

IMPERMEABILIZACIÓN DEL TÚNEL DE LA ROVIRA (BARCELONA) CON INYECCIONES DE CONTACTO A BASE DE LECHADAS DE BENTOCER[®] Y LÁMINA CARFOAM[®]

Patricio García de Haro

(Ingeniero Superior en Ingeniería Geológica. Director de Proyectos. SENER, Ingeniería y Sistemas, S.A.).

Iñaki Doval Apaolaza

(Director de Sistemas Tecnológicos y Servicios. BIMSA, Barcelona d'Infraestructures Municipals, S.A.).

Introducción

En este artículo se describen los trabajos realizados para impermeabilizar los dos túneles paralelos que constituyen el denominado Túnel de la Rovira (Barcelona).

Los tratamientos se realizaron en dos fases. Una primera fase entre los meses de septiembre y diciembre de 2007 a base de inyecciones de contacto y lechadas de Bentocem[®] de la cementera HOLCIM, y una segunda fase realizada entre los meses de noviembre de 2008 y febrero de 2009, con lámina impermeabilizante tipo Carfoam[®] de la empresa CARSA.

El túnel, situado en el centro de la ciudad de Barcelona, conecta la Ronda del Mig con los barrios de Horta y El Carmelo, y sirve de acceso a la Ronda de Dalt. Cada uno de los túneles presenta una longitud ligeramente superior a los 1.300m, un ancho variable entre 10 y 14m, un gálibo de entre 4,5 y 6,5m y salva un desnivel de 15m [Figura 1]. La circulación es unidireccional en dos tubos de dos carriles de 3,50m de ancho, con arcén y una acera. El tráfico medio se sitúa en unos 27.000 vehículos/día por sentido, de los cuales únicamente un 3% corresponde a camiones.

Aunque se trata de un túnel urbano, uno de los más largos del Estado, sus características se asemejan más a las de un túnel carretero. La construcción de los túneles

bajo el montículo conocido como Turó de la Rovira se inició a finales de 1972 y se concluyó en primera fase (excavación, sostenimiento y revestimiento) a finales de 1976. El sistema constructivo que se empleó fue el NATM. La obra fue difícil y compleja en aquella época. Una vez colocado el sostenimiento, se realizó un revestimiento a base de hormigón en masa, con espesores de hormigón variables en función de la sección, empleando un carro de hormigonado.



[Figura 1] Vista de uno de los túneles de la Rovira

El zócalo o sustrato rocoso del sector del túnel de la Rovira es muy complejo, tanto por la clase de rocas que lo forman como por la historia geológica de los propios materiales y su deformación. El Turó de la Rovira está formado por rocas paleozoicas, con presencia de casi todos los periodos de esta época y con litologías que integran desde pizarras a areniscas, calizas, dolomías y sus equivalentes metamórficos.

En función de su origen se puede decir que está constituido por dos grandes grupos de materiales: una serie metasedimentaria y otra serie ígnea intrusiva. Estos materiales se encuentran intensamente deformados, tanto por estructuras frágiles, como por estructuras dúctiles.

En el año 2006 el túnel fue clasificado por el estudio EuroTap, realizado sobre 52 túneles (8 de ellos españoles) de 14 países europeos, como uno de los ocho túneles

más deficientes de Europa, y el segundo peor de España (de los analizados), únicamente superado en el país en el estudio de ese año por el túnel de Lorca (Murcia).

A partir de la caracterización que se hizo del túnel en este estudio, la sociedad municipal BIMSA (Barcelona d'Infraestructures Municipals, S.A.) se encargó rápidamente de licitar y promover los correspondientes proyectos y obras asociadas de adecuación y mejora de los sistemas de protección, seguridad y gestión técnica centralizada que incluían actuaciones sobre la señalización, ventilación, iluminación, sistemas de extinción, etc.

Más concretamente, los trabajos a abordar para actualizar el túnel, se dividieron en fases y consistieron en:

- Revisión de los Sistemas de Seguridad del Túnel, realizando un análisis pormenorizado de las normativas de aplicación y un estudio de reingeniería para la mejora de los Sistemas ITS del Túnel.
- Proyecto Constructivo de Adecuación de las Instalaciones del Túnel de La Rovira en 1ª Fase: Sistemas de Protección y Seguridad y Gestión Técnica Centralizada. En esta fase se incluyeron: Sistemas de Comunicaciones, Sistema de Gestión Técnica Centralizada y Puesto de Control, Videovigilancia (CCTV), Sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI), Megafonía e Interfonía, Protección Contra Incendios, Cierre de Túnel y Señalización, Paneles de Información a usuarios, Alumbrado de emergencia y Obra civil para acondicionamiento de salas técnicas y canalizaciones.
- Proyecto Constructivo de Adecuación de las Instalaciones del Túnel de La Rovira en 2ª Fase: Sistemas de Ventilación y Energía.
- Proyecto Constructivo de Reparación y Mejora del Sistema de Impermeabilización y Drenaje.
- Asistencia Técnica al Cumplimiento de la Normativa NTP de Endesa.

Más recientemente BIMSA ha llevado a cabo otros trabajos en el túnel, como fresado del pavimento de hormigón y pintado de la señalización horizontal para aumentar la seguridad en el mismo.

En este documento nos ocuparemos únicamente de los trabajos de impermeabilización del túnel.

Indicar que muchas de las juntas de hormigonado del revestimiento ya habían sido tratadas con anterioridad, total o parcialmente. La escasa información disponible sobre estas antiguas actuaciones, indicaba que los trabajos de sellado e impermea-

bilización en dichas fases fueron a base de repicado de la junta, revocado con mortero, colocación de malla plástica y recubrimiento de la malla nuevamente con mortero.

La vida útil de estos tratamientos, en el momento de abordar los trabajos que se describen en este artículo, se mostraba agotada, desenganchándose el conjunto formado por bandas plásticas y mortero, con resultado incluso de caída en ocasiones de fragmentos a la calzada [Figura 2] con el consiguiente peligro para la circulación.

Las reparaciones habían perdido su efectividad inicial, principalmente como consecuencia del paso del tiempo y el ambiente de gases al que se encontraban sometidas.

El objetivo, como se ha indicado, era reparar las juntas de hormigonado del revestimiento de ambos túneles urbanos en servicio, así como la impermeabilización de los mismos.

El número total de juntas de hormigonado entre ambos túneles asciende a 342 juntas. Cada junta presenta una longitud de 22,5m.



[Figura 2] Vista de junta en la que se ha desprendido un fragmento de banda elástica, antes del inicio de los tratamientos de impermeabilización.

Características del tratamiento de las juntas con inyecciones de bentocem® de Holcim

Cómo se ha indicado, para conseguir los objetivos fijados, dadas las características particulares de los túneles y en base a soluciones ya ejecutadas para problemas similares, se optó, por su adaptabilidad y características, por un tratamiento de impermeabilización en el que se combinaron inyecciones de contacto, con reposición de bandas elásticas de sellado de la junta tipo Combiflex y colocación de lámina impermeabilizante y drenante vista en la clave del túnel.

Las inyecciones de contacto se emplearon únicamente en las juntas perimetrales de hormigonado, pues se contaba con la capacidad de viaje de las lechadas empleadas para rellenar el trasdós del túnel y el contacto revestimiento-sostenimiento. Por su parte, las láminas impermeabilizantes se emplearon tanto puntualmente, para cubrir una junta, como en tramos más amplios de túnel.

Las juntas tratadas con inyecciones de contacto y Bentocem fueron aquellas que en el momento de realizar los trabajos presentaban un ingreso importante de agua en el interior del túnel desde el trasdós (especialmente en el túnel descendente o de entrada a Barcelona). Los problemas de infiltraciones presentes eran de diferente escala y magnitud. No se realizó la inyección de todas las juntas por motivos de viabilidad (duración de los cortes), técnicos (durante el tratamiento de inyección se observó que algunas cavidades y las oquedades tratadas en general tenían dimensiones muy superiores a lo previsto en el proyecto; muchas válvulas de inyección no se pudieron cerrar por presión por este motivo) y económicos, evidentemente relacionados con los anteriores.

El hecho de no poder inyectar la totalidad del túnel se traduce en que el agua busca nuevas zonas de ingreso. Dado que se contaba con ello, el proyecto ya contemplaba las indicadas dos fases diferenciadas de trabajos, tanto en técnicas a emplear (inyecciones y láminas) como en el tiempo a ejecutarlas.

Posteriormente a las inyecciones en todas las juntas de ambos túneles se sustituyeron las bandas de sellado existentes por otras bandas nuevas de tipo flexible e impermeable y se colocó lámina impermeabilizante Carfoam. Todos los trabajos se realizaron en jornadas nocturnas de cinco horas de duración y con cortes de tráfico.

El tratamiento de sellado y reparación de las juntas de hormigonado del revestimiento del túnel que presentaban filtraciones importantes en ese momento, se inició

con la limpieza y calafateo de las mismas. Previamente se procedió a desmontar los paneles de revestimiento tipo Glasal existentes en el interior del túnel que cubrían a las juntas que serían tratadas. La limpieza se realizó con agua a presión y picado para eliminar los restos de antiguos tratamientos y formar a la vez un canal en V para relleno y sellado, todo ello desde un equipo elevador autopropulsado.

La preparación y sellado de las juntas [Figura 3] se mostró de complejidad dispar. Las juntas a tratar presentaban características muy distintas [Figura 4], lo que se tradujo en rendimientos y consumos diferentes.



[Figura 3] Trabajos de sellado de juntas desde tijeras elevadoras, en el túnel descendente.

Las juntas de construcción en ocasiones tenían un elemento de porexpan como separador entre las distintas fases de hormigonado, y podían presentar un tubo flexible drenante embebido en las mismas y recubierto con un posterior tratamiento con mortero impermeabilizante. En estos casos también se procedió al repicado mecánico con martillo neumático para abrir la junta, retirando en su caso el tubo.

Se eliminaron los cascotes sueltos en la junta, dejando siempre hormigón sano en los dos laterales de la junta en toda su longitud.

Posteriormente se efectuó una limpieza energética, con chorro de agua a muy alta presión (300 bar), eliminando con este tratamiento toda la suciedad, partículas suel-

tas y dejando un hormigón en las condiciones que la Instrucción EHE indica como correctas para los tratamientos de juntas en retomas de hormigonado.

Una vez saneadas las juntas, el sellado se realizó con mortero de fraguado rápido sin retracción especial para sellado de vías de agua como el Sika 4A y el Nanocrete Emaco. En las juntas con porexpan el espesor del mortero de sellado era el suficiente



[Figura 4] Detalle del diferente aspecto que podían mostrar las juntas existentes entre módulos de revestimiento, tras el repicado, saneo y limpieza de las mismas.

para soportar la presión de la lechada en la inyección, sin desprenderse ni presentar pérdidas. Como mínimo, este espesor fue de unos 4 cm, aunque en algunas juntas llegó a superar los 30 cm.

La preparación del producto de sellado de juntas se realizó, en función de la cantidad, a mano o empleando equipos de amasado ligero (batidoras de doble eje) para la preparación de la pasta de sellado de las juntas. El amasado de mortero es más dificultoso que el de pasta únicamente a base de cemento, pues requiere una homogeneización adecuada. El amasado mecánico facilita la hidratación del producto y evita la segregación de la carga del mortero. Igualmente facilitaba el trabajo a los operarios dado que el sellado de una junta podía tener un consumo comprendido entre 250 y 300 kg de mortero.

A pesar de las medidas tomadas, durante la aplicación del sellado llegaban a producirse cuarteos, resultado de la retracción endógena, que se traducían en fugas de

lechada durante la fase de inyección. La correcta limpieza de la junta, el empleo de un material de sellado adecuado al soporte, el tratamiento previo del mismo (humidificación antes de la aplicación de la pasta de sellado para evitar que el soporte seco robe agua a la pasta y se produzca un fraguado inadecuado), y el curado una vez colocado el mortero, resultan indispensables para evitar dificultades en esta fase de los trabajos. Poder realizar el sellado de la junta por lo menos dos o tres días antes de su inyección, para que el sellado alcanzara unas propiedades resistentes mínimas, también se mostró muy adecuado.

Selladas las juntas, se perforaron cinco taladros dispuestos en abanico sobre las mismas y denominados A-B-C-D-E, que atravesaron completamente el hormigón de revestimiento y el gunitado que podía existir hasta llegar al contacto con la roca.

Los taladros se realizaron partiendo desde la clave del túnel y situándolos aproximadamente cada 30° del perímetro de la junta. Estos taladros tenían un diámetro de 20 mm y se realizaron con martillos de mano. En los taladros se colocaron las agujas o válvulas de inyección, que eran metálicas, con la punta biselada y de longitud adecuada, en función de la sección tipo de túnel que se estaba reparando, para penetrar en el trasdós. Las agujas con las que realizar la inyección a baja presión, se fijaron al paramento de la junta rellenando el espacio anular existente entre éstas y las perforaciones con un mortero de endurecimiento rápido.

En esta técnica se prepara una determinada longitud a tratar con los taladros correspondientes antes de empezar a inyectar y los taladros se van inyectando hasta alcanzar las consignas de inyección establecidas o bien hasta que se empiezan a comunicar entre sí y la lechada sale por los taladros próximos al que se encuentra en fase de inyección. La inyección [Figuras 5 y 6] se realiza desde las agujas más bajas hacia las superiores. El material inyectado rellena las fisuras, la porosidad y desplaza el agua contenida en los huecos, dando lugar a una estructura cementada mucho más impermeable.

La lechada inyectada a través de las agujas fue a base de cemento tipo Bentocem®, suministrado en sacos. Este cemento está compuesto de un ligante especial superfino a base de escorias de alto horno y clinker, con tamaño de partícula máximo 35 micras, estabilizado con bentonita sódica reactiva. El cemento, por su tamaño de partícula máximo, pertenece a la familia de los microcementos. Se eligió este producto por sus propiedades y granulometría, las cuales le confieren su capacidad de penetrar en fisuras y pequeñas oquedades.

REPARACIÓN Y MEJORA DEL SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN
DE UN TÚNEL CARRETERO EN LA PROVINCIA DE BARCELONA



[Figuras 5 y 6] Inyección de las válvulas colocadas en la clave del túnel desde cesta autopropulsada.

La relación agua/cemento de la lechada empleada fue fluida para conseguir una mayor penetración; la dosificación empleada fue de 500 kg de Bentocem por m³ de lechada (relación a/c de 5/3). El amasado de las lechadas [Figura 7] se realizaba durante un tiempo mínimo de tres minutos antes de ser inyectadas. Tras su preparación y hasta su inyección eran agitadas sin interrupción, con la finalidad de evitar la segregación o decantación. La velocidad de inyección se situó en una tasa de admisión de entre 10 y 15 l/min. Las válvulas mayoritariamente se cerraron por presión, la cual se fijó en 2 kp/cm² y se controlaba en boca de válvula.



[Figura 7] Fabricación de lechada a base de Bentocem® suministrado en sacos, con bomba Hány.

En cuanto a rendimientos medios alcanzados en los trabajos objeto de este artículo, puede indicarse que:

- La duración del chorreado con agua de una junta fue de 15-20 min, requiriendo de un equipo compuesto por dos personas y una tijera elevadora autopropulsada.
- El repicado de la junta se situó entre 1 y 1,5 horas en función de la junta. El equipo lo componían tres personas y una tijera elevadora.
- La perforación de los taladros para la colocación de las válvulas de inyección se situó en 60-75 min, incluyendo traslado de una junta a otra. El tiempo medio de las operaciones se situaba en: perforación 5-10 min y colocación de la válvula 5-7 min más. Una junta requería de un equipo de dos personas y una tijera elevadora.

- La duración media del sellado completo de una junta (22,50 m de desarrollo) fue de 1,5-2 horas con un equipo de dos personas. Una junta requería de un equipo de dos personas y una tijera elevadora.
- La operación de obturación de la válvula eran unos 3 min [Figura 8]. Las inyecciones se situaron en los caudales ya indicados de entre 10 y 15 l/min. La operación requería de dos personas en control y alimentación de bomba y una persona más en obturación de válvula en clave de túnel. Los equipos necesarios: una cesta elevadora autopropulsada, un equipo de mezcla y bombeo.



[Figura 8] Detalle de la operación de obturación de la válvula.

Teniendo en cuenta que un equipo podía dedicarse a dos o más actividades de las indicadas, los rendimientos medios se situaron en unas 5 juntas tratadas por día.

Una vez concluida la fase de inyecciones, como se ha indicado, se procedió a reponer la banda elástica de sellado de las juntas [Figura 9]. En total se colocaron 7.695m de banda sistema Combiflex de la casa Sika distribuidos entre las 342 (170+172) juntas de ambos túneles.



[Figura 9] Detalle de junta sellada y con banda colocada.

Características del tratamiento con lámina carfoam® de CARSA

Acabada la fase de inyecciones, en aquellas zonas en que o bien no se pudo cerrar por presión o bien empezaron a dar agua con el tiempo, cuando antes no lo hacían, por haberse constituido en nuevas vías preferentes de circulación, se procedió a la colocación de lámina vista tipo Carfoam® en la zona de clave [Figura 10]. Dicha lámina es de polietileno de alta densidad (PEAD). La lámina permite dejar algunas zonas del túnel drenadas y recoger el agua que ingresa en el túnel.

La lámina drenante se fija a las paredes del túnel mediante anclajes y es unida entre sí por soldadura térmica. La soldadura asegura la total estanqueidad del sistema y permite un comportamiento a tracción a las juntas compatible con la resistencia a tracción de la lámina.

La lámina empleada tiene un espesor de 6 mm y presenta una absorción de agua prácticamente nula, siendo resistente a los ataques de aguas con cargas minerales



[Figura 10] Detalle de las láminas Carfoam® colocadas.

disueltas, a los ataques de microorganismos y bacterias y a las salidas permanentes de humos. Las características de la lámina frente al fuego ó lo que es lo mismo, su Euroclase es Bd0s1; esto quiere decir que es autoextinguible, no produce goteo y tiene baja emisión de humos.

Donde se ha instalado la lámina se han podido salvar los elementos correspondientes a instalaciones del túnel [Figuras 11 y 12] como cableados, luminarias, ventiladores, etc., sin que la estanqueidad del sistema se vea disminuida. Además, por las características de la misma, en caso de resultar dañado una vez instalado, puede ser reparado rápida y fácilmente.

La lámina, suministrada en rollos, era cortada en la longitud necesaria en cada caso para su aplicación. La fijación al soporte se realizó mediante tres filas de anclajes de plástico tipo Hilti, dispuestas a lo largo de secciones transversales correspondientes a los extremos y eje longitudinal de la tira. En el caso de tiras sucesivas se colocaron dejando un solape en uno de sus laterales con la tira anterior ya instalada, a la que se soldaba por termofusión, y se fijaba mecánicamente a lo largo del otro lateral y de su eje longitudinal.

Las fijaciones que quedaban vistas tras la colocación de la lámina en toda la longitud del túnel, se impermeabilizaron mediante el termosoldado de piezas de la misma lámina. Los puntos de encuentro de la lámina con elementos que sobresalían del revestimiento de hormigón del túnel, como podían ser bandejas o similares, se resolvieron mediante un sellado con material elástico.



[Figura 11] Vista de un tramo del túnel con la lámina Carfoam® adaptada a las instalaciones existentes.



[Figura 12] Detalle de la lámina Carfoam® adaptada a las instalaciones existentes.

En total se colocaron 1.969.82 m² entre ambos túneles. El rendimiento para la colocación de la lámina drenante fue de unos 70-80 m² día con dos equipos de trabajo; este rendimiento tan bajo se debe a las condiciones en las que se realizó el trabajo tales como horario nocturno, cortes de tráfico, tramos pequeños de impermeabilización, etc.; en condiciones normales los rendimientos son de 400 m²/día aprox.

Conclusiones

Los tratamientos previstos en el “Proyecto Constructivo de Reparación y Mejora del Sistema de Impermeabilización y Drenaje” realizado por SENER en fecha febrero de 2007 previa adjudicación en concurso público por la sociedad BIMSA, alcanzaron sus objetivos.

Dichos tratamientos consistieron en inyecciones de contacto con lechadas a base de Bentocem® en un determinado número de juntas de los túneles, complementada con la colocación de lámina drenante Carfoam®.

Las inyecciones tenían por objeto rellenar e impermeabilizar las juntas así como el contacto y discontinuidades existentes entre el conjunto sostenimiento-revestimiento y macizo rocoso. Las juntas tratadas se distribuyeron básicamente en dos zonas en el túnel descendente o de entrada a la ciudad y otra más en el ascendente o de salida.

Durante los trabajos se puso de manifiesto la alta capacidad de penetración de las lechadas a base de Bentocem y la idoneidad de las mismas para la realización de tratamientos de este tipo. Pudo observarse en reiteradas ocasiones como se producían fenómenos de comunicación de válvulas de una misma junta e incluso de comunicación de válvulas pertenecientes a dos juntas contiguas.

También se observó como la lechada “viajaba” rellenando todas las oquedades existentes en el trasdós, siendo capaz de salir por pequeñas fisuras y grietas existentes en el revestimiento, las cuales también eran colmatadas y quedaban selladas al fraguar la lechada.

Las admisiones fueron muy variables, dependiendo de la junta en cuestión. Los volúmenes admitidos variaron entre un mínimo de unos 200 l en alguna junta hasta los 2.520 l o 2.640 l de dos juntas concretas. La admisión media de las juntas tratadas se situó en unos 930 l por junta. La distribución por válvulas fue igualmente diversa, así las válvulas con mayor admisión se situaron en unos 1.000 l y las de menor en

unos 50 l; en algunos casos la admisión también fue nula. En las válvulas con altas admisiones generalmente al inyectar las contiguas la admisión era muy inferior. El consumo total se situó en 42 toneladas de Bentocem.

La técnica empleada y la configuración de equipos asociada se mostraron como muy adecuados para realizar este tipo de trabajos, en los que suelen ser habituales cortes de servicio parciales.

También se mostró muy adecuada dada la gran cantidad de instalaciones existentes en el interior de los túneles, las cuales eran fáciles de salvar o de proteger. Otro aspecto fundamental es el medioambiental, pues las lechadas a base de microcementos, a diferencia de otros compuestos para inyección como las resinas o geles, todo y que estos han avanzado bastante en este aspecto, no presentan ningún tipo de afectación a los acuíferos; en el caso del Túnel de la Rovira este aspecto era muy importante por tratarse de una zona en la que hasta no hace mucho, los ciudadanos se abastecían de agua en las fuentes y surgencias que todavía hoy existen.

Destacar también la importancia que tiene la ejecución en los resultados de un tratamiento de este tipo, siendo claramente favorecedora una metodología basada en la inyección de caudales no muy elevados y constantes en un mismo punto, hasta obtener la presión de cierre o que se comuniquen las válvulas de inyección.

Por último, indicar que es común que a medida que se van sellando zonas, el agua busque nuevas vías de circulación, con lo que suele aparecer agua en zonas que no presentan problemas en el momento de realizar los trabajos, por lo que es recomendable que este tipo de tratamientos abarque la totalidad de la infraestructura bajo tratamiento o que sea combinado con otros sistemas como el caso que nos ocupa.

Ante la imposibilidad de tratar la totalidad de ambos túneles y previendo el fenómeno de aparición de agua en nuevas zonas no tratadas, ya se contempló en proyecto una segunda actuación a base de colocación de lámina drenante vista Carfoam en puntos y tramos de la clave del túnel. Las características de esta lámina la hacen idónea para este tipo de actuaciones, por su resistencia, comportamiento y simplicidad de colocación y fijación mediante anclajes y soldadura térmica. El sistema de colocación y los elementos integrantes del conjunto han sido específicamente diseñados para aplicaciones rápidas, altamente eficaces y de reducido costo gracias a esta misma rapidez y simplicidad de colocación.