecargas en función de que sean favorables o desfavorables, la no linealidad de los materiales (como la pérdida de rigidez del hormigón cuando fisura, por ejemplo), etc. son aspectos habitualmente contemplados en el diseño de

estructuras cuya consideración en modelos de interacción suelo-estructura supone un reto.

Por ello, para el diseño del sostenimiento y revestimiento se ha optado por un enfoque colaborativo entre ambas herramientas, aprovechando las virtudes intrínsecas de cada una y explotando las sinergias que se generan entre ambas. Se han realizado diferentes modelos de interacción suelo-estructura de los que se han obtenido conclusiones, en lo que se refiere a empujes y módulos de reacción del terreno, con los que se han alimentado y calibrado los modelos de cálculo estructurales (más ágiles y versátiles) que se han utilizado para el dimensionamiento.

5.1. Modelos de interacción suelo-estructura

La primera aproximación a la interacción suelo-estructura se ha realizado mediante modelos axi-simétricos bidimensionales que proporcionan resultados razonables para las zonas de pozos circulares no afectadas por aberturas de conexión a los túneles. Posteriormente, se han realizado modelos de interacción suelo-estructura tridimensionales con el fin de analizar: por un lado, el comportamiento en las zonas en torno a las aberturas de conexión con el túnel, por otro la potencial interacción entre los pozos principal y satélite y, finalmente, para analizar la descompensación de empujes debida a la existencia de elementos de contención cercanos a los pozos. Los resultados de estos modelos tridimensionales han servido para confirmar y actualizar los resultados de los modelos axi-simétricos. En general, los valores de empujes y módulos de reacción del terreno obtenidos de los modelos axi-simétricos, y posteriormente utilizados en los modelos de cálculo estructurales, se pueden considerar razonables y ligeramente conservadores, si bien, en las zonas alrededor de los huecos, ha sido necesario ajustar el módulo de reacción del terreno para tener en cuenta la flexibilidad que se genera en las aberturas de conexión con los túneles.

5.2. Modelos de cálculo estructurales

5.2.1. Sostenimiento primario. Dovelas prefabricadas

Para el diseño de estos elementos se han realizado modelos de barras para cada anillo. Estos elementos se encuentran coaccionados por el terreno y cargados radialmente considerando potenciales situaciones de carga asimétrica.

La consideración de las juntas radiales entre dovelas se ha realizado de dos maneras: inicialmente mediante una reducción general de la rigidez de los anillos utilizando la formulación propuesta por Muir-Wood [2] para, posteriormente, modelizar las juntas de manera más precisa mediante rótulas elastoplásticas cuyo comportamiento estructural es función del nivel de esfuerzo axil.

Adicionalmente, tal como se ha comentado anteriormente, se han realizado modelos locales de elementos finitos de las juntas entre dovelas para tener en cuenta la no linealidad del material.

5.2.2. Revestimiento de hormigón armado y losa de fondo

Para el revestimiento y la losa de fondo se ha acudido a modelos de elementos finitos tipo “shell” donde se han introducido, en base a los resultados obtenidos en los modelos de interacción suelo-estructura, tanto la coacción del terreno mediante muelles como las cargas actuantes (que simulan el empuje del terreno y del agua) mediante presiones. Además de las presiones radiales (debidas al empuje del terreno y del agua) o ascendentes (debidas a la subpresión), se han considerado las cargas del pozo tanto en situación permanente (estructuras internas que descansan en la losa de fondo y en el revestimiento) como en cada fase constructiva: cargas asociadas al paso de las tuneladoras, cargas transmitidas por el túnel a través de las galerías de conexión, cargas temporales debidas a elementos auxiliares, etc.

6. Conclusiones

El proyecto de los pozos de intervención y ventilación de los túneles de Euston y Northolt, en un entorno densamente consolidado como el de Londres, ha presentado una serie de retos que ha sido posible resolver gracias a una estrecha colaboración entre disciplinas, en este caso geotecnia y estructuras. Modelos de cálculo estructurales, debidamente alimentados y calibrados, han complementado a los modelos de interacción suelo-estructura. El resultado, son diferentes soluciones de sostenimiento y revestimiento (resumidas en la tabla 2 de esta comunicación) que se han adaptado a los múltiples requerimientos del proyecto como pueden ser la estratigrafía del terreno en cada ubicación y las preferencias constructivas, sin olvidar la funcionalidad, entre otras condiciones de contorno.

Agradecimientos

Los autores del artículo quieren agradecer a HS2 (High Speed 2), SCS (SKANSKA & COSTAIN & STRABAG Construction Joint Venture) y a la Design House Joint Venture (formada por TYPESA & ARUP & STRABAG) el haber hecho posible su participación en un proyecto icónico como es High Speed 2. Especial agradecimiento a los compañeros de estructuras y geotecnia de la Design House, sin su entrega y conocimiento no habría sido posible sacar el proyecto adelante ni escribir este artículo que también es suyo.

Referencias

- [1] British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers (2010) *BTS Specification for tunnelling. Third Edition*, ICE Publishing
- [2] Wood, A.M. (1975) *The circular tunnel in elastic ground. Geotechnique 2*