

Victoria Road Crossover Box – Pozo multiseccante definitivo para doble túnel en el HS2 (Londres)

Victoria Road Crossover Box - Multiseccant permanent shaft for double tunnel in HS2 project (London)

Alejandro Ramos Casquero^a, Guillermo Mazón Guitiérrez^b, José María Lorenzo Romero^c y José Luis Sánchez Jiménez^d

^a Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPsa. Jefe de equipo. aramos@typsa.es

^b Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPsa. Ingeniero de proyecto. gmazon@typsa.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPsa. Director Adjunto. jmlorenzo@typsa.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPsa. Director de departamento. jlsanchez@typsa.es

RESUMEN

En el tramo inicial de la línea de alta velocidad entre Londres y Birmingham formado por dos túneles paralelos, es necesario disponer un pozo definitivo de grandes dimensiones, denominado Victoria Road Crossover Box, para realizar el cruce de los trenes y para conseguir la apertura necesaria para la adecuada ventilación. Además, el pozo se usa para introducir una de las TBM y como pozo logístico durante la construcción de sendos túneles. El diseño se ha optimizado de cara a minimizar los costes, pero también por motivos de sostenibilidad y para adaptar la construcción a las necesidades de la obra.

ABSTRACT

A large permanent shaft, known as the Victoria Road Crossover Box, is required in the initial two-way underground section of the high-speed line between London and Birmingham to allow the crossing of the trains and to achieve the ventilation appropriate opening size. Additionally, the shaft will be used to introduce one of the TBMs and as a logistics shaft during the construction of both tunnels. The design has been optimised to minimise costs, but also for sustainability reasons and to adapt the construction to the project's needs.

PALABRAS CLAVE: obra subterránea, pozo multiseccante permanente, caterpillar, pantallas, puntales.

KEYWORDS: underground structure, multiseccant permanent shaft, caterpillar, diaphragm wall, props.

1. Introducción

Como parte de las obras del tren de alta velocidad que se está construyendo en Reino Unido entre Londres y Birmingham, se han diseñado dos túneles paralelos (con 7.3km de longitud cada uno) que permiten la salida del tren desde el centro de Londres (en la estación de Euston) hacia el oeste, con una mínima afección a la ciudad. Además de los túneles, se han

diseñado los necesarios pozos de evacuación, emergencias y ventilación, así como las rampas de acceso. Estas estructuras se integran con dos estaciones ya previstas como parte de otros proyectos (Euston y Old Oak Common). Además de estas estructuras ha sido necesario ejecutar un complejo pozo subterráneo de

grandes dimensiones del que trata la presente comunicación.

La obra que está siendo ejecutada por el consorcio de constructoras SCS (Skanska-Costain-Strabag) y diseñada por Design House JV, del que TYPsa forma parte junto a Arup y Strabag, y que es promovida por HS2 que es el

ente público que se encarga de esta nueva línea de alta velocidad.

La estructura del Victoria Road Crossover Box (VRCB) se sitúa a unos 300m de la estación de Old Oak Common, al oeste de la ciudad de Londres, como se indica en el siguiente esquema.

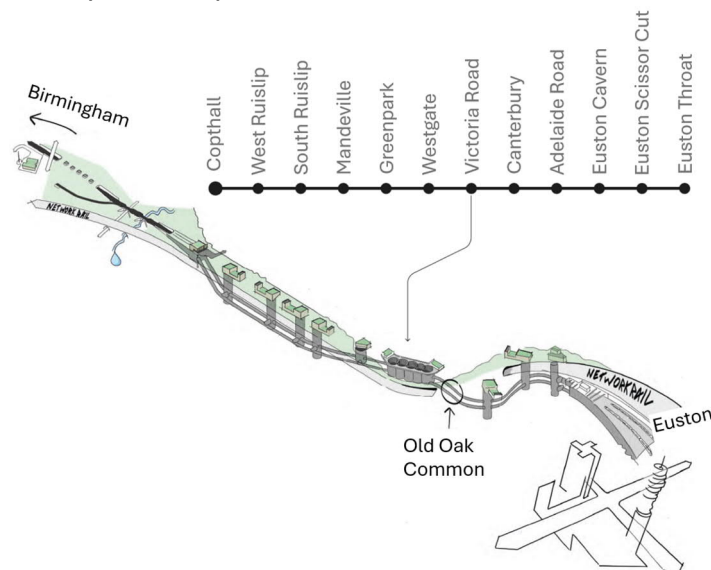


Figura 1. Obras incluidas en los tramos S1 y S2 del HS2.

Por un lado, el pozo VRCB debe permitir el cruce los trenes entre las dos vías, dando así versatilidad a las operaciones en la estación adyacente; pero además tiene unos requerimientos especiales de ventilación, por lo que era necesaria una gran superficie abierta de unos 5000m².

El pozo se encuentra en una parcela en la que se han demolido los edificios existentes y se ha excavado hasta la cota de ejecución de las pantallas, eliminando el suelo antrópico. Por tanto, las pantallas se encuentran íntegramente en un estrato de London Clay, que es una arcilla sobreconsolidada típica de la zona. Se trata de una arcilla que aunque a corto plazo tiene unas características adecuadas y estables con empujes moderados y sin presencia de empuje hidrostático, a largo plazo se comporta de manera poco competente con grandes empujes y en la que se restablecen los empujes hidrostáticos. El nivel freático se sitúa prácticamente a cota del terreno natural.

El diseño referencial del que se partía era una caja casi rectangular mucho más larga, que abarcaba completamente el cruce de las vías. Sus dimensiones exteriores eran de 215.6m de longitud, entre 36.6m y 39.2m de ancho en los extremos y 33m de ancho tipo en la zona central, y de una profundidad de unos 25.0m. Dada la singularidad del terreno eran necesarias pantallas de espesor 1.80m, con una profundidad de 47.5m, tres niveles de arriostramiento (con puntales de 2.00m o 2.50 de ancho y 1.50m de canto, dispuestos cada 12.5m) y una losa inferior de 1.20m de espesor. La losa, además de incorporar un drenaje inferior y células de alivio de presión para evitar el empuje expansivo diferido de la arcilla provocado por la pérdida de presión de confinamiento, incluía 68 pilotes de diámetros entre 1.80 y 2.40m y unos 40m de profundidad, con capiteles en la losa de hasta 2.40m de espesor.

Se trataba de una obra de compleja ejecución (algunos de sus elementos, como las

This diagram illustrates the assembly of a multi-layer PCB. It shows the PCB with various components (resistors, capacitors, and integrated circuits) mounted on its top and bottom surfaces. The PCB is shown in an exploded view relative to a large, rectangular heat sink. Red dashed lines indicate the alignment and positioning of the components and the heat sink. The heat sink has a series of vertical fins on its bottom surface, which are shown in an exploded view relative to the PCB. The diagram is a technical illustration used to show the relationship between the PCB, its components, and the heat sink.

The diagram illustrates a cross-section of a tunnel structure with the following components and dimensions:

- Dimensions:**
 - Vertical spacing between RC Capping Beams: 1500 mm.
 - Vertical spacing between RC Waling Beams: 1500 mm.
 - Horizontal spacing between RC Waling Beams: 1200 mm and 1400 mm.
- Structural Components:**
 - SSLL 38.00 Roof Slab
 - 2500 Wide x 1500 mm Deep RC Capping Beam
 - Upper Intermediate Slab SSLL 38.25
 - 2500 Wide x 1500 mm Deep RC Waling Beam
 - D-Wall Installation Tolerance (±100)
 - Lower Intermediate Slab SSLL 37.20
 - 3500 Wide x 1500 mm Deep RC Waling Beam
 - HS2 Track Level
 - Base Slab SSLL 10.225
 - 1200mm RC Base Slab
 - 1800mm Thick D-Wall
- Other Features:**
 - RC Prop's
 - 1500mm Wide Maintenance Walkway (Typical) Level Varies
 - Carrier Drain
 - Pressure Relief Pipes
 - 900 Thick Void Former Zone
 - 300 Thick Drainage Layer
 - Toe Level -9.50

Para ello se trabajó en dos direcciones que llevaron al diseño final. Primeramente, era

2.1 Reducción de la longitud del pozo

2.2 Optimización estructural del pozo

1. Reducir la huella de carbono con la optimización del trabajo estructural
2. Minimizar la longitud, profundidad y espesor de las pantallas perimetrales
3. Simplificar la losa inferior
4. Reducir el número de puntales y aumentar su separación
5. Comprimir en lo posible el plazo de ejecución, ya que el pozo sirve para introducir una de las tuneladoras y es el pozo logístico para extraer las tierras e introducir las doveles de ambos túneles.

Alejandro Ramos et al / IX CONGRESO ACHE – GRANADA 2025 3

además de satisfacer los requerimientos estructurales normales (estabilidad, resistencia y capacidad de uso) atendiera a:

- Minimizar todo riesgo durante la construcción
- Satisfacer las exigentes condiciones de durabilidad
- Garantizar una vida útil de 120 años para los elementos estructurales primarios
- Asegurar un diseño respetuoso con el medio ambiente; en la referencia [2] se indica la mejora en relación a sostenibilidad que se ha logrado con este diseño.

- Incluir los requerimientos de resistencia frente al fuego y de robustez, que se comentarán más adelante

2. Diseño ejecutado

El diseño final de la estructura es el de un pozo multisecante formado por cinco células circulares de 38.5m de diámetro que se intersecan, dando lugar a la forma en planta de una oruga ("Caterpillar"), que es la denominación que se ha dado al pozo VRCB.

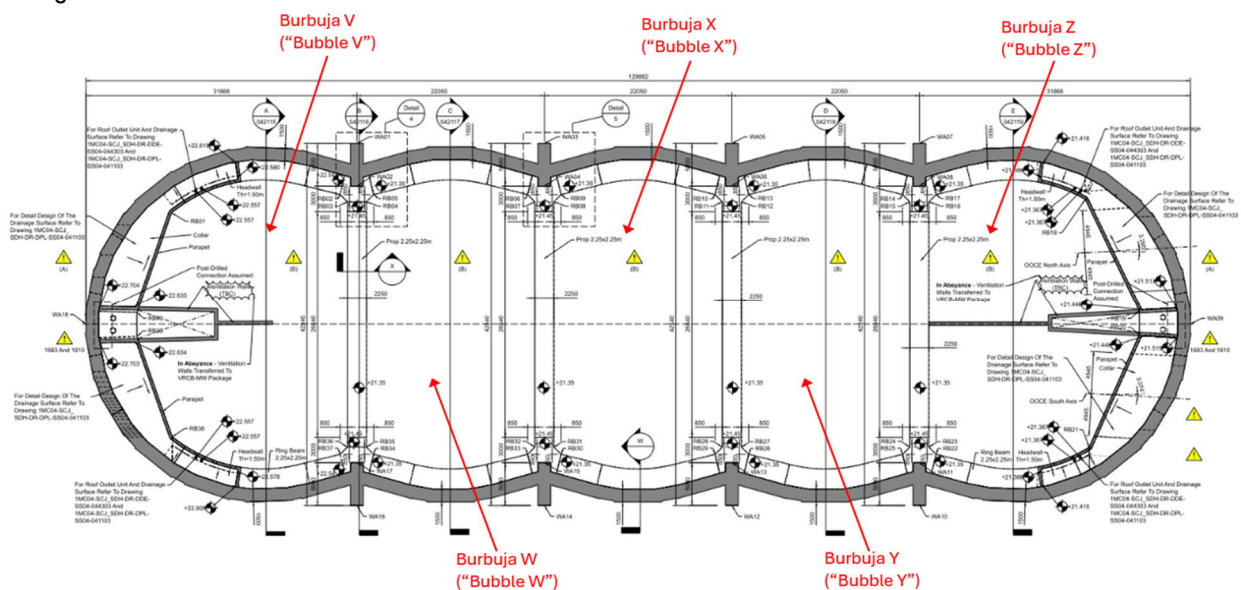


Figura 4. Planta del nivel intermedio de arriostramientos.

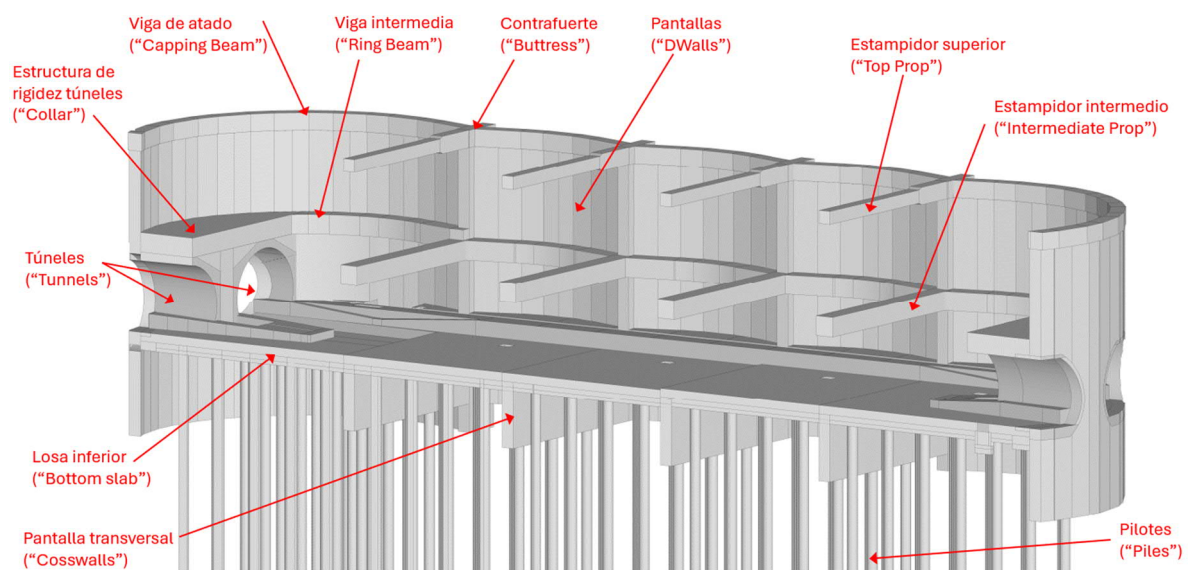


Figura 5. Esquema tridimensional con los elementos estructurales del pozo.

Las dimensiones en planta, a caras exteriores, son de 129.9m de longitud con un ancho variable entre 37.5m y 41.7m. Las pantallas se han reducido a un espesor de 1.50m y una profundidad de 32m en las células centrales (W, X e Y) y de 1.0m o 2.3m más profundas en las células extremas (Z y V).

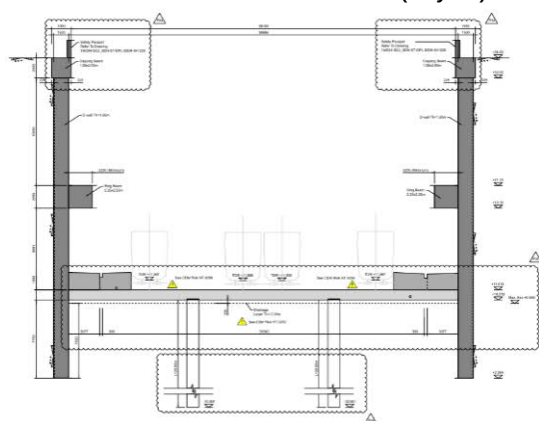


Figura 6. Sección transversal tipo diseñada por medio de una de las burbujas que componen el pozo

La losa inferior es de 1m de espesor constante con un sistema de drenaje inferior, pero sin células de alivio de presión. El sistema de arriostramiento se ha reducido a tan solo dos niveles de puntales (con unas dimensiones de 1.50m x 1.50m los superiores y de 2.25m x 2.25m los intermedios) y 4 puntales en cada nivel (con una separación de 22m en transversal entre puntales).

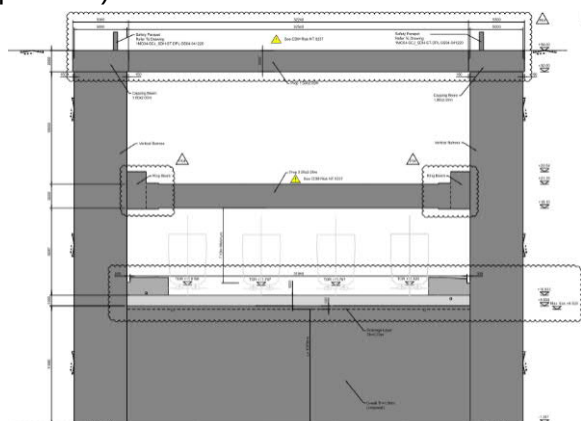


Figura 7. Sección transversal tipo diseñada por los contrafuertes.

El número de pilotes se ha incrementado mínimamente a un total de 77, pero se ha

reducido considerablemente tanto su diámetro, que pasa a 1.20m, como su longitud que se queda en 20m por debajo de la losa de cimentación.

Las pantallas han sido ejecutadas con una pantalladora normal y bataches de tres mordiscos. Todas ellas mediante el empleo de lodos bentoníticos que aseguran la estabilidad de las zanjas durante la construcción, y con junta wáter-stop entre los diferentes bataches de cara a asegurar los requisitos de impermeabilidad exigidos.

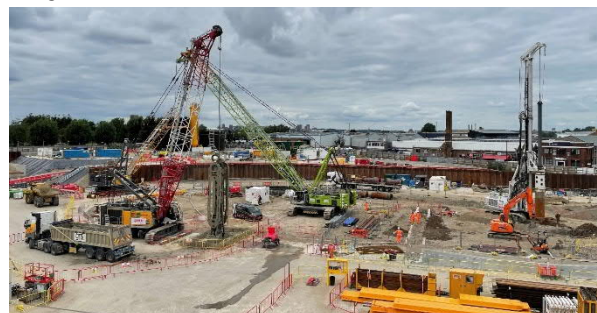


Figura 8. Imagen general de la obra durante la ejecución de las pantallas.

Con esta solución, el trabajo de la estructura pasa de movilizar la flexión vertical, como es lo común en una caja rectangular con pantallas, a movilizar un sistema principalmente de fuerzas horizontales de tubo en compresión, ayudado por una mínima flexión vertical, como un pozo circular, mejorando así el desempeño estructural de las pantallas. Para ello es necesario asegurar el equilibrio de las fuerzas horizontales en la intersección de cada una de las células circulares que forman el pozo. Como se esquematiza en la siguiente figura, las compresiones circunferenciales deben equilibrarse con una reacción en dirección transversal al eje longitudinal del pozo. Para ello se disponen en estas intersecciones los puntales que recogen estos esfuerzos; pero dichos puntales son elementos puntuales, al tener que dar continuidad longitudinal al paso de los trenes. El primero dispuesto a cota superior y el otro tan abajo como permite el paso de los trenes. En la parte inferior, la losa permite el arriostramiento transversal de las pantallas.

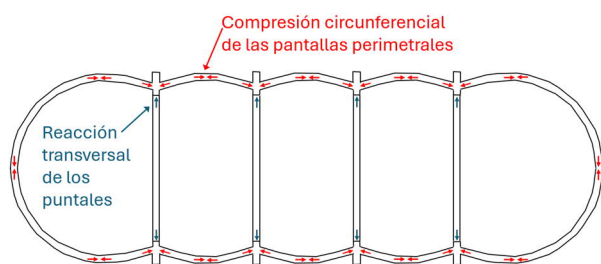


Figura 9. Planta de la estructura indicando los esfuerzos de compresión circunferenciales y el axil de compresión en los puntales intermedios.

Durante la construcción, el cierre de estos circuitos de esfuerzos se logra por medio de unas pantallas transversales (“Crosswalls”) que se demuelen conforme se excava, y que solo en la parte inferior, bajo la losa, se quedan como definitivas.

El problema al que se llega en la solución definitiva es que las compresiones circunferenciales se desarrollan en las pantallas de forma continua en toda su altura, mientras que los apoyos transversales son puntales, por lo que es necesario un elemento que recoja la flexión que se produce en vertical.

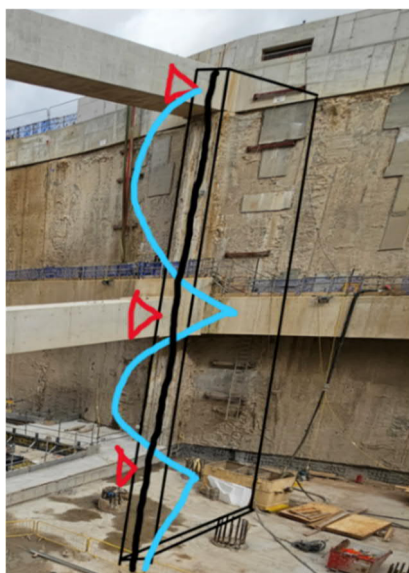


Figura 10. Imagen indicando sobre una fotografía del contrafuerte el trabajo como viga vertical trabajando a flexión apoyada en los puntales y la losa inferior.

Para ello se han dispuesto unos bataches de pantalla dispuestos transversalmente (con 5.00m de anchura y 1.50m de espesor) que trabajan como vigas recogiendo la carga

circunferencial transversal y llevándola por flexión vertical hasta los puntales y la losa inferior. Estos bataches, además de la conexión con los puntales transversales, incluyen el arranque de los tramos circunferenciales, dando lugar a un batache especial con forma de pie de pájaro que se muestra en la figura 11.

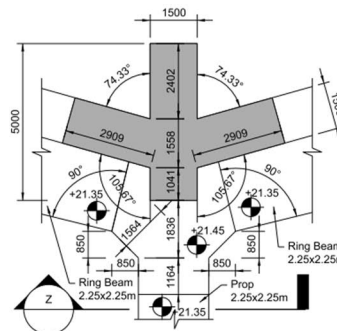


Figura 11. Planta del contrafuerte con su forma de pie de pájaro.

Se trata de elementos fuertemente armados dado su trabajo como viga. En ellos ha sido necesario cuidar el diseño para lograr que las armaduras dispuestas fueran acordes a los requerimientos constructivos de las pantallas. Como se verá más adelante en la presente comunicación, ha sido necesario un proceso de construcción algo más complejo y menos habitual que el de una pantalla convencional.

Otro elemento singular es la estructura dispuesta en las zonas en las que se realiza el hueco de paso de los túneles en ambos extremos ("Collar"). Se han diseñado unas estructuras que reconducen los esfuerzos circunferenciales asegurando el equilibrio del sistema global.

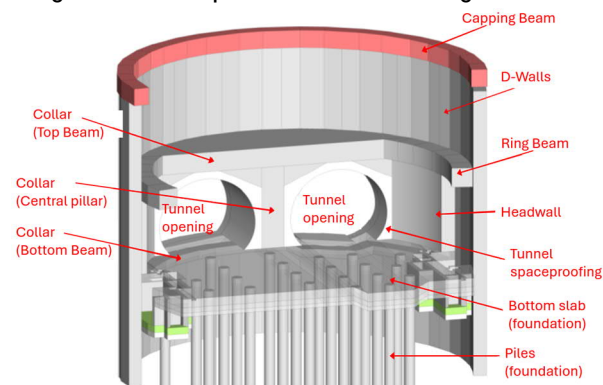


Figura 12. Esquema tridimensional de la estructura alrededor de los huecos de los túneles.

Se trata de unos muros (“Headwall”) que se ejecutan entre la losa inferior (“Bottom slab”) y la viga de atado intermedia (“Ring Beam”) y que ayudan a reconducir las compresiones circunferenciales hacia esta viga, que se hace de mayor ancho en la zona de los túneles (“Collar Top Beam”) y el borde de la losa inferior en el que también se dispone de una zona de mayor rigidez (“Collar Bottom Beam”). Entre ambos túneles se dispone un pilar central (“Collar Central Pillar”). Los túneles se embeben en esta estructura con un machihembrado y contra ella se cierra su impermeabilización.

Se ha requerido una atención especial en el diseño para el paso del esfuerzo rasante que se produce entre las pantallas y los headwalls al transferir los esfuerzos circunferenciales. Tras abordar diferentes soluciones como insertos metálicos, demoliciones parciales para ejecutar juntas en cola de milano u otras alternativas, se optó por la que constructivamente parecía más sencilla en base a barras transversales con acopladores mecánicos. La dificultad residió en llegar a una solución construible dado el número de barras necesarias, manteniendo las separaciones mínimas para no generar un problema de ejecución de las pantallas.



Figura 13. Zona del *headwall* tras descubrir los acopladores mecánicos previstos y tras la ejecución.

Otros elementos que han requerido un especial estudio durante el diseño han sido los puntales. En este caso se trata de elementos importantes, pues son los que equilibran el sistema, sus esfuerzos son altos y tienen unas dimensiones considerables. Como una medida de robustez, durante la fase de diseño se

consideró que la estructura fuera capaz resistir aunque uno de los puntales perdiera un 50% de rigidez mediante la redistribución de esfuerzos, pero sin considerar plastificaciones.

Otros dos aspectos del diseño de los puntales que caben ser destacados se incluyen a continuación. Primero, la resistencia frente al fuego, ya que si un tren se incendia justo debajo de ellos el calor que les llega obliga a considerar la degradación de la rigidez de su sección. Además, al tratarse de un elemento estructural fuertemente hiperestático, se generan unos esfuerzos inducidos en el resto de la estructura que deben considerarse por la curvatura y la deformación longitudinal que el fuego provoca en el puntal. Se trata de un problema no lineal y evolutivo en el tiempo que puede abordarse de forma simplificada pues se llegaría a un problema de sobredimensionamiento del diseño que complicarían en exceso la ejecución. Además del análisis estructural, en la referencia [3] se detalla el estudio térmico y análisis de riesgo que se ha realizado.

Segundo, el proceso de ejecución y las restricciones que aseguren que no se produce un exceso de compresiones debidas a su hormigonado en situación de mínima temperatura ambiental. Se estudió el rango óptimo de temperaturas para no penalizar su dimensionamiento y no condicionar excesivamente el proceso de construcción.

Otras de las medidas encaminadas a asegurar la robustez del sistema son:

- consideración en el cálculo de cargas asimétricas y estudio de sensibilidad en las condiciones geotécnicas del contorno;
- incorporación de la viga de rigidez intermedia (“Ring Beam”) que permite que el trabajo de las pantallas perimetrales sea tanto circunferencial como por flexión vertical.

Como se ha descrito, se trata de una solución de pozo que, aunque no es la primera vez que se emplea en experiencias internacionales, se ha adaptado a los condicionantes específicos del proyecto para

lograr el óptimo no solo estructural sino también constructivo. Algunas de las singularidades específicas propias de esta obra son:

- 1) se trata de un pozo permanente para una vida útil de 120 años,
- 2) se queda abierto en su totalidad en situación definitiva,
- 3) ha resultado satisfactorio para asegurar los requerimientos de impermeabilidad del recinto perimetral.

Ha representado una reducción de la huella de carbono de aproximadamente el 50% respecto a la solución original del proyecto de referencia.

3. Sistema constructivo

A continuación, se detalla el proceso constructivo implementado:

1. Ejecución de los muros guía, y de las pantallas perimetrales, las transversales y los contrafuertes.
2. Ejecución de los pilotes dejando relleno con grava la parte superior que posteriormente se excavará.
3. Ejecución de la viga de atado superior de las pantallas y los puntales transversales.
4. Excavación hasta el primer nivel de puntales. Las pantallas transversales se demuecen conforme se va excavando.
5. Ejecución de la viga de atado intermedia y los puntales a dicha cota.
6. Excavación hasta el nivel inferior.
7. Ejecución de la losa y del sistema de drenaje inferior.
8. Realización de los headwalls y la segunda fase de las estructuras de cierre de los túneles (pilar central).
9. Apertura de los huecos de los túneles y ejecución de éstos.

En el momento de redactar la presente comunicación los túneles de ambos extremos han sido abiertos y la estructura se encuentra concluida a falta de acometer los acabados una vez se finalicen los túneles.

Se pueden desatacar tres aspectos que parecen relevantes del proceso de ejecución

finalmente desarrollado y que se expondrán a continuación.

1. Ejecución asimétrica de la excavación y ejecución por fases de la estructura longitudinal
2. Ejecución de la estructura de cierre de los túneles en dos fases
3. Sistema constructivo para la ejecución de los contrafuertes

3.1 Excavación asimétrica

En las primeras fases de diseño se había considerado que la excavación de las cinco burbujas se ejecutaría de forma simétrica bajando todas a la vez. Sin embargo, durante la construcción surgió la necesidad de que la burbuja inicial estuviera terminada cuando llegara la TBM.

Para no alargar el plazo de ejecución, se decidió que el proceso de excavación sería asimétrico. Para ello se permitía un salto de 4m entre celdas, funcionando las pantallas transversales temporales como sistema de contención. Los diferentes elementos de arriostramiento (viga de atado superior y puntales superiores, viga de atado intermedia y puntales intermedios, o losa inferior) se ejecutaron por fases en longitudinal, como se indica en la siguiente figura.

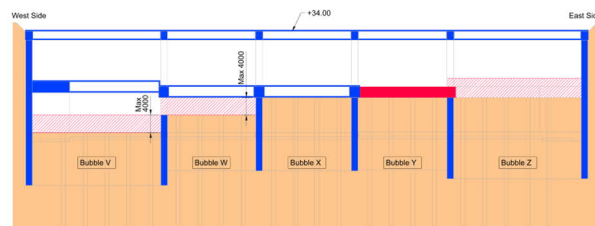


Figura 14. Esquema del proceso constructivo ejecutado en el que se muestra la excavación asimétrica longitudinalmente y cómo los elementos se hace de forma secuencial.

Lógicamente, esto provoca esfuerzos asimétricos que han tenido que ser considerados, y para lo que se tuvo que evolucionar el modelo de cálculo inicial, basado en un sistema que trabaja perfectamente ante cargas simétricas.



Figura 15. Momento durante la excavación en el que se puede observar cómo en cada burbuja las retroexcavadoras están a un nivel distinto.

3.2 Ejecución de la estructura de cierre de los túneles

En una primera fase de diseño se había propuesto una sección evolutiva de esta viga de forma que no quedara completamente colgada de las pantallas. Para ello se previó la ejecución previa de una sección mínima al bajar, que luego se recrecía para completar la sección de ancho completo. Además, se había diseñado un entronque de manera que los túneles acometieran en perpendicular para facilitar la ejecución del cierre.

Se han realizado dos mejoras constructivas destacables. Por una parte, el ancho de la estructura de cierre se ha modificado, haciéndola variable entre 2.25m de ancho mínimo y 4.50m de ancho máximo en la sección del pilar central. De esta manera, el eje de la estructura de cierre no queda perpendicular a los ejes de los túneles, pero esto no es una afección grave.

Por otra parte, para evitar esa segunda fase de ejecución de la sección transversal, se buscó una solución que no colgara toda la carga de la viga de las pantallas. Para ello se ejecutaron en cada extremo del Caterpillar dos pilotes de 600mm de diámetro con unos 20m de profundidad (10m entre las vigas de atado y 10m bajo la losa de cimentación). Estos pilotes se ejecutaron desde la cota de excavación intermedia, antes de hormigonar la viga, y servían como apoyo vertical para no cargar las

pantallas. Los pilotes se quedan embebidos en el pilar definitivo.

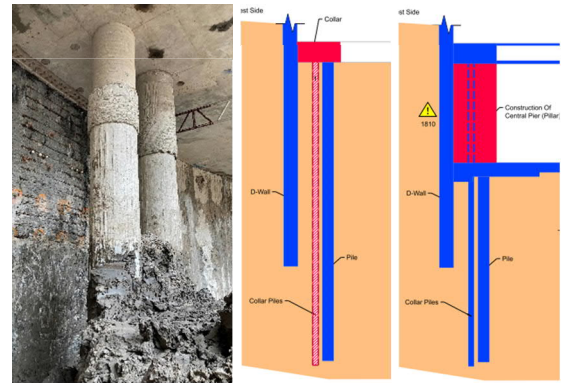


Figura 16. Izquierda imagen de los pilotes ejecutados. Centro etapa de ejecución de los pilotes. Etapa de ejecución del pilar central.

3.3 Sistema de ejecución de los bataches de los contrafuertes

El sistema para ejecutar los bataches de pantallas es el habitual para estos elementos (excavación, introducción de las armaduras en la zanja y hormigonado con tubo tremie). Para ello es normal que las jaulas de las armaduras de las pantallas se acoplen en vertical con los diferentes solapes necesarios para minimizar los medios de elevación necesarios. Esto no es un problema para las pantallas perimetrales, en las que el peso a elevar en cada jaula, repartido en tres módulos, no es excesivo.

Sin embargo, los contrafuertes son paneles fuertemente armados dado que sus esfuerzos de flexión son grandes, y en los que es necesario garantizar que tengan continuidad en toda su dimensión. Se llega de esta forma a jaulas de armado que para toda su longitud alcanzan unas 85t de peso. La elevación de estas pesadas jaulas conlleva dos problemas constructivos:

- No se pueden ejecutar en tramos verticales cortados dado que el empalme en vertical de las capas interiores de armadura es un problema de Seguridad y Salud para los trabajadores y es descartado para evitar cualquier riesgo
- La ejecución en un solo tramo continuo conlleva la necesidad de hacerlo en la propia obra (y no en una factoría y traer la jaula

premontada como con las pantallas habituales). Para no sobredimensionar la armadura de rigidización de la jaula, el equipo de obra propuso una solución con una estructura auxiliar exterior tipo celosía que permitía elevar la jaula completa y girarla sin tener que incluir mucha más armadura que la estricta por diseño.

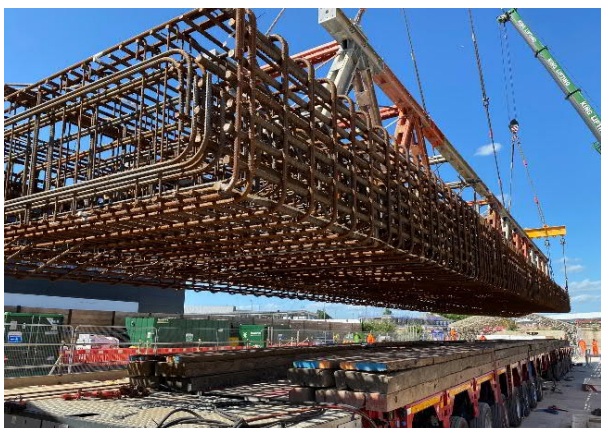


Figura 17. Momento de elevación de la jaula de armadura para situarla en los carros de transporte.



Figura 18. Elevación de una jaula completa de armadura de un contrafuerte con la ayuda de una celosía de rigidización exterior. Imagen tomada de: [HS2 video oficial](#).

3. Conclusiones

Se ha presentado una estructura subterránea singular en la que, tanto en la fase de diseño como durante su ejecución, se ha buscado llegar a una solución óptima desde los puntos de vista estructural y constructivos. Se han detallado algunos de los aspectos que han ayudado a lograr que la construcción se haya desarrollado sin problemas significativos.



Figura 19. Imagen general con la estructura en funcionamiento dado servicio para la ejecución de los túneles. Imagen tomada de: [HS2 video oficial](#).

Agradecimientos

Los autores de la comunicación quieren agradecer al equipo de la Design House (TYP-SA-Arup-Strabag) que ha participado en el proyecto, tanto desde la fase de diseño como en la de acompañamiento a la obra, su apoyo y dedicación durante todo su desarrollo. Asimismo, se extiende el agradecimiento al equipo involucrado en la obra (Skanska-Constain-Strabag) por habernos hecho partícipes de tan singular proyecto y por sus comentarios de cara a mejorar y facilitar la construcción. Y finalmente al equipo de HS2 que ha sido el motor imprescindible para el desarrollo del proyecto y de la obra.

Referencias

- [1] S. Kanaris, "Caterpillar shaft saves carbon and space on HS2's west London site", *New Civil Engineer*, London, 2023.
- [2] I. Navarro, A. Ramos, J.M. Lorenzo y J.L. Sánchez, "Sustainability as a key design factor from the structure conception stage", *IABSE Symposium*, Manchester, 2024.
- [3] P. Woodburn, M- Deevy, I Wang, J. Zhu, N. Hoffman and M. Boyd, "Train fire spalling risk assessment", *High Speed Two (HS2): Infrastructure Design and Construction (Volume 1)*, Institution of Civil Engineers, 2021, 193-215.