

Soluciones innovadoras en el cruce de túneles y estaciones L5 Metro Riyadh

Innovative solutions for tunnel and stations crossing L5 Metro Riyadh

Víctor TORRALBA MENDIOLA

Ing. de Caminos, Canales y Puertos
Bridge Technologies SL
Director de Proyectos
victor.torralba@btechno.es

Ángel GARCÍA-FONTANET MOLINA

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos
PRO Geo Consultores
Director
agfm@progeo-cga.com

Didac PLANA AGUILAR

Ingeniero Geólogo
FCC Construcción
FAST L5 Geotechnical Manager
DPlanaA@fcc.es

David Pérez Ayuso

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FCC Construcción
FAST L5 Stations Site Manager
DPerezA@fcc.es

Gonzalo RAMOS SCHNEIDER

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña
Catedrático de Universidad
gonzalo.ramos@upc.edu

Tomás ARRANZ MARCO

Ing. de Caminos, Canales y Puertos
FCC Construcción
FAST L5 Construction Manager
TArranzM@fcc.es

Javier AINCHIL LAVIN

Ing. de Caminos, Canales y Puertos
FCC Construcción
FAST Design and Construction Manager
JAinchil@fcc.es

RESUMEN

Uno de los principales problemas cuando se construye una línea de metro mediante una tuneladora es coordinar la ejecución del túnel con la ejecución de las diversas estaciones que va a atravesar. La velocidad de perforación del túnel varía respecto a la prevista, pudiéndose dar el caso de alcanzar las estaciones antes de su completa excavación. En esta comunicación se presenta una solución para este problema que se ha implementado en la L5 del metro de Riyadh. Esta solución permite ejecutar el túnel y posteriormente excavar la estación manteniendo la operatividad de la tuneladora.

ABSTRACT

One of the main problems when constructing a metro line using a tunnel boring machine (TBM) is to coordinate the execution of the tunnel with the execution of the different stations that it will cross. The drilling speed of the tunnel varies from the predicted one, being possible to reach the stations before their complete excavation. This paper presents a solution to this problem that has been implemented in the Riyadh metro L5. This solution allows to execute the tunnel and later to excavate the station maintaining the operation of the TBM.

PALABRAS CLAVE: túnel, tuneladora, dovelas

KEYWORDS: tunnel, TBM, segments

1. Introducción

La Línea 5 del Metro de Riyadh (Arabia Saudí) pertenece al paquete adjudicado al Consorcio FAST, del cual es socio FCC Construcción. Dicha línea la está construyendo un equipo de FCC y consiste en un túnel mediante TBM y una serie de estaciones construidas a cielo abierto. Esta comunicación se centra en la problemática surgida en el cruce entre túnel y estaciones. Gracias a la magnífica progresión del túnel, que ha merecido incluso un premio internacional (TBM Team Award 2016), éste alcanzó las estaciones en fechas anteriores a las previstas en el planning, por lo que las pasó en lleno, es decir, antes de haberlas excavado. Por ello, se planteó el problema de intentar simultanear los trabajos en el túnel y, en consecuencia, mantener el sostenimiento de dovelas, a la vez que se excavaba la estación y se iniciaba la ejecución de su estructura interior.

Esta comunicación presenta la problemática surgida, la solución adoptada y los análisis desarrollados para su completo diseño.

2. Problemática

En las estaciones 5A2, 5A3, 5A5, 5A6, 5B1, 5B2 de la L5 del metro de Riyadh la velocidad de avance de la TBM, superior a la prevista, hizo que ésta alcanzara las estaciones cuando éstas aún no habían completado su excavación. Las alternativas eran dos:

- a. Parar la tuneladora hasta completar la excavación de esas estaciones para poder pasarlas en vacío y así permitir ir ejecutando la estructura interior de la estación mientras se completaba el túnel. Esta alternativa tenía unos costes en términos económicos y de plazo muy elevados que la hacían inviable.
- b. Pasar las estaciones en lleno, lo que según las condiciones de proyecto impedía proseguir la excavación de las estaciones y debía dejarse el terreno como mínimo 3 m por encima de la clave del túnel hasta la finalización de éste. Obviamente, esta solución también tenía costes económicos y de plazo inviables.

En consecuencia, el reto consistía en compatibilizar la excavación de las estaciones mientras se mantenía el túnel operativo en construcción, lo cual suponía un reto técnico importante. En la figura 1 se muestra cuál es el procedimiento constructivo en que se compatibiliza la ejecución del túnel con la de la estación.

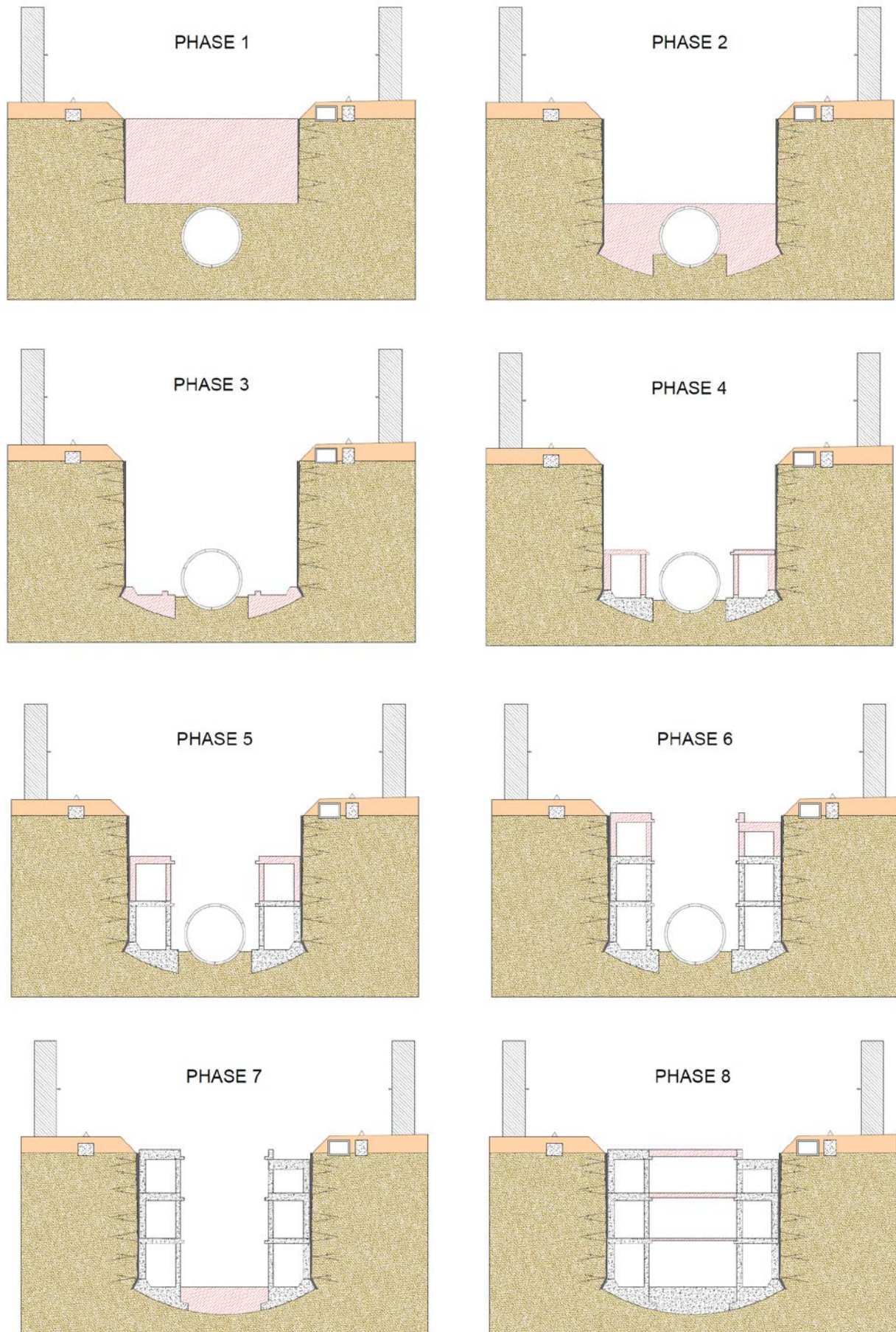


Figura 1. Fases Constructivas de túnel y estaciones

Como es bien sabido, los sostenimientos de dovelas funcionan por forma gracias al confinamiento que les proporciona el terreno circundante. En el caso de excavar alrededor del túnel y dejar el sostenimiento “al aire”, éste es un mecanismo que colapsa. En consecuencia, era imprescindible hacer estable ese anillo de forma provisional, y evolutiva (pues se puede llegar a él conforme se excava) y sin interferir en todas las instalaciones y tráfico interior inherente a la ejecución del túnel.

El túnel está formado por anillos de 7 dovelas, con diámetro interior de 8,70 m, espesor de dovela de 350 mm y una longitud media de anillo de 1,60 m. Existen 19 posiciones distintas del anillo. Son anillos de hormigón armado, con una armadura de base de 11 Φ 12 por dovela (1,60m).

Se adoptaron dos soluciones, una primera solución puramente estructural, y una segunda solución con interacción geotécnica que aún simplificaba más la ejecución.

3. Diseño de la primera solución

Dados los condicionantes, se pensó en diseñar una solución estructural, que confiriera estabilidad a los anillos y que se pudiera ejecutar totalmente por el trasdós, sin interferir en los trabajos del túnel.

La condición de mecanismo de un anillo de dovelas viene marcada por la existencia de las juntas radiales, o también llamadas longitudinales. Las juntas circunferenciales separan los anillos, pero no representan un problema pues si se asegura la estabilidad de cada anillo por separado el conjunto también es estable. Esas juntas radiales presentan uniones con pernos (fig. 2). Los pernos son elementos provisionales para montaje, que nunca se consideran como elementos resistentes, y que normalmente siempre se retiran. Sin embargo, en este caso la presencia de los pernos era muy positiva, pues confería una cierta capacidad resistente frente a flexión de las juntas, no comportándose como articulaciones puras. Esa capacidad es la que permite ir excavando por etapas sin el colapso del anillo, a pesar de que al no existir ningún axil ni coacción lateral, en cuanto se tienen 3 juntas al aire se tiene un mecanismo.

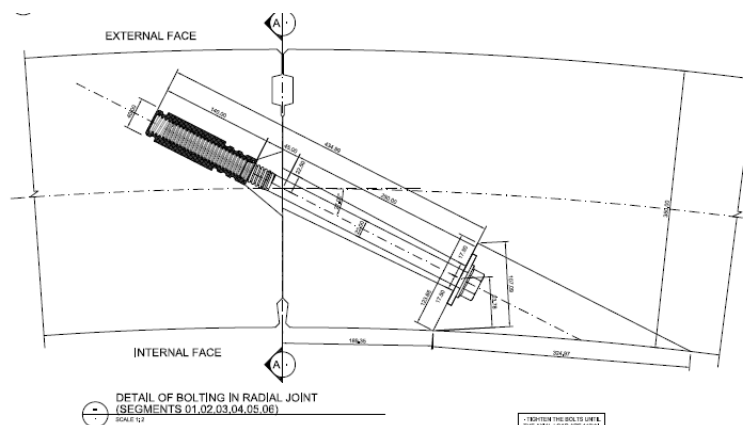


Figura 2. Perno en junta radial.

La modelización se realizó mediante el software SAP2000, analizándose la estructura como evolutiva mediante la opción “nonlinear staged construction analysis”. El modelo era de un solo anillo, pero en tres posiciones, la 1, la 6 y la 12 que eran, tras un análisis inicial, las pésimas, al situar la dovela llave en clave, en el diámetro horizontal y en su posición inferior (ver figura 3).

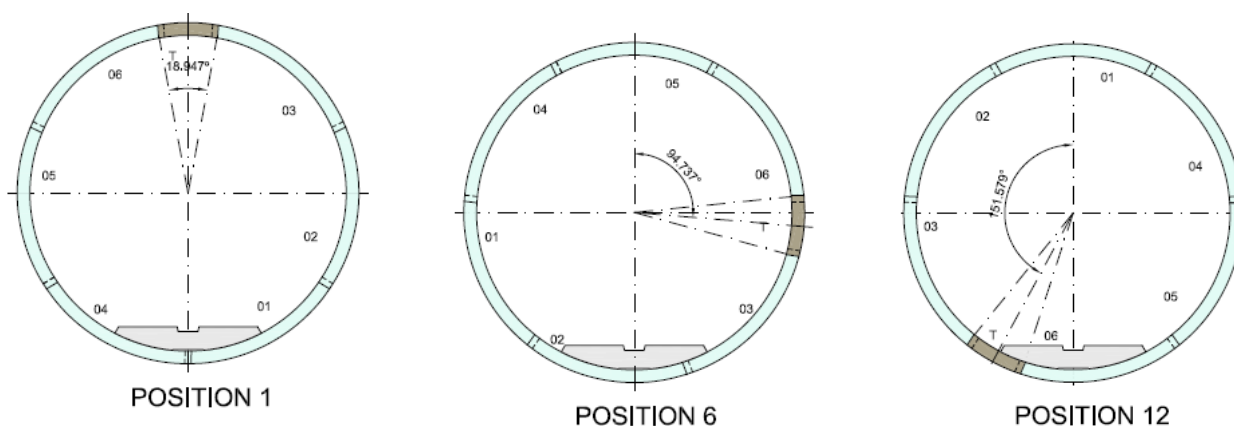


Figura 3. Posiciones del anillo de dovelas.

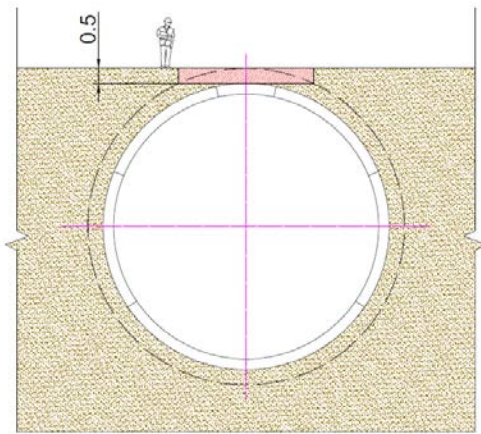
La roca en la que está ejecutado el túnel es una caliza meteorizada, con un módulo de balasto horizontal de 200000 kN/m^3 y vertical de 300000 kN/m^3 . En el modelo el terreno se modeliza mediante muelles no lineales que funcionan sólo en compresión. Para las juntas se introdujo la rigidez a flexión correspondiente al conjunto junta-perno obtenida a partir de un análisis momento-curvatura. Dadas las incertidumbres siempre inherentes a los coeficientes de balasto, también se realizó un análisis de sensibilidad del módulo horizontal, que es el que realmente influye en el problema, adoptándose valores extremos de 50000 kN/m^3 y de 1000000 kN/m^3 . Los muelles se van retirando conforme el terreno se va excavando.

En cuanto a las acciones consideradas, además del peso propio de la estructura de dovelas se consideró una carga puntual en clave de 4.45 kN , una sobrecarga correspondiente a maquinaria que se desplazara junto al túnel de 20 kN/m^2 , un coeficiente de empuje activo del terreno de $0,217$ y las acciones del tren de suministros del túnel. Se consideraron hipótesis no simétricas de sobrecarga de maquinaria. Además, en el estado ya totalmente excavada, cuando conviven túnel y estación en construcción, de cara a considerar posibles impactos, se aplicó una carga accidental vertical de 100 kN en clave de túnel y otra horizontal de 100 kN a la altura del diámetro horizontal, produciendo ovalización del anillo. Todas las cargas se han mayorado según EC2.

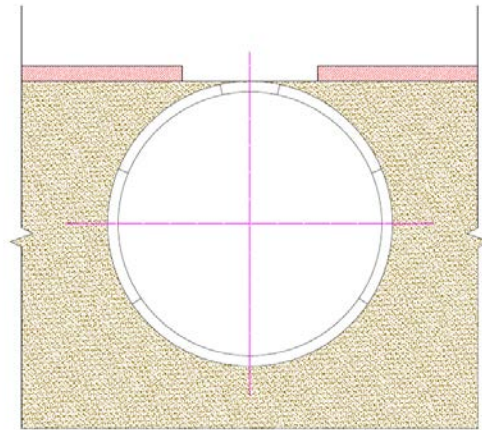
En una primera fase se verificó si se podía excavar la totalidad del túnel, sólo dejando una pequeña cama de apoyo, gracias a la presencia de los pernos que fijaban, parcialmente, las juntas. En ese primer análisis ya se vio que esta solución no era posible, pasándose a otra propuesta en la que las juntas se van reforzando conforme se va excavando.

Así, el procedimiento estudiado es el que se muestra en la figura 4.

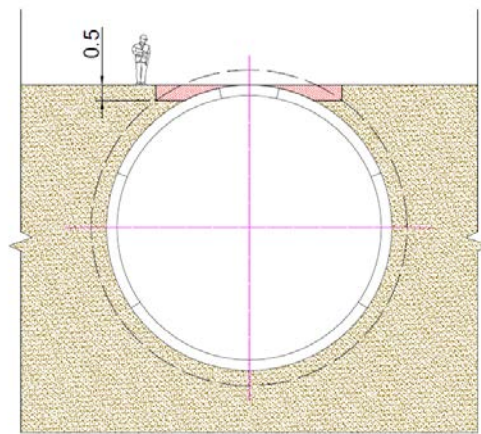
Dado que las juntas sólo se podían reforzar desde el trasdós, pues en el interior del túnel existían las instalaciones de la tuneladora, más el tráfico de suministros, no pudo realizarse un único tipo de refuerzo. El refuerzo más sencillo es el que corresponde a las juntas sometidas a un momento negativo, o sea aquéllas que se abrirían por el trasdós. En ese caso se diseñó una chapa anclada mediante pernos con epoxy. Las dimensiones de la chapa son considerables pero es de pequeño espesor, dado que la escasez de armadura hacía que para transmitir la tracción de la chapa a las dovelas se tuviera que movilizar la práctica totalidad de la armadura (Figura 5).



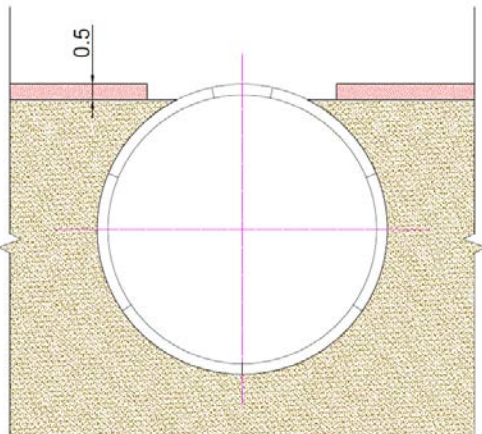
Zanja en clave, medios ligeros para retirar la inyección del gap



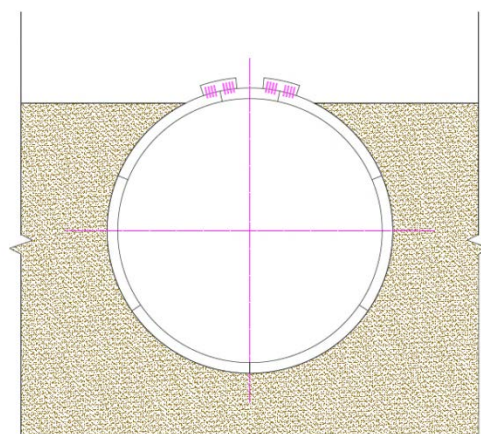
Excavación de una tongada de 0,5 m



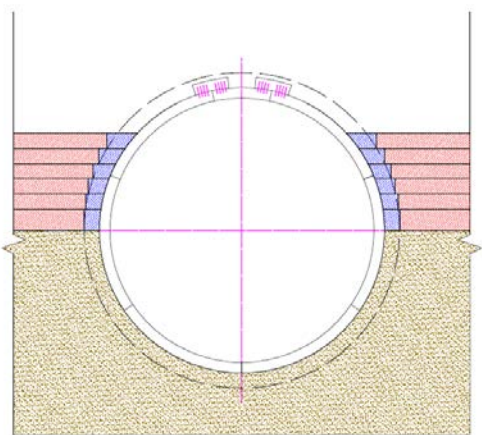
0,5 m de excavación sobre clave con medios ligeros



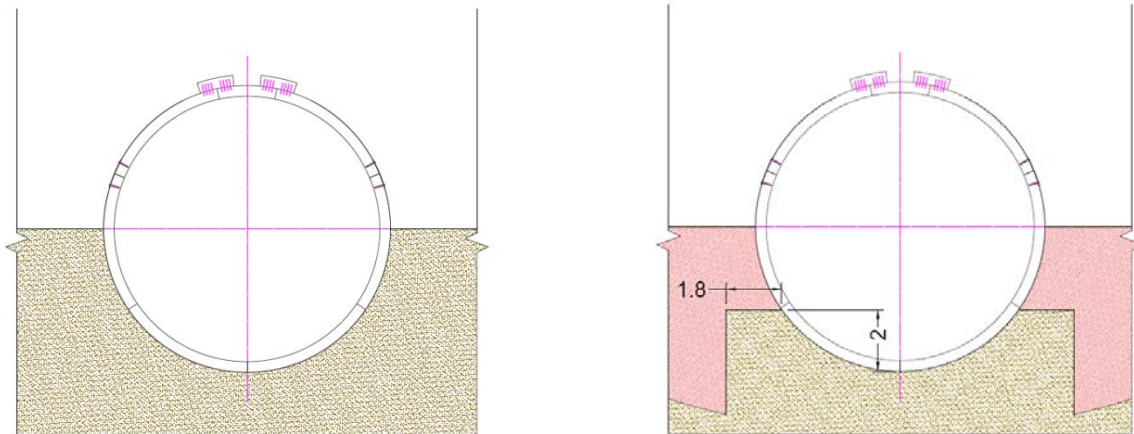
Excavación de una tongada de 0,5 m



Ejecución de refuerzos de las juntas descubiertas



Sucesivas excavaciones de 0,5 m de espesor hasta el diámetro horizontal



Ejecución de refuerzos en las juntas descubiertas

Excavación dejando una cuna de soporte del túnel

Figura 4. Proceso de excavación de la estación a la cota del túnel

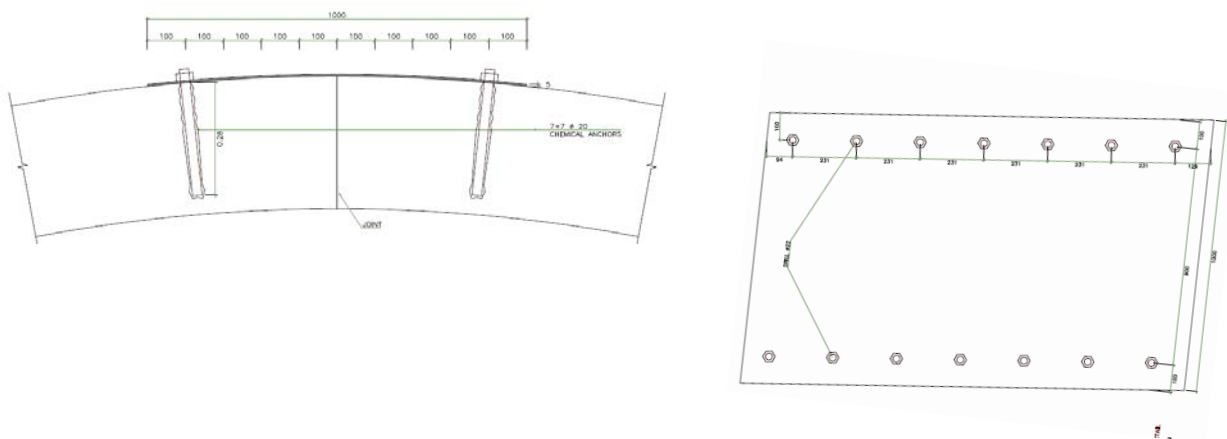


Figura 5. Refuerzo de trasdós mediante chapa de acero

En el caso de las juntas con momento positivo, dada la imposibilidad de colocar la chapa por el intradós, se diseñó un bloque de hormigón, conectado mediante armadura con epoxy a las dovelas existentes, que permite el empotramiento parcial de la junta (Fig. 6).

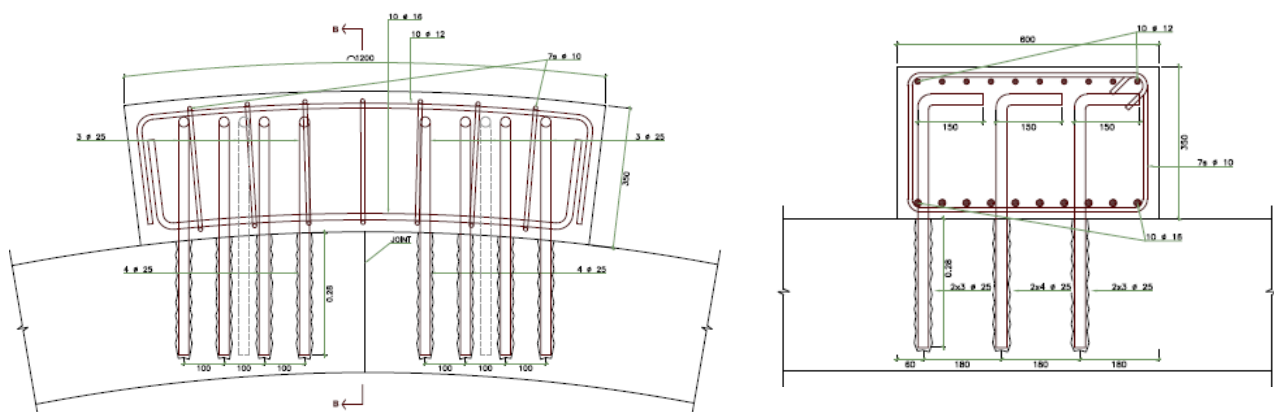


Figura 6. Refuerzo de trasdós mediante bloque de hormigón

Para saber el tipo de refuerzo de cada junta se estableció, a partir del estudio de las diferentes configuraciones de anillo, un sencillo criterio que funcionaba en todos los casos y que era que las juntas incluídas en el arco correspondiente a 90° con centro en clave, todas las juntas se debían reforzar con bloques, mientras que el resto se reforzarían con chapa.

Otra zona sensible es la de transición entre estación y terreno, pues el túnel está confinado en el terreno, manteniendo la forma, mientras que en la zona de estación ovaliza ligeramente. Para determinar si existía algún posible problema se realizó un análisis en 3D, del cual se muestran resultados en la figura 7. La conclusión fue que los esfuerzos se podían resistir perfectamente y que los cortantes se podían transferir a través de los biconos.

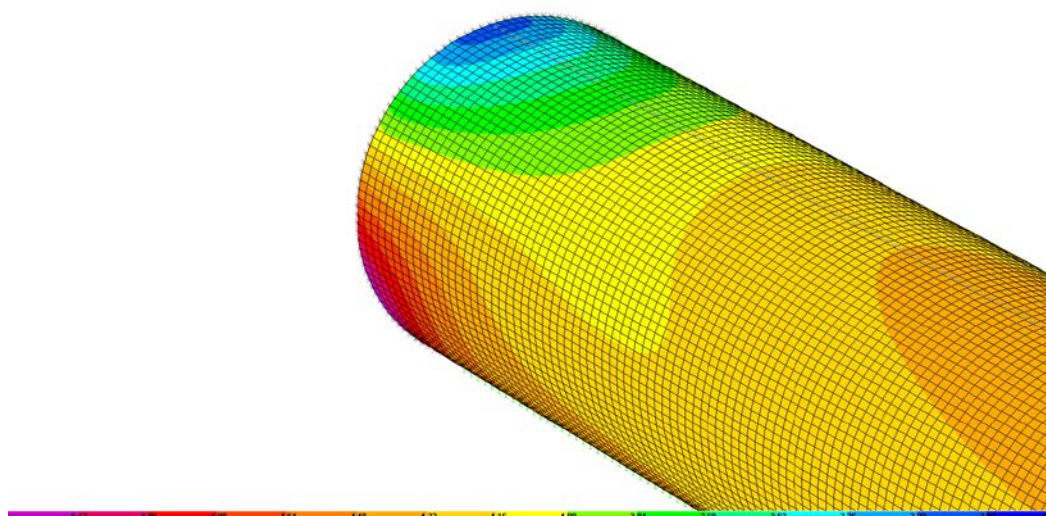


Figura 7. Cortantes en ELU en zona de transición

Finalmente se realizó una comprobación de la estabilidad de la cama de soporte del túnel mediante un análisis por elementos finitos con Plaxis (ver Figura 8).

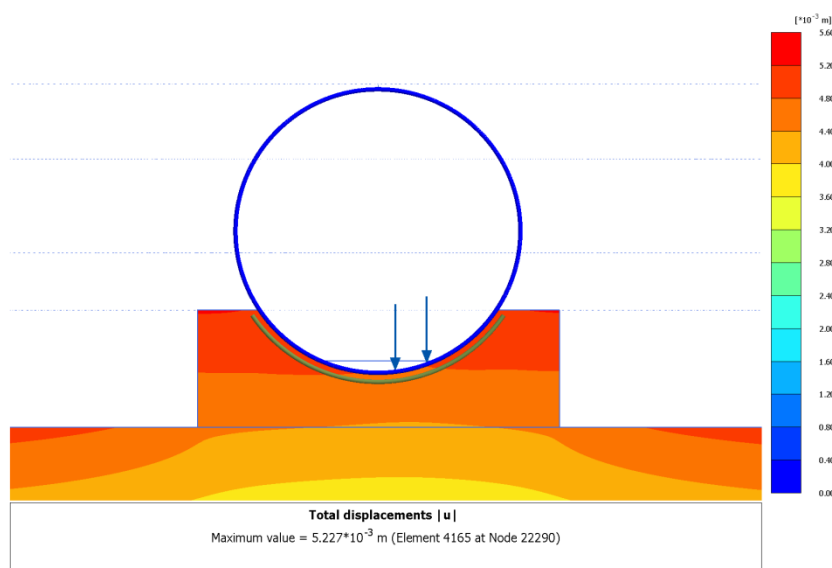


Figura 8. Desplazamientos totales al paso de un tren de suministro

La solución se implantó con gran éxito (figuras 9 y 10). En la figura 9a se muestra una fase inicial donde se está descubriendo la clave del túnel.



Figura 9. Descubrimiento de la clave del túnel y excavación



Figura 10. Ejecución de solera y de estructura interior de la estación

4. Diseño de la segunda solución

La solución anteriormente descrita fue un éxito absoluto, sin embargo la ejecución paulatina de todos los refuerzos de las dovelas consumía un tiempo apreciable. Además, durante la excavación se comprobó que la roca tenía unas muy buenas condiciones geomecánicas que podían ser aprovechadas. Tal como se indicaba en un punto anterior, el comportamiento de un anillo es adecuado cuando se encuentra convenientemente confinado. Siguiendo esa idea, si era posible determinar el espesor mínimo de roca a mantener alrededor del anillo para que éste sea estable, podíamos ahorrarnos los refuerzos perdiendo, eso sí, un poco de espacio para ir ejecutando la estructura de la estación. Además, se decidió proceder a la excavación con grandes zanjadoras que debían poder cruzar por encima del túnel y para ello se planteó excavar la estación de forma asimétrica.

En este caso el modelo tenía que ser geomecánico, incorporando el túnel de dovelas, y se realizó con el conocido software Plaxis. La figura 11 muestra los desplazamientos (zanjadora excéntrica) y los momentos flectores en el anillo (zanjadora centrada) en una fase intermedia de excavación. También se tuvieron en cuenta 3 posiciones del anillo de dovelas y se verificaron las dovelas a flexocompresión. Incluso se estudió la posibilidad de dejar una rampa sobre el propio túnel, de forma que no interfiriera con la ejecución de la estructura de la estación.

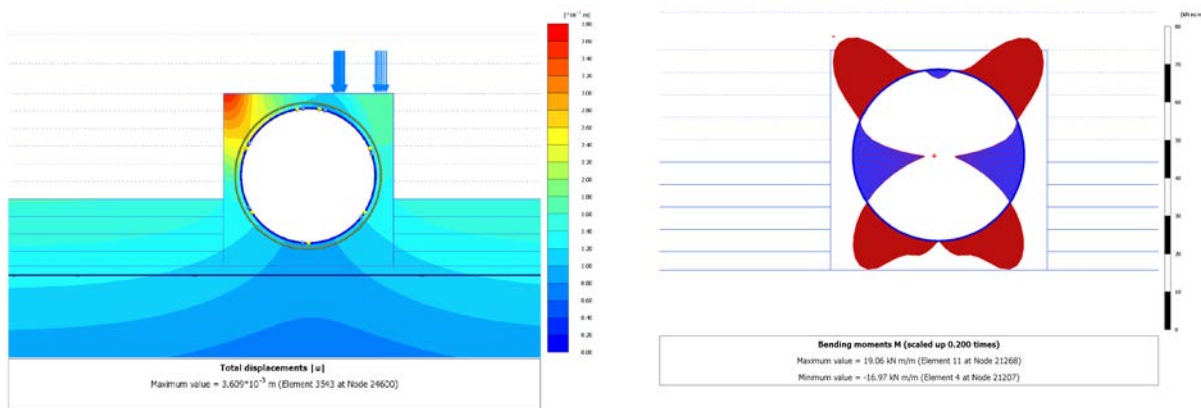


Figura 11. Desplazamientos totales en dos hipótesis de cálculo

Esta solución también se ha implementado en obra, como puede verse en la figura 12.



Figura 12. Estación en excavación, rampa sobre el túnel

5. Conclusiones

La comunicación presenta una solución innovadora (creemos que es la primera vez que se aplicaba a nivel mundial) de compatibilización de ejecución de túnel y estaciones en una obra de metro mediante tuneladora. La combinación de aspectos constructivos junto a modelos de cálculo complejos ha permitido desarrollar soluciones originales que han ahorrado aproximadamente 4 meses de obra.

Agradecimientos

El éxito de estas soluciones es el resultado del trabajo de un equipo de personas que no caben todas como autores de la comunicación, pero que no son por ello menos importantes, como Joan Tomás y Rubén Riverol de Bridge Technologies.