

## Crossrail C305: el reto de construir 24 km de túnel en el centro de Londres con 4 tuneladoras



**Alejandro Sanz Garrote**  
Ingeniero Industrial y Civil Engineer.  
Dirección Técnica de Dragados. Servicio de Obras Subterráneas. Madrid



**Francisco González Fernández**  
Ingeniero Agrónomo.  
Project Director Crossrail C305. Londres (Reino Unido)



**Juan Ares Santos**  
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.  
Engineering Manager Crossrail C305. Londres (Reino Unido)



**Roger Escoda Estelrich**  
Ingeniero Geólogo.  
Project Manager Crossrail C305. Londres (Reino Unido)



**Enrique Fernández González**  
Ingeniero de Minas.  
Dirección Técnica de Dragados. Jefe del Servicio de Obras Subterráneas. Madrid

### Resumen

El proyecto Crossrail consiste en una nueva red de transporte ferroviario urbano que atraviesa transversalmente la capital británica, discurriendo en subterráneo a lo largo de 21 km a través del centro de Londres. El contrato C-305 ha consistido en la perforación de 11,8 km de estos túneles gemelos, siendo el más grande del proyecto.

La excavación se ha realizado con cuatro tuneladoras EPB de 7,1 m de diámetro de excavación, capaces de instalar dovelas prefabricadas de hormigón reforzado con fibra de acero. Cada anillo, de tipo universal, de 300 mm de espesor y 1,6 m de longitud, constaba de siete dovelas además de la clave. Los túneles discurrían principalmente por las formaciones arcilla de Londres y Lambeth Group, con contactos ocasionales con la formación Harwich, que consta de varias transiciones de arcilla a arena.

Distintas e innovadoras soluciones técnicas y logísticas se han empleado para minimizar las interrupciones o interferencias con otros contratos y el vecindario. El documento describe este enfoque innovador.

### Palabras clave

Tuneladora, EPB, arcilla de Londres, logística

### Abstract

*The C-305 Eastern Running Tunnels contract involved the boring of 11.8 km of twin tunnels and was the largest in the Crossrail project, created to develop a new transverse suburban line 118 km long with an underground area of 21 km across the very centre of London.*

*Excavation was done by four EPB TBMs with an excavation diameter of 7.1m and able to install steel fibre reinforced precast concrete segments. Each universal type ring consisted of seven pieces plus key, 300mm thick and 1.6m long. The tunnels were bored mainly in the London Clay and Lambeth Group formations with occasional contacts with the Harwich Formation, consisting of various transitions of clay to sand.*

*Logistics and solutions were developed to minimize disruptions or interferences with other contracts and the neighbourhood. The article describes this innovative approach.*

### Keywords

*TBM, EPB, London clay, logistics*

## 1. Introducción

El proyecto Crossrail, que actualmente se está construyendo en la ciudad de Londres, consiste en una nueva red de transporte ferroviario urbano que atraviesa la capital británica desde Reading (al oeste) hasta Abbey Wood y Shenfield (al este) con un total de 118 kilómetros de línea y 42 km de túneles de vía simple (21 km por sentido de circulación).

Dragados en UTE con John Sisk and Sons (90 %-10 %) ha ejecutado uno de los tramos centrales del proyecto Crossrail, el contrato C305, consistente en 3 tramos de túneles gemelos por debajo de la zona Este de la ciudad de Londres, ejecutados con cuatro tuneladoras (TBM) tipo *Earth Pressure Balance* (EPB) de 7,1 m de diámetro de excavación.

El proyecto Crossrail estaba subdividido en diferentes contratos, con la particularidad de que las estaciones atravesadas y los túneles se agrupaban en contratos independientes, existiendo por tanto interferencias de contratistas en cada paso de estación e incluso en algunos portales.

El artículo describe las particularidades y complejidad del contrato C305, tanto por las dificultades técnicas como por los condicionantes derivados de la ubicación en el centro de Londres.

## 2. El proyecto Crossrail C305

El contrato C-305 consiste en la ejecución de 3 tramos de túneles gemelos que hacen un total de 23,6 km a excavar con máquinas tuneladoras:

- Drive Y: 8,2 km de túnel bitubo entre Limmo Peninsula y Farringdon Station.
- Drive Z: 2,7 km de túnel bitubo entre Stepney Green y Pudding Mill Lane.
- Drive G: 0,9 km de túnel bitubo entre Limmo Peninsula y Victoria Dock.

El alcance del proyecto Crossrail incluía la excavación de los mencionados túneles con tuneladora, galerías de conexión entre los mismos, además de pozos en Limmo Peninsula y Stepney Green, donde además se ejecutaron dos cavernas en suelos de 17 m de vano.

La zona de Limmo Peninsula era un elemento estratégico dentro de la obra, ya que era el único punto en el trazado del túnel con suficiente área disponible en superficie para soportar las necesidades logísticas de los túneles, además de estar conectado con el río Lea, afluente del río Támesis, lo que facilitó

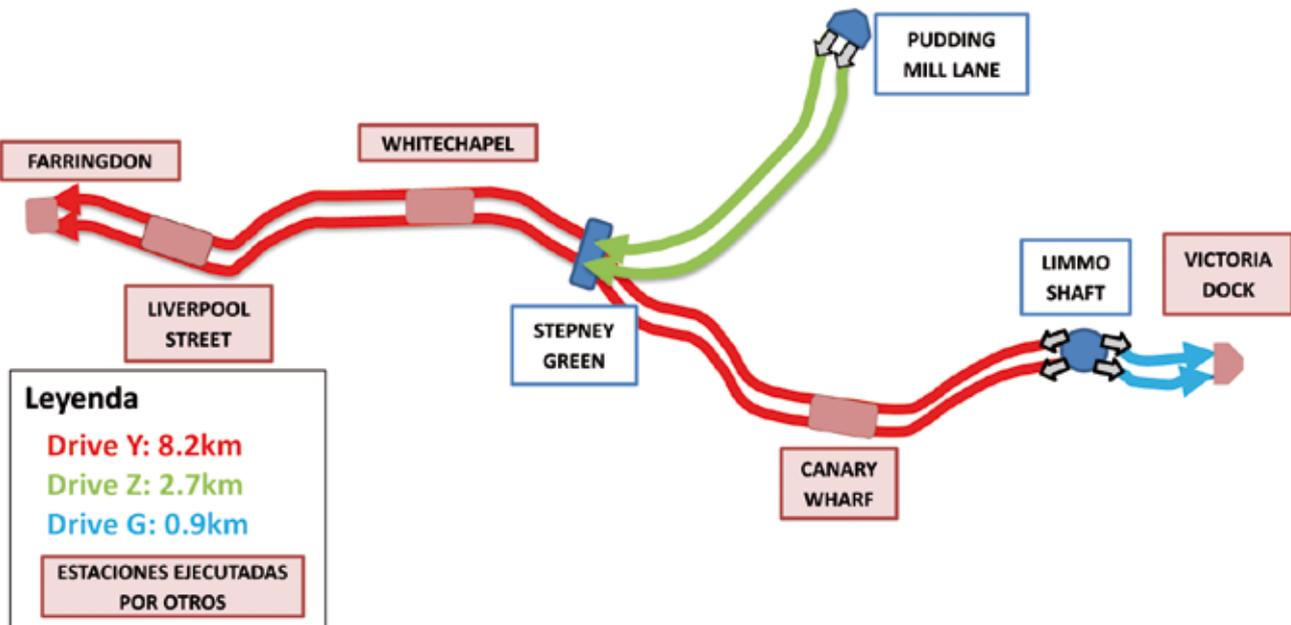


Fig. 1. Crossrail C305. Esquema general del proyecto

el transporte fluvial para el suministro de dovelas y la retirada del material de excavación (ver figura 2). Por estos motivos se atacaron los tramos Y & G (Drive Y&G) desde este punto.

De hecho, el planteamiento original de Crossrail consistía en ejecutar todos los trabajos de túnel de este contrato desde Limmo Peninsula, lanzando las tuneladoras del tramo Z (Drive Z) desde Stepney Green y alimentándolas a través de los propios túneles del Drive Y. Pero durante las fases iniciales del proyecto, se pudo desarrollar una opción más interesante para el conjunto del proyecto Crossrail consistente en lanzar y operar las tuneladoras del Drive Z desde Pudding Mill Lane. Para ello fue necesario acordar con el contratista encargado de la construcción del portal de Pudding Mill Lane la cesión del espacio suficiente para la excavación de los túneles en paralelo con la realización de las obras del propio portal.

Esta optimización relajó la presión en los trabajos en Stepney Green, donde la ejecución del pozo y las complejas cavernas de forma variable se encontraban en el camino crítico, eliminando así riesgos importantes del proyecto y permitiendo adicionalmente la reutilización de las tuneladoras del Drive Z en el Drive G, con el consiguiente ahorro en la adquisición de dos tuneladoras (el concepto original precisaba de 6 tuneladoras) y de los equipos logísticos de apoyo, además de la simplificación de la logística en la zona de Limmo Peninsula.

El proyecto comenzó con la excavación de los pozos de Limmo y Stepney Green. A continuación, se realizaron las galerías

auxiliares para el lanzamiento de las tuneladoras en Limmo y las cavernas de bifurcación en Stepney Green, utilizando para ello métodos de excavación secuenciales. Posteriormente, se montaron las tuneladoras 1 y 2 en Limmo, y comenzaron la excavación del Drive Y hacia la estación de Farringdon, atravesando en su camino estaciones ejecutadas por cuatro contratistas independientes. Las tuneladoras 3 y 4 se montaron en Pudding Mill Lane, y excavaron el Drive Z hacia Stepney Green, en donde fueron desmontadas y trasladadas a Limmo, donde se volvieron a montar para la excavación del Drive G.

### 3. Túneles de Línea

La geología atravesada por los túneles comprende principalmente las formaciones 'London Clay' de arcillas y 'Lambeth Group' compuesta por gravas, arenas, arcillas y limos con contactos puntuales de 'Thanet sand' consistentes en arenas ligeramente arcillosas. Adicionalmente en las proximidades de algunos portales se atravesaban zonas de aluviales y terrazas (*River Terrace Deposits*).

Considerando que los túneles se encontraban en un entorno urbano, bajo el nivel freático y discurrían próximos a infraestructuras, edificaciones y servicios sensibles, se optó por emplear tuneladoras presurizadas. Considerando que cerca del 50 % del trazado se excavaba en arcilla, se seleccionaron tuneladoras de tipo *Earth Pressure Balance* (EPB o de equilibrio de presión de tierras), ya que son las más adecuadas para excavar en terrenos cohesivos, permitiendo también la excavación en las fracciones más granulares gracias a la uti-



Fig. 2. Vista aérea de Limmo Peninsula (izda.) y Stepney Green (dcha.)

Anillo de dovelas		Tuneladoras	
Diámetro interior	6,2 m	Tipo	EPB
Espesor	0,3 m	Diámetro de excavación	7,10
Longitud	1,6 m	Apertura	55 %
Tipo	<i>Left-Right</i> (Universal con claves por encima del eje del túnel)	Presión máxima de trabajo	3,5 bar
Segmentación	7+1	Empuje	58.000 kN
Junta longitudinal	Convexa-convexa	Par recomendado	8.190 kNm@2,45 rpm
Refuerzo	Fibras de acero en 90 % del túnel. Armadura + fibra en 10 %	Par máximo	9.828 kNm
Sellos	EPDM con cordón hidrofílico	Longitud TBM + <i>back up</i>	148 m

Tabla 1. Características principales del anillo de dovelas y las tuneladoras

lización de aditivos acondicionadores del terreno. Se diseñó una cabeza de corte muy abierta para evitar que las arcillas obstruyesen el flujo de material hacia el tornillo durante la excavación, y se instalaron principalmente picas para excavar el terreno, si bien en muchos casos se montaron también cortadores de disco para excavar los muros de hormigón de algunos portales.

Las características principales de las tuneladoras se indican en la tabla 1, junto con las características de los anillos de dovelas prefabricadas que instalaban.

El relleno del trasdós se realizó con inyección de tipo bicomponente, la cual se preparaba en una planta propia ubicada en los portales y se bombeaba hasta unos tanques situados en el *back up* de cada máquina tuneladora, desde donde se bombeaba para inyectar el espacio anular alrededor del trasdós de las dovelas. Este tipo de inyección bicomponente facilita el control de presiones durante la excavación de la tuneladora, ya que al gelificar con gran rapidez permite sujetar los anillos desde su salida fuera del escudo, y reduce la interacción entre las presiones de trabajo en cámara y las presiones de inyección de trasdós, con lo que acaba siendo una herramienta fundamental para minimizar los asientos en superficie.

Para alimentar a las tuneladoras se instaló una vía simple temporal a lo largo del túnel. Como el material de excavación se extraía con cintas continuas de desescombro instaladas a lo largo de los túneles, las necesidades de transporte dedicado a las tuneladoras se limitaban a materiales de producción (fun-

damentalmente dovelas y consumibles) y personal. Gracias a ello las TBMs y las composiciones de trenes se diseñaron para transportar materiales correspondientes a dos anillos completos, minimizándose así el tráfico en los túneles y en los portales, y permitiendo conseguir buenos rendimientos con una vía única de suministro.

#### Fabricación de dovelas

Para la fabricación de dovelas se montó una fábrica propia con dos carruseles en la localidad de Chatham, a unos 50 km de distancia al sureste de Londres, situada junto a un afluente del río Támesis.

El diseño y operación de la factoría permitió fabricar las dovelas al ritmo necesario para alimentar hasta cuatro tuneladoras trabajando simultáneamente, manteniendo en todo momento los niveles de calidad exigidos. En este sentido fue fundamental el sistema de curado con vapor elegido para facilitar el desmoldeo a edades muy tempranas de las dovelas de hormigón armado únicamente con fibras metálicas. Gracias a ello se llegó a fabricar a ritmo constante aproximadamente ochenta dovelas por relevo, equivalentes a unos 40 anillos al día, lo que sirvió para garantizar la operación de las 4 TBMs.

#### Tramo Y (Drive Y)

##### a. Zona de Instalaciones en Limmo Peninsula

Se construyeron dos pozos en Limmo Peninsula para montar, lanzar y alimentar las dos tuneladoras del Drive Y junto con las dos tuneladoras del Drive G. El primero es un pozo de 30 metros de diámetro y 45 metros de profundidad, denominado



**Fig. 3.** Carga de material de excavación en barcazas por medio de cintas tipo tripper en Instone Wharf (izda.).  
 Recepción de dovelas en Limmo suministradas mediante barcazas (dcha.).

pozo principal, y el segundo es un pozo temporal de 27 metros de diámetro y 40 metros de profundidad, denominado pozo auxiliar, conectados entre sí mediante dos túneles excavados por métodos convencionales de 55 metros de longitud.

El pozo principal se construyó mediante muros pantalla de 1,20 metros de espesor mientras que el auxiliar, en el que se montaron las tuneladoras del Drive G, se ejecutó mediante tablestacas hasta encontrar las arcillas de Londres (London Clay) aproximadamente a 17 metros de profundidad y sostenimiento primario de hormigón proyectado a partir de esta cota. La razón es que el pozo principal será utilizado en el futuro como pozo de ventilación y evacuación, mientras el uso del pozo auxiliar es temporal y, por lo tanto, se rellena hasta la superficie una vez completados los trabajos en los túneles.

Esta zona de instalaciones comprendía dos zonas de trabajo próximas, una junto a los pozos de Limmo Peninsula y otra en el muelle de Instone Wharf, conectado con la zona anterior por un camino junto al río Lea (ver figura 4).

El suministro de dovelas se realizaba en barco por el Támesis desde la fábrica localizada en Chatham. Los anillos se descargaban directamente mediante un puente grúa de 18 toneladas en el muelle de Limmo Wharf, muy próximo a los pozos de ataque. Estos anillos se transportaban con un vehículo sobre neumáticos al acopio principal de 430 anillos de capacidad situado en la zona de instalaciones junto a los pozos, donde dos grúas pórtico de 32 toneladas se encargaban de gestionarlo y de cargar los trenes de suministro a las tuneladoras en el fondo de los pozos.



**Fig. 4.** Instalaciones principales en Limmo Peninsula

En el pozo principal de Limmo el material excavado se extraía a través de dos cintas verticales tipo sándwich de 1.300 t/h, para llevarlo a continuación mediante cintas de superficie a Instone Wharf donde, gracias a dos cintas tipo tripper, se cargaban las barcas que llevaban el material excavado hasta la isla de Wallasea. En Instone Wharf también se contaba con una zona de acopio intermedio de material excavado con capacidad para 6.000 m<sup>3</sup> que permitía almacenar el escombros temporalmente en los periodos de ausencia de barcas.

#### b. Arranque de tuneladoras

Para el montaje y arranque de las tuneladoras del Drive Y se estudiaron diversas opciones. La opción más económica habría sido montar las tuneladoras en el fondo del pozo, pero considerando la complejidad del conjunto de pozos y galerías auxiliares de Limmo Peninsula, junto con las estructuras auxiliares necesarias en los pozos para poder lanzar y operar las tuneladoras que requerían de un tiempo mayor que el de suministro de las tuneladoras a la obra, se optó por montar las tuneladoras 1&2 en superficie mientras se terminaban de ejecutar las galerías y estructuras auxiliares inferiores. Una vez preparados, se empleó una grúa de cadenas de 1.350 toneladas para levantar cada una de las tuneladoras de 520 toneladas de peso, requiriendo un *superlift* de 500 toneladas para poder alcanzar la posición más alejada. Con este sistema se consiguió mejorar el camino crítico del programa en más de 2 meses (ver figura 5).

#### c. Excavación con tuneladora

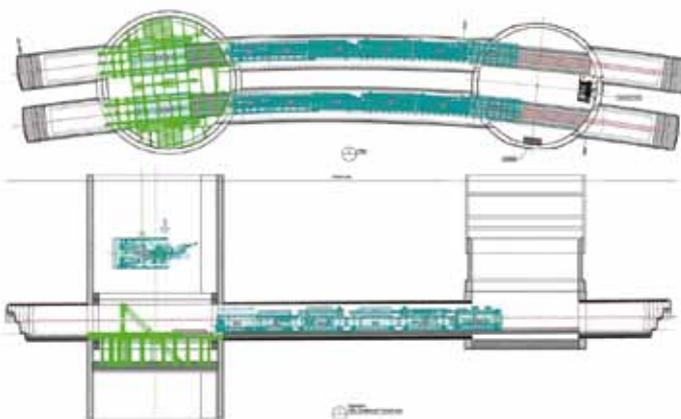
El Drive Y tiene aproximadamente 8.200 metros de longitud y discurre entre el pozo de ataque en Limmo Peninsula y la estación de Farringdon. Los primeros metros del túnel

discurrían por la formación arcillosa London Clay, pasando posteriormente a encontrar una combinación de diferentes alteraciones de London Clay, Harwich Formation y del Lambeth Group, siendo mayoritaria la presencia de combinaciones de Harwich Formation y del Lambeth Group, terrenos de características más granulares que la London Clay.

La excavación de los túneles con tuneladora de todo el proyecto se realizó íntegramente en presión, conforme a las presiones calculadas previamente para minimizar los asentamientos en superficie. Para ello resultó indispensable contar con el equipo humano adecuado, con la experiencia y flexibilidad suficiente para adaptarse a las particularidades de la obra.

La excavación se realizó durante las 24 horas del día y los 7 días de la semana, tanto para conseguir los mejores rendimientos posibles por las necesidades del programa, como para minimizar los asentamientos en superficie que pueden llegar a generar las paradas prolongadas.

Las galerías de conexión entre túneles supusieron varias dificultades para la excavación de las tuneladoras. La primera dificultad consistía en colocar unas dovelas especiales, realizadas con fundición, en los entronques de las futuras galerías. Además de que estas dovelas no se podían manipular con la placa de vacío del erector, el sistema de conexión de estas dovelas con los anillos de dovelas de hormigón contiguos requería de ciertas adaptaciones que ralentizaban la operación. Estas dovelas de fundición se componían de múltiples piezas, de modo que para excavar las galerías se retiraban las piezas centrales de las mismas, quedando un marco de fundición conectado con el túnel de dovelas de hormigón (ver figura 6).



**Fig. 5. Sistema de pozos y galerías en Limmo Peninsula (izda.). Descenso de tuneladoras en el pozo principal (dcha.)**

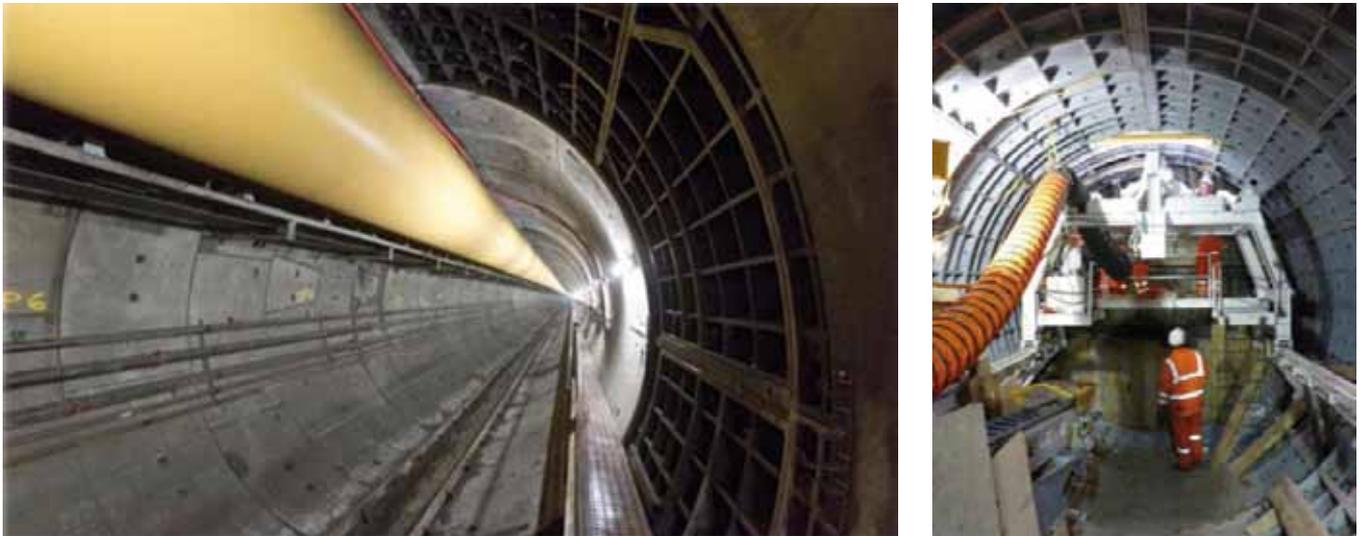


Fig. 6. Dovelas de fundición especiales en los entronques con las galerías de conexión (izda.) y excavación de galerías de conexión sostenidas con dovelas de fundición (dcha.)

Posteriormente, cuando las tuneladoras estaban suficientemente lejos de las galerías de conexión, se instalaron cambios californianos desde los cuales se atacaba la excavación de estas galerías simultáneamente con las excavaciones de las tuneladoras, suponiendo ciertas dificultades logísticas tanto para las tuneladoras como para los equipos de las galerías ya que el túnel contaba con vía simple de circulación de trenes.

#### d. Paso de la estación de Canary Wharf con tuneladora

Tanto el diseño como la ejecución del conjunto de las obras de toda la línea han sido dirigidas por Crossrail a excepción de la estación de Canary Wharf, ejecutada por el grupo privado Canary Wharf Group (CWG). CWG es la empresa propietaria y promotora de la estación de Canary Wharf, además de gestionar otros activos en Londres. La empresa llegó a un acuerdo con Crossrail para ocuparse de realizar y financiar la estación de Canary Wharf-Crossrail, garantizándose de este modo la mejora de las comunicaciones proporcionadas por la nueva línea ferroviaria.

La estación de Canary Wharf se encuentra en el corazón del nuevo distrito financiero de la ciudad y está concebida no solo como una mera estación de tránsito de viajeros, sino como un centro comercial. La estación está diseñada en forma de cajón de 256 m de longitud, ancho variable entre 22,6 y 28,6 metros, y una profundidad de 27 m. Se encuentra rodeada por un canal (el North Dock of West India Quay) por lo que se excavó al amparo de una pantalla de pilotes.

CWG tenía interés en empezar a desarrollar la zona comercial de los pisos superiores de la estación lo antes posible con independencia del estado de avance de la línea ferroviaria, previendo la inauguración de los 3 niveles comerciales superiores de la estación en mayo de 2015. Por este motivo, los trabajos de ejecución de la estación de Canary Wharf comenzaron con anterioridad a los del túnel, ejecutados por contratistas independientes.

Los túneles de línea y, por tanto, las tuneladoras tenían que pasar por el nivel inferior de la estación. Considerando que el diámetro de las tuneladoras es mayor que el espacio útil necesario a lo largo de la estación en fase de operación, la estación se diseñó más ancha en los extremos para poder recibir y relanzar las máquinas tuneladoras, permitiendo el paso de las mismas por su parte central a lo largo de una ruta muy ajustada tanto lateralmente por las paredes de la estación como verticalmente por la losa del nivel superior (ver figura 7).

La elección del sistema de paso de las tuneladoras por la estación de Canary Wharf estuvo condicionada por el acuerdo entre Crossrail y CWG, que describía una serie de ventanas y condiciones para facilitar y minimizar la interferencia, si bien el contratista del túnel era el responsable de diseñar el sistema de tránsito cumpliendo con las restricciones negociadas previamente. Parte de estas restricciones consistían en limitar al máximo los trabajos pesados y el movimiento de tierras o trasego de materiales asociados a las tuneladoras por la estación.

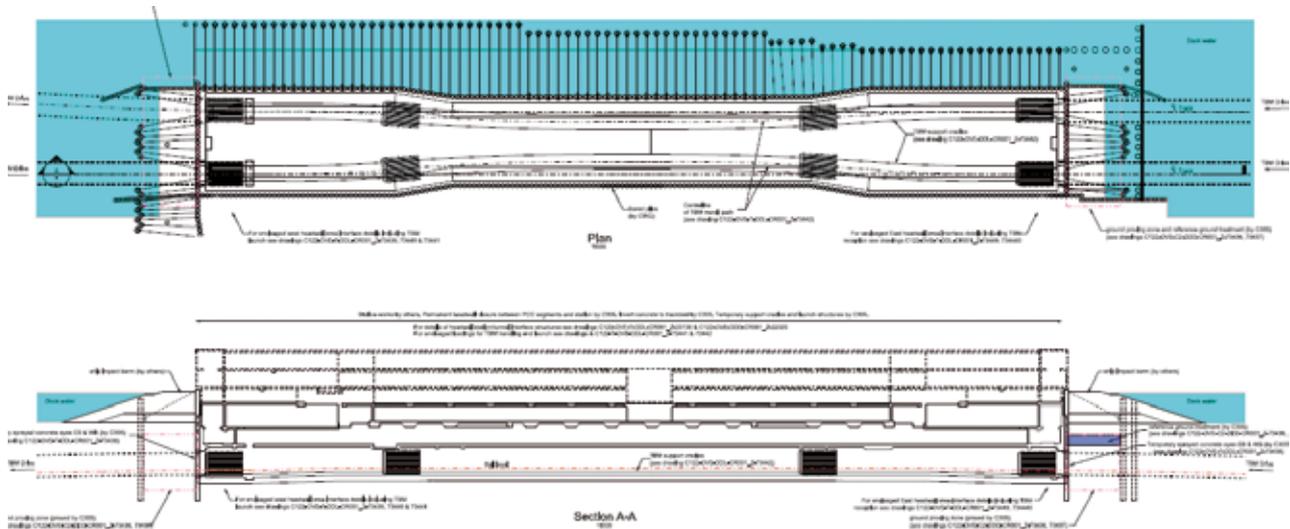


Fig. 7. Planta y alzado de la estación de Canary Wharf rodeada de agua. Ruta disponible para el paso de las tuneladoras

Desde el punto de vista del terreno, el canal que rodea la estación se encuentra por encima de los túneles en las proximidades de los distintos cales, con lo que un riesgo importante era la creación de vías de agua y arrastres de material por el extradós de las pantallas generando inestabilidades durante los cales de las tuneladoras, por lo que se realizaron una serie de inyecciones de mejora del terreno por detrás del muro de recepción de las TBM. Para la salida de las máquinas de la estación, se confió en la colocación de sellos mecánicos y no se realizó ningún tipo de tratamiento ni paraguas.

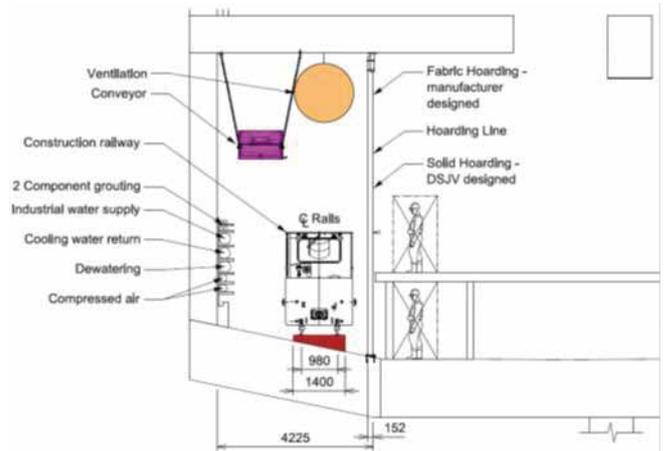
Desde el punto de vista logístico, como la estación pertenecía a otro contrato que iba más avanzado y que ya había comenzado a realizar las losas intermedias, el acceso a los niveles inferiores de la estación estaba muy limitado para cualquier intervención referente a los túneles tanto por las dimensiones físicas de los accesos como por los espacios de trabajo disponibles.

Tras el paso de las TBM por la estación había que entregar la zona central de la misma para que CWG pudiese ejecutar los andenes de la misma y progresar con los trabajos de estructura y acabados de abajo hacia arriba. Esto implicaba que para el paso de las TBM por la estación no se podían emplear elementos permanentes que luego entorpeciesen los trabajos de construcción de andenes y, por otra parte, después del tránsito iba a ser necesario reorganizar todas las instalaciones y redes de alimentación a las máquinas para no interferir con las zonas entregadas a CWG.

Por estos motivos se diseñó un sistema de tránsito poco invasivo junto con un sistema de separación de espacios suficientemente flexible que permitiese a CWG trabajar de forma segura en la ejecución de andenes tras el tránsito, pero que al mismo tiempo facilitase la logística para mantener la comunicación entre las tuneladoras y el pozo de ataque en Limmo Peninsula para alimentar los frentes en los 6 km de túnel que todavía quedaban por excavar desde este punto, con la dificultad de contar en este paso intermedio con un estrechamiento desde 6,2 m de diámetro interior en el túnel a 4.025 m de ancho libre y con el fondo inclinado en el paso de la estación (ver figura 8).

La solución adoptada consistía en ejecutar unas zapatas corridas de apoyo a lo largo de la línea exterior de la estación, que se emplearían en una primera fase para empujar la máquina y su *back up* mediante un sistema de patines de elevación y deslizamiento, y que en la fase posterior de operación de la máquina se podrían emplear para desviar el tráfico del túnel por encima de estas zapatas corridas, generando de este modo espacio para los trabajos de ejecución de andenes. En la parte interior de la estación, el sistema de patines de deslizamiento se apoyaba directamente en la losa de fondo, con lo que los trabajos previos y posteriores asociados en esta zona serían mínimos.

El paso completo de cada TBM por Canary Wharf se realizó aproximadamente en dos meses y medio desde el cale hasta



**Fig. 8. Paso de tuneladora por la estación (izda.).  
 Servidumbre a través de la estación para suministro de las tuneladoras tras el paso de la estación (dcha.)**

la entrega de la parte central de la estación a CWG. Destacar que se cumplieron los hitos del acuerdo previo entre Crossrail y CWG para la entrega de la parte central de la estación, y que el tránsito y posterior operación de las tuneladoras por la estación de Canary Wharf no ha supuesto ningún impacto negativo en el programa de trabajos de la estación.

**e. Paso de la caverna de Stepney Green y estaciones con tuneladora**

La siguiente estructura que atravesaron las TBM fueron las cavernas de bifurcación de Stepney Green, ejecutadas por medios convencionales previamente. Las tuneladoras del Drive Y atravesaron las cavernas en primer lugar y tras el tránsito continuaron con la excavación de los 4 kilómetros

de túnel restantes. Durante este periodo, las tuneladoras provenientes del Drive Z calaron en la zona más ancha de las cavernas y tenían que avanzar hasta la zona estrecha para poder extraerlas por el pozo y llevarlas a Limmo Peninsula y así poder reutilizarlas en el Drive G. Como el pozo entroncaba con las cavernas en la zona estrecha, fue necesario emplear un sistema poco invasivo de avance de las máquinas por las cavernas, de modo que tras el primer tránsito se pudiese reacondicionar la caverna para el segundo tránsito sin afectar a la producción de la máquina más avanzada.

Para ello se ejecutaron unos muros guía con unas vigas metálicas embebidas sobre las que deslizaban las tuneladoras. En la parte central se ejecutaba una solera plana que



**Fig. 9. Cale de la segunda TBM en Stepney Green (izda.) y vista de la caverna tras el paso de las máquinas (dcha.)**



Fig. 10. Tránsito de la TBM del Drive Y por la estación de Whitechapel

permitía la instalación de unos calzos de madera para sujetar las dovelas de solera instaladas por las máquinas en su avance por las cavernas. Con este sistema, las tuneladoras pudieron avanzar por la caverna empleando medios propios al tiempo que los elementos que dejaban atrás (dovelas de solera y estructura de guiado de las máquinas) podían retirarse con relativamente poco trabajo, por lo que tras el primer tránsito, se pudo preparar y realizar el cale y retirada de las tuneladoras provenientes del Drive Z sin afectar a las tuneladoras del Drive Y.

Tras el paso de Stepney Green, las tuneladoras continuaron la excavación hacia Whitechapel y Liverpool Street Stations, situadas en zonas más céntricas de la ciudad. La excavación del tramo sucedió sin incidentes remarcables, salvo que como el contratista encargado de ejecutar las estaciones a atravesar se estaba retrasando, hubo que buscar un lugar adecuado después del cale para dejar paradas las máquinas un periodo relativamente largo de tiempo mientras se finalizaban las estaciones.

Cuando las estaciones estuvieron preparadas, el tránsito se realizó empleando un sistema similar al empleado en Stepney Green (ver figura 10).

#### f. Desmontaje de tuneladoras en Farringdon Station

El Drive Y terminaba en la estación de Farringdon, muy céntrica y con muchas limitaciones subterráneas por interacciones con otras infraestructuras además de las limitaciones en superficie, que hacían que la configuración de pozos de acceso sobre los túneles no fuese posible.

Por este motivo, las tuneladoras del Drive Y debían terminar en el borde de la estación, sin llegar a entrar en ella. Como

el desmontaje de este tipo de TBMs dentro del túnel habría resultado muy complejo y costoso por la limitación de acceso y por la dificultad de sostener el terreno durante el proceso, se optó por ejecutar unas cámaras de dimensiones mínimas, desde la propia estación de Farringdon, para introducir las máquinas y desmontarlas en ellas, retirando las piezas por el propio túnel, pero empleando el acceso de la estación para facilitar la ventilación y mejorar las condiciones de seguridad (ver figura 11).

Con este sistema el desmontaje de cada máquina se realizó en aproximadamente 4 meses de duración.

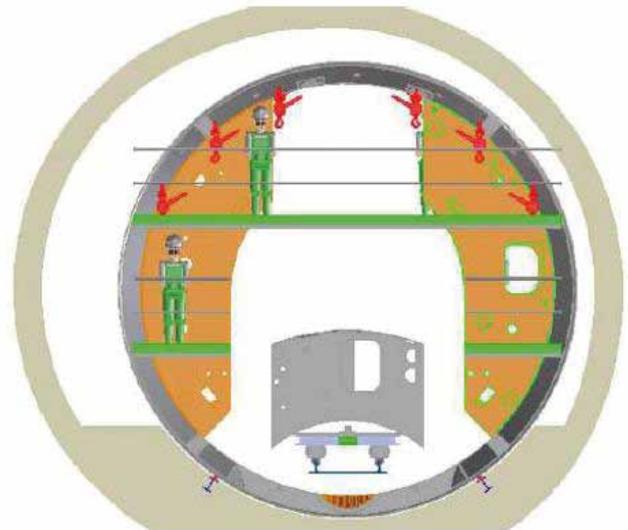


Fig. 11. Cale de tuneladora del Drive Y en la cámara de desmontaje anexa a la estación de Farringdon



Fig. 12. Vista aérea del Drive G

#### 4. Tramo G (Drive G)

El Drive G tiene 900 metros de longitud y discurre entre el pozo de ataque en Limmo Peninsula y el portal de salida de Victoria Dock. Los primeros metros del túnel discurren por la formación arcillosa London Clay, pasando posteriormente a encontrar una estratigrafía variada compuesta por London Clay, Harwich Formation y las unidades superiores del Lambeth Group. Arcillas, arenas y gravas se encontraron simultáneamente durante este tramo, disminuyendo el espesor de London Clay en clave a medida que el túnel continuaba ascendiendo hacia el portal. Durante los últimos metros, el frente comprendía primero London Clay en la parte inferior y River Terrace Deposits en la superior, y más tarde Alluvium sobre River Terrace Deposits, manteniéndose la London Clay en la mitad interior del frente. La combinación de frentes mixtos con poco recubrimiento, junto con la existencia de servicios y estructuras próximas fueron los condicionantes que llevaron a emplear máquinas tuneladoras presurizadas para la excavación de estos tramos cortos de túnel.

##### a. Trabajos preliminares

Dentro del marco del contrato C305 se encontraban unos trabajos preliminares a realizar en la zona de Victoria Dock Portal para preparar la recepción de las tuneladoras. Según se acercaba la alineación del túnel hacia el portal con pendiente ascendente, se iba perdiendo cobertera de tierras, pasándose progresivamente de tener la formación arcillosa London Clay en el frente y en clave a únicamente depósitos superficiales, con cobertera en el momento del 'cale' de únicamente 3,5 m de terreno no competente.

Por este motivo, el contrato recogía, por un lado, un tratamiento previo de los depósitos superficiales para mantener la

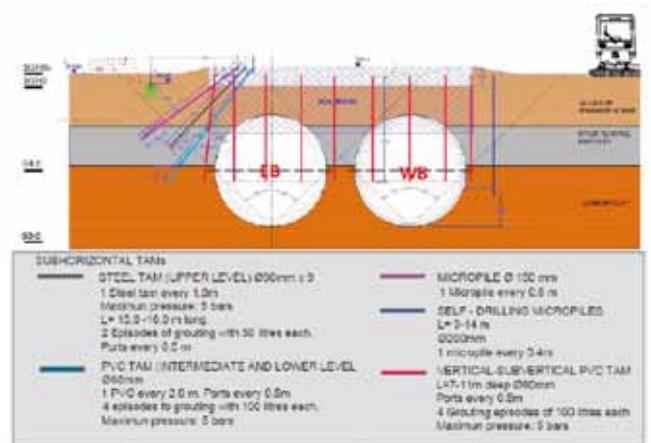


Fig. 13. Sección transversal de los túneles del Drive G en las proximidades del portal de Victoria Dock indicando los tratamientos del terreno (arriba) y recepción de tuneladoras en el portal (abajo)

estabilidad del frente durante la excavación de los túneles y, por otro, la construcción de una losa antiflotación de hormigón armado junto al portal de Victoria Dock, sobre el área tratada por el método del *soil-mixing*, que a la vez sería utilizada para emplazar la grúa de 600 t. para el desmontaje de las tuneladoras (ver figura 13).

El principal objetivo de este tratamiento era proteger los servicios afectados en una zona de excavación de túnel con escasa cobertera de tierras, muy sensibles a asentamientos y distorsiones angulares. Por otro lado, favorecería la estabilidad del frente y por lo tanto mitigaría el posible riesgo de pérdida de sección y sobre excavación.

#### b. Excavación con TBM

En junio y septiembre de 2014 respectivamente se lanzaron las tuneladoras del Drive G desde el pozo de auxiliar en Limmo Peninsula. Las tuneladoras fueron avanzando hacia el este, bajo las vías del tren ligero DLR (Docklands Light Railway), el portal de la Jubilee Line de London Underground y el viaducto de la A1020 Silvertown Way. A continuación, los túneles iban ascendiendo con una pendiente del 3,3 % hacia el portal de Victoria Dock, atravesando unos 100 metros de zona de depósitos superficiales previamente tratada mediante inyecciones de impregnación y *soil-mixing*, 'calando' en el portal en agosto y octubre de 2014 respectivamente con pérdida de volumen nula (*volumen loss* nulo) y con una cobertera inferior al medio diámetro.

Calar con tan escaso recubrimiento y sin generar ningún asiento en superficie se puede considerar un gran logro ya que se trata de situaciones límite complejas, tanto por la dificultad de definir unas presiones posibles y reales de operación de tuneladora que consideren la transición de terreno a pantalla de hormigón y posterior transición al espacio de la estación, junto con las propiedades geomecánicas y reológicas del propio terreno a excavar, como por el elevado número de parámetros que hay que controlar en la máquina para conseguir esas presiones en la realidad, además de las medidas adicionales necesarias para garantizar que se mantienen las presiones en cada una de las fases de transición intermedias del cale.

### 5. Tramo Z (Drive Z)

El Drive Z tiene 2700 metros de longitud y discurre entre el pozo de ataque en Pudding Mill Lane y las cavernas de bifurcación en Stepney Green. La primera mitad de los túneles discurría por una estratigrafía variada compuesta por London Clay, Harwich Formation y las unidades superiores del Lam-

beth Group. En la primera zona de estos terrenos con frentes mixtos y poco recubrimiento los túneles pasaban además muy próximos a diversos servicios e infraestructuras existentes, que obligaron a tomar medidas preventivas para garantizar que la ejecución de los túneles no iba a afectarles.

En la segunda mitad del trazado el terreno encontrado comprendía las unidades inferiores de London Clay y las unidades superiores del Lambeth Group principalmente.

Las máquinas tuneladoras se lanzaron desde el portal situado en Pudding Mill Lane, con muchas limitaciones de espacio que no permitieron ni lanzar las tuneladoras completamente ensambladas, ni operar dos tuneladoras al mismo tiempo.

#### a. Trabajos preliminares

Dentro de los primeros 150 m de excavación las tuneladoras tenían que atravesar diversas dificultades, todas ellas sensibles a los asentamientos y distorsiones angulares, y situadas en una zona donde los túneles excavaban con poco recubrimiento (ver fig. 14):

- La existencia de un cable de 400 kV, con restrictivas limitaciones de asentamientos, situado a menos de 20 m del portal en una zona de poco recubrimiento y junto a un canal.
- La existencia de pilotes de madera con punta metálica en los bordes del canal. La situación exacta de las puntas metálicas se desconocía pero existía la posibilidad de que estuviesen en el camino de las tuneladoras.
- Paso de los túneles bajo el canal con menos de un diámetro de recubrimiento.
- Paso bajo el Colector Wick, revestido de ladrillo, con 1,2 m de diámetro interior, y situado 2,1 m por encima de los túneles a excavar.
- Paso bajo el Colector Ham, revestido de ladrillo, con 2,1 m de diámetro interior, y situado únicamente 0,53 m por encima de los túneles a excavar.

Combinando estas dificultades con el hecho de que era necesario realizar varias paradas técnicas con las tuneladoras en estos tramos debido a que el portal de ataque no permitía montar las máquinas completamente, se realizó una campaña de trabajos preliminares destinada a proteger las estructuras más sensibles y mejorar las condiciones de excavación en estos primeros metros.

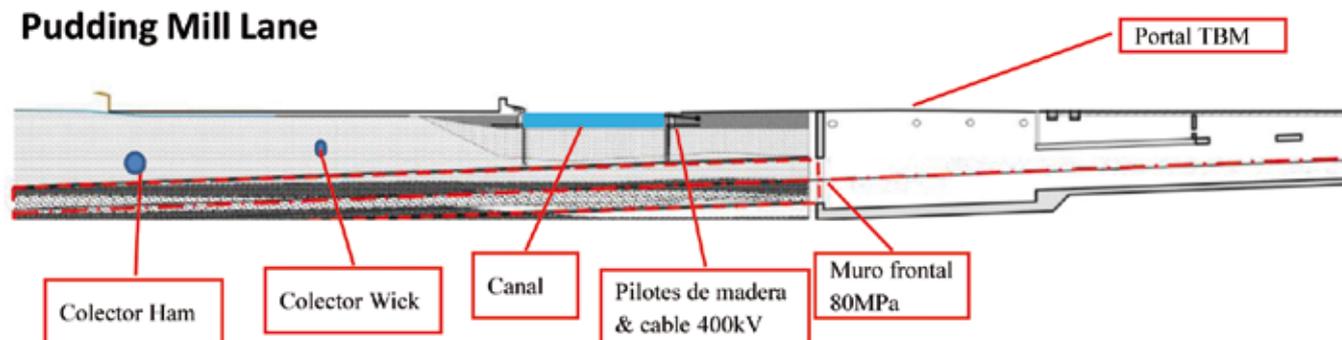


Fig. 14. Sección longitudinal de los túneles en la zona de Pudding Mill Lane

Los trabajos preliminares consistieron en:

- Ejecución de un pozo auxiliar entre el canal y el portal para ejecutar inyecciones de mejora del terreno, consistentes en una combinación de inyecciones de impregnación y de fracturación para proteger los muros del canal y el cable de alta tensión.

- Ejecución de recinto de tablestacas dentro del propio canal para tratar el fondo del río y acceder a las puntas de los pilotes metálicos para su retirada en caso de interferencia con el túnel. Este recinto se rellenó posteriormente y sirvió para mantener en 'precarga' la sección más somera bajo el río Lee durante la excavación de las TBM. La precarga se mantuvo hasta que se terminó la excavación de los túneles y se colocó el hormigón pesado de la solera para evitar que el túnel flotara.

- Refuerzo del colector existente Wick con revestimiento interior de fibra de vidrio curada con luz ultravioleta (UV cured GRP).

- Blindaje interior del colector Ham con camisa de acero inoxidable.

#### b. Excavación con tuneladora

En agosto de 2013 se lanzó la primera máquina tuneladora del Drive Z hacia Stepney Green. Debido a las pequeñas dimensiones del pozo de ataque fue necesario realizar varias paradas técnicas a lo largo de los primeros 150 primeros metros para ir completando el montaje de todos los carros del *back up* de la tuneladora. Estas paradas se realizaron muy próximas a las estructuras y servicios descritos previamente, sin generar ningún asiento fuera de los parámetros aceptables gracias a la combinación de la adecuada operación de la máquina junto con las medidas de protección implementadas.

Una vez montada por completo, la TBM continuó con la excavación del túnel, consiguiendo muy buenos rendimientos máximos y medios en este tramo. De hecho en este tramo es donde se consiguieron los mejores rendimientos entre las tuneladoras utilizadas en todos los contratos de Crossrail, en parte gracias al equipo humano y los medios empleados, y también gracias a que el terreno encontrado permitía una elevada penetración de la tuneladora.

En paralelo a la excavación del primer túnel del Drive Z se fue montando la TBM del segundo túnel en el portal, de modo que cuando se produjo el cale de la primera máquina en Stepney Green, en pocos días se adaptaron las instalaciones en el portal para poder iniciar la excavación del segundo túnel.

El elevado número de tuneladoras trabajando simultáneamente en el contrato, junto con distintas circunstancias particulares como la corta longitud de algunos tramos, o las paradas forzosas y prolongadas para poder calar en alguna estación incluida en otro contrato, hicieron muy dificultosa la gestión de los numerosos equipos de personal en algunos momentos, si bien fue un factor clave para el éxito de las excavaciones.

#### 6. Cavernas de bifurcación en Stepney Green

En Stepney Green se diseñaron dos bifurcaciones de sección variable que unen los trazados de los Drives Y y Z, con un ancho de 16,5 m y una altura de 17 m en su zona más ancha y a las que se accedía desde un pozo situado en la zona central de las cavernas, ejecutado con muros pantalla. Las excavaciones de ambas bifurcaciones tenían que estar acabadas antes de la llegada de las tuneladoras para no afectar al programa, con lo que fue necesario emplear un método de excavación que proporcionase la rapidez y seguridad necesarias.

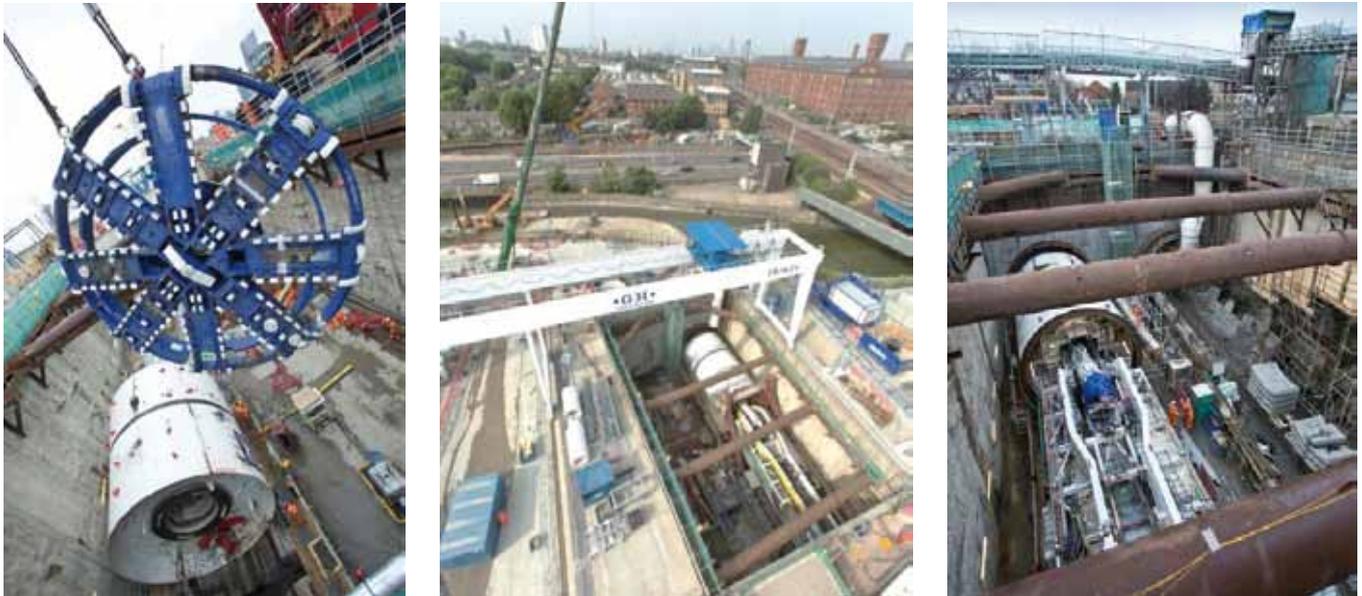


Fig. 15. Montaje de la primera TBM (izda.). Vista del pozo de ataque en Pudding Mill Lane (centro). Montaje de la segunda TBM en paralelo con la excavación del túnel paralelo (dcha.)

La excavación se realizó con un sistema de excavación secuencial con medios mecánicos convencionales, variando la secuencia constructiva en función de los condicionantes geométricos de cada tramo. El tramo hacia el oeste del pozo, dada la menor sección de excavación, se excavó subdividiendo el frente de excavación en avance, destroza y contrabóveda. Se excavaba con una longitud de pase de 1 m en el avance y 2 m en la destroza y contrabóveda, ejecutándose un pase de

destroza cada dos pases de avance, y uno de contrabóveda a continuación, cerrándose así la contrabóveda a menos de un diámetro de distancia del frente de excavación.

En el primer tramo de la caverna hacia el este se dividió el frente en dos fases de excavación, los llamados Side Drifts (ver figuras 16 y 17), que dividen la sección en dos mitades y que a su vez se subdividen en avance, destroza y contrabóveda.

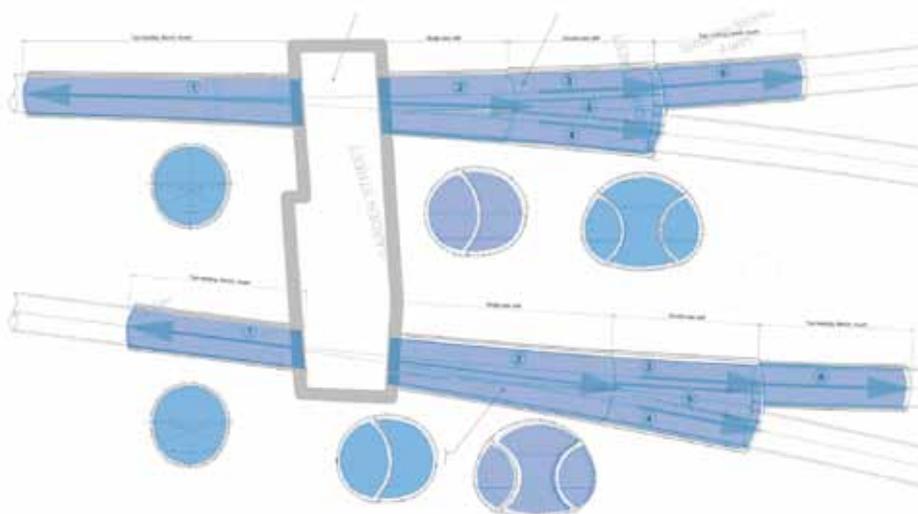


Fig. 16. Bifurcación en Stepney Green, con subdivisión del frente en función del tamaño de la sección de excavación



Fig. 17. Subdivisión del frente en dos fases (izda.) y subdivisión en tres fases para las secciones de mayor tamaño (dcha.)

El tercer tramo de la caverna, debido al aumento de sección, se dividió en tres fases, dos laterales y una central, que a su vez se excavaron en tres subfases: avance, destroza y contra-bóveda. Primero se excavaron y sostuvieron los dos secciones laterales y se terminó excavando la sección central, en la que se iban demoliendo los muros temporales divisorios con las dos fases anteriores al avanzar.

El sostenimiento consistió en un sellado de hormigón proyectado en el frente de excavación y una capa de hormigón proyectado en el contorno de la sección con una primera capa de 75 mm y una serie de capas sucesivas posteriores hasta completar el espesor final de 325 mm.

Adicionalmente se colocaron cerchas reticuladas cada dos metros como sostenimiento. La colocación de estas cerchas supuso un reto tanto logístico como desde el punto de vista de la ejecución de la excavación. Desde el punto de vista logístico, al tratarse de una sección de excavación variable, cada cercha era distinta y se componía de diversas piezas, cada una de las cuales se debían colocar en un momento distinto, a veces con varios meses de separación en el tiempo. Como a la obra se suministraban cerchas completas, fue necesario implementar un sistema capaz de gestionar el abultado *stock* de cerchas y que permitiese encontrar la 'parte' adecuada en cada momento. Adicionalmente, desde el punto de vista de la ejecución, la conexión mecánica de las secciones de la cerchas correspondientes a fases distintas resultó complicada, ya que implicaba trabajos manuales en lugares de difícil acceso.

La excavación de las cavernas se realizó sin incidentes re-marcables, con un nivel de asentos inferior a las previsiones y según los plazos previstos. Cada bifurcación se excavó en aproximadamente 6,5 meses.

La impermeabilización consistió en la instalación de una lámina de PVC en la parte inferior de las cavernas y en una lámina proyectada en la parte superior, con un solape de aproximadamente 1 m de lámina proyectada sobre la lámina de PVC. El revestimiento consistió en hormigón encofrado en la parte inferior de contra-bóveda y arranques, ejecutándose la parte superior del revestimiento con hormigón proyectado.

## 7. Rendimientos

Las tuneladoras del contrato C305 finalizaron las excavaciones en mayo del año 2015, dentro del programa y presupuesto, y en el momento de escribir este artículo, toda la obra civil principal ha sido completada y únicamente restan trabajos menores antes de entregar la obra.

Las tuneladoras obtuvieron los siguientes rendimientos medios:

- Drive Y: 8,2 km - rendimiento medio de 19,55 m/día
- Drive Z: 2,7 km - rendimiento medio de 28,8 m/día
- Drive G: 0,9 km - rendimiento medio de 22,8 m/día

Consiguiéndose unos rendimientos máximos de 72 metros en un día, 296 metros en una semana, y 1.175 metros en un mes, siendo éstos los mejores rendimientos de todos los distintos contratos del proyecto Crossrail.

Un elemento clave para conseguir estos rendimientos ha sido poder plasmar la experiencia adquirida por Dragados en proyectos similares a través de los métodos constructivos seleccionados en cada una de las etapas del proceso de excavación y, fundamentalmente, a través de la selección de los especialistas y personal responsable de gestionar y construir el proyecto día a día.

Otro elemento clave para conseguir estos rendimientos manteniendo la calidad fue la utilización de los típicos incentivos basados en la producción, pero vincularlos a parámetros de calidad y de seguridad, tanto para la excavación de los túneles como para la fabricación de las dovelas.

## 8. Conclusiones

La construcción de los túneles del contrato C305 ha supuesto un reto considerable dadas las dimensiones del mismo y por desarrollarse íntegramente en el centro de una megápolis como Londres. La logística empleada en todos y cada uno de los procesos constructivos se ha diseñado con el objetivo de minimizar el impacto en la periferia y

en todos aquellos actores que, de una u otra manera, se encontraban afectados por las obras. Así, los suministros y transporte de escombros se realizó con la ayuda de barcazas que, navegando por el Támesis y sus afluentes, permitió que el tráfico rodado no fuera afectado durante los cuatro años que duraron las obras. Los pasos de estaciones e interferencias con otros contratos, no solamente se minimizaron sino que se redujeron costes y plazos respecto a las previsiones iniciales.

Con todo, podemos concluir que Crossrail C305 ha sido un ejemplo de cómo enfocar la construcción de nuevas infraestructuras en zonas urbanas a las que dotar de nuevos sistemas de comunicación pero sin generar molestias y costes, durante su ejecución, al entorno.

De este modo, se consigue dotar a la ciudad de recursos que incrementan la calidad de vida de sus ciudadanos, garantizando un coste social muy inferior al producido con otras alternativas a la solución subterránea.

Es por ello, el camino a seguir y a divulgar, a fin de concienciar a las autoridades y responsables de las administraciones que la opción subterránea es la que permitirá un desarrollo sostenible en las, cada vez más numerosas, megápolis de nuestro planeta. **ROP**

