

Innovadoras dovelas capaces de puentear cargas temporales y permanentes alrededor de las aberturas en los túneles TBM

Innovative segments capable of bridging temporary and permanent loads around TBM segmental lining openings

Xavier Torelló Ciriano^a, Ángel Denia Berrocoso^b, Helena Castellví Linde^c, Dominik Hoerrle^d y Fernando Acosta^e

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnica y Proyectos, S.A. Director – Estructuras de Catalunya. xtorello@typsa.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Técnica y Proyectos, S.A. Ingeniero– Estructuras de Catalunya. adenia@typsa.es

^cIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. Técnica y Proyectos, S.A. Ingeniera– Geotecnia de Catalunya. hcastellvi@typsa.es

^dDiplôme d'Ingénieur. Ed. Züblin AG – Zentrale Technik. Coordinador de Proyectos - Tunnelbau. dominik.hoerrle@zueblin.de

^eDr. Ingénieur. Ed. Züblin AG – Zentrale Technik. Coordinador de Proyectos - Tunnelbau. Fernando.acosta@zueblin.de

RESUMEN

En los túneles del proyecto de alta velocidad británica HS2 S1-S2, en Londres, se innovó con el uso de un conjunto de dovelas especiales de hormigón altamente armadas y con pasadores permanentes cosiendo los anillos alrededor de las aberturas para minimizar la cantidad de trabajos temporales dentro del túnel y garantizar la seguridad durante la construcción. La solución propuesta es durable, resistente al fuego y permite construir 62 galerías de conexión y varias aberturas de ventilación en suelos y presiones de agua de hasta 4.5 bar, sin sostenimientos temporales ni marcos permanentes. Análisis avanzados y una extensa campaña de ensayos arrojaron resultados muy por encima de las soluciones más comunes.

ABSTRACT

In the tunnels of the British high-speed rail project HS2 S1-S2 in London, a set of innovative special segments around the opening were designed using highly reinforced steel cages with permanent dowels connecting adjacent rings. The proposed solution is durable, fire resistant and minimizes the amount of temporary works inside the tunnel by ensuring safety during construction. It also allows 62 cross passages and several ventilation openings to be built in soil and water pressures up to 4.5 bar. The special segments allow construction without temporary supports or permanent frames. The use of advanced analysis methods and an extensive test campaign yielded results far above more common solutions.

PALABRAS CLAVE: Túnel, tuneladora, dovelas especiales, aberturas.

KEYWORDS: Tunnel, TBM, special segments, openings

1. Introducción

La Fase 1 de la red de alta velocidad británica *High Speed 2* (HS2, por sus siglas en inglés) se encuentra actualmente en construcción entre las

ciudades de Londres y Birmingham. De los siete lotes en los que se dividió el proyecto, los contratos S1 y S2 implican la ejecución de 22 km

de túneles bitubo mediante 3×2 tuneladoras (TBM) entre la Estación de Euston, en el centro de Londres, y el Oeste de la ciudad (Figura 1). Con tal de cumplir los requerimientos del proyecto a lo largo del trazado, se optó por el diseño de tres tipos de secciones de los túneles, los cuales atraviesan 6 grandes pozos de ventilación e intervención, la nueva estación intermodal de Old Oak Common de aproximadamente 1 km de longitud y el macro-pozo de Victoria Road Crossover Box (VRCB) y el pozo de Victoria Road Ancillary Shaft (VRAS) adyacente a VRCB.



Figura 1. Trazado de los túneles TBM de los contratos S1 y S2 del proyecto HS2 en Londres.

Los tres tramos de túneles se dividen en los denominados Northolt Tunnel West (NTW), Northolt Tunnel East (NTE) y Euston Tunnel (ET), siendo este último el que discurre hasta un máximo de casi 60 m de profundidad por el área central de la ciudad de Londres.

La solución adoptada para los túneles consiste en revestimientos de anillos de dovelas de hormigón armado de diámetros y espesores diferentes para cada uno de los tres tramos: 8.80 m de diámetro interno y 35 cm de espesor para NTW, 8.10 m de diámetro interno y 34 cm para NTE, y 7.55 m y 32.5 cm para ET. Para el NTW, la configuración del anillo de dovelas es de 7+0, mientras que para los otros dos es de 6+0.

A lo largo de la traza, los túneles se conectan entre ellos y a los pozos de acceso y ventilación a través de aberturas de diferentes tamaños: 52 galerías de conexión entre túneles, 10 aberturas para la conexión entre túneles y pozos (1 doble en VRAS), y 14 aberturas de mayor dimensión en clave que involucran varios anillos de dovelas para la ventilación del túnel (Figura 2).

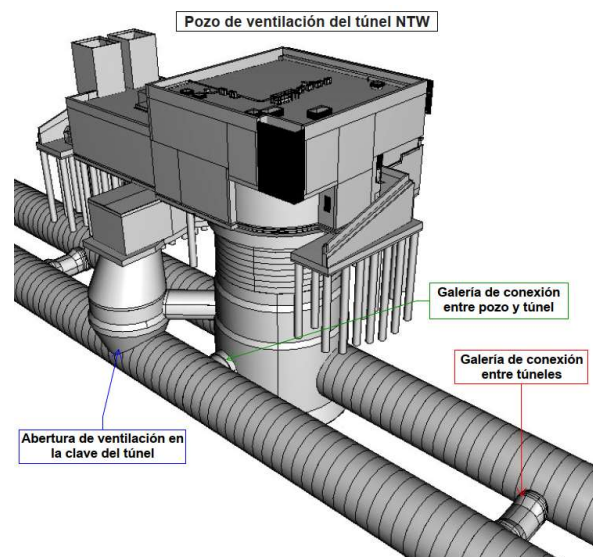


Figura 2. Tipos de conexiones de los túneles a lo largo de la traza de los NTW, NTE y Euston.

Respecto a las condiciones geotécnicas, ET y NTE discurren mayoritariamente por la altamente sobreconsolidada London Clay, una arcilla rígida muy estudiada y sobre la que se tiene amplia experiencia de ejecución de túneles. Sin embargo, en el NTW, el tramo oeste donde los túneles alcanzan la superficie, los suelos del grupo Lambeth son predominantes. Este grupo intercala unidades arcillosas con capas arenosas con presencia de agua, por lo que se necesita tratar el terreno para garantizar su estabilidad durante la ejecución de galerías y conexiones. El tratamiento del terreno escogido para 15 de las galerías fue el de la congelación, que ejerce notables cargas adicionales sobre las dovelas en la zona tratada.

2. Planteamiento del problema

Las soluciones para estructuras de soportes temporales para las aberturas de las galerías de conexión de túneles de anillos de dovelas son bastante comunes y se pueden encontrar en la literatura disponible [1], así como las metodologías pertinentes para su análisis y diseño [2].

Dada la gran cantidad de aberturas en los túneles y la naturaleza del contrato de “Diseño y Construcción”, los integrantes del equipo de

ingenieros consultores y del consorcio constructor decidieron utilizar la fase de diseño para desarrollar una solución innovadora que fuera eficiente y adaptable a los requerimientos del proyecto. En este contexto, se desarrolló la solución de dovelas especiales capaces de puentear las cargas alrededor de las aberturas sin la necesidad del uso de estructuras temporales que redujeran la sección útil de los túneles durante la obra, ni la necesidad de marcos de hormigón para el apoyo de las dovelas en situación permanente, con tal de optimizar la geometría de las secciones de las galerías de conexión.

3. Descripción de la solución estructural adoptada en fase de diseño

3.1 Requerimientos de producción, de durabilidad y resistencia al fuego

El diseño realizado propone un sistema de dovelas autoestable y permanente que no impacta en el espacio libre del túnel TBM, mejorando las operaciones en fase de construcción, y satisfaciendo los criterios de durabilidad con una vida útil de 120 años y resistencia al fuego EBA/Eureka.

Para la gran cantidad de aberturas y sus diferentes tamaños, se buscaron geometrías con la mayor adaptabilidad evitando así diferentes soluciones singulares. Por ello, los requisitos de tolerancias y modularidad de montaje fueron generosamente elegidos para los diferentes elementos que constituyen las dovelas especiales con tal de facilitar su instalación en obra. Por otro lado, los moldes de las dovelas especiales se fabricaron con la máxima precisión, en el rango de décimas de milímetro, utilizando los mismos moldes adaptables de las dovelas estándares. De esta manera se trasladaron las exigencias de tolerancia de la obra al taller de fabricación.

3.2 Principales elementos de las dovelas especiales

Es bien sabido que los revestimientos de dovelas son soluciones flexibles por la presencia de juntas longitudinales y circunferenciales. En el caso de las juntas longitudinales que se encuentran alrededor de las aberturas del túnel, las tensiones de contacto están altamente influenciadas por la excavación y la redistribución de cargas alrededor de la conexión. Por ello, la mejor conexión entre dovelas del mismo anillo o entre adyacentes, es aquella que pretende suprimir las juntas alrededor de las aberturas y permite un comportamiento monolítico del revestimiento del túnel. Estructuralmente es mucho más efectivo integrar los elementos de conexión directamente en el elemento más rígido, es decir, la dovela. Para ello se necesitan componentes capaces de transferir los esfuerzos de cortante y de tracción que se producen en las juntas al puentear las cargas interrumpidas por la abertura.

Además de satisfacer con los requisitos mencionados anteriormente, se desarrolló una nueva tipología de dovela mixta desarrollada para disponer alrededor de las aberturas de los túneles que debía garantizar la transmisión de esfuerzos entre las juntas circunferenciales de anillos adyacentes. Con tal de conseguir este objetivo, se disponen pasadores de acero y barras pretensas. La Figura 3 muestra cómo dichas barras llegan hasta el centro de la dovela con la función de asegurar la correcta transmisión de la carga de pretensando en el macizo de hormigón, mientras que los pasadores de acero se disponen a lado y lado de dichas barras para restringir el movimiento de la junta en cualquier dirección del plano que contiene a ésta. También se muestra el ensamblaje de dicho sistema durante la ejecución del túnel.

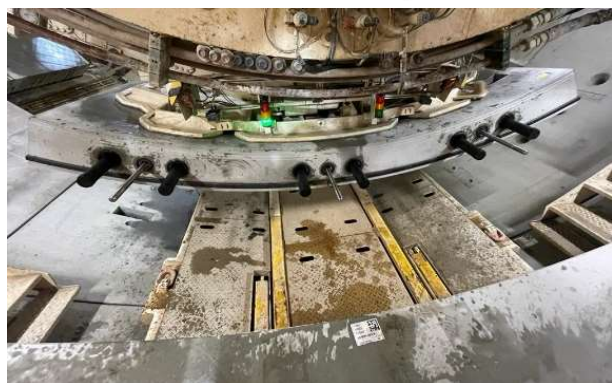
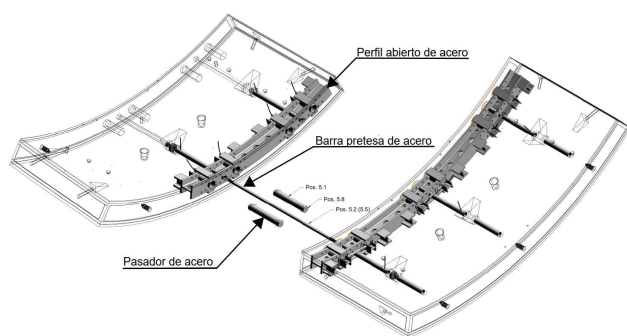


Figura 3. Ensamblaje del sistema de pasadores de acero, barras pretensas y perfiles abiertos embebidos en las dovelas especiales (arriba), ensamblaje de una dovela especial en el túnel (abajo).

El gran desafío del diseño de esta solución era garantizar el anclaje de los insertos de acero en la dovela con tal de aprovechar bien toda la sección transversal de acero y que la capacidad portante del sistema no se viera limitada por las acciones locales en el hormigón. Por ello, la solución planteada requiere tres elementos principales en la dovela especial.

El elemento llamado trípode dispone de manguitos de alojamiento para los pasadores de acero y la barra pretensa ortogonal a la junta circunferencial. Esta pieza mecanizada en taller exigía de unas tolerancias estrictas para su posterior ensamblado en un bastidor metálico embebido en un perfil abierto de acero. Este perfil facilita la distribución de la carga y se encuentra paralelo a la junta circunferencial, la cual está equipada con una serie de conectores diseñados para transferir las cargas a la sección de hormigón a nivel de rasante.

También, se dispone de una jaula de armadura de alta cuantía, que incluye barras Halfen®, para resistir el incremento de flector derivado de la descompresión del anillo por la

excavación de la galería/conexión, añadida al incremento de carga por la abertura del anillo adyacente.

La dirección más débil en la conexión anteriormente descrita es la radial. Por ello, se realizaron modelos de elementos finitos (EF) y ensayos a escala real con tal de estudiar la capacidad de ésta, los cuales se comentarán en apartados posteriores. En cuanto a la dirección tangencial de la conexión, el fallo en ésta solo es posible si la dovela colapsa en dirección circunferencial, lo cual requiere de fuerzas de una gran magnitud.

Todas las piezas integradas de acero se planificaron con un recubrimiento de hormigón suficiente con tal de garantizar su durabilidad. En el caso de los pasadores de acero, estos se recubren con una fina capa de plástico que, posteriormente en el túnel, se inyecta con resina epoxi actuando como doble protección contra la corrosión. Mientras que las barras pretensas son de acero inoxidable y no necesitan de revestir las cavidades de sujeción con mortero. Respecto al pretensado de las barras, en la fase de diseño solo se consideró para las etapas a corto plazo durante construcción, mientras que se ignoró tanto a largo plazo como para el escenario frente a fuego.

4. Descripción de los modelos de cálculo

Los túneles de dovelas ejecutados mediante tuneladora son elementos cuya modelización estructural es muy dependiente del efecto de la presencia de las juntas longitudinales y circunferenciales. De hecho, las juntas longitudinales de túneles TBM generalmente se consideran en los modelos geotécnicos y estructurales mediante métodos simplificados, como por ejemplo la formulación de Muir Wood [3]. Sin embargo, en las aberturas, donde las hipótesis de deformación plana dejan de aplicar, el diseño del revestimiento debe considerar modelos de elementos finitos en tres

dimensiones con la presencia de las juntas circunferenciales.

El estado tensional y leyes de esfuerzos en los revestimientos de dovelas alrededor de las aberturas son altamente dependientes de la secuencia de excavación de la galería/conexión por el impacto que tiene la descompresión inducida sobre el túnel. Al mismo tiempo, la redistribución longitudinal de las tensiones a lo largo del revestimiento de dovelas también juega un papel importante ya que ésta se encuentra gobernada por la capacidad limitada de transmisión de esfuerzos cortantes entre anillos adyacentes.

Por ello, se necesita tanto una simulación precisa de la interacción suelo-estructura (modelo geotécnico), como de las uniones circunferenciales (modelo estructural) dada la complejidad de introducir las condiciones de compatibilidad entre piezas de dovelas dentro de los modelos geotécnicos. Se estableció la siguiente estrategia de análisis numérico considerando tres tipos de modelos para la verificación de las dovelas especiales en cada tipo de abertura.

Modelos geotécnicos de EF:

Focalizados en la derivación de cargas para la calibración del modelo estructural. El detalle del análisis se centra en la interacción suelo-estructura, mientras las juntas del túnel y los elementos estructurales se modelizan de manera simplificada.

Modelos estructurales de EF: Cargas y muelles que representan el terreno son calibrados a partir de los modelos geotécnicos. El detalle del análisis se centra en los elementos estructurales: pasadores de acero, barras pretensas, perfiles embebidos y “bi-blocks” de conexión entre juntas circunferenciales. Las leyes de esfuerzos y desplazamientos de estos modelos permiten dimensionar las armaduras de las dovelas especiales y la verificación de los elementos de acero.

Modelos estructurales avanzados de EF: Simulan el sistema de acoplamiento entre

juntas circunferenciales para la obtención de la carga última y desplazamientos asociados.

Los dos primeros tipos de modelos corresponden al comportamiento global de los túneles en la zona de las aberturas, mientras que el tercer tipo es un modelo local que permite analizar con mayor detalle el sistema de acoplamiento de las dovelas especiales y dovelas adyacentes.

4.1 Modelos EF geotécnicos

Los modelos geotécnicos se realizaron con el software PLAXIS® 3D permitiendo la modelización del terreno que rodea los túneles y sus conexiones. Para cada tipo de conexión de túnel (entre túneles, galería túnel-pozo y abertura de ventilación) se modelizaron los anillos con elementos bidimensionales con 5 grados de libertad por nodo (*plate elements* en PLAXIS® 3D, llamados *shell elements* en otros softwares). Las juntas longitudinales se consideraron mediante la formulación de Muir Wood, mientras que se tomaron dos casos extremos para las juntas circunferenciales entre anillos.

Modelo de tubo rígido: la transmisión de esfuerzos entre anillos es completa, como en una tubería continua.

Modelo de tubo flexible: las juntas circunferenciales se modelizan con un elemento tipo *plate* con propiedades reducidas para que la transmisión longitudinal de los momentos flectores y los cortantes radiales sea casi nula. De esta manera, se independiza el comportamiento de cada anillo de dovelas.

De esta manera, se evalúa la redistribución longitudinal considerando los dos comportamientos extremos de los que se obtienen los límites superior e inferior para los desplazamientos y esfuerzos internos (axiles, flectores y cortantes) en el túnel.

La referencia [4] presenta más información sobre la estrategia de modelización empleada para las juntas circunferenciales y cómo los límites superiores e inferiores de los

esfuerzos se utilizan para calibrar el modelo estructural.

La Figura 4 muestra ejemplos de los modelos geotécnicos de EF que se realizaron durante la fase de diseño en detalle.

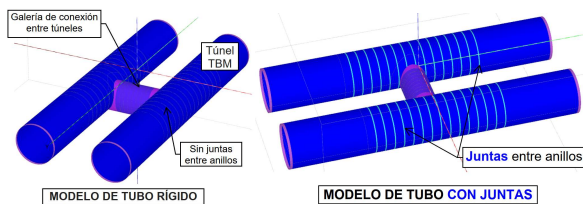


Figura 4. Modelos geotécnicos empleados en el diseño: modelo de tubo rígido (izquierda); modelo de tubo con juntas (derecha).

Los modelos geotécnicos son evolutivos permitiendo la simulación de las fases de ejecución de los túneles, excavación de las galerías de conexión, ejecución de las aberturas de las dovelas y ejecución de los revestimientos de las conexiones al túnel.

A pesar de las intercalaciones arenosas, el comportamiento tenso-deformacional del grupo Lambeth es el de una arcilla sobre-consolidada, por lo que el terreno se caracterizó con el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Este modelo tiene un comportamiento elastoplástico perfecto cuando se somete a un estado de tensiones con predominancia de cortante (desviador) y es más adecuado para la simulación de las arcillas sobreconsolidadas que alternativas como el Hardening Soil Model. Se consideraron diferentes propiedades del terreno a corto plazo (excavación y construcción) y a largo plazo (situación de servicio del túnel).

También se analizó el tratamiento del terreno mediante congelación que se efectuó para ciertas secciones del túnel y que generaba fases temporales de acciones condicionantes en el diseño de los anillos especiales.

4.2 Modelos EF estructurales globales

Los modelos estructurales de elementos finitos creados con el programa SAP2000® en su versión *Ultimate*, permitieron analizar en detalle los elementos embebidos en las dovelas mediante el uso de elementos tipo viga y tipo

muelles no lineales. Los diferentes modelos creados para cada tipo de conexión del túnel se dispusieron con las características que se describen en los siguientes párrafos.

Elementos tipo *thick shell* para la simular el hormigón de las dovelas con una ley lineal del material y aplicando una reducción de la inercia en sentido circunferencial para tener en cuenta la presencia de las juntas longitudinales, según la formulación de Muir Wood. Solo en el caso de conexiones particulares, en donde la posición de ensamblaje de las dovelas especiales es fija y por tanto la posición de las juntas longitudinales, se desarrollaron modelos considerando las posiciones esperadas de las juntas. Los perfiles metálicos embebidos se introducen de forma simplificada para considerar la contribución a la generación de una sección mixta.

Elementos tipo *tension / compression friction isolators* trabajando solo a compresión y que permiten la transmisión limitada de cortante por rozamiento cuando se emplean para simular el contacto hormigón-hormigón de las juntas circunferenciales.

Elementos tipo tendón para la simulación de las barras pretensas y tipo *multiplastic link* para la simulación de los *bi-blocks* estándares y de alta capacidad que se disponen entre anillos adyacentes. El pretensado se introduce con un valor de carga del 60% de la capacidad de las barras. Dicho valor de pretensado se aplica en obra mediante el uso de una llave dinamométrica. Los *bi-blocks* se modelan mediante las leyes no lineales a cortante y a tracción propuestas por el fabricante.

Elementos tipo viga que simulan los perfiles abiertos embebidos en las dovelas con conexión completa y los pasadores de cortante entre juntas circunferenciales.

Mediante los análisis evolutivos de proceso constructivo, con un carácter fuertemente no-lineal respecto a condiciones de contorno y comportamiento de los insertos, se simularon las etapas de ejecución más representativas.

En cada una de estas etapas se calibró la carga del terreno actuando sobre las dovelas y se ajustó la rigidez del terreno (modelizada mediante elementos tipo *tension/compression friction isolators*) hasta obtener valores intermedios a los obtenidos en los modelos geotécnicos.

Además, este proceso de diseño permitió ir ajustando la secuencia constructiva de la excavación de las conexiones adyacentes con tal de no superar la capacidad estructural ni los desplazamientos límites de servicio del sistema de anillos especiales.

Los cálculos incluían una última etapa en la que se evaluaba la situación a largo plazo. En esta etapa se consideró la rigidez drenada del terreno y el incremento de carga que supone la disipación de los excesos de presiones de agua (en los terrenos cohesivos). A largo plazo, se desactivaban dichas barras pretensas del sistema una vez el revestimiento final de la conexión del túnel se ha ejecutado.

La Figura 5 ejemplifica las deformaciones y el camino de las fuerzas circunferenciales alrededor de la abertura una vez se ha ejecutado ésta. Cabe destacar que la alta rigidez que dota el sistema de acoplamiento entre anillos resulta en desplazamientos relativos casi nulos entre anillos de dovelas especiales. Aunque no se muestra en la figura, se modeló el revestimiento final de la galería mediante muelles trabajando solo a compresión restringiendo el movimiento transversal de la zona de la conexión.

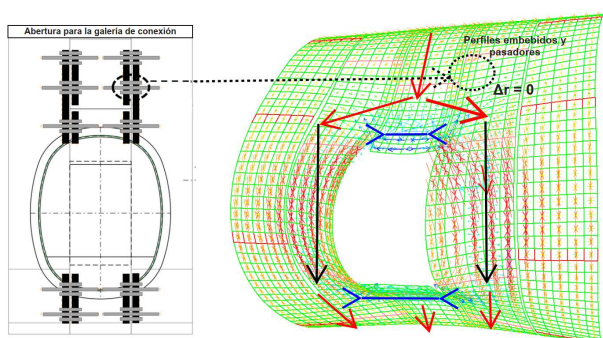


Figura 5. Estado tensional y deformada de las dovelas especiales de la conexión entre túneles.

Por otro lado, la Figura 6 muestra el estado tensional y el camino de las fuerzas circunferenciales del túnel para una de las

conexiones en clave a los pozos de ventilación, que son las que tienen las mayores aberturas con una superficie de aproximadamente 28 m². Por lo general, dichas aberturas se ejecutan mediante dos fases de excavación y construcción del revestimiento de conexión de hormigón armado de manera simétrica al eje longitudinal del túnel. Con ello, se pretendía evitar desplazamientos relativos excesivos entre anillos adyacentes por criterios de servicio para no comprometer la estanqueidad del *gasket*, así como mayores esfuerzos en las dovelas.

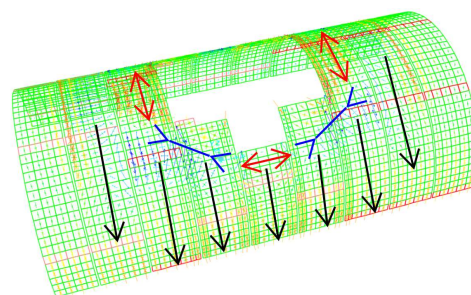


Figura 6. Estado tensional de las dovelas especiales de la conexión en clave con el pozo de ventilación.

4.3 Modelos EF estructurales locales del sistema de acoplamiento de las dovelas especiales

Se desarrollaron modelos de elementos finitos focalizados en el sistema de acoplamiento entre las dovelas especiales con tal de comprender el posible mecanismo de fallo. Dado que se pretendía simular un ensayo hasta rotura del sistema acoplado, se realizó un análisis dinámico explícito con el software de elementos finitos Abaqus CAE®. La geometría del modelo se generó utilizando el software Altair Hypermesh y el post-proceso se realizó con Altair Hyperview.

El hormigón se simuló con el modelo constitutivo *Concrete Damage Plasticity* basado en el criterio de fluencia de Drucker-Prager. Tanto las armaduras como todos los elementos de acero se modelaron mediante un material elástico y perfectamente plástico, mientras que el epoxi rígido que llena el espacio entre los pasadores y los tubos de acero está modelado como un material elástico lineal.

La Figura 7 muestra la geometría del modelo, así como los principales resultados que se utilizaron para validar los diseños de los diferentes juegos de dovelas especiales para los diferentes tipos de aberturas.

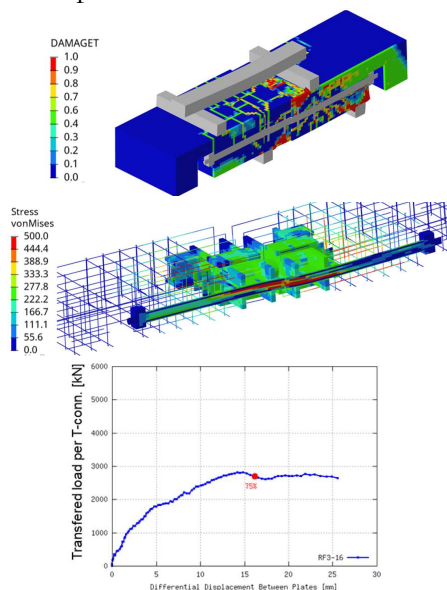


Figura 7. Resultados del modelo local para el sistema de acoplamiento de las dovelas especiales.

El modelo consta de dos paneles de hormigón armado (simulando cada una de las dovelas acopladas) que están conectadas por un sistema de acoplamiento integrado (trípode). Aprovechando las condiciones de simetría a lo largo del eje longitudinal, se modelizó la mitad de la geometría del sistema de acoplamiento, permitiendo reducir la malla de elementos finitos y el coste computacional. La curvatura de las dovelas no se tuvo en cuenta porque no es necesaria para determinar la carga última y la rigidez del sistema.

Los elementos de hormigón, los pasadores de acero y las barras pretensas se modelizaron con elementos hexagonales (C3D8) de ocho nodos. Los demás elementos de la construcción de acero (viga de distribución de carga y trípode) se modelaron con elementos tipo *shell* tridimensionales. Todas las superficies de contacto entre estructuras de hormigón y acero se modelaron mediante una formulación de contacto basada en la fricción. Para las armaduras se utilizaron elementos tipo *truss* tridimensionales (T3D2) de dos nodos, los

cuales quedan embebidos en los elementos de hormigón. Esto se logró mediante una interacción definida por la restricción de que un grupo de elementos esté incrustado en un grupo de elementos anfitrión. De esta manera, los grados de libertad de traslación de los nodos incrustados (barras de armadura de acero) están restringidos a los valores interpolados de los grados de libertad correspondientes del elemento anfitrión (hormigón).

Los dos paneles se apoyan en su parte inferior mediante dos soportes articulados que impiden el desplazamiento vertical ($U_x = 0$ y $U_z = 0$). Además, se colocaron dos vigas transversales sobre las losas donde apoyar el perfil de carga y distribuirla. Dado que se simula solo la mitad del sistema, todos los nodos contenidos en el plano de simetría se fijan en la dirección de la normal, es decir, $U_y = 0$. Durante el análisis, la carga se controló por deformación hasta un desplazamiento vertical máximo de $U_z = 30$ mm.

En lo referente a los resultados del análisis, el comportamiento del sistema de acoplamiento se evalúa en términos de capacidad de transferencia de carga y ductilidad mediante un diagrama de carga-desplazamiento. La Figura 7 muestra que el esfuerzo cortante máximo que se puede transmitir ortogonalmente a través de la junta es de unos 2800 kN y se alcanza tras un desplazamiento diferencial entre los paneles de unos 10 a 15 mm. El sistema plastifica una vez se superan estos valores de desplazamiento.

Las predicciones de cargas últimas y desplazamientos asociados arrojadas por los modelos se validaron a posteriori mediante ensayos en la etapa de producción de las dovelas especiales. La Figura 8 muestra el ensayo a escala real del sistema. Los resultados del ensayo experimental verificaron los reducidos desplazamientos en servicio (máximo *offset* para la junta del túnel), las cargas máximas últimas previstas y demostraron un comportamiento dúctil validando la confianza en la respuesta del sistema frente a cargas superiores a las esperadas.



Figura 8. Ensayo a escala real del sistema de acoplamiento entre dovelas especiales.

5. Diseño de la solución estructural

Una vez descritas las bases de los análisis para la obtención de leyes esfuerzos y desplazamientos de los anillos de dovelas especiales, el presente capítulo presenta los tipos y resistencias de los materiales que se emplearon en el dimensionamiento de la solución estructural, el cual se basó en los Eurocódigos y los Anejos Nacionales del Reino Unido.

En primer lugar, las dovelas especiales alrededor de las aberturas se diseñaron con un hormigón C70/85 de altas prestaciones a los 28 días, tamaño máximo de árido limitado para asegurar la compacidad y con alta cuantía de armadura, aproximadamente $\phi 25$ cada 10 cm tanto en el intradós como en el trasdós. Dichas armaduras se combinan en las dovelas con los perfiles HEM 180 embebidos de acero S235, las barras pretensas M39 y M36 de acero de grado 10.9 y los pasadores de acero de diámetro 80 mm y acero de grado 8.8. También se dispusieron otro tipo de dovelas de compensación no tan altamente armadas, y de hormigón C60/75. Fuera de las áreas de abertura, los anillos especiales se conectan a los anillos adyacentes mediante *bi-blocks* de altas prestaciones capaces de transmitir cortantes de hasta 350 kN.

Respecto a los desplazamientos relativos entre anillos en servicio, se restringieron a valores máximos de 5 mm con tal de no comprometer la estanqueidad de los *gaskets*, elevándose dicho límite a un caso excepcional de 10 mm para las aberturas de mayores dimensiones. Cabe destacar que los valores

elevados de desplazamiento relativo entre anillos se obtenían, conservadoramente, de modelos no que no consideraban fuerzas de propulsión remanente de la tuneladora en el sentido longitudinal del túnel.

6. Ensayos de resistencia frente al fuego

Los ensayos de resistencia de fuego de las dovelas en carga sólo pueden ser realizados por unos pocos centros en Europa, ya que es necesario disponer tanto de un horno de grandes dimensiones como de prensas y apoyos adecuados. Uno de los puntos críticos era el de ensayar el sistema de acoplamiento. Los ensayos se llevaron a cabo en el CERIB (Centre d'Études & de Recherches de l'Industrie du Béton) en Épernon, cerca de París. CERIB montó estructuras de apoyo con aislamiento térmico en un horno de aproximadamente 4x6 m². En el lado opuesto al fuego, se dispusieron las prensas con tal de ejercer las fuerzas necesarias para simular los estados tensionales deseados a ensayar. Del total de los seis ensayos que se realizaron, los ensayos de cortante bajo sollicitación de fuego no se llevaron hasta rotura sino, satisfactoriamente, a los máximos valores de cálculo que se habían obtenido de los modelos estructurales globales.

7. Fabricación y ensamblaje en obra

Durante la fase de diseño se realizaron modelizaciones tridimensionales de la geometría de las dovelas especiales, así como de las armaduras y todos los sistemas embebidos en ellas. De este modo se garantizaba el control de la factibilidad de montaje de dichos elementos durante su producción.

La gran adaptabilidad de la solución diseñada permitió realizar ajustes en obra fruto de peticiones del constructor con tal de agilizar y de no entorpecer la construcción de los pozos

adyacentes. Este caso fue el de la galería de conexión del Victoria Road Ancillary Shaft (VRAS) del tramo NTE (Figura 9), donde la abertura es doble y un cambio en el faseado de excavación resultó en la introducción de perfiles adicionales con tal de reforzar la junta intermedia entre las aberturas.



Figura 9. Anillos de dovelas especiales expuestos.

8. Conclusiones

Las innovadoras dovelas especiales diseñadas para el proyecto HS2 garantizan en todo momento los trabajos de construcción sin interrupciones. El sistema descrito minimiza las dimensiones de las aberturas en el revestimiento del túnel al no requerir de marcos de hormigón para el apoyo de las dovelas en situación permanente, permitiendo una optimización de la sección de las galerías de conexión. Las dovelas especiales son capaces de absorber elevadas cargas, incluso en dovelas ligeras de tan solo 325 mm de espesor, y son compatibles con medidas de tratamiento del terreno, como la congelación. Además, el sistema presenta una elevada rigidez que permite satisfacer los límites de resaltos por temas funcionales y de estanqueidad entre anillos adyacentes.

Dado que las tolerancias se llevan a la fábrica, el ensamblaje en obra se hace rápido sin interrumpir, en general, el avance habitual de la TBM. Esto conlleva una adaptabilidad que permite realizar los ajustes que surjan en obra. Por tanto, la producción industrial de los componentes permite una reducción de costes. El diseño garantiza el carácter durable (120 años) y resistente a acciones accidentales como el

fuego, probado mediante ensayos con modelos a gran escala.

Por último, este tipo de solución requiere de trabajos arduos de diseño desde una etapa muy temprana del proyecto, así como esfuerzos de coordinación entre empresa constructora, cliente y diseñadores.

Agradecimientos

Esta comunicación se ha publicado con el permiso de HS2 Ltd. Los autores expresan su agradecimiento por las aportaciones del consorcio constructor Skanska-Costain-Strabag Joint Venture (SCS) para la publicación de esta comunicación. El éxito de la solución implementada ha sido posible gracias a los miembros de la UTE de diseño Design House (ARUP, Strabag y TYPESA) que han colaborado durante las diversas fases del proyecto y la obra. Durante la redacción de este artículo, el segundo autor participa en el programa de Doctorado Industrial de AGAUR (expediente 2021 DI 122).

Referencias

- [1] A. Harding and D. Treweek, Effective Opening Support for Cross Passages. Proceedings of World Tunnel Conference 2016, Seiten, 2016.
- [2] T. Lee and T. Choy, Numerical Analysis of Cross Passage Opening for TBM Tunnels. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul (2017), 1713-1720.
- [3] A.M. Muir Wood, The circular tunnel in elastic ground. Géotechnique 25 (1975), No. 1, 115-127.
- [4] H. Castellvi, X. Torelló, A. Denia, L. Baró, D. Hoerrle, An Approach for Geotechnical Numerical Modelling of Tunnels Lining Longitudinal Behaviour. Proceedings 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (2023), 26th to 28th of June, London.