

Impermeabilización de túneles: especificación y estado del arte

STEFAN LEMKE (*), JOSÉ LUIS ENCISO (**) y ALBERTO REY (***)

RESUMEN Los túneles se diseñan y construyen en la actualidad para un periodo de servicio de hasta 100 años, lo que conlleva requerimientos elevados para los elementos y los sistemas que participan en su construcción, en particular para todos los sistemas relacionados con el revestimiento, los sellados y la impermeabilización. La influencia del agua durante la construcción y el tiempo de servicio es un aspecto fundamental desde el punto de vista de la durabilidad y de las reparaciones posteriores. Es por ello, que la ubicación del túnel respecto al nivel freático determine las especificaciones para su ejecución. Los sistemas de impermeabilización para túneles como el sistema de doble capa instalando láminas de impermeabilización flexibles permiten reducir las filtraciones. El objeto de esta comunicación es presentar los detalles relacionados con el concepto de la impermeabilización, no sólo desde el punto de vista de los materiales, sino considerando a su vez los procedimientos de instalación, con el fin de alcanzar el 100% de estanqueidad en el túnel.

FALTA TITULO EN INGLES

ABSTRACT Falta resumen en ingles

Palabras clave: Faltan palabras clave

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles se diseñan y construyen hoy en día con una durabilidad de 100 años, lo que conlleva elevados requerimientos para los elementos y sistemas que participan en su construcción, y en particular, para todos los sistemas relacionados con el sellado e impermeabilización.

La dificultad del diseño del sellado será función por un lado de la influencia negativa del agua del entorno, y por otro, de la función prevista para la construcción. En consecuencia, el funcionamiento óptimo del sellado se presenta como un factor crítico en el caso de túneles con tráfico, ante la dificultad añadida que presentan frente a las labores de reparación debidas a daños producidos por el agua, especialmente en zonas de presión de agua. Respecto a las características del sistema de sellado de un túnel, se debe tener presente, que éstas deben corresponder tanto a la solución óptima para afrontar los requerimientos técnicos exigidos para la función concreta de la labor, como al comparativo técnico-económico dentro de las diferentes opciones disponibles (1).

El revestimiento de túneles que se encuentren por debajo del nivel freático no debe sufrir daños ocasionados por el agua. Existen diferentes soluciones, dependiendo de las condiciones del terreno, presión de agua, concepto de diseño, etc.

Un túnel puede ser diseñado como una estructura no drenada con una capa de sellado en todo el perímetro. Tras la construcción no es necesario reconducir el agua, y por ese motivo, se eliminan los efectos negativos asociados. Para ello, es necesario construir un sistema capaz de trabajar con presiones de agua, con una modificación, en la mayoría de los casos, del concepto de sellado y un incremento relativo de los costes. Por contra, los túneles no drenados presentan unos costes de mantenimiento especialmente bajos.

Por su parte, los túneles drenados recogen el agua infiltrada a través de drenajes en la solera o pies de hastial aliviando la estructura del túnel, tal y como se muestra en la Figura 1. El agua infiltrada absorbe y transporta materiales solubles al atravesar el material de los hastiales y el propio hormigón proyectado. Los materiales lavados en combinación con el aire y las condiciones especiales en el túnel pueden precipitar y llegar a obturar los conductos completamente. Como consecuencia de ello, la presión de agua en los hastiales del túnel se incrementa, y con esto, la posibilidad de dañar la estructura. Es evidente por tanto, que el drenaje debe trabajar perfectamente para no poner en riesgo su capacidad y la propia seguridad del túnel. Para

(*) falta titulación y cargo

(**) falta titulación y cargo

(***) falta titulación y cargo

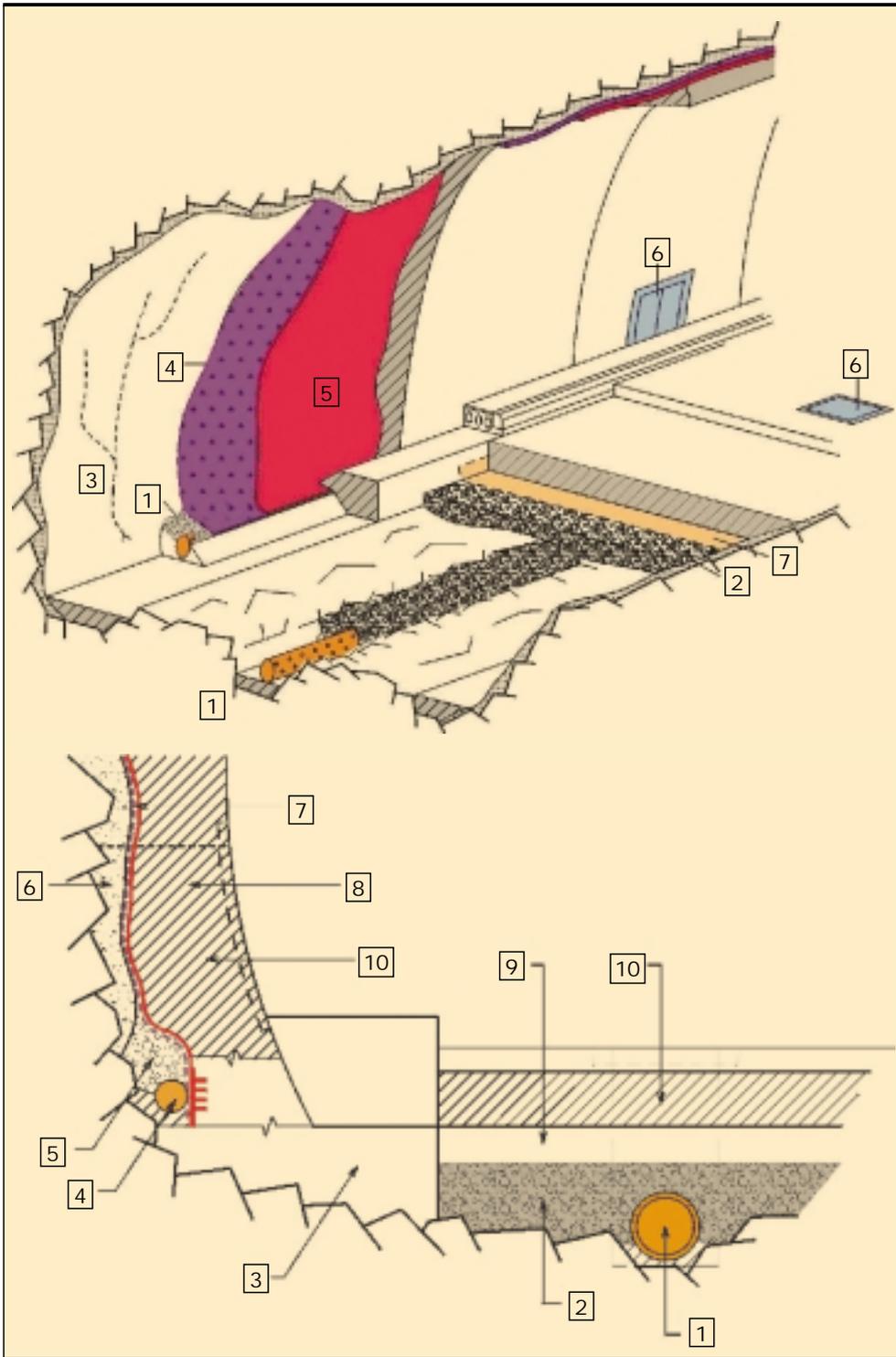


FIGURA 1. Sistema Paraguas incluyendo detalles del drenaje.

mantener en servicio los conductos es habitual emplear elevadas presiones en las labores de saneo de los mismos, lo que incrementa los costes de mantenimiento. Un daño en la estructura al pie de un hastial no es fácil de solucionar y produce elevados costes y cortes de tráfico en el túnel (2).

El sistema de impermeabilización en un túnel está condicionado por una serie de factores. Las características de la lámina son muy importantes, pero no se deben analizar

de forma separada respecto a otros parámetros (3). Así, el concepto de impermeabilización de un túnel consiste por un lado, en la lámina y su colocación incluyendo tecnologías de soldadura y fijación, geotextiles, capa drenante, capa de protección, discos, cintas PVC, etc. y por otro lado, la preparación del soporte regularizando el hormigón proyectado (tamaño de grano, rugosidad, eficiencia y regularidad), la eficiencia del anillo de revestimiento incluyendo tecnologías

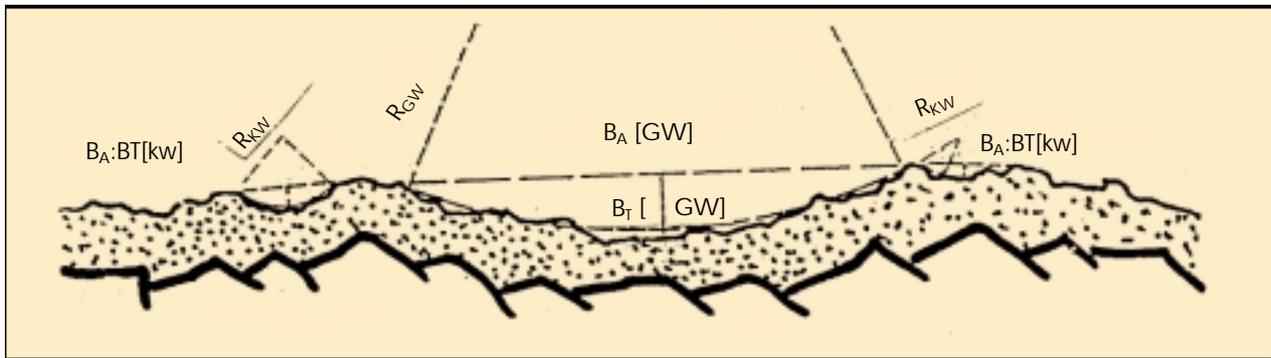


FIGURA 2. Criterios para el hormigón proyectado.

de inyección (láminas colocadas contra presiones de agua), y finalmente, aunque no por ello menos importante, los procesos de garantía y calidad (4).

2. HORMIGÓN PROYECTADO

El hormigón proyectado se emplea para el sostenimiento del hueco excavado y del frente de excavación durante las labores de avance. En el caso de túneles de doble revestimiento con láminas, la última capa de hormigón proyectado no requeriría acondicionar con hormigón proyectado adicional la superficie, para lograr una fijación adecuada entre el geotextil y la lámina. En el sostenimiento se emplean cuadros metálicos, mallazo, bulones y hormigón proyectado. Este hormigón proyectado debe presentar una superficie adecuada para preservar la integridad de la lámina. De acuerdo con los criterios que se muestran a continuación, se empleará hormigón proyectado en aquellas zonas que no satisfagan los requerimientos necesarios.

La superficie de hormigón proyectado debe satisfacer estos criterios para la colocación de láminas:

- $B_A : B_T = 10 : 1$ (Figura 2).
- Irregularidades de pequeña escala deben tener un radio mayor de 300 mm.
- El hormigón proyectado debe estar fraguado con un espesor de capa mínimo de 5 cm.
- El mallazo metálico estructural, bulones, cabezas de anclaje, etc. deben estar recubiertos al menos por 5 cm de hormigón proyectado.
- Las esquinas y los límites deben estar redondeados.
- Debe garantizar la estabilidad y la resistencia solicitadas.
- Emplear áridos rodados (no de machaqueo).
- Tamaño máximo del árido debe ser 8 mm.

Atendiendo a la contaminación del agua y a los depósitos en el sistema de drenaje, y con el objetivo de evitar daños graves resultado de la manipulación de acelerantes de fraguado alcalinos, se recomienda emplear acelerantes de fraguado libres de álcali. El Na_2O equivalente en acelerantes libres de álcali debe ser menor del 1%.

La dosificación del acelerante debe ser minimizada de acuerdo con las condiciones de la labor, adecuándose a los límites de trabajo conforme a las especificaciones del Control de Calidad. Por este motivo, se debe controlar y registrar continuamente la dosificación de trabajo.

3. CONCEPTO DE SELLADO DE UN TÚNEL

A continuación, se describen los conceptos comúnmente utilizados para el sellado y el drenaje de túneles.

3.1. TÚNELES SIN DRENAJE PERMANENTE (SELLADO EN TODO EL PERÍMETRO DEL TÚNEL CON PRESIÓN DE AGUA)

El drenaje permanente no es necesario en un túnel construido para soportar presiones de agua. En estos casos son viables altas presiones de agua, que incrementan los requerimientos de resistencia para el revestimiento (5). En túneles no drenados bajo presiones de agua en los que el sostenimiento se realiza empleando hormigón proyectado, las láminas se colocan entre el hormigón proyectado y el anillo de revestimiento. Dependiendo de la propia presión del agua, así como del estado de la misma y del terreno se posicionan los siguientes sistemas:

- Una lámina en todo el perímetro del túnel.
- Una lámina en todo el perímetro del túnel combinada con una anillo de revestimiento impermeable.
- Doble lámina en todo el perímetro del túnel.

En alguno casos, en túneles excavados a sección completa con TBM's, se coloca una única lámina entre las dovelas de hormigón prefabricadas y el anillo de revestimiento, recubriendo así todo el perímetro de los mismos.

3.1.1. Drenaje provisional

El túnel debe disponer de un drenaje provisional bajo la solera, que permanecerá en servicio después de la colocación de la lámina y del anillo de revestimiento para mantener seca el área de trabajo. Se disponen puntos de bombeo cada 100 m aproximadamente, para posibilitar el bombeo durante la construcción, y el relleno y cierre del drenaje en etapas posteriores. Los conductos metálicos trabajan de forma combinada con el sistema de impermeabilización de la solera conectándose al mismo.

3.1.2. Espesor de la lámina

Si el túnel se construye con sistema de impermeabilización en todo el perímetro, se colocará lámina tanto los hastiales y la bóveda, como la solera. Para obtener una mejor resistencia frente a daños mecánicos locales (resistencia a la penetración), y en consecuencia, para aumentar la calidad, la mayoría de Normas en Europa recomiendan láminas de 3,0 mm de espesor para túneles con presión de agua, como alternativa a los 2,0 mm de espesor de lámina en el caso de túneles sin presión de agua. Asimismo, la lámina de imperme-

meabilización dispone de una capa de otro color para facilitar la detección de los daños de la lámina, antes o después de su colocación. Adicionalmente, el color claro de la lámina, refleja las luces en el interior del túnel resultando una atmósfera de trabajo positiva psicológicamente.

En Francia se ha desarrollado otro sistema de detección de daños con láminas translúcidas, capaz de permitir la inspección total de la superficie detrás de la lámina, y el empleo de agua coloreada durante los ensayos de soldadura para encontrar fallos en la misma. Los argumentos en contra de este sistema, serían por un lado, que el uso de geotextiles como protección recomendada entre el terreno y la propia lámina limita las posibilidades de inspección de hormigón proyectado, y por otro, la falta de capa de color para detectar los daños. Asimismo, el empleo de agua en los ensayos de soldadura de la lámina es más caro que el aire, obteniendo una interpretación similar de la calidad del trabajo (6).

3.1.3. Membrana de protección

La zona de solera, se recubre con una lámina de protección de 3,0 mm de espesor, soldada por puntos con la propia lámina de impermeabilización. Esta lámina protege a la lámina de impermeabilización contra los daños que se pueden producir con el tránsito y el resto de las labores.

3.1.4. Cintas PVC

En cada compartimiento se debe instalar una Cinta PVC (600 mm de ancho con 6 ribetes y conductos de inyección), con el objetivo de limitar la posibilidad de entrada de agua al mismo evitando así afectar a centenares de metros del túnel. Las Cintas PVC se sueldan con la propia lámina. Por este motivo el material de las barreras debe ser compatible con el de las láminas, incluyendo la vida estimada de servicio y los parámetros de soldadura de ambas. Un parámetro importante para la eficacia de las Cintas PVC es la completa integración de los ribetes en el hormigón (especialmente en corona). No se debe permitir la circulación del agua. Dado que en algunos casos, esto se logra sólo parcialmente, se colocan Cintas PVC que permiten la inyección posterior, posibilitando así, el relleno de las cavidades entre la Cinta PVC y el hormigón. Esta es la única forma de garantizar el servicio de las Cintas PVC y lograr la compartimentación del túnel (7).

Para proteger la lámina se disponen las Cintas PVC en la misma posición que las juntas del hormigón de revestimiento, formando así un sistema adicional de sellado con la estructura de hormigón de revestimiento.

3.1.5. Inyecciones

Se disponen instalaciones para una posible inyección posterior. En estas conexiones, se adoptan precauciones de forma sistemática, con el objetivo de rellenar la junta de contacto entre la lámina y el anillo de revestimiento de hormigón en el caso de que se detecte un fallo en la superficie de sellado.

3.2. DRENAJE PARCIAL

El drenaje parcial se aplica cuando el agua acumulada no puede extraerse sin ayuda de bombas en los siguientes casos (5):

- Túneles que retienen agua y tienen restricciones de presión de agua.
- El agua en un túnel se alivia hasta una presión determinada. Limitando la presión de agua, se puede reducir sustancialmente la extracción de agua dependiendo de la geología e hidrogeología en comparación con drenajes sin presión.

- Túneles drenados sujetos a pequeñas presiones locales debidas a obstrucciones en el flujo del agua. En un túnel diseñado con un sistema de drenaje el agua se puede acumular resultando bajas presiones que demandan instalaciones en el sistema de drenaje primario o secundario, o que éstas son inadecuadas o están obturadas por depósitos. La causa sería la errónea posición ya que el agua sólo puede alcanzar el drenaje si se incrementa la presión de agua. La misma situación se presenta si los orificios de entrada al drenaje tienen dimensiones inadecuadas o si la capa de sellado inferior no trabaja convenientemente.

3.3. TÚNELES DRENADOS

En el caso de columnas de agua elevadas con presiones de agua asociadas importantes, posiblemente sólo un túnel drenado puede cumplir los requerimientos estáticos por razones tanto económicas como prácticas. Esto se aplicaría también en el caso de pequeñas cargas de agua con poca o muy poca incidencia del agua. Un relleno puede reducir pequeñas filtraciones en el túnel durante la ejecución. La evacuación de filtraciones permanentes de agua sin presión se debe garantizar para toda la vida de servicio estimada para la obra tanto para los elementos del drenaje primario como para los del secundario. Si se puede cumplir con estas necesidades, la bóveda del túnel no precisaría estar diseñada para soportar presiones de agua. En caso necesario, la solera puede ser plana. Si no es posible garantizar estos requisitos es esperable que se presenten incrementos de presión bajo la solera o en los hastiales.

Se han desarrollado nuevos métodos, por ejemplo el Sistema de Drenaje Valplast incluyendo un paquete de grava como superficie de drenaje permanente, o contornos plásticos en combinación con grava en las esquinas de la solera, eliminando así la unión con cemento y logrando una reducción del riesgo de bloqueo u obturación de los conductos de drenaje (8).

3.4. SISTEMAS MIXTOS

Los túneles largos pueden atravesar estratos secos y zonas de carga de agua. El paso de retención con presión de agua a secciones drenadas se debe prever y ejecutar cuidadosamente para evitar problemas posteriores.

3.5. ESPECIFICACIONES PARA LÁMINAS

La función del sellado del túnel es proteger al mismo del daño ocasionado por la humedad o la entrada de agua así como los peligros asociados a aguas y suelos agresivos y los efectos químicos. La importancia de sellado se aprecia especialmente si se considera la vida estimada de servicio para túneles con tráfico, que habitualmente es de 80 a 100 años. En la práctica, los antiguos túneles ferroviarios alcanzan una vida de servicio de hasta 150 años.

3.5.1. Materiales

Recordando la historia de la impermeabilización, una amplia gama de diferentes materiales se han empleado en el caso de los túneles con más o menos éxito, por ejemplo, materiales bituminosos, copolímeros (ECB / EVA), polietilenos modificados de alta densidad (mod. HDPE), PVC-P, etc. Últimamente, se han implementado nuevos productos, basados en polietileno (de baja densidad PE-LD, densidad moderadamente baja PE-LLD y de muy baja densidad PE-VLD), polipropileno flexible (PP-flex) y una larga lista de combinaciones denominados compuestos. Esta amplia gama de productos se denominan TPO o FPO (poliolefinas termoplásticas o poliolefinas flexibles) modificados frecuentemente para lograr mejorar las propiedades mecánicas.

En el caso de la aplicación de estos productos en el campo de los túneles, atendiendo a la larga experiencia acumulada, al comportamiento del sellado, y a las características económicas y técnicas de todos los materiales mencionados, se puede decir, que dos de ellos se han impuesto el PVC-P y el TPO. Es importante desde el punto de vista de las especificaciones del material y los procedimientos de ensayos incidir en que PCV-P y TPO son materiales completamente diferentes con distintas características y comportamiento.

En la última década, se han estudiado y ensayado diferentes materiales de impermeabilización en aplicaciones en túneles, principalmente en Suiza y Alemania. Los materiales están basados en compuestos de poliolefinas (PE y PP) o PVC-P. Una completa evaluación del proceso se ha llevado a cabo en dos túneles largos en los Alpes Suizos de acuerdo con los requerimientos establecidos por Alp Transit Gotthard AG y BLS AlpTransit AG. Considerando para ello la influencia de la carga de aguas termales, las condiciones tensesoformacionales del terreno, el proceso constructivo y las especificaciones para una vida prevista de servicio de 100 años. Se han ensayado en un programa de 24 meses de duración combinaciones de productos poliméricos en la impermeabilización de los túneles. Se han completado los métodos de ensayos existentes, por ejemplo, añadiendo elevadas temperaturas o con agua con altos contenidos en oxígeno a elevadas temperaturas respectivamente, ensayos de comportamiento bajo compresión lateral y cortante horizontal, y ensayos de colocación (9). El resultado de este procedimiento de ensayos ha sido que los dos tipos de materiales (PVC-P y compuestos de poliolefinas) satisfacen los requerimientos.

3.5.2. Rigidez, flexibilidad y soldadura

En la aplicación al campo de los túneles, el principal problema suele estar asociado a la rigidez del material y las dificultades de soldadura, en particular en condiciones de humedad y zonas de acceso limitado, por ejemplo, en nichos, corte de secciones, soldadura de Cintas PVC, soldadura de discos, etc. Quizás el aspecto más importante en las operaciones de impermeabilización es la soldadura de las láminas, que se debe llevar a cabo con extremado cuidado para mantener la continuidad de la superficie de impermeabilización. Un defecto en la soldadura provocaría una filtración en el túnel con resultados fatales en el caso de condiciones con presión de agua.

La flexibilidad del material se explica con el Módulo de Elasticidad de la sección $E_{1,2}$ de acuerdo con la Norma DIN EN ISO527 1-3, ensayo pieza 5: El Módulo $E_{1,2}$ de la sección para PVC-P flexible será $\leq 30 \text{ N/mm}^2$ en comparación con FPO rígido $\leq 100 \text{ N/mm}^2$. La flexibilidad del material se debe analizar de forma paralela a la rugosidad del hormigón proyectado y las irregularidades de la superficie.

3.5.3. Resistencia a tracción y alargamiento

La resistencia a tracción y el alargamiento son características particulares del material importantes para los ensayos de envejecimiento (almacenaje en agua templada / aire caliente) y la resistencia contra líquidos agresivos, siendo el límite para ambos de $\leq 20 \%$. Para controlar de forma individual cada material no tiene sentido establecer límites por encima de los valores normalizados. Especificaciones recomendadas para el alargamiento en la rotura serían para PVC-P $> 12 \text{ N/mm}^2$ (250 %) y para TPO $> 15 \text{ N/mm}^2$ (500 %), lo que garantiza un mínimo de resistencia mecánica para su aplicación. Por otro lado, la resistencia a tracción es un indicador de la rigidez del producto. Productos no reforzados con una elevada resistencia a tracción son el la mayoría de los casos rígidos.

Para la interpretación del comportamiento del material y su uso en el campo de los túneles, se recomienda ensayar el alargamiento biaxial (biaxial burst pressure test) del material de acuerdo con la Norma FET 365 (Normativa Austriaca). La posibilidad de alargamiento biaxial para puentear fisuras o roturas es la mayor ventaja de las láminas plásticas de sellado. En este sentido, la elasticidad del material es importante, especialmente en el caso de movimientos durante las fases constructivas por cambios de temperatura o cargas dinámicas.

3.5.4. Comportamiento al fuego

En trabajos subterráneos o zonas cerradas se precisa un mínimo de retardo en la aparición de llama ante la posibilidad de que se presente una combustión accidental durante la colocación. El retraso en la llama es sólo necesario durante la colocación y no tiene influencia una vez concluido el anillo de hormigón de revestimiento.

Conforme a la normativa suiza y austriaca, la lámina debe ser auto-extinguible de acuerdo con la longitud del túnel y las actuaciones de Seguridad y Salud para los trabajadores del túnel. Así, el PVC-P (aprox. 21 MJ/kg) tiene un factor mucho menor que el TPO (aprox. 40-45 MJ/kg). Por otro lado, el TPO se puede formular con aditivos apropiados para el retraso de la llama. De forma adicional a la mayoría de las normativas internacionales, la Norma SIA V 280 presenta una clasificación de comportamiento frente al humo. La intensidad del humo es un factor clave en caso de rescates de emergencia.

3.5.5. Fijación de las láminas

Para mantener las condiciones óptimas del material (por ejemplo: alargamiento biaxial) en fisuras, roturas, juntas y nidos de grava se recomienda emplear una (spot fixed) plastic sealing membrana. Se colocan discos en la superficie de hormigón proyectado para permitir un soporte adecuado y un acoplamiento robusto en toda la superficie proyectada. La lámina de impermeabilización se coloca con la capa señal con una holgura suficiente para prevenir sobretensiones durante el hormigonado.

Se han desarrollado nuevos sistemas de colocación, como por ejemplo el sistema de colocación rápido con Velcro, el sistema de soldadura caliente, el sistema de aire caliente, etc., que permiten junto con los carros de colocación automática fijar láminas de 4 m de ancho reduciendo así los cordones de soldadura y aumentando la calidad final (1).

3.5.6. Geotextiles

Dado que las láminas son sensibles a los daños mecánicos, se debe colocar un geotextil entre el terreno y la propia lámina para proteger a esta última. Otra función del geotextil es crear una superficie de deslizamiento para la lámina con el objetivo de evitar esfuerzos en la misma y permitir movimientos de la estructura de hormigón causados por temperatura, asientos, cargas dinámicas, etc. evitando así también pequeñas fisuras en el anillo de hormigón.

En el pasado, capas de protección inadecuadas y problemas en las intersecciones con la estructura de hormigón provocaron deficiencias con elevados costes de reparación. Estas deficiencias se deben evitar en el futuro (10).

El geotextil debe proteger la lámina durante el proceso constructivo y la vida de servicio del túnel. Los siguientes aspectos se consideran importantes de cara a los requerimientos a solicitar a los geotextiles como capa de protección:

- El geotextil debe ser suficientemente robusto y los elementos de colocación, compatibles y adecuados de modo que el geotextil no quede tenso reduciéndose localmente su sección durante la colocación debido al hormigonado del anillo de revestimiento.

- El geotextil no tiene una función de drenaje. Por lo que no serán necesarios requerimientos relativos a la capacidad en el plano.
- Debe presentar una resistencia suficiente a los ácidos y los productos alcalinos.
- A su vez, debe mantener las propiedades necesarias para el correcto funcionamiento durante todo el tiempo de operación del túnel, resistiendo las tensiones en las condiciones existentes.
- Finalmente, el geotextil debe cumplir los requerimientos del comportamiento frente al fuego.

En el pasado era habitual colocar geotextiles con una masa de 500 g/m². Las nuevas recomendaciones apuntan a colocar un geotextil no tejido de polipropileno con un 1% de materiales sintéticos y una masa de 500 g/m² - 1.000 g/m² en función del terreno. Por otro lado, el ajuste y consecuentemente el espacio entre la lámina y el hormigón proyectado debe ser lo más reducido posible.

3.5.7. Hormigón

Para el sostenimiento permanente la mayor parte de los túneles se revisten con hormigón armado bombeado. La colocación del anillo de hormigón se realiza en dos etapas, hormigonado de la solera y hormigonado de la bóveda, en ambos casos, en tramos de hormigonado de entre 10 y 12 m. El espesor habitual en la bóveda es de 35 a 60 cm, mientras que en el caso de la solera oscila entre 45 y 65 cm en función de las condiciones geológicas, presión de agua y cargas.

Las deformaciones del terreno y la presión de agua actúan desde el exterior hacia el interior del túnel. El estado del anillo de revestimiento es muy importante frente a estas tensiones. Desde hace algunos años, se pueden realizar ensayos no destructivos del anillo de revestimiento como los métodos sísmicos o similares. Principalmente las zonas dañadas se detectan en la corona y en las zonas de juntas. La superficie del trasdós y la cara vista del anillo de revestimiento ya no se entienden como en el pasado. La lámina puede sufrir esfuerzos importantes debido al hormigón de la bóveda, especialmente si la armadura está vista.

Para prevenir áreas defectuosas en el anillo de hormigón y se rellenan las fisuras en la corona una vez finalizado el hormigonado de revestimiento, empleando por ejemplo inyecciones de lechada de cemento a través de conductos previamente dispuestos en la lámina.

4. CONCLUSIÓN

En la actualidad se construyen túneles en zonas con condiciones geológicas y geotécnicas cada vez más difíciles, en roca meteorizada o en áreas con elevada presión de agua. En estas zonas la construcción del túnel es muy complicada. La calidad es el total de las propiedades y características de un producto relacionadas con su empleo y adecuación a los requerimientos de Proyecto. El objetivo máximo será alcanzar y mantener esas propiedades en el primer intento, esto es, sin correcciones, tal y como reza en el slogan: *Hazlo bien a la primera*

5. BIBLIOGRAFÍA

1. HAACK. *Further Developments in Sealing Tunnels constructed by Mining Means*, In: tunnel 3/2005, S. 16-22 (2005).
2. BAUMANN. *Drainage Pipes in Tunnelling*. In: tunnel 5/2003, S. 38-41 (2003).
3. BACCHELLI. *Best material for lining tunnels*. In: Tunnels & Tunnelling International, May 2000, S. 46-48 (2000).
4. LEMKE/BRACHER/KLAPPERICH. *Tunnel under difficult conditions - waterproofing systems*. In: Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2005-1, Review 2004 - Research Reports- Invited Lectures „Geotechnical Seminar“, S. 325-333 (2005).
5. CHABOT. *Draining underground Tunnels*, In: tunnel 2/2002, S. 18-24 (2002).
6. STUVA. *Untersuchung der Möglichkeit zur Nahtprüfung bei einlagigen Kunststoffabdichtungen im Tunnelbau*, In: STUVA Forschungsbericht, 12/79 (1979).
7. KOMMA. *Recognitions from the new Cologne-Rhine/Main Rail Rout*. In: tunnel 8/2001, S. 57-59 (2001).
8. KIRSCHKE. *Fortschritte und Fehlentwicklungen bei der Tunnelentwässerung*. In: geotechnik 24, Nr. 1, S.42-50 (2001).
9. FLÜELER/FARSHAD/LÖWE/KRAMER/BÖHNI/ZWICKY. *New evaluation procedure of the waterproofing systems for the Swiss Alpine base tunnels*. In: (Re) Claiming the Underground Space, Saveur (ed.), 2003, Swets & Zeitlinger, Lisse, S. 441-447 (2003).
10. BRUMMERMANN/SCHLÜTTER/BEYER. *Topical Developments to improve geotextile protection layers for geomembrane sealing in tunnel construction*. In: 6. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", Sonderheft 1999 (1999).