

Ejecución de túneles Bolaños

Con TBM de roca simple escudo dentro del plan de construcción del AVE Madrid-Galicia



MARCOS
Calleja

Ingeniero Industrial.

Departamento de Instalaciones
y Procedimientos, Dirección de
Maquinaria. FCC Construcción



Fig. 1. Plano de conjunto del proyecto



RESUMEN

El proyecto del tramo Vilariño-Campobeceros ha supuesto una aportación técnica importante para conseguir una significativa mejora en la calidad del acabado del túnel y ha hecho necesaria la implementación de sistemas propios de escudos de presión de tierras en una Tuneladora de excavación para macizos rocosos. Además las exigencias geotécnicas e hidrogeológicas del macizo pusieron de manifiesto la capacidad resolutive del equipo de trabajo para hacer frente a ellas en condiciones de máquina abierta en terrenos inestables.

El resultado final obtenido en la calidad del acabado del túnel ante una geología tan adversa muestra el camino a seguir en cuanto a la colaboración entre la técnica del diseño del túnel, la organización productiva de la obra, y un intensivo control de subsidencias.

PALABRAS CLAVE

Vilariño-Campobeceros, calidad, terrenos inestables, diseño, organización productiva, control

ABSTRACT

Vilariño-Campobeceros project provided an important technical contribution to achieve a significant improvement in the quality of the tunnel making it necessary to implement own earth pressure shield systems in an excavation tunnel for rock masses. In addition, the geotechnical and hydrogeological strong requirements of the massif revealed the resolute ability of the work team to deal on this kind of unstable grounds in open mode conditions.

The final result obtained regarding the quality of the finished tunnel in this adverse geology shows the way to go ahead in terms of collaboration among the tunnel design technique, the productive organization of the work and an intensive control of subsidence.

KEYWORDS

Vilariño-Campobeceros, quality, unstable grounds, design, organization, control

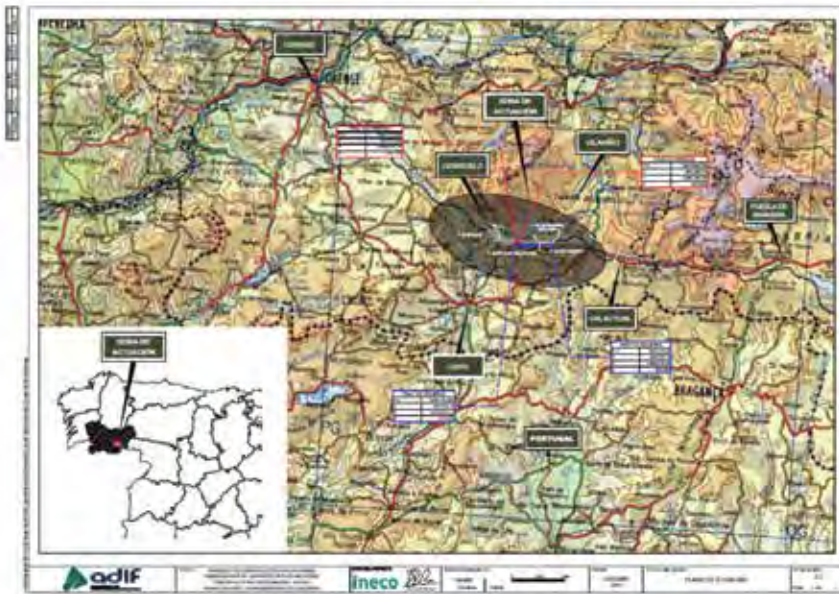


Fig. 2. Plano de situación

instalaciones y logística en el exterior del túnel.

La tuneladora en cuestión es una máquina abierta, de roca dura y simple escudo. Más adelante se resumirán sus características más importantes.

La sección del túnel definitivo fue determinada por ADIF y se presenta en la figura 3.

2 Geología, geotecnia y tramificación

La zona de estudio se enmarca dentro del Macizo Ibérico ocupado por la denominada Zona de Galicia-Tras-os-Montes (ZGTM). A lo largo de la traza se alternan tramos de pizarras, laminadas y grises silíceas, junto con zonas de cuarcitas, cuarzo filitas y areniscas; incluyendo ampelitas carbonatadas con niveles arenosos volcánicos al final del proyecto imponiendo un reto importante a la excavación de un macizo mayoritariamente rocoso.

INTRODUCCIÓN

El Proyecto de Construcción de Plataforma, en el Corredor Norte-Noroeste de alta velocidad, para la línea de AVE Madrid-Galicia, es una infraestructura altamente demandada para mejorar las conexiones ferroviarias del noroeste con el centro y sur de la península.

Esta actuación permite dar continuidad a la línea Madrid-Zamora-Lubián-Orense para que, con origen en Orense, sucesivos ejes distribuyan el tráfico ferroviario de Alta Velocidad por las capitales gallegas.

El 22 de diciembre de 2007 entró en servicio la línea de Alta Velocidad Madrid-Segovia-Valladolid. Este nuevo corredor será el eje vertebrador de las comunicaciones ferroviarias entre el centro de la península y el norte y noroeste del país. El tramo objeto de este proyecto es, por lo tanto, parte del nexo de unión entre esta nueva infraestructura en ejecución y el tramo ya en servicio (figura 1).

1 Ubicación y coordinación de trabajos para ejecución de los Túneles de Bolaños

Los túneles de Bolaños transcurren entre los municipios de Campobeceros y Vilariño de Conxo, ambos términos pertenecientes a la provincia de Orense (figura 2).

Con el fin de optimizar la logística y coordinación en la construcción de dos túneles gemelos, se formó una Macro-UTE entre las empresas adjudicatarias de ambos lotes (UTE Vilariño Vía Izquierda y UTE Vilariño Campobeceros Vía derecha) con objeto de ejecutar ambos túneles de forma conjunta. No era la primera vez que estas empresas cooperaban para la ejecución de grandes obras de infraestructura como la que se trata en este artículo. Los túneles se ejecutaron secuencialmente con una tuneladora y aprovechando las

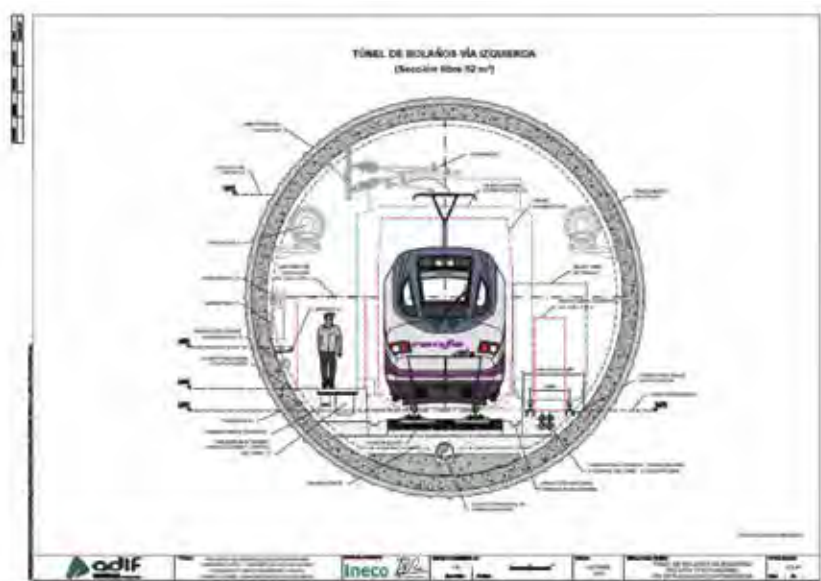


Fig. 3. Sección del túnel terminado

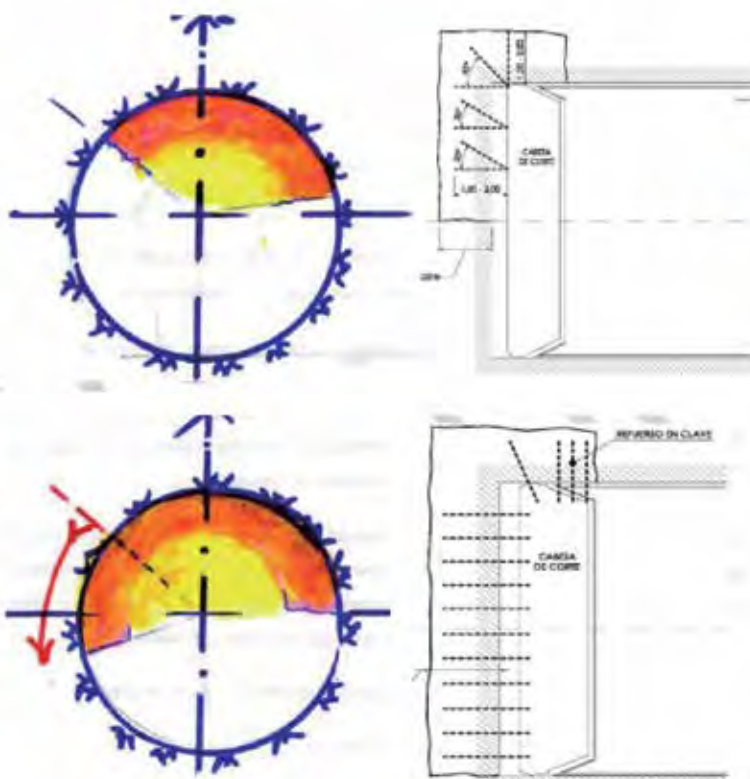


Fig. 4. Secciones de actuación con tratamiento del frente

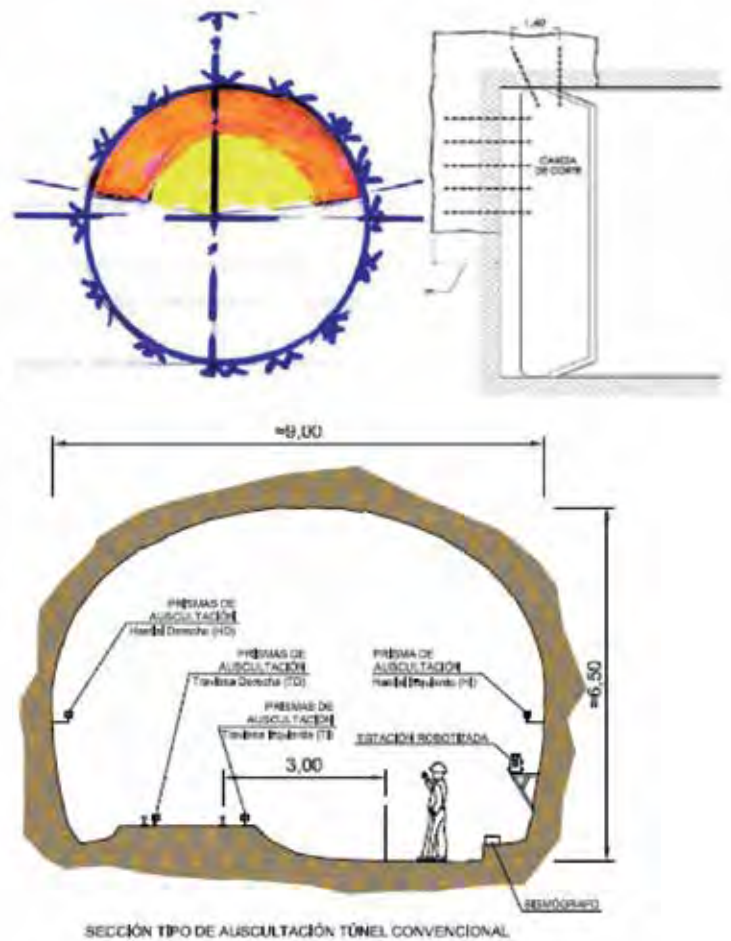


Fig. 5. Esquema de auscultación

Los principales desafíos que proponía la geología de los túneles eran:

- La existencia de 7 fallas a atravesar, que conllevaba la evaluación de un plan de contingencias contra la posible actividad sísmica y deslizamientos de la zona.
- La orografía de los emboquilles, con elevadas pendientes en áreas con diferentes grados de meteorización, obligó a importantes tratamientos en el terreno, incluyendo el inicio de la excavación en medios convencionales a media sección y sección completa.
- La excavación de ampelitas carbonatadas con alto grado de convergencia y unas condiciones hidrogeológicas adversas a lo largo del proyecto.

Además, asociada al anticlinal de "Portas" situado a 3,5 km del emboquille

de Campobeceros por donde se atacan los túneles, se llevaron a cabo tratamientos continuos y severos de consolidación del terreno en varias zonas. Estos tratamientos se realizaron durante la excavación y en el frente además del perímetro radial a la rueda de corte tal y como se observa en el esquema de la página siguiente (fig. 4).

La longitud de los túneles perforados con tuneladora es de 6.709 metros para vía derecha, túnel comprendido entre los PK 300+229 hasta el PK 306+938; y de 6.696 metros para vía izquierda, entre los PK 300+229 al PK 306+925. La excavación de ambos túneles se realizó en sentido este-oeste.

Los comienzos de la excavación se realizaron desde el lado de Campobeceros con una pendiente ascendente del 0,5 % durante unos 5.500 metros

aproximadamente, para luego pasar a una pendiente descendente del entorno del 0,3 %.

Las diferentes características del terreno a lo largo de la traza pueden resumirse según la siguiente tramificación:

- 1er tramo / PK 306+938 a PK 305+800/:

Se atraviesa una geología con predominio de pizarras grises silíceas a lo largo de los primeros 1.638m con un RMR 60 y en este tramo se produce además el primer cruce con una vía en servicio de ferrocarril, situado a 40 metros sobre la bóveda del túnel. A modo de prevención se detuvo la excavación a unos 20 metros antes de llegar a dicho cruce para realizar un mantenimiento general y un cambio de las herramientas de corte con mayor desgaste con el fin de evitar una parada imprevista bajo la línea

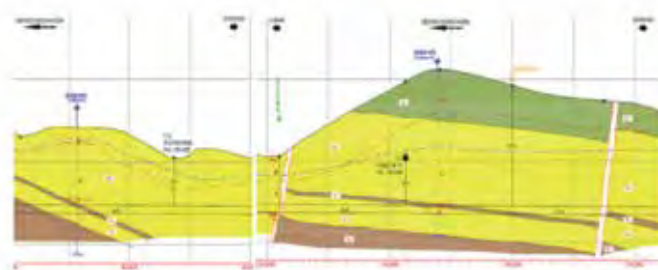
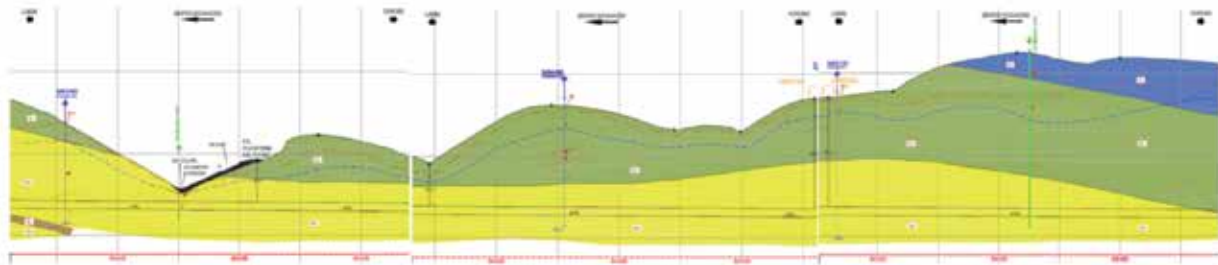
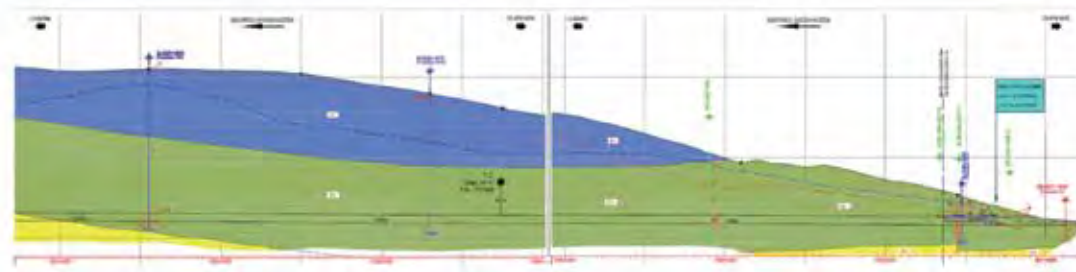


Fig. 6. Perfil geológico 1er tramo (PK 306+938 a PK 305+800)

Fig. 7. Perfil geológico 2º tramo (PK 305+800 a PK 302+860)

de ferrocarril y asegurar una excavación continua bajo la zona de riesgo.

Además se procedió a la auscultación del ferrocarril durante la excavación por debajo del mismo en tiempo y con transmisión de datos a una plataforma digital de control de movimientos y asentamientos diseñada para estos cruces (figura 5).

Este tramo inicial sirvió como zona de evaluación para terminar de afinar los parámetros correspondientes a la excavación e inyección del bicomponente predefinidos inicialmente con las pruebas de laboratorio y de un modelo del escudo realizado a escala real en el Parque de Maquinaria de FCC.

Al finalizar este tramo se produce una transición de arcillas grises silíceas, a cuarcitas, cuarzofilitas y areniscas y los

túneles llegan a alcanzar 182m de cobertura (figura 6).

- 2º tramo /PK 305+800 a PK 302+860/: Transcurre a lo largo de una geología con predominio de cuarcitas, cuarzofilitas y areniscas con un RMR 60 durante los primeros 1.800m y los 1.140m restantes la calidad de la roca desciende hasta valores RMR 30.

Se atraviesan dos fallas en los p. k. 303+780 y PK 303+223 que dan lugar a intrusiones puntuales de pizarras laminadas.

Además, a lo largo de esta zona, el trazado se va cruzando con otras estructuras principales:

o Carretera con 136m de montera

o Plataforma de ferrocarril con 55m de montera

o Paso bajo vaguada con 18m de montera

o Plataforma de ferrocarril con 58m de montera

o Carretera con 151m de montera

o Plataforma de ferrocarril con 61m de montera

Previamente antes de llegar a todos estos puntos y fallas, de igual modo que en el tramo anterior, se revisa la herramienta de corte y se realiza un mantenimiento preventivo. Igualmente, todos los cruces bajo dichos puntos fueron controlados y auscultados por el mismo sistema anteriormente indicado.

- 3er tramo/PK 302+860 a PK 300+229/:

Comienza con la transición desde la anterior geología a una zona con predominio de pizarras laminadas a lo

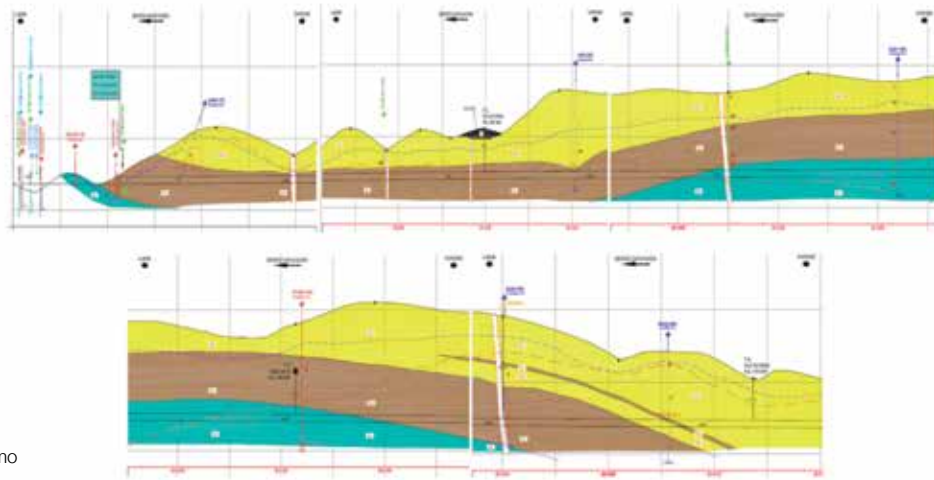


Fig. 8. Perfil geológico 3er tramo (PK 302 + 860a PK 300+229)

largo de 1.628m pero que intercala un tramo intermedio de 1.000m con predominio de ampelitas carbonatadas con niveles arenosos volcánicos y con un RMR que transcurre entre valores de 30 y 50.

Nuevamente se cruza la vía de ferrocarril, en dos ocasiones esta vez, y bajo una cobertura de aproximadamente 60m. Pero sin lugar a dudas este tramo se significó por ser el más complicado de excavar como más adelante se detallará, no sólo debido a atravesar las siguientes 5 fallas; sino por la excavación con una TBM abierta de niveles de arenas y terrenos inestables en varias zonas del anticlinal de "Portas", mayores a los esperados en proyecto (figura 8).

- o PK 302+599 (ampelitas)
- o PK 301+497 (ampelitas)
- o PK 300+965 (pizarra)
- o PK 300+772 (pizarra)
- o PK 300+595 (pizarra)

3

Características principales de la tuneladora

La excavación de los túneles de Bolaños de una longitud de 6.709 y 6.696 metros cada uno, se realizó empleando

una TBM de roca de Simple Escudo, denominada con el nombre de proyecto del fabricante alemán Herrenknecht HK S-805, provista de un total de 64 cortadores de 17 pulgadas (56 sencillos y 4 dobles), con un diámetro de excavación de Ø 9.900 mm

La TBM tiene 230 metros de longitud, 2.900 toneladas de peso y una potencia instalada de 6.150 KW, incluyendo 14 motores del accionamiento ppal. de 350 kW cada uno. Está compuesta por un escudo de 10,4 metros de longitud y 12 remolques. El par máximo del accionamiento es de 19.960 KNm a 2,2 r.p.m y una capacidad máxima de rotación de 6 r.p.m. la rueda de corte es capaz de desplazarse longitudinalmente 600 mm. y en el propio plano de la cabeza a izquierda y derecha (80 mm) y arriba (150 mm) / abajo (30 mm) con el fin de evitar posibles atrapamientos dadas las condiciones geotécnicas y coberturas extremas.

Cuenta con un empuje máximo de 115.270 KN, a través de 24 cilindros de empuje, proporcionando una herramienta fundamental en caso de atrapamiento. La extracción del escombros se realiza por medio de cangilones, que recogen el material de la cámara de escombros y lo llevan a una cinta de 17 metros situada en la parte central. Esta cinta deposita el material en una cinta transversal de 5 metros que, a su vez, traslada el material a la cinta del túnel. Todas estas cintas están dimensionadas para una capacidad de 1.500 toneladas por hora.

La TBM va provista de un sistema hidráulico, con un depósito de 8.000 litros para accionar entre otros la extensión y retracción de los cilindros de empuje. La alimentación a la TBM le llega a través de un cable eléctrico a 20 KV. Por medio de tres transformadores se logran las tensiones necesarias (690 / 400 / 230 V) de motores del accionamiento y del resto de equipos.

La ventilación en una TBM de estas características es muy importante. El polvo generado en la propia excavación debe ser eliminado a través de un sistema de ventilación aspirante (dos ventiladores de 90 KW en serie) y un despolvador, de capacidad 1.200 m³ / min. La renovación del aire para la correcta ventilación del túnel es ayudada por la ventilación secundaria de la máquina, de 250 KW y capacidad hasta 90 m³/s.

En previsión de que se necesitara reducir la fricción que se crea en el movimiento de la máquina entre escudo y terreno excavado, la máquina dispone de 30 orificios radiales por los que puede ser inyectado bentonita.

4

Características principales del anillo de sostenimiento.

Uno de los objetivos más importantes del proyecto fue la ejecución de un túnel estanco en una hidrogeología adversa. Para conseguir dicho objeti-

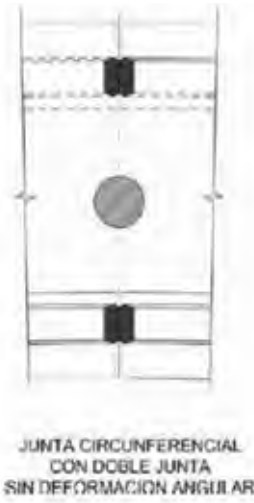


Fig. 9. Esquema descripción funcionamiento junta circunferencial con doble junta

Fig. 10.a Acopio de dovelas en playa de vías

Fig. 10.b. Detalle dovela con doble junta de sellado

vo se revisó el diseño del anillo prefabricado de hormigón, al que se dotó de todos los elementos y accesorios al alcance de la técnica, para asegurar un resultado óptimo en estanqueidad.

El anillo de tipo universal está formado por un total de 7 dovelas más un elemento independiente, la solera, que tiene como función servir de base en la parte inferior del túnel y sobre la cual irá montada la doble vía por donde circulan los trenes de servicio de la TBM durante la fase de excavación. Por lo tanto el anillo está formado por:

- 4 dovelas denominadas D, C, B2, B1.
- 2 dovelas contra llaves A2, A1
- 1 dovela llave K
- 1 pieza de solera

En este proyecto se optó por el uso de dovelas trapezoidales, eliminando las uniones radiales paralelas al eje del túnel. Con esta configuración se buscaba reducir, durante el montaje, la fricción entre las juntas de estanqueidad de dovelas contiguas, que puede provocar el arrastre y separación entre la junta y la dovela disminuyendo la eficacia del sellado.

Adicionalmente con esta configuración se elimina la posibilidad de que se encuentren cuatro vértices de dovelas en el mismo punto, zona en la que las juntas pueden presentar fallos de estanqueidad.



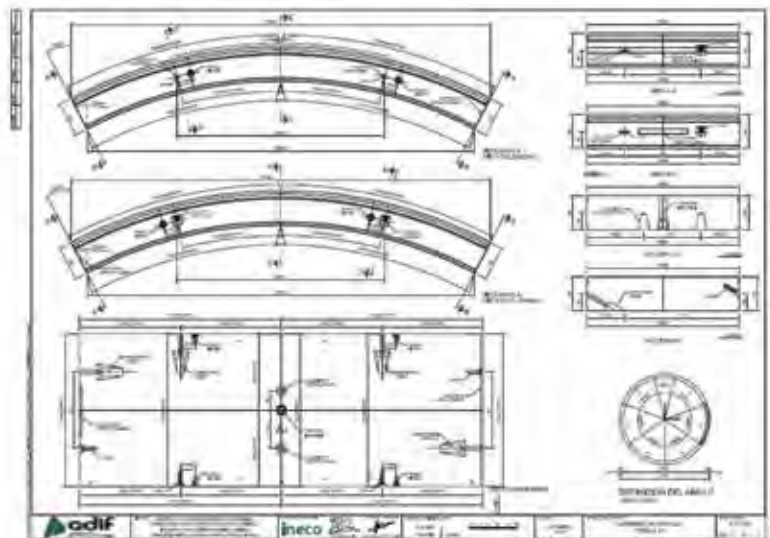
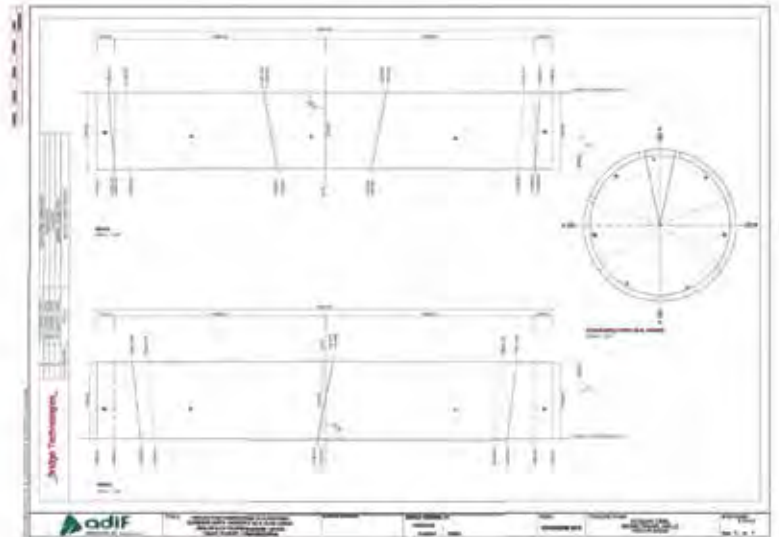
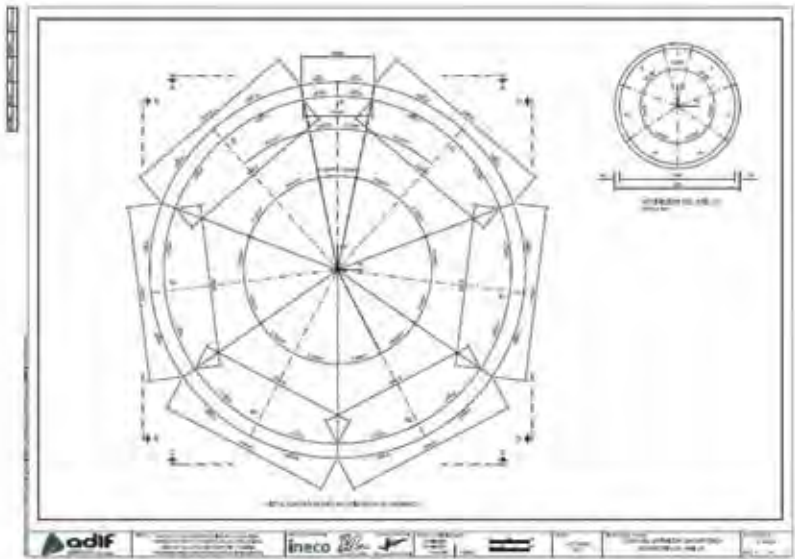


Fig. 11. Definición geométrica del anillo

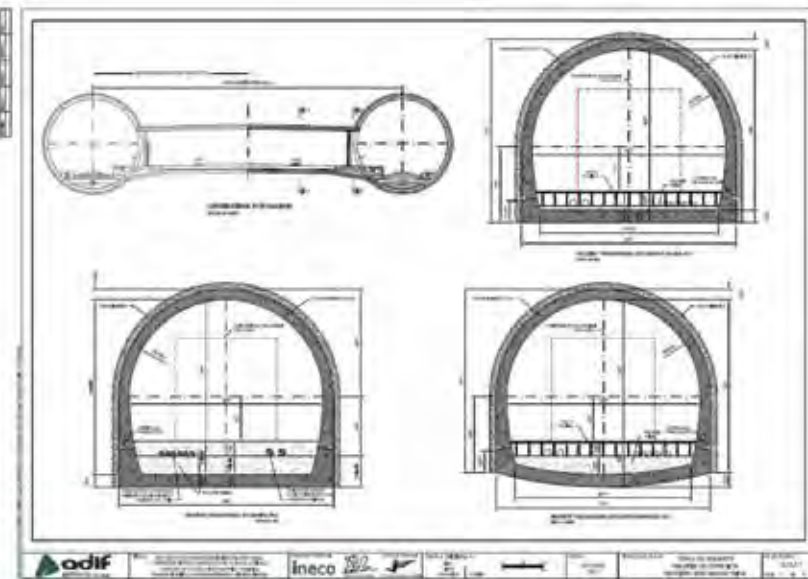
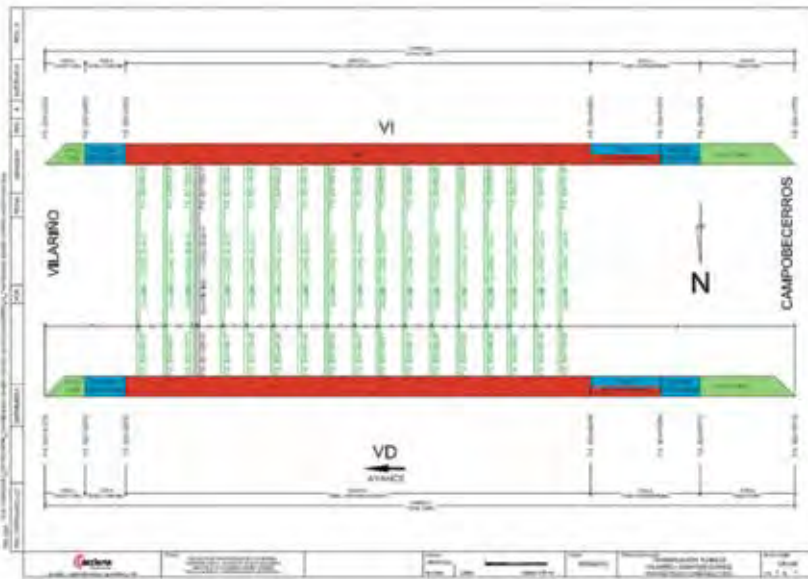
Fig. 12. Definición de juntas trapezoidales del anillo

Fig. 13. Detalle de dovela

El Proyecto de Construcción de Plataforma, en el Corredor Norte-Noroeste de alta velocidad, para la línea de AVE Madrid-Galicia, es una infraestructura altamente demandada para mejorar las conexiones ferroviarias del noroeste con el centro y sur de la península

Fig. 14. Disposición de galerías entre ambos tubos

Fig. 15. Galería de conexión



La instalación de una doble junta de sellado en cada dovela fue otra de las medidas adoptadas para asegurar la estanquidad. Para conseguir que las juntas trabajen de forma adecuada se incorporó el uso de dos biconos centradores por dovela en la junta circunferencial de manera que el offset entre las caras de la junta fuera siempre el mínimo. El empleo de dos tornillos por dovela en la junta circunferencial garantiza la precarga de las juntas desde el primer momento de montaje. Las barras de guiado, instaladas en las juntas radiales realizaban las mismas funciones de centrado que los biconos (figura 9).

Las dimensiones geométricas del anillo utilizado como sostenimiento:

- Diámetro exterior del anillo: 9,47 m.
- Diámetro interior del anillo: 8,75 m.
- Espesor de las dovelas: 0,36 m.
- Longitud media del anillo: 1,6 m.
- Posiciones de la llave: 13.

(Ver figuras 10-13).

5 Galerías y emboquilles

Debido a la longitud de los túneles y de acuerdo con la normativa vigente, entre los túneles principales se ejecutaron 18 galerías, de longitudes entre 15,5 y 20,5 m (figura 14).

En la figura adjunta puede verse la definición geométrica de la misma. Las galerías aparecen distanciadas 350 a 400 m, salvo al comienzo y al final, a 245 y 289,5 m respectivamente del inicio de los falsos túneles.

Las galerías fueron excavadas por métodos convencionales, una vez que se finalizó los trabajos de avance en el primero de los túneles principales. Esto permitió el uso de vehículos sobre neumáticos, simplificando la logística dentro del túnel. Alguna de ellas fue calada durante los trabajos de excavación del segundo túnel (figura 15).



Fig. 16. Banco de simulación de inyección de mortero por escudo de TBM en túnel

6 Tratamientos especiales y particularidades

Dentro de los retos superados inherentes a un proyecto de estas dimensiones, cabría destacar la implementación de la inyección por cola de mortero bicomponente en una máquina sin presión de tierras y la excavación de ésta misma en terrenos con predominio de arenas como fue la zona final de ampelitas.

- Inyección del trasdós con mortero bicomponente por cola del escudo:

Conocida la dificultad de obtener la estanquidad de los túneles con el uso del mortero convencional, en trazados en roca y con grandes caudales de agua, debido al potencial riesgo de lavado de dicho mortero previo a su fraguado, se evaluó la utilización del sistema de inyección de mortero bicomponente para el relleno del volumen anular creado entre el diámetro de excavación y el trasdós del anillo de dovelas.

Este sistema consiste en la adición de un reactivo acelerador de la cohesión denominado "Componente B" en base silicato; a una mezcla homogénea y fluida denominada "Componente A" y consistente en cemento, bentonita, agua y un aditivo dispersante-estabilizador del

fraguado. La inyección conjunta de ambos componentes, forman una masa cohesiva y tixotrópica, con un tiempo de gelificación menor de un minuto, minimizando el riesgo de lavado y proporcionando un soporte inmediato al anillo saliente del escudo de manera que no se altera su posición respecto al anterior ya en el túnel.

Para la simulación de la inyección de mortero bicomponente entre el perímetro de excavación de la TBM y el trasdós del anillo de dovelas prefabricadas, se diseñó y fabricó un banco de pruebas en el Parque de Maquinaria de FCC con el fin de simular las condiciones de velocidad de avance de la TBM; el volumen generado por ésta que habría de rellenar una línea de inyección de mortero a través del escudo de cola; la pérdida de carga que habría en la tubería a través de dicho escudo; y el efecto de la gravedad que habrá en cada uno de los 6 puntos de inyección (figura 16).

Gracias a ello también se obtuvo una formulación óptima para el arranque de la TBM en el proyecto.

Finalmente se adaptó el sistema de inyección a la tuneladora a través de 6 toberas situadas en el escudo de cola, cada una de ellas con dos líneas de inyección, una para cada componente.

- Tratamiento de frente inestable para excavación con TBM en modo abierto:

Las inyecciones con resinas expansivas se utilizaron en terrenos inestables, con el objetivo consolidar el terreno y evitar que colapsara sobre la cabeza de corte impidiendo su movimiento. Estas resinas bicomponentes, que expanden hasta 20 veces su volumen al aire, se inyectan a través de unas cánulas por las aberturas de la rueda de corte, de modo que expanden rápidamente al inyectarlas.

Los efectos conseguidos fueron:

- Permitir la excavación con TBM de roca sin inestabilidad en el frente
- Una correcta impermeabilización del túnel.
- Evitar que se produzcan asentamientos en superficie.

Además hubo que diseñar un sistema de variación de huecos de entrada en la cabeza de corte en función del material atravesado en esta zona, pasando el porcentaje de huecos en excavación normal de un 4,5 % aprox. a un mínimo del 2,2 % en esta zona, y que permitiera la variación porcentual de esta horquilla en función de la calidad del terreno atravesado. Esta operación evitó el colapso de las cintas de evacuación de escombros así como la generación de huecos de sobreexcavación (figuras 17 y 18).

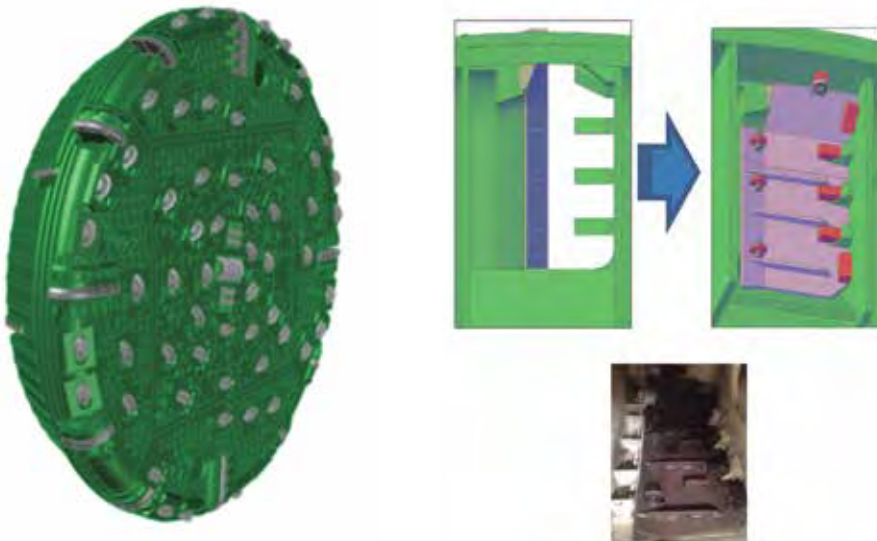



Fig. 17. Esquema diseño de cierre porcentual de las ventanas en la cabeza de la TBM



Fig. 18. Equipo de inyección de resinas en TBM e inyecciones en el frente

7 Conclusiones al proyecto

El objetivo de la ejecución de un túnel estanco, en una hidrogeología adversa, tratando de eliminar actuaciones posteriores a la excavación, obligó a la revisión del anillo prefabricado, haciendo uso de dovelas trapezoidales con doble junta de estanqueidad y una detallada elección de los accesorios de dovelas, que dio como resultado la mejora del montaje del anillo, minimizando posibles defectos en las juntas, así como la eliminación

casi total de las cejas entre dovelas, con un posicionamiento óptimo de las juntas de estanqueidad. Todo ello junto al uso de bicomponente para la inyección del extradado del anillo, ha proporcionado unos niveles de estanqueidad y calidad en el acabado del túnel, no alcanzados hasta momento, reduciendo actuaciones posteriores y manteniendo los niveles de producción de este tipo de obras con tuneladora (figura 19). 

Este nuevo corredor será el eje vertebrador de las comunicaciones ferroviarias entre el centro de la península y el norte y noroeste del país



Fig. 19. Cale de la TBM