

Eje pirenaico. Túnel de Petralba



Rafael López Guarga

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Ministerio de Fomento



Ricardo Páramo Vaquero

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Prointec

Resumen

La ejecución del túnel de Petralba en la carretera N-260 en el Pirineo oscense con una sección de 110 m² y 2.595 m de longitud ha supuesto una mejora en las comunicaciones en el norte de la provincia de Huesca.

Para llevar a buen término la obra fue preciso salvar diversos inconvenientes principalmente de índole medioambiental y de conocimiento previo de las características del macizo, que condicionaron la ejecución de la excavación, por lo que se optó por realizar la galería de evacuación paralela adelantada respecto al túnel a modo de galería piloto.

Palabras clave

NATM, túnel, galería, sostenimiento, excavación, sección completa, emboquille, paraguas

Abstract

The construction of the Petralba tunnel on the N-260 road in the Huesca Pyrenees, has led to an improvement in communications in the north of the Huesca province. The successful completion of this 2,595 m long and 110 m² section tunnel had to overcome a series of problems, mainly of environmental nature and with respect to the prior knowledge of the characteristics of the massif, which conditioned the construction of the evacuation tunnel and made it necessary to construct this gallery by advanced boring parallel to the main tunnel, much in the way of a pilot bore.

Keywords

NATM, tunnel, gallery, support, excavation, complete section, entrance, umbrellas

Introducción

El tramo de nuevo trazado de la carretera N-260, Eje Pirenaico, que incluye la ejecución del túnel de Petralba entre Sabiñánigo y Fiscal forma parte del Eje Pirenaico, carretera N-260 de frontera francesa (Port Bou) a Sabiñánigo, a su paso por la provincia de Huesca. Este tramo de nueva carretera, de 23,3 kilómetros de longitud, conecta los valles del Gállego y del Ara de forma directa sin necesidad de atravesar el puerto y túnel de Cotefablo, reduciendo el tiempo de recorrido de una hora a poco más de 15 minutos. El túnel de Petralba tiene una longitud total de 2.625 m. Atraviesa la Sierra de Canciás bajo el collado de Petralba con una montera máxima cercana a los 500 m. La tramitación del proyecto fue larga y problemática al afectar a la ZEPA Oturia-Canciás con la presencia de quebrantahuesos y águila real, siendo necesario el desarrollo de varias alternativas hasta que se consensuó el trazado definitivo. Dado lo escarpado del terreno atravesado por el túnel y su grado de protección no se pudieron realizar prospecciones geotécnicas en fase de proyecto, salvo la geología de superficie.



Fig. 1. Emboquille norte

Ya en fase de construcción, dado que se denegaron los permisos para ejecutar nuevas pistas de acceso, solamente se pudieron realizar sondeos y geofísica en las zonas accesibles, que no cruzan el trazado del túnel, por lo que hubo que extrapolar los resultados de las prospecciones. Todo ello llevó a realizar la obra con un alto grado de incertidumbre, que exigió un seguimiento exhaustivo de los frentes de excavación y de la evolución de los resultados obtenidos.

Datos generales del túnel

Como ya se ha dicho se trata de un túnel de carretera monotubo de 2.625 m de longitud de doble sentido de circulación con tres carriles.

El trazado en planta presenta tres alineaciones, una curva de 500 m en la entrada, una recta central de 1.944 m y otra curva de 800 m de radio en la boca de salida. La rasante es continua de -3 %.

La sección transversal es de herradura con 7 centros, quedando así, para un gálibo vertical de 5,5 m, una plataforma de 11,0 m distribuidos en una mediana central de 0,40 m, un carril de 3,50 m en el sentido de bajada, dos carriles de 3,25 m en el sentido Fiscal-Sabiñánigo y arcenes exteriores de 0,30 m. Para emergencias y conservación tiene sendas aceras de 0,60 m de anchura en la parte baja. En la mediana central se disponen elementos flexibles de balizamiento.

Dispone además de cinco apartaderos de 50 m de longitud en los que se amplía la plataforma 3,50 m respecto al resto del túnel. Resulta con todo esto una sección de excavación de 110 m² y de 148 m² en apartaderos.

Por motivos de seguridad dispone de una galería de evacuación paralela con sección de 4,5x4,5 m² con bóveda de medio punto. El túnel y la galería se conectan a través de nueve galerías de conexión en las que se disponen refugios que podrán ser utilizados por los usuarios en caso de emergencia en el túnel.

Las instalaciones del túnel se han adaptado a lo indicado en el R.D. 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la red de carreteras del Estado.

Geología y geotecnia

Como ya se ha dicho, durante la redacción del proyecto no fue posible un análisis exhaustivo del terreno que iba a ser atravesado al no poder realizar reconocimientos profundos de ningún tipo por falta de accesibilidad, por no disponibilidad de los terrenos y por condicionantes ambientales. El túnel fue proyectado basándose exclusivamente en geología de superficie e interpretación de fotogramas aéreos, complementados con una caracterización geomecánica de afloramientos superficiales.

Por ello, como parte de la obra, el proyecto consideró la realización de una campaña adicional de investigación mediante la perforación de sondeos con extracción de testigo, ensayos in situ y de laboratorio de las muestras recogidas y la realización de cualquier otro tipo de investigación geotécnica que proporcionara la información necesaria para concretar el diseño de las distintas fases o etapas de la construcción del túnel.

Así se realizó la siguiente campaña de investigación geotécnica:

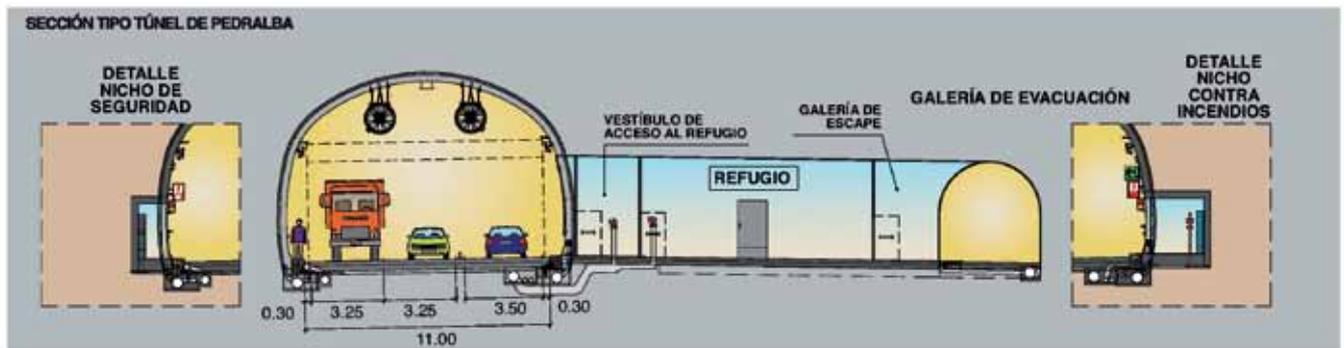


Fig. 2. Sección tipo túnel

- 600 m de sondeo con extracción de testigo.
- 480 m de perfiles de sísmica de refracción.
- 2.450 m de sísmica de reflexión.
- 2.250 m de tomografía eléctrica.

Con estas prospecciones no se observó ningún accidente geotécnico de relevancia aunque al no haberse podido ejecutar exactamente sobre la traza se extrapolaron los resultados obtenidos, tomando su resultado como no concluyente.

Para realizar la excavación se optó por los métodos convencionales de voladura mediante avance y destroza y, dado el grado de incertidumbre, se decidió realizar la galería de evacuación adelantada respecto al túnel principal a modo de galería piloto.

La zona por la que discurre el túnel está constituida en su totalidad por terrenos terciarios pertenecientes a la Cuenca Surpirenaica Central, denominada Cuenca de Jaca, limitada al norte por el zócalo hercínico y la cobertera mesozoica y solapando por el sur con el dominio del Ebro. Por el este y oeste sus límites son admitidos convencionalmente, el oriental en la zona de la rampa oblicua de las inmediaciones del valle del Segre y el occidental representado en la alineación de diapiros navarros de Estella-Velate.

Los materiales atravesados constituyen un sinclinal laxo, Sinclinal de Canciás. Una vez realizada la excavación puede afirmarse que la charnela de dicho sinclinal se encuentra desplazada hacia el origen del tramo (boca Sabiñánigo) y

es también en esta boca donde el buzamiento de la estratificación disminuye con mayor rapidez para después mantenerse durante unos 500 metros con buzamientos inferiores a 5 grados que se corresponden con la perforación de la zona de charnela.

La caracterización del macizo rocoso se realizó en cada uno de los frentes de excavación utilizando la Clasificación de Bieniawski (1989) que permitió obtener una clase y calidad del macizo rocoso con la que se definió el sostenimiento en base a los criterios marcados en el proyecto. Con los datos obtenidos se consideró un valor medio del RMR entre 40 y 60, correspondiente con una calidad de roca media incluida en la clase III (Beniawski, 1989), aunque se presentaron frentes de excavación con valores inferiores a 30 (Tipo IV. Calidad mala) y valores máximos del RMR de 70 (Tipo II. Calidad buena) (Fig. 4).

Las diferentes litologías atravesadas pertenecen a la formación Campodarbe (Eoceno-Oligoceno) y están constituidas por materiales detríticos de origen fluvial, lutitas, areniscas y conglomerados que afloran en capas de escala métrica a decimétrica, presentando una geometría tabular o canali-forme. Esta formación cartográficamente de muro a techo se subdivide en los siguientes dominios:

- Zona inferior de la serie con dominio de lutitas. Se intercalan cuerpos de arenisca y conglomerados aislados, de potencia decimétrica y en ocasiones métrica.
- Zona media con dominio de niveles de arenisca y conglomerados. Se intercalan paquetes de lutitas de potencia métrica a decimétrica. Afloran niveles de calizas lacustres.

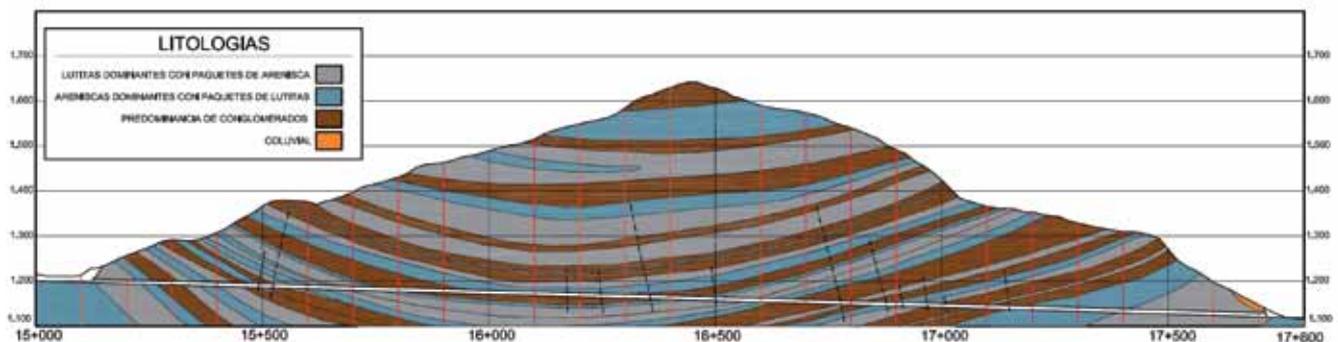


Fig. 3. Perfil geológico

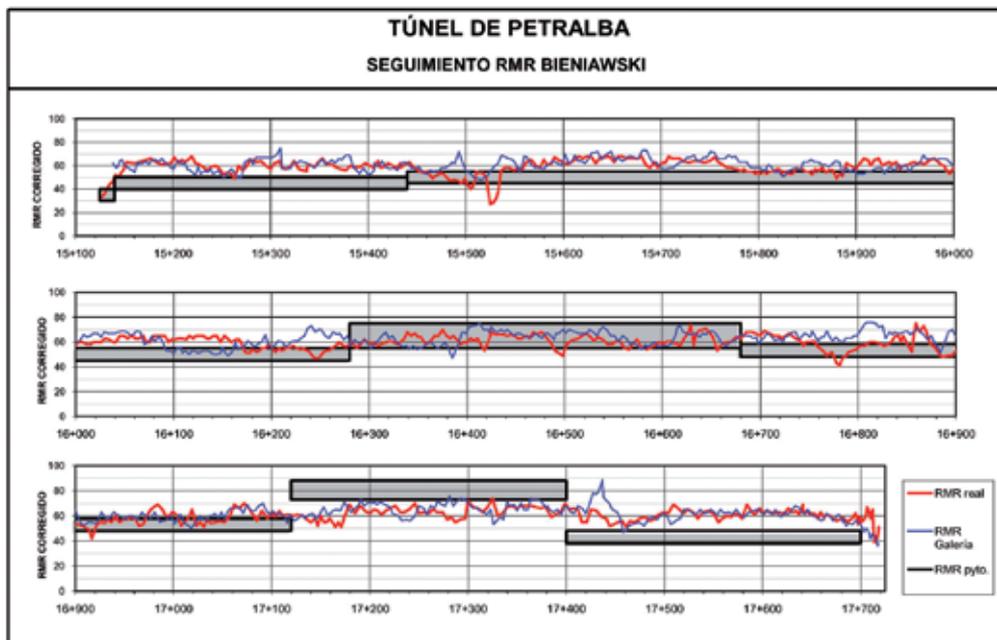


Fig. 4. Seguimiento RMR

- Zona superior constituida predominantemente por paquetes de conglomerados de potencia métrica a decimétrica, con intercalaciones más finas de lutitas.

Los parámetros geotécnicos obtenidos durante la excavación para las tres litologías principales son los que se indican en la tabla.

Los niveles de conglomerados interceptados por la excavación no fueron masivos ya que se encuentran intercalados entre las otras dos litologías de la formación. Esto hizo que los índices RMR obtenidos no se pudieran considerar

representativos de la calidad de los conglomerados. Los paquetes atravesados nunca tuvieron la entidad suficiente como para ocupar la sección total del túnel, presentando siempre alguna intercalación de las otras dos litologías, llevando consigo una mayor fracturación y la presencia de agua ya que las lutitas presentan una permeabilidad más baja.

El estado de las lutitas observadas en los frentes fue masivo con pocas familias, debido probablemente a su reducido módulo de deformación, a que resultan impermeables y a una mayor resistencia a compresión respecto de la espera-

Parámetro	Litología		
	Conglomerados	Lutitas	Areniscas
σ_c (Mpa)	60,305	38,704	45,430
m	22,404	24,3309	27,003
E (Mpa)	15.045	8.584	13.161
RMR	min	29	42
	medio	62	63
	max	66	74

Tabla 1. Parámetros geotécnicos

da, siendo por tanto la calidad del macizo excavado mayor que la prevista, por lo que en el cálculo del índice RMR todos los sumandos relativos a las juntas se incrementaron respecto a lo estimado.

En el caso de las areniscas, los índices RMR obtenidos en la excavación fueron similares a los estimados en proyecto.

La diversidad en los materiales atravesados vino ligada a variaciones en la hidrogeología, apareciendo algunas diaclasas con aportación de un caudal apreciable, hasta 30 litros por minuto, sobre todo en el caso de conglomerados en que la apertura de las fracturas fue importante, alcanzando en casos puntuales hasta 1 m, siendo lo habitual de 10 cm, por las que circula el agua. El resto de materiales (lutitas y areniscas) también se presentaron fracturados en mayor o menor medida, pero en estos casos la apertura de las diaclasas fue mucho menor con caudales mínimos de agua estando incluso secas.

Se caracterizaron cuatro familias de juntas además de la estratificación, denominadas J1 a J4.

En cuanto a la estratificación hay que señalar que la tendencia se corresponde con un sinclinal. El buzamiento en ambos emboquilles es de 45° y el sentido es opuesto en cada boca aunque, para los dos casos, favorable a la exca-

vación. Este ángulo va disminuyendo conforme se avanza en el trazado del túnel, reduciéndose a un ritmo más rápido desde la Boca Sabiánigo (DO 15+125), alcanzándose la charnela en la DO 16+250, por lo que a partir de aquí el buzamiento es desfavorable a la excavación.

En la Boca Fiscal el descenso del buzamiento de la estratificación se produce de manera más paulatina, con unos valores iniciales de 45° y mínimos de 4°. En este caso el sentido del buzamiento fue a lo largo de toda la ejecución favorable a la excavación al estar en todo momento en el mismo flanco del sinclinal.

La familia J1 se trata de juntas de origen tectónico con dirección subparalela a la estratificación y, por tanto, paralela al eje del sinclinal y al eje del túnel, por lo que se podría decir que son el resultado de las tracciones sufridas por el macizo durante el plegamiento.

Las de la familia J2 presentan una dirección subparalela al eje del sinclinal y al eje del túnel, de buzamiento subvertical. No son persistentes y aparecen en las tres litologías aunque con carácter más marcado en las areniscas y conglomerados, donde se encuentran de manera constante, presentando aperturas muy elevadas, de hasta 1 m, aunque con valores medios de apertura de 10 cm. De modo general, se presentan rellenas de calcita y arcilla y han

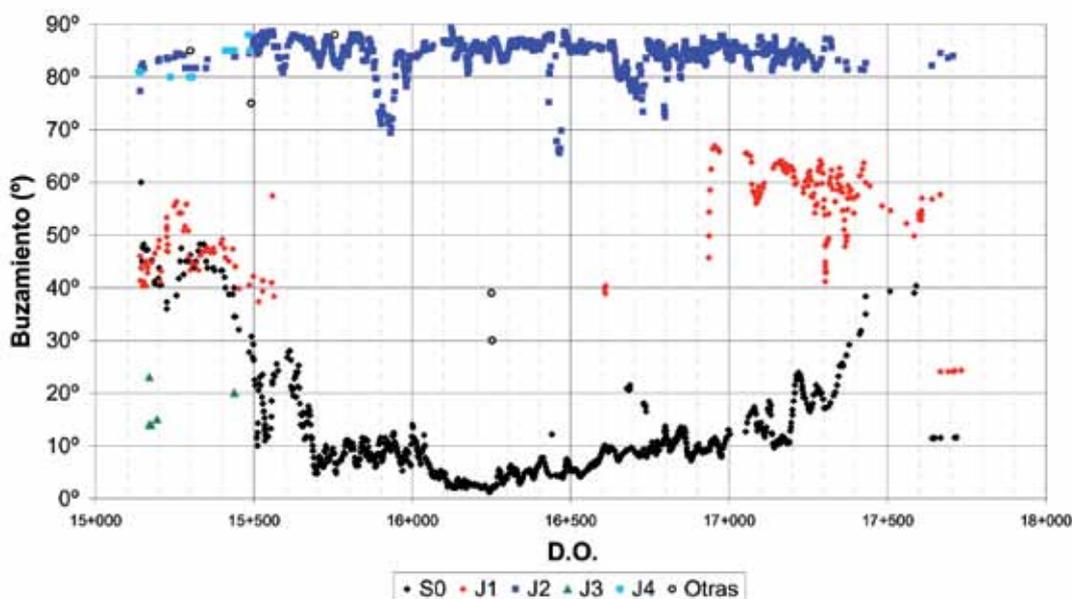


Fig. 5. Evolución de buzamientos

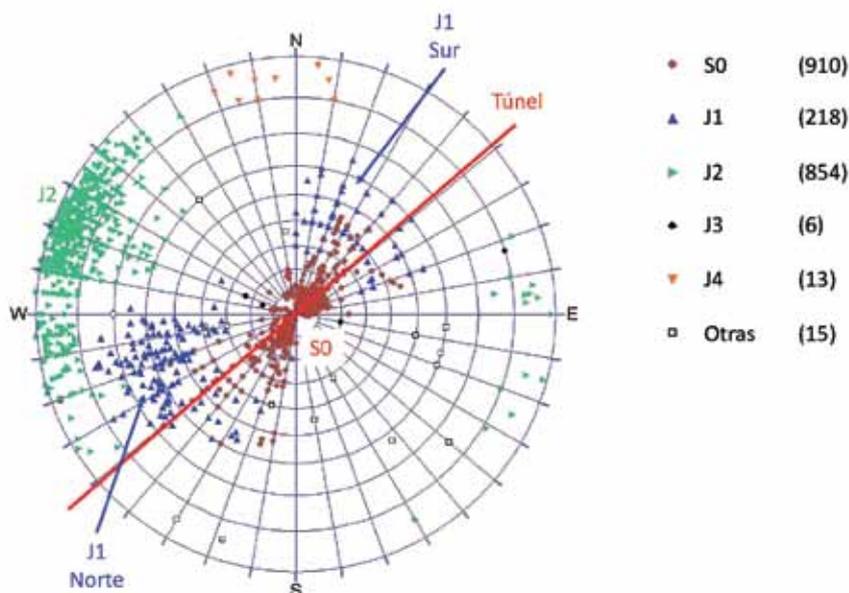


Fig. 6. Proyección estereográfica de discontinuidades

mostrado presencia de agua, en determinados casos con caudal apreciable.

Emboquille sur

Al igual que el resto del túnel los emboquilles también se han excavado en la formación Campodarbe y más específicamente en una alternancia de lutitas y areniscas con buzamientos entre 40 y 45° hacia el interior del macizo al presentarse cada una de ellas en flancos opuestos del sinclinal de Canciás. En ambos casos, el rumbo del talud de excavación es prácticamente paralelo a las curvas de nivel de la ladera en la zona.

La boca del lado Sabiñánigo está localizada en el flanco sur del sinclinal, con 22 metros de cobertera sobre la clave del túnel. El RMR presentó valores entre 30 y 50 (clase IV a III, calidad mala a media) y el espesor de suelo alterado fue muy pequeño (alrededor de 1 metro), careciendo de material coluvial sobre el sustrato rocoso.

La excavación del talud frontal del emboquille se realizó con talud 1H/3V con un sostenimiento a base de bulones de acero de 4 m de longitud y un sellado de hormigón proyectado.

Las condiciones geotécnicas disponibles para la perforación permitieron que pudiera realizarse la excavación por

medio de voladuras, aunque para el caso del emboquille con longitudes de pase de uno a dos metros. Como medida adicional se realizó un paraguas de micropilotes de 15 m de longitud en el túnel y un paraguas de redondos de acero de 12 m de longitud en la galería.

Emboquille norte

La ladera donde se ejecutó el emboquille norte es un pie de monte de la sierra subpirenaica de Oturia y Canciás que presenta una inclinación natural de aproximadamente 30°, presentando en planta dos planos separados por una vaguada, que se sitúa aproximadamente en la intersección entre el talud frontal y el lateral derecho del emboquille.

En planta, el talud frontal del emboquille forma un ángulo de 30° con la ladera, lo que genera una asimetría en las tensiones del terreno, que son mayores en el lateral al tener mayor cobertera. El talud derecho del emboquille es subparalelo a la ladera.

Dados tanto el ángulo que forma el talud frontal con la ladera como la inclinación de ésta, el talud izquierdo resultante es muy pequeño, tanto en altura como en longitud.

Los perfiles sísmicos de refracción y los distintos sondeos realizados determinaron la presencia de un espesor de coluvial medio de unos 8 metros sobre lutitas de la forma-

ción Campodarbe que buzan unos 40°-45° hacia el túnel al encontrarse en el Flanco Norte del Sinclinal de Canciás, poniendo de manifiesto la estructura interna que presentaba el macizo, que era el esperado de una formación de este tipo, con resaltes debidos a niveles más competentes.

Para reducir las dimensiones del talud frontal se alargó en 20 m la longitud del túnel excavado en mina y se verticalizó lo más posible, llegando al 1H/3V tras un cálculo de estabilidad a corto plazo de la altura del batache excavado en el tramo en coluvial. Aun así la anchura de la trinchera fue de 37 metros ya que alberga tanto el túnel principal como la galería de evacuación, cuyos hastiales en el emboquille tienen una separación de 9 metros.

Las ventajas que llevaron a ampliar la longitud del túnel fueron las siguientes:

- Se buscó reducir lo más posible la altura de los taludes y por tanto de la trinchera de acceso, con el objeto de primar su estabilidad y sacrificar la calidad del macizo excavado en los primeros metros de túnel, que por otra parte quedó sujeto con un paraguas pesado, calculado para soportar el peso que gravita sobre él.
- Al reducirse las dimensiones del talud frontal aumenta el confinamiento que ejercen sobre éste los taludes laterales

de la trinchera de acceso. No obstante conviene aclarar que los estudios de estabilidad se realizaron sin considerar este confinamiento, por estar del lado de la seguridad.

- Desde el punto de vista ambiental la solución ejecutada fue mucho mejor ya que supuso menor superficie de ocupación, al reducirse el movimiento de tierras a cielo abierto, con menores excedentes y menor nivel de ruidos por el paso de maquinaria.

La altura del talud frontal finalmente resultante fue variable entre 12 metros en la margen izquierda y 23 metros en la derecha.

Para la excavación de la trinchera de acceso, en el tramo excavado en coluvial, fue necesario realizar un sostenimiento a base de bulones autoperforantes de 40 mm de diámetro y 20 mm interior, en malla de 1x1 metros, con una longitud de 12 metros en las filas superiores y de 9 metros las dos últimas antes de alcanzar la roca.

En el tramo excavado en roca se colocaron bulones de barra de 32 mm de diámetro en malla de 3x3 metros.

Una vez terminada la excavación tanto de la trinchera como de los primeros metros del túnel, para mejorar el coeficiente de seguridad definitivo, se adosó un falso túnel

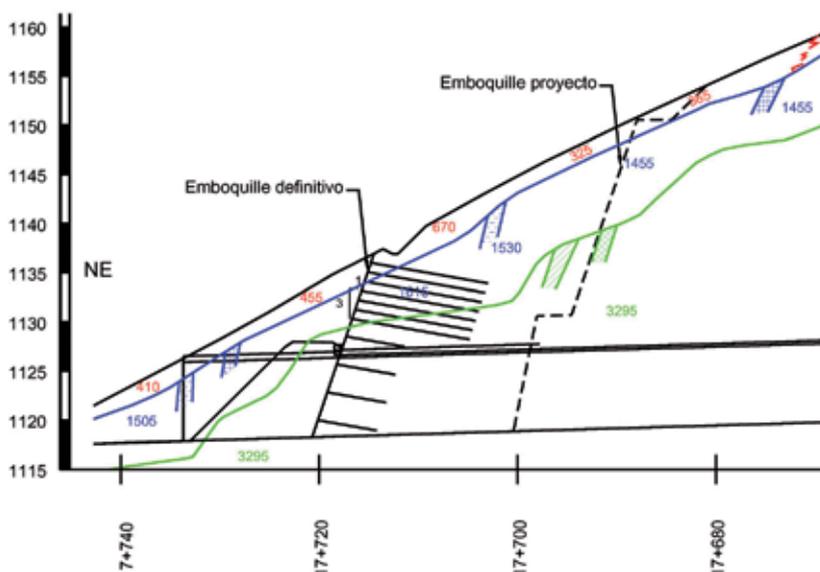
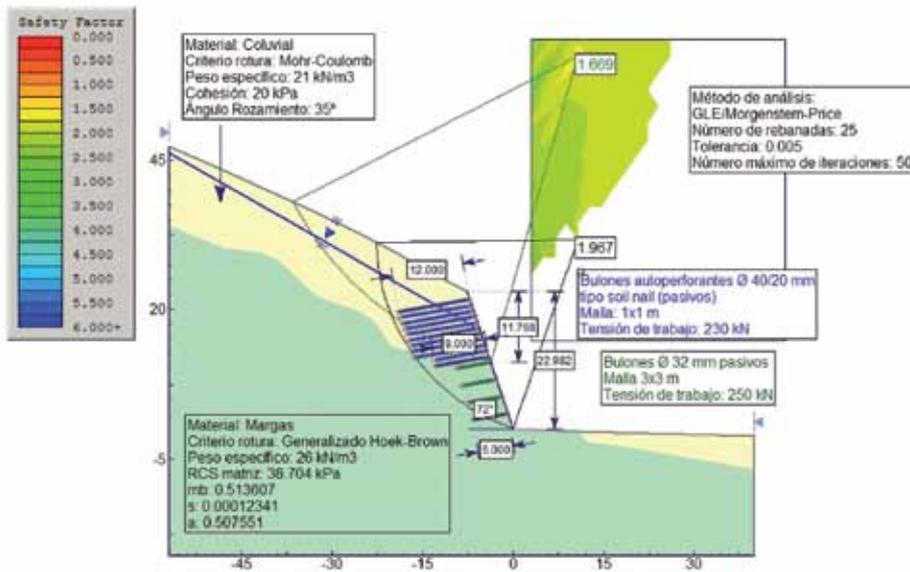


Fig. 7. Emboquille norte. Comparativo con proyecto



**Fig. 8. Boca Norte.
Tratamiento del talud frontal**

de 18 m de longitud sobre el que se realizó un relleno de tierras.

Los valores de los RMR obtenidos fueron cercanos a 40 dado el alto grado de fracturación y alteración de las juntas. Por ello, y por la poca cobertura de roca existente sobre la clave, la excavación de los 30 primeros metros se realizó con medios mecánicos y en tres fases. El sostenimiento empleado fue rígido a base de cerchas HEB.

Nuevo método austriaco

El método de excavación empleado en el túnel de Petralba fue el del Nuevo Método Austriaco (NATM) mediante perforación y voladura. Según definición de Müller (1978), “el NATM es un concepto cuyo éxito depende de que se aplique un conjunto de principios, el primero de los cuales es utilizar la masa rocosa como principal elemento para resistir las cargas”. La aplicación del NATM optimiza el empleo de recursos, ya que considera menores cargas sobre el sostenimiento que los métodos de excavación clásicos que tienen en cuenta toda la bóveda que gravita sobre el túnel. Para aplicar el NATM se debe movilizar deliberadamente la resistencia del terreno en torno al túnel lo máximo posible, permitiendo su deformación controlada mediante la aplicación de sostenimientos flexibles y controlando las deformaciones con una correcta instrumentación. Por tanto, en aplicación de los principios teóricos del NATM, se actuó de la siguiente manera:

- utilización de la roca como elemento resistente,
 - empleo de planes de tiro con retardos y con voladura perimetral de recorte para alterar lo menos posible el macizo rocoso,
 - verificación de la clasificación del macizo respecto a las calidades definidas en el proyecto mediante el índice RMR de Bieniawski, aplicando el sostenimiento correspondiente según la calidad observada,
 - control de la influencia del tiempo en el comportamiento del macizo rocoso mediante la medición y seguimiento de convergencias y aplicación de sostenimiento adicional en caso de ser necesario,
 - construcción de un sostenimiento definitivo mediante un anillo de revestimiento con hormigón encofrado.
- En fase de obra se realizaron controles sistemáticos de los siguientes aspectos:
- geológico con levantamientos continuos del frente,
 - cálculo de estabilidad de cuñas con las principales familias de diaclasas identificadas y considerando su evolución dentro del sinclinal,
 - medición de convergencias,



Fig. 9. Situación definitiva del emboquille norte

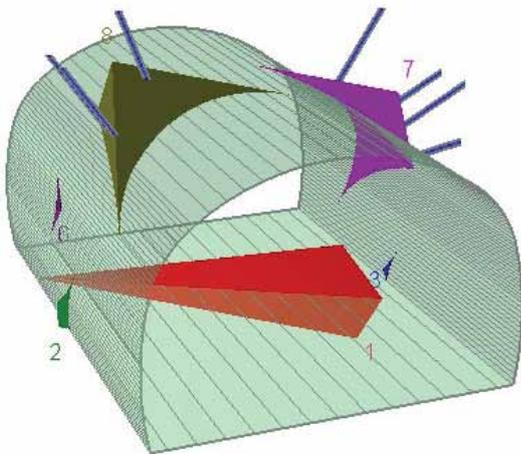


Fig. 10. Ejemplo de análisis de estabilidad de cuñas

- control de calidad de los elementos de sostenimiento y revestimiento.

Salvo en los primeros 60 m de cada frente, la excavación se realizó a sección completa hasta que se comprobó la estabilidad de los frentes. Se adoptó esta opción frente a la sección partida por las razones geotécnicas siguientes:

- cada cambio o reajuste en el estado de tensiones del macizo crea perturbaciones y roturas en la roca circundante a la excavación, que hace que el “anillo” portante de roca necesario para la aplicación del NATM pierda calidad,

- la ejecución de excavaciones parciales suele generar esquinas en las que se producen concentraciones de tensiones, que también redonda en la calidad del “anillo” de roca,

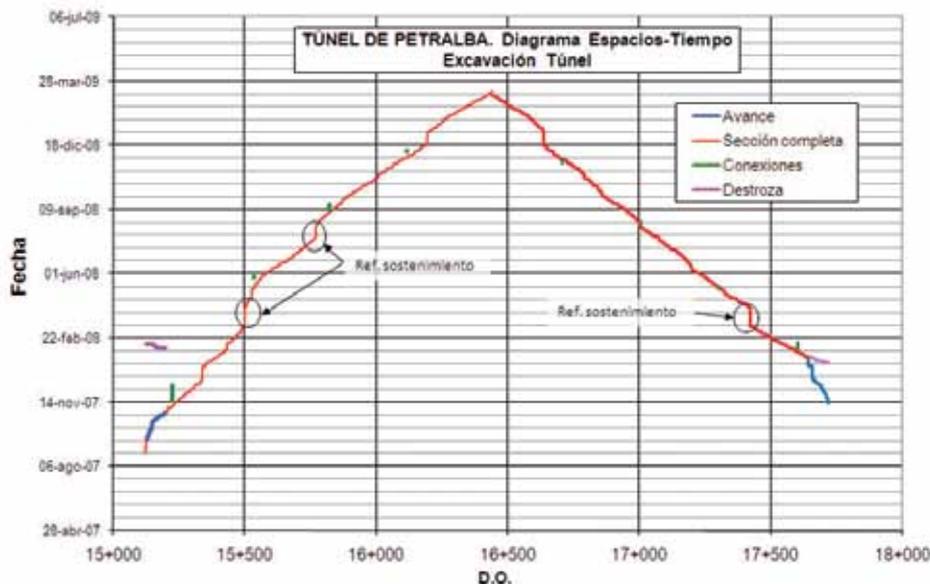


Fig. 11. Diagrama espacio-tiempo

- un túnel se debe considerar estáticamente como una estructura tipo tubo, de mayor capacidad portante que una estructura tipo arco, siempre que esté cerrado, cuestión que en el presente caso no tenía importancia dada la calidad del macizo.

Hay que destacar que hasta en las secciones especiales de apartadero con 148 m² se mantuvo el criterio de excavación a sección completa.

Desarrollo de las obras

Como ya se ha indicado, la excavación del túnel se realizó desde ambas bocas, así como la de la galería lateral, que se llevó adelantada unos 100 m a modo de galería piloto de reconocimiento, con lo que se consiguió una estimación inicial de la calidad del macizo, estableciendo puntos de alerta donde se esperaba algún incidente geotécnico de relevancia.

Ello perdió parte de su cometido cuando se alcanzó la charnela del sinclinal, ya que por la potencia de los estratos, alternancia de litologías y, principalmente, por la diferencia de cota entre galería y túnel (más de 5 m), no fue posible observar previamente la calidad del macizo en la clave del túnel.

Aun así, la opción de llevar la galería lateral avanzada a modo de galería piloto y obtener una estimación de la calidad del macizo a excavar, permitió ejecutar la excavación del túnel

a sección completa en el 94 % de su longitud, incluidos los tramos especiales con apartadero, lo que supuso, además de ventajas geotécnicas, una mejora en los rendimientos globales de excavación y la optimización de la maquinaria.

Sin embargo, al ejecutar los dos túneles en paralelo los rendimientos del principal se vieron ligeramente alterados dadas las interferencias que se producían con las voladuras.

Riesgos geotécnicos durante la excavación

Los principales riesgos geotécnicos observados en la excavación fueron los siguientes:

- formación de techos planos,
- presencia de freáticos colgados,
- alteración de las fracturas J2.

Formación de techos planos

Aunque no se trata de un riesgo geotécnico muy grave cabe mencionarlo, ya que se produjo en una longitud importante de casi 500 m.

En la charnela del sinclinal la estratificación se situaba horizontal, con unos índices RMR entre 55 y 65, donde según las hipótesis de proyecto los sostenimientos previstos eran a base de hormigón proyectado y bulones, es decir, sin cerchas. Sin embargo, una vez realizado el saneo, las

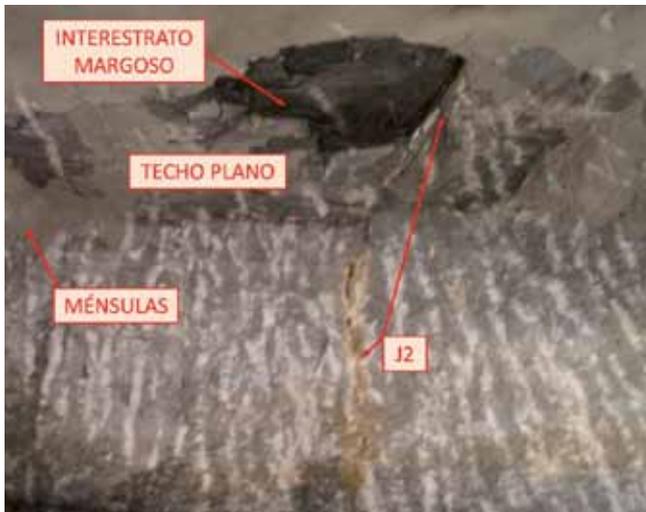


Fig. 12. Techo plano



Fig. 13. Interestrato lutítico

secciones resultantes de la excavación presentaban un perfil escalonado en hombros, produciéndose ménsulas cortas en los hastiales y techos planos en clave con caída de bloques, que obligó a realizar un refuerzo a base de cerchas tipo TH-21 ante las grietas que comenzaron a aparecer en clave.

Analizando las roturas se observó que eran por flexión de los estratos margosos debido a su potencia decimétrica y a la intercalación de interestratos lutíticos con mayor contenido en arcilla y nula rugosidad.

Posteriormente, se llevó a cabo en los hastiales el sostenimiento correspondiente a la sección tipo para esa clase de terreno y en la clave un refuerzo a base de cerrar la malla de bulones a $1,5 \times 1,5 \text{ m}^2$ y así sostener la bóveda de descarga creada al romperse las ménsulas cortas de los hombros y el techo plano favorecido por el diaclasado existente. Por último, se colocó una capa de mallazo y una tercera de hormigón proyectado.

La idoneidad de estas medidas se comprobó intensificando las inspecciones visuales y las medidas de convergencias.

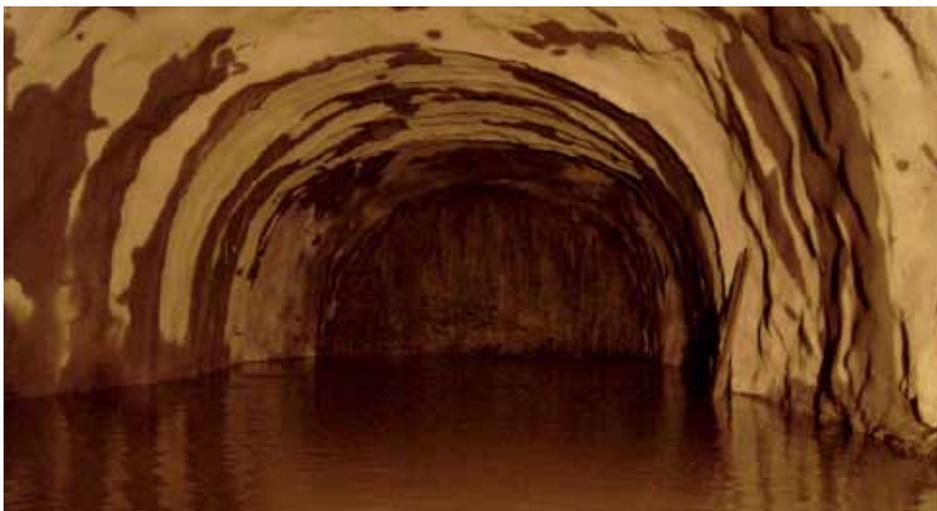


Fig. 14. Inundación del frente



Fig. 15. Alteración de fracturas J2

Niveles freáticos colgados

Tanto la estructura de sinclinal como la alternancia de litologías con distinto grado de permeabilidad generaban la presencia de niveles freáticos colgados que produjeron aportes importantes de agua al pincharlos con la perforación. Ello se produjo al pasar de suelo a techo de un estrato impermeable a uno permeable o con alguna fractura tipo J2 al ser vías preferentes de agua.

El mayor de los niveles captados se produjo por la boca de Sabiñánigo con un caudal y volumen importantes de agua que dieron lugar a la inundación de, aproximadamente, 70 m de túnel al resultar insuficiente el sistema de achique. Ello no pudo ser detectado previamente por la galería de evacuación al tener una cota inferior a la del túnel principal.

A partir del suceso descrito se duplicó la capacidad del sistema de achique.

Alteración de las fracturas J2

La presencia de diaclasas de la familia J2, juntas subverticales con dirección cuasiperpendicular al eje del túnel, con aperturas importantes por disolución, produjo la aparición de eventos kársticos, bien con presencia de agua o secos, dando lugar a importantes surgencias de agua al realizar la perforación.

Los riesgos potenciales de la alteración de estas fracturas eran la caída de bloques por la conjunción con la estratificación y otras familias y ser vía preferente de filtraciones hacia el túnel.

En los casos más graves se solucionó colocando un sostenimiento a base de cerchas e implantando una sección de auscultación para observar posibles deformaciones excesivas.

Las filtraciones se canalizaron al drenaje general a través del sostenimiento mediante un tubo, en el caso de puntos localizados y mediante mayor cuantía de perforaciones y lámina drenante cuando se trató de una superficie amplia no susceptible de canalizar mediante tubo.

En la mayoría de los casos, estas fracturas fueron de la entidad suficiente como para ser detectadas ya en la galería de evacuación, lo que permitió establecer los niveles de atención necesarios para prever avances menores y sostenimientos de mayor entidad en esos tramos.

Rendimientos de la excavación

Los rendimientos de la excavación en un túnel de estas características son variables en función de los siguientes factores:

- *Propios del túnel de Petralba, sobre los que no se puede actuar para mejorarlos*

- Condiciones geotécnicas del macizo, o fracturación,
 - hidrogeología,
 - resistencia de la matriz,
 - abrasividad de la roca excavada.

- Pendiente del túnel, avance contra o a favor de la pendiente,
 - por drenaje,
 - por ventilación.

- Secciones especiales del túnel: apartaderos, conexiones, nichos, etc.

- Aumento de la longitud de transporte de los productos de excavación.

- *Propios del método de excavación (NATM con perforación y voladura)*

- Interferencias con la excavación de las galerías. Paradas por la ejecución de las voladuras.

- Interfases entre las actividades del ciclo.



La obra pertenece al nuevo trazado de la Vía Pirenaica N-260 entre las poblaciones de Sabiñanigo y Fiscal.

El tramo de carretera tiene dos túneles (Berroy y Pedralba) de secciones distintas con barrera New Jersey incluida.

La complejidad de la obra estaba en conseguir un único encofrado para resolver las cuatro geometrías que además fuera capaz de adaptarse a las tres secciones de Pedralba sin necesidad de desmontarse. Para ello PERI diseñó un encofrado especial metálico con una clave de módulos

articulados que permite, partiendo de una geometría curva inicial, adaptarse a otras curvas mediante una aproximación en forma de margarita. Para poder cumplir la necesidad de la obra de entrar por una de las bocas del túnel de Pedralba y hormigonar las tres secciones adaptándolo en el interior sin necesidad de sacarlo, PERI diseñó, sobre la plataforma del carro TET-4, un equipo hidráulico de transformación que partiendo de la geometría tipo del túnel lo adaptaba a las secciones de apartadero abriendo el encofrado de clave e intercalando tres módulos complementarios.

Cuatro secciones con un sólo encofrado sobre carro en alquiler con marcado CE Tendrá éxito construyendo con PERI



Encofrados
Andamios
Ingeniería

www.peri.es

- Empleo de las últimas tecnologías, como jumbo robotizado.
- Explosivo empleado y sistema de carga.

• *Otros factores sobre los que se puede actuar para mejorar el ciclo*

- Mantenimiento y conservación de la maquinaria, especialmente la de difícil sustitución, como jumbos, robots gunitadores y grupos electrógenos.
- Estado de la plataforma del túnel, con mayor incidencia cuanto mayor es la longitud excavada en cada frente,
 - reducción de los tiempos de desescombro,
 - menores averías en los medios de transporte,
 - reducción de tiempo de servicio de materiales, como el hormigón.
- Accesos al túnel. En el caso de Petralba, ante la imposibilidad de construir alguno de los viaductos de la nueva carretera hasta la finalización del túnel, el acceso

debía realizarse por una pista de 8 km en el lado Sabiánigo y de 7 km en el lado Fiscal. Además, dada su situación estas pistas de acceso quedaron afectadas negativamente por la vialidad invernal.

- Organización y planificación de la obra, siendo fundamental la experiencia en trabajos similares del personal adscrito a la misma, la limpieza, la organización de los tajos, la presencia de talleres y la previsión de repuestos.
- Previsión de materiales necesarios para la ejecución del ciclo, tales como cerchas, mallazo, gunita, fibras, bulones, resina, etc.

La maquinaria empleada en la ejecución del túnel fue la siguiente:

- *Boca Sur*
 - 2 jumbos: Tamrock Axera T11 DATA-315
 - 2 robots de gunita Sika PM 500

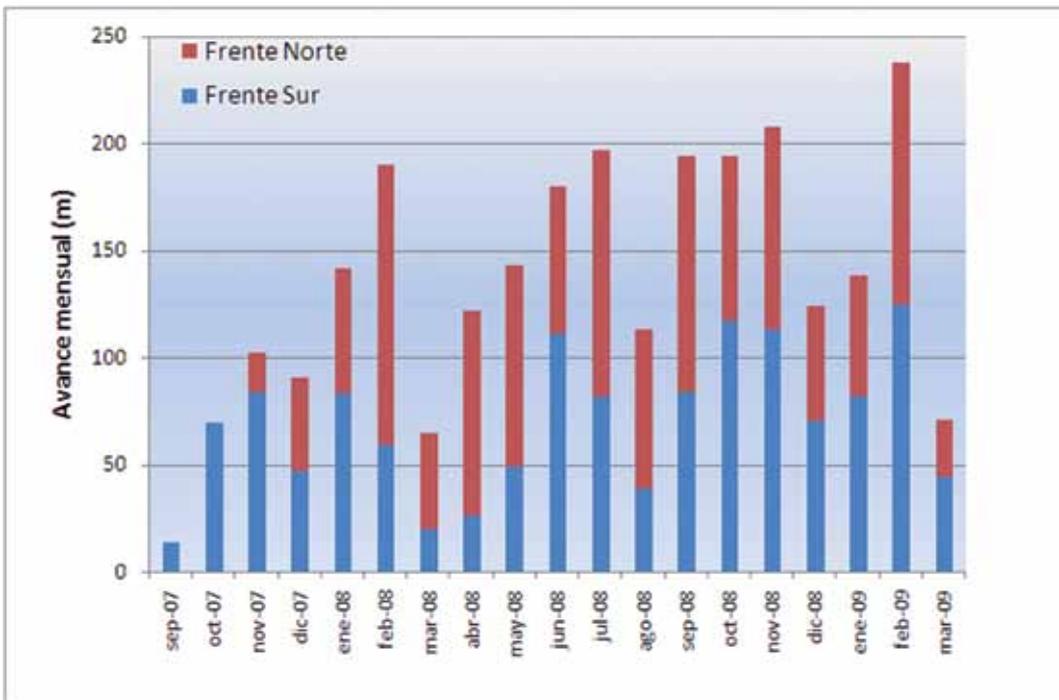


Fig. 16. Rendimientos mensuales

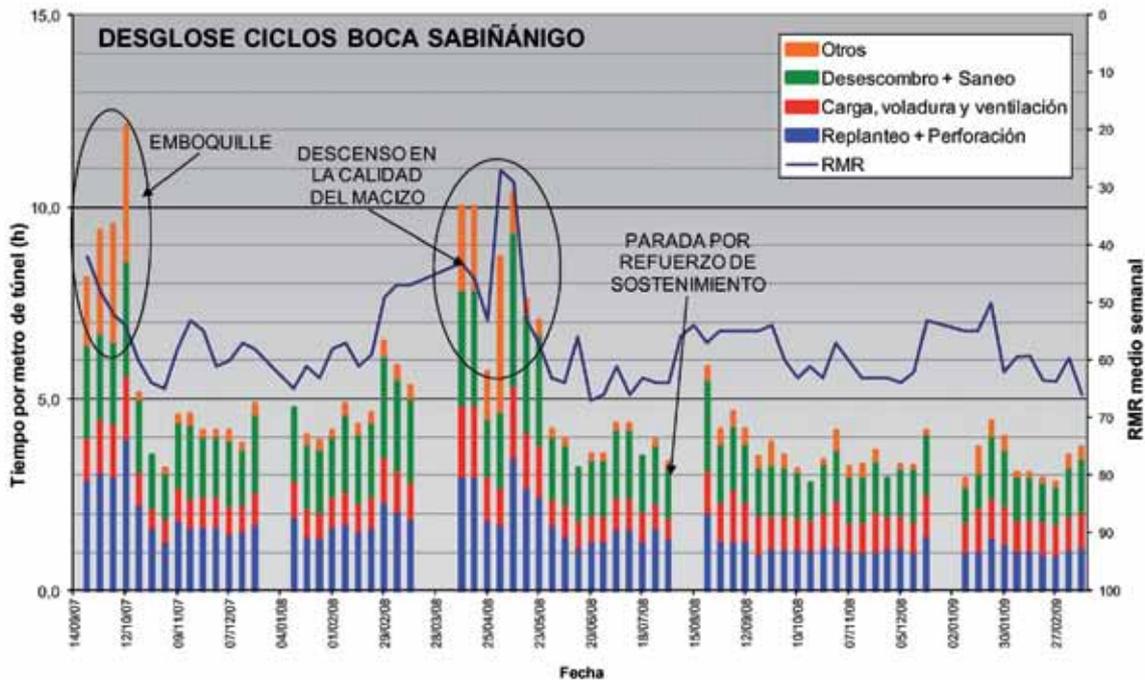


Fig. 17. Desglose de ciclos. Boca de Sabiñánigo

- 2 palas cargadoras Volvo L180E
- 4 camiones Dúmper articulados Volvo A30D
- 2 retroexcavadoras CAT 330 L ME

• *Boca Norte*

- 1 jumbo Atlas Copco Rocket Boomer
- 1 robot de gunitado Sika PM 500
- 1 pala cargadora Volvo L180E
- 5 camiones Dúmper articulados Volvo A30D
- 1 retroexcavadora Volvo EC240B
- 1 vehículo de transporte y carga de ANFO

En la gráfica se representan los avances mensuales obtenidos en la excavación, habiéndose alcanzado un máximo de 238 m en sección completa entre las dos bocas.

La media mensual obtenida fue de 151 m/mes a sección completa, que con los condicionantes del túnel se puede considerar un rendimiento superior a la media habitual para este tipo de obras.

Como se observa, los rendimientos iniciales son muy pequeños debido a la calidad del macizo atravesado en los primeros metros de excavación.

Ya es sabido que las principales fluctuaciones en los rendimientos son consecuencia de la variación del índice RMR, ya que a menor calidad del macizo rocoso aumenta principalmente el tiempo destinado a la fase de sostenimiento. En el inicio de los trabajos se presentaron plazos de hasta 12 horas por metro de túnel excavado debido a una calidad baja-media del macizo rocoso, al tratarse de la zona del emboquille (más fracturada y con elevadas filtraciones de agua) y al ser necesario un periodo de adaptación tanto de personal como de maquinaria.

Superado este primer periodo, a medida que iba aumentando la competencia del macizo con valores más altos de RMR, se obtuvieron mejores rendimientos llegando a

Nivel	Deformación	Velocidad	Acción
Prevención	0,5 %L	5 mm/día	Estudiar si es necesario refuerzo de sostenimiento
Riesgo	1,0 %L	10 mm/día	Refuerzo obligatorio del sostenimiento

Tabla 2. Convergencias. Niveles de alarma

L: Longitud de la cuerda

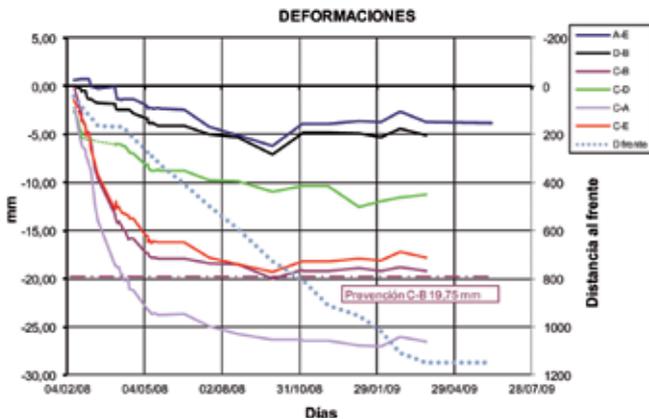


Fig. 18. Ejemplo seguimiento convergencia

alcanzarse tiempos de algo menos de 4 horas por metro de túnel excavado y sostenido a sección completa.

Puntualmente se presentaron tramos en los que la duración del ciclo fue mucho mayor, dada la disminución de la calidad del macizo rocoso con valores de RMR inferiores a 30, que aunque se trataba de una zona de conglomerados se encontraban muy fracturados y con importantes filtraciones de agua que dieron lugar a la ejecución de sostenimientos pesados.

Auscultación

Control de convergencias

Para el control de convergencias el procedimiento empleado fue la medición de seis cuerdas en las secciones implantadas en el túnel principal y de tres cuerdas en las implantadas en las galerías, tanto de conexión como de evacuación. Para analizar su evolución, se siguieron los criterios definidos en

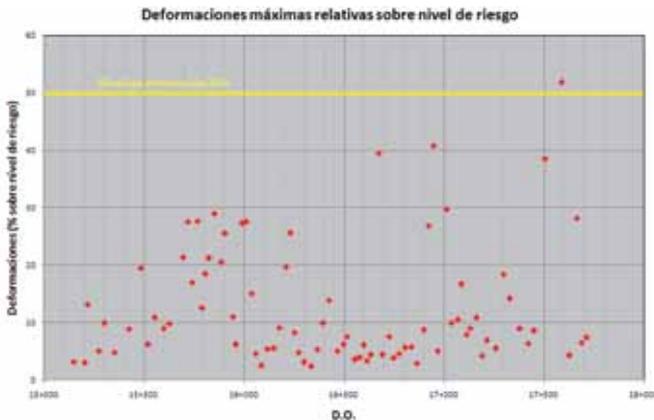


Fig. 19. Convergencias. Lecturas máximas

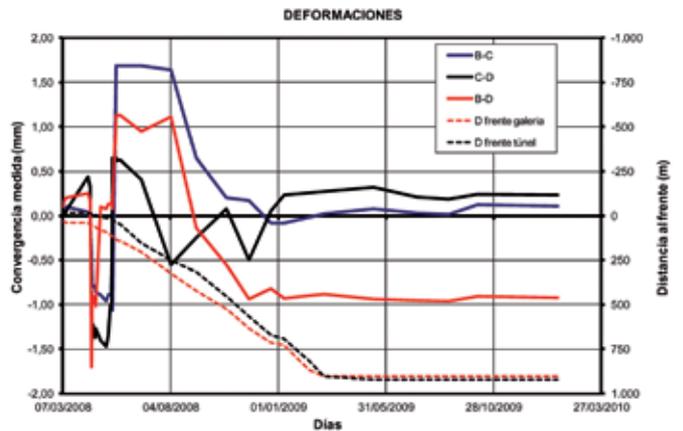


Fig. 20. Ejemplo de convergencia en la galería

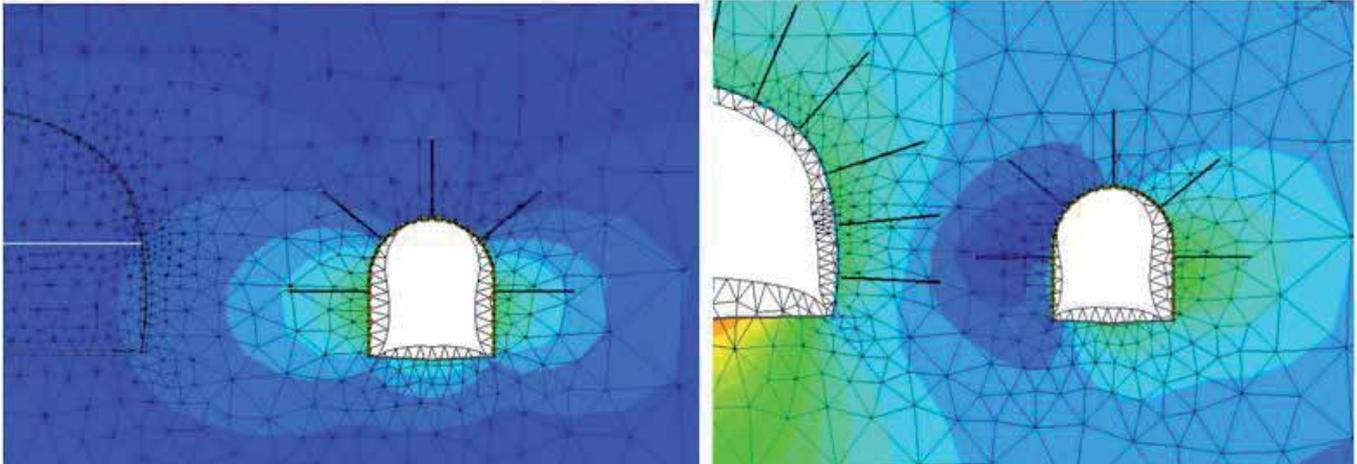


Fig. 21. Malla deformada (detalle de la galería de evacuación)

el proyecto, con dos niveles de alarma tanto en deformación como en velocidad de deformación, estando cifrado el nivel de riesgo en 1 % de la longitud de la cuerda medida y 10 mm/día y el nivel de prevención en el 50 % del de riesgo.

En el túnel se instalaron 82 secciones de convergencia, lo que supuso una por cada 32 m y en la galería de evacuación 55 secciones, es decir una por cada 47 m excavados. Además en cada galería de conexión se instaló una sección en el centro de la misma, resultando por tanto otras nueve adicionales.

En la gráfica se indica el porcentaje de las convergencias medidas respecto al nivel de riesgo (que tendría valor 100 %). Como se observa tan solo en una sección se alcanzó el nivel de prevención (50 %), en la que tras un refuerzo del sostenimiento se estabilizó llegando al 51,8 %.

En el seguimiento de las convergencias se pudo observar el efecto producido por la excavación del túnel sobre la galería. Al llevarse la excavación de esta adelantada respecto al túnel se produjeron desplazamientos hacia él, siendo mayor lógicamente el del hastial izquierdo, el más cercano al túnel.

Como explicación gráfica de este efecto se realizó una simulación mediante elementos finitos en 2D considerando las fases de excavación.

Extensómetros

Además de la convergencia, se instalaron cuatro secciones con extensómetros en clave y hastiales, con varillas empotradas a 3, 6 y 9 m, con los que se obtuvieron deformaciones máximas de 3 mm, encontrándose estabilizadas.

Impacto ambiental

Materiales procedentes de la excavación

La geología de los terrenos atravesados condicionó negativamente el empleo de los productos de la excavación para la producción de áridos, dada la alternancia de materiales margosos con los de las otras dos litologías.

Aun así, parte de los productos procedentes de la excavación tras una clasificación y machaqueo previo se pudieron emplear en la traza como zahorra artificial, explanada mejorada y núcleo de terraplén, aunque otra gran parte, dada la descompensación de tierras existente en la obra, fue preciso transportarla a vertederos, que fueron objeto de restauración ambiental mediante la extensión de una capa de tierra vegetal de 40 cm de espesor y la plantación de especies autóctonas.

Vertidos

Se dispusieron en cada una de las bocas balsas de decantación al objeto de que tanto el agua captada del macizo durante la excavación como la procedente de la utilización de

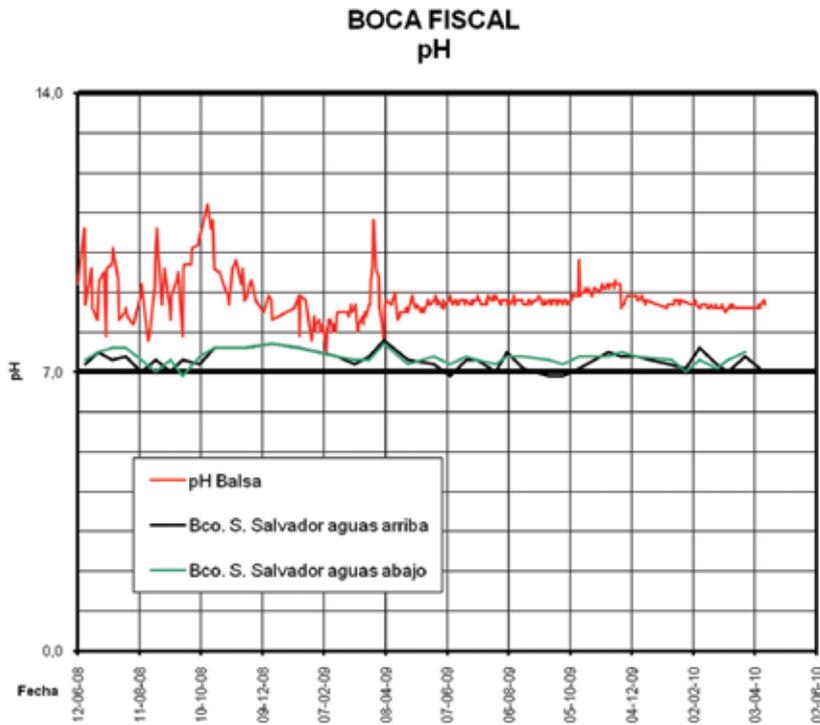


Fig. 22. Control pH Boca Norte

la maquinaria de perforación pasase por ellas previamente a su vertido a los barrancos. Se efectuó un control diario y con periodicidad quincenal se realizaban controles de los cauces naturales aguas arriba y aguas abajo con el fin de detectar una eventual afección. Los parámetros analizados en cada punto de control, ocho entre las dos bocas, fueron los siguientes: pH, sólidos en suspensión, DQO, DBO₅, oxígeno disuelto, aceites, grasas y compuestos orgánicos.

Los parámetros mínimos de calidad exigidos en los puntos de control de los cauces aguas abajo del punto de vertido debían ser los definidos para aguas salmonícolas por la Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 6 de septiembre de 2006, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces. En la gráfica adjunta se observa que la afección al curso de agua fue despreciable, al mantenerse prácticamente constantes los parámetros analizados.

Revestimiento

Previamente a la realización del cale del túnel comenzaron las labores de revestimiento con la ejecución de las ban-

quetas de apoyo del carro de encofrado, empleándose para ello dos unidades automotoras de 12 m de longitud, con la particularidad de que la que iba situada más retrasada según el avance del revestimiento era articulada, pudiendo abrirse para adecuarse a la sección del apartadero.

Los empujes verticales resultantes durante el hormigonado se transmitían desde el encofrado interior, a través de unos husillos de apoyo, a la zapata, mientras que los horizontales lo hacían superiormente a través del codal de clave y en su parte inferior a la zapata mediante picas de cortante.

Los carros estaban provistos de un sistema hidráulico para realizar todas las maniobras durante el ciclo normal de trabajo: traslación, ripado horizontal, movimiento de faldones, elevación y descenso, incluso durante la transformación interior para pasar de la geometría general del túnel a la de apartadero. El movimiento de avance se realizó mediante cuatro ruedas motrices con freno, disponiendo el sistema hidráulico de válvulas de seguridad y dispositivos de emergencia.

Con los encofrados de arranque se hormigonaron tanto el muro guía inferior del túnel como las zapatas, sirviendo



Fig. 23. Revestimiento. Carro encofrado y carro en apartadero

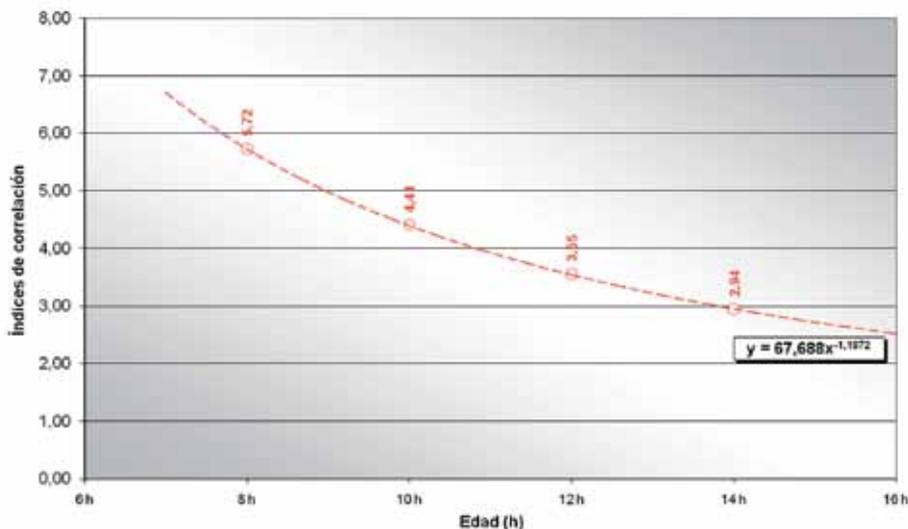


Fig. 24. Hormigón revestimiento. Correlación resistencias

también para dejar los huecos de las llaves de cortante en la posición correcta.

El sistema de encofrado se completó con los encofrados para nichos, los de entronque para las galerías, los exteriores para el falso túnel y cuñas metálicas de suplemento para el paso por curva debido a los radios de curvatura en planta.

Para el control del tiempo de desencofrado se realizó un estudio de la resistencia en tiempos cortos de las probetas curadas a la misma temperatura que el hormigón dispuesto en el encofrado, obtenida mediante termopar introducido en un depósito de agua, de manera que se reprodujeran lo más aproximadamente las condiciones reales del hormigón.

Paralelamente se iban realizando roturas de probetas curadas en las condiciones ambiente, de manera que se pudieran comparar las resistencias, obteniendo una correlación entre la resistencia del hormigón encofrado y la del curado en condiciones ambientales, permitiendo de esa manera evitar la colocación del termopar una vez que se comprobó la eficacia de la formulación realizada. Con este sistema se corregía la resistencia obtenida en condiciones normales, estimando la del hormigón en el interior del encofrado.

Esta misma correlación se realizó en las dos plantas de hormigón que suministraban al túnel para obtener la fórmula de cada una de ellas.

El desencofrado se autorizaba cuando se alcanzaban los 12,5 MPa en el interior del encofrado, que generalmente se producía a las 12 h de curado.

Conclusión

La puesta en servicio del tramo Sabiñánigo-Fiscal del Eje Pirenaico (N-260) ha supuesto una mejora considerable en las comunicaciones por carretera de la provincia de Huesca, ya que la alternativa era el puerto de Cotefablo y ha generado un ahorro importante en los tiempos de transporte.

La situación del túnel de Petralba en cuanto a relieve y grado de protección del suelo fue un condicionante muy importante tanto en fase de proyecto como de construcción, limitando en gran medida la ejecución de reconocimientos geotécnicos.

Dada la precaria información, la excavación supuso un éxito al ir solventando sobre la marcha los condicionantes geotécnicos conforme se iban presentando. La excavación a sección completa, 148 m², de los tramos con apartadero supuso un hecho destacable, ya que lo habitual es acometerla por fases.

**OBRAS SUBTERRÁNEAS****ESTABILIZACIÓN DE TALUDES****CIMENTACIONES ESPECIALES**

UN NUEVO TIEMPO EN LA OBRA SUBTERRÁNEA

»ESPAÑA

Innobak, Centro Empresarial Kareaga Goikoa Enpresaldea
Calle Junquera 13, 2ª Planta. Oficina 10. 48903 Barakaldo, Bizkaia. España
Teléfono: +34 94 497 05 07. Fax: +34 94 497 01 71

www.geotunel.es

»COLOMBIA

Geotunel Filco, S.A.S.
Avenida Carrera 15 N° 100 - 69. Edificio Vanguardia, oficina 503
Bogotá D.C., Colombia. Teléfono y fax: + 57 1 6216319



Fig. 25. Frente a sección completa

El NATM como método de excavación y sostenimiento de túneles ha confirmado su gran versatilidad en cuanto a soluciones de sostenimiento y variaciones en la sección, siendo competitivo en excavación de túneles en roca. Durante la excavación se controlaron los impactos propios de

la ejecución de este tipo de obras, contribuyendo al desarrollo sostenible. El túnel de Petralba dispone de todas las instalaciones necesarias para adecuarse al RD 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras de la red del Estado. **ROP**

Referencias

- Ministerio de Fomento. Proyecto de nueva carretera entre Sabiñánigo y Fiscal. Vía Pirenaica, N-260 de frontera francesa (Port Bou) a Sabiñánigo. Tramo: Fiscal-Sabiñánigo (Huesca)
- Varios autores (2007). II Curso máster en túneles y obras subterráneas. C.I.C.C.P., AETOS.
- González de Vallejo, L.I.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Ed. Pearson Educación
- Ministerio de Fomento (2005). Guía para el proyecto y la ejecución de micropilotes en obras de carreteras
- Ferrer, M.; González de Vallejo, L.I. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de

macizos rocosos en afloramientos. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Medio Ambiente.

- López Jimeno, C. et al (1997). Manual de túneles y obras subterráneas. Ed. Entorno gráfico
- Romana Ruiz, M. et al (2005). Jornadas sobre el nuevo método austriaco. STMR, S.L.
- Romana Ruiz, M. (2000). Uso de clasificaciones geomecánicas en las boquillas de los túneles. Revista Ingeopres
- Romana Ruiz, M. (2005). Emboquilles: Intersección de talud y túnel. VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Valencia.