

## ARTÍCULO TÉCNICO

# Tuneleo para el futuro

## Desafíos constructivos de la impermeabilización de túneles utilizando membranas aplicadas por proyección

Sina AMOUSHAI  
Hatch, Montreal  
Quebec, Canadá

Anne TREMBLAY-LAFORCE  
Hatch, Montreal  
Quebec, Canadá

Jean HABIMANA  
Hatch, Montreal  
Quebec, Canadá

Alun THOMAS  
All2plan Consulting  
Copenhague, Dinamarca

### Resumen

El uso de membranas impermeabilizantes aplicadas por proyección (SAWM) en proyectos de construcción de túneles ha ganado popularidad en las dos últimas décadas a nivel internacional y en Canadá. Esta técnica es particularmente atractiva para geometrías subterráneas complejas. Sin embargo, la preparación del sustrato y la instalación requieren de una buena planificación, un control de calidad riguroso y amplia experiencia. La aplicación de SAWM en condiciones húmedas es todo un desafío. Este artículo hace un análisis de los desafíos en la construcción de SAWM en túneles modernos revestidos con concreto lanzado o túneles SCL, con base en la experiencia de los autores en proyectos recientes de alto perfil en Quebec, Canadá.

Se abordan los requisitos de construcción antes, durante y después de la aplicación de la membrana y se presentan diferentes productos, explicando los pros y los contras de cada uno de ellos. También se analiza la aplicación de una malla de drenaje innovadora.

### 1. Introducción

La impermeabilización es uno de los principales desafíos en el diseño, la ejecución y, posteriormente, en la operación y el mantenimiento de las instalaciones subterráneas. El uso de membranas impermeabilizantes aplicadas por proyección (SAWM) ha ganado popularidad en las dos últimas décadas en los túneles modernos revestidos con concreto lanzado (SCL) en todo el mundo. La principal ventaja de las SAWM con respecto de las membranas de láminas convencionales es su flexibilidad en emplazamientos geométricamente complejos, como los cruces de túneles. Sin embargo, no es posible aplicar eficazmente las SAWM en lugares en los que hay entrada activa de agua a través del sustrato. Incluso un bajo índice de filtración detrás de la membrana durante el curado puede perturbar la interfaz concreto/membrana, provocando un fallo del sistema.

Dependiendo del tipo de revestimiento (capa sencilla, capa doble o capa compuesta), de la clase de impermeabilización

requerida por el cliente, de las condiciones hidrológicas del sitio de la obra, de la presión del agua y de los métodos de drenaje (totalmente drenado, parcialmente drenado o tanque lleno "full-tank"), el diseñador debe elegir el tipo de membrana apropiado (lámina o SAWM) y especificar las condiciones y requisitos específicos del proyecto.

A priori, la SAWM no es adecuada para suelos o rocas de alta permeabilidad (al menos a corto plazo), si no se gestiona de algún modo la entrada de agua. La técnica aparentemente fácil de las SAWM podría ser desafiante en términos de constructibilidad, gestión del agua durante la construcción, control de calidad y durabilidad. Este documento se enfoca particularmente en estos retos, aporta soluciones prácticas y establece algunas recomendaciones que pueden utilizarse en proyectos futuros.

### 2. Categorías de SAWM

Se han desarrollado muchos productos para la impermeabilización de edificios, puentes y cimentaciones. Sin embargo, solo unos pocos materiales han demostrado ser adecuados para la industria de la construcción de túneles. En la actualidad, existen tres principales categorías de materiales para SAWM que se utilizan con frecuencia en la construcción de túneles (Su y Bloodworth, 2019):

- (1) materiales a base de copolímero de acetato de vinilo de etileno (EVA);
- (2) materiales a base de resina reactiva de metacrilato de metilo (MMA);
- (3) materiales a base de polímero de caucho de estireno-butadieno (SBR).

La principal diferencia de estas membranas es el proceso de curado, la absorción de agua y la sensibilidad a la humedad. Los materiales de las membranas no reactivas se secan mediante exposición al aire o hidratación, mientras que los sistemas reactivos se curan mediante reacciones de polímeros.

Las fichas técnicas de los fabricantes ofrecen información detallada sobre las propiedades de los materiales. En Canadá, los materiales a base de EVA, con datos de ensayo probados e independientes a escala internacional, han dominado hasta ahora el mercado. Las experiencias de los autores proceden principalmente de dos productos a base de EVA.

### 3. Desafíos de las SAWM

#### 3.1. Aplicación limitada en superficies mojadas

La principal limitación de las SAWM es que no pueden aplicarse en superficies muy húmedas o con agua corriente. Los proveedores de las SAWM mencionan que es posible colocarlas en superficies húmedas (no en aguas activas). Sin embargo, con base en la experiencia de los autores, incluso superficies muy húmedas (sin que se trate de aguas corrientes) podrían dañar las membranas antes del curado final. Esto es especialmente cierto en el caso de las membranas a base de EVA, posiblemente por dos razones: 1) la absorción de agua es muy elevada para estos materiales; y 2) estos productos se curan mediante un proceso de secado.

#### 3.2. Requisitos mínimos

ITAtch (2013) especificó una fuerza de adherencia mínima de 0.5 MPa en ambos lados de la membrana (membrana al sustrato y membrana al revestimiento interior en caso de membranas de doble capa). Se han obtenido varios datos de ensayos independientes en membranas basadas en EVA (Su y Thomas, 2015; Su y Bloodworth, 2016; MacDonald, 2019), que demuestran la adherencia de estas membranas en ambos lados. Según estos datos de pruebas independientes, los productos tienen una fuerza de unión adhesiva de alrededor de 1 a 1.4 MPa y una resistencia al corte superior a 2 MPa. Estas pruebas se han realizado en condiciones normales de humedad atmosférica.

Para un proyecto en Montreal, se realizaron quince (15) pruebas de arrancamiento según el procedimiento B de la norma CSA A23.2-6B (2019). Con este objetivo, se reprodujeron las mismas secuencias de obras reales, es decir, primero se proyectó la capa primaria de concreto lanzado reforzado con fibras de acero (SFRS) hasta aproximadamente la mitad de la profundidad de las cajas y, a continuación, se terminó con una capa niveladora de 35 mm. A continuación, se proyectaron las dos capas de membrana a base de EVA (dos capas de 1.5 mm) y, por último, se añadió el revestimiento secundario de SFRS. Las pruebas se realizaron después de 28 días. El mecanismo de falla de los 15 ensayos se produjo

entre la membrana y la capa niveladora o la capa secundaria (Figura 1) con unos valores mínimo, máximo y medio de 0.28 MPa, 0.91 MPa y 0.62 MPa, respectivamente.

El mecanismo de falla dominante (en la membrana y la capa niveladora), así como los resultados de estas pruebas, muestran la importancia de utilizar un buen material como capa niveladora (de regulación). Como también indican PISOVA e HILAR (2017), las propiedades de la capa niveladora deben ser especificadas por el diseñador de antemano, ya que podrían influir significativamente en el desempeño de todo el sistema (revestimiento intercalado del túnel "sandwiched").

#### 3.3. Adherencia del revestimiento secundario (interior) a la membrana

Una de las propiedades clave de la membrana es que el revestimiento secundario debería poder adherirse a la membrana una vez que ésta haya sido curada. Existen algunas inquietudes a este respecto sobre las membranas basadas en resinas reactivas, ya que no se dispone de datos de ensayos independientes sobre la fuerza de adherencia de estas membranas (Su y Bloodworth, 2019). Esto es más desafiante en el caso de túneles de gran envergadura, en los que la geometría de la corona del túnel puede ser más plana y con un arco menos curvo. Sin embargo, las membranas fabricadas a base de EVA han demostrado un buen desempeño en términos de adhesión del revestimiento secundario a la membrana.

#### 3.4. Contenido de humedad

Las membranas de EVA y SBR son muy sensibles al contenido de humedad. Las membranas a base de polímeros absorben cantidades significativas de agua. Con base en algunas investigaciones independientes, se concluyó que una membrana de EVA o SBR húmeda tiene una rigidez y una resistencia a la compresión, a la tensión y al corte considerablemente inferior a la de una



▲ Figura 1. Pruebas de arrancamiento *in situ* realizadas en el proyecto REM (doble arco, sección sur), Montreal, Canadá.

## ARTÍCULO TÉCNICO

membrana seca (Thomas, 2019). Cabe señalar que todos los datos técnicos proporcionados por los fabricantes se realizan en el entorno atmosférico, sin contacto directo con agua. Esto podría provocar que una membrana originalmente adherida se degrade a un estado no adherido, resultando en un cambio significativo en el reparto de cargas entre los revestimientos primario y secundario.

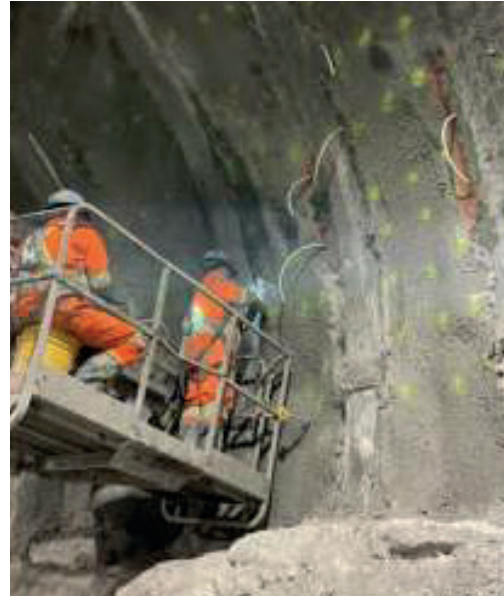
El revestimiento primario (exterior) es más permeable que el secundario (interior) debido a las juntas entre cada longitud de avance, la contracción, las zonas de sombra y los huecos dejados durante la proyección de concreto en las “costillas” de acero o vigas de celosía, si los hubiera. En el caso de las “costillas” de acero, se recomienda encarecidamente dejar varias mangueras de inyección en cada “costilla” previo a la aplicación de la primera capa de concreto lanzado para inyectar después la lechada cementosa ultrafina o las resinas acrílicas o de poliuretano (ver Figura 2). La inyección de “costillas” o celosías tiene tres ventajas: 1) mejorar la durabilidad a largo plazo del concreto lanzado primario, al sellar los huecos, las grietas y las fisuras a través del concreto lanzado; 2) sellar las fugas y mejorar la impermeabilidad del sustrato y proporcionar una superficie más seca para la posterior aplicación de la membrana; y 3) mantener en la medida de lo posible las propiedades mecánicas originales secas de la interfaz membrana-concreto.

Se recomienda encarecidamente que en todo diseño de revestimiento compuesto se especifique una metodología exhaustiva de inyección y drenaje antes de la aplicación de la membrana. Además, el diseñador debe ser cuidadoso con las propiedades mecánicas proporcionadas por los proveedores, ya que se basan en condiciones secas y normalmente en el laboratorio. Tanto las membranas fabricadas con materiales EVA como las fabricadas con materiales SBR muestran una reducción considerable (del 35% al 40%) de las propiedades mecánicas en presencia de agua o humedad (Thomas, 2019).

En caso de considerarse inevitable la presencia de agua en cualquiera de sus formas, es más apropiado un diseño conservador de la interfaz de la membrana (sin adherencia), a menos de que el diseñador especifique un control de calidad muy exhaustivo. Además, es aconsejable realizar varios ensayos in situ en una zona de prueba representativa antes y durante la construcción para verificar que los valores de los parámetros sean adecuados al tipo de membrana elegido y a la mano de obra. En túneles urbanos poco profundos, la presencia de infraestructuras urbanas sobre el túnel debe considerarse una importante fuente potencial de fugas de agua.

### 3.5. Tratamiento de la superficie

Los resultados de las pruebas y de los casos prácticos muestran que la rugosidad del sustrato no influye directamente en la resistencia de adherencia de la membrana. Sin embargo, tiene un efecto significativo sobre la resistencia al corte y en la rigidez de la membrana. Cuanto menos lisa sea la superficie del sustrato, mayor será el grosor y la cantidad de materiales necesarios para alcanzar la estanqueidad especificada. Es de esperar que el grosor realizable de la membrana esté relacionado con la rugosidad del sustrato: si el sustrato es irregular, será imposible aplicar una capa fina realizable en una superficie más lisa. Además, la aplicación de la membrana sobre una superficie rugosa podría crear agujeros en la membrana. La superficie podría ser lisa, pero irregular (ondulada), lo que aumenta el consumo de material. En uno de los proyectos, la colocación de membrana a base de EVA aumentó aproximadamente un 60% debido a una superficie ondulada, a pesar de que se había aplicado la capa lisa. En otro proyecto, la mala ejecución de la capa niveladora obligó a retirar el revestimiento final para volver a realizar la capa niveladora y comenzar nuevamente con el proceso de colocación de la membrana y del revestimiento final. Se recomienda acabar la superficie final inmediatamente después de la aplicación de la capa niveladora, de acuerdo con la recomendación del proveedor,



▲ Figura 2. Inyección posterior de “costillas” o viga de celosía para minimizar las filtraciones.

utilizando un acabado con escoba y esmerilado para eliminar las piedras afiladas.

La aplicación contra una superficie de concreto lanzado limpia y regular proporciona una mejor clave para la SAWM. Se recomienda encarecidamente aplicar una capa niveladora de un tamaño máximo del agregado de 4 mm antes de la aplicación de la membrana, especialmente si el revestimiento primario contiene fibras de acero.

Se requiere de una superficie seca adecuadamente preparada antes de la aplicación de la membrana para lograr la adherencia requerida. De acuerdo con ITAtech (2013), el sustrato debe estar adecuadamente seco durante las 24 horas previas a la aplicación de la membrana. Sin embargo, y en la práctica, esto no es sencillo, ya que el agua siempre tiende a seguir el camino de menor resistencia a través del revestimiento primario. En un proyecto, en determinadas secciones, tras probar varios días de inyección, se observó que simplemente estábamos empujando el agua alrededor del revestimiento hacia nuevas ubicaciones. Por lo tanto, se decidió excluir las zonas húmedas durante la aplicación (marcándolas con pintura) e inyectarlas después de que la membrana hubiera curado lo suficiente. Los resultados fueron satisfactorios ya que, tras la inyección final, la membrana se había curado lo suficiente y el agua no podía traspasar la membrana curada y aparecer en otros lugares. Por último, se añadieron manualmente 3 mm de membrana en estos lugares como aplicación secundaria.

### 3.6. Temperatura y tiempo de curado

Una de las partes más desafiantes de cualquier trabajo de impermeabilización es la planificación y la programación de la capa niveladora, de las capas de membrana y del revestimiento secundario. Algunos proveedores recomiendan esperar hasta 7 días antes de la instalación de la membrana para que se haya producido la contención principal y se haya alcanzado el 85% de la resistencia a la compresión de la capa niveladora final. Sin embargo, este retraso puede hacer posible que se desarrollen otras fugas, por lo que es preferible aplicar la membrana cuanto antes. Algunas membranas a base de EVA podrían aplicarse sobre concreto de 24 horas.

La temperatura y la humedad relativa (HR) del sitio de la obra afectan directamente al tiempo de curado y, por consiguiente, a la logística de la obra. Cabe señalar que todos los datos facilitados por los proveedores son válidos para una temperatura y una humedad relativa determinadas. Un aumento en el grosor de la membrana aplicada también conlleva un aumento del tiempo de curado necesario.

La aplicación del revestimiento secundario final (SFRC) debe optimizarse cuidadosamente en el sitio de la obra. Si se aplica demasiado pronto, podría dañar la membrana y si se aplica demasiado tarde, podríamos tener nuevas presiones hidrostáticas antes del curado completo, daños por polvo e incluso de otra maquinaria en la obra. El concreto lanzado de revestimiento secundario no debe aplicarse hasta que la membrana haya curado lo suficiente como para alcanzar una dureza “Shore A” adecuada.

Se menciona que el curado final de la membrana duraría de 10 a 14 días en función del contenido de agua y de las condiciones ambientales del sitio de la obra (temperatura y humedad relativa). Un aumento del contenido de agua durante la proyección se traduce en un aumento del tiempo de curado necesario. Normalmente, las membranas aplicadas por proyección sólo pueden soportar la presión activa del agua cuando están completamente curadas y, normalmente, empotradas entre dos revestimientos de concreto.

Cabe señalar que si la humedad relativa es del 100%, no puede producirse evaporación y el curado se detiene. Para un curado óptimo, se recomienda que la humedad relativa sea inferior al 90% y que la velocidad del aire sea como mínimo de 0.5 a 1.0 m/s para las membranas construidas a base de EVA (dependiendo del producto), ya que de lo contrario el agua quedará retenida dentro de la membrana, aunque esto no debería perjudicar su impermeabilidad final. Con base en nuestras experiencias, una temperatura y humedad constantes junto con una ventilación permanente acelerarían el tiempo de curado y, en consecuencia, la construcción.

### 3.7. Gestión de entradas de agua e inyección “grouting”

El principal reto de la impermeabilización mediante membranas aplicadas por proyección es que la superficie debe estar lo suficientemente seca (al menos sin una entrada de agua activa) durante la aplicación y el tiempo de curado. Para este propósito, se pueden utilizar diferentes métodos, incluido la inyección (de cemento, poliuretano o resina acrílica), morteros impermeables aplicados sobre áreas localizadas con flujo de agua, láminas de drenaje y bandas de drenaje empotradas en el revestimiento primario.

En los túneles drenados con un sistema de drenaje permanente en la sección inferior, tanto la canalización del agua como la inyección podrían utilizarse previo a la aplicación de la membrana, dependiendo de la importancia del revestimiento primario. Tradicionalmente, para la canalización del agua, se han utilizado mantas de geotextil de drenaje o láminas de drenaje de hoyuelos. Los tapetes de drenaje convencionales separan las distintas capas del revestimiento (impidiendo cualquier unión), lo que aumenta el riesgo de que pueda desarrollarse presión de agua detrás de la membrana y dañar el revestimiento interior. En consecuencia, es inevitable dejar huecos en el revestimiento. Además, no es fácil aplicar el concreto lanzado sobre estos tapetes de drenaje y es necesario algún tipo de refuerzo de malla para proporcionar suficiente adherencia. Al colocar clavos a través de la manta atravesando hasta el sustrato de concreto para su fijación, la presión de la junta de caucho comprime la manta y ayuda a evitar el goteo de agua en la penetración. Los clavos deben venir con arandelas o collares de caucho autosellantes, puesto que se intenta evitar la fijación de clavos en zonas de entrada de agua. Sin embargo, a veces se observan algunas pequeñas fugas de agua en la interfaz de los tapetes de drenaje y de dichos clavos. No es fácil conseguir un sellado completo alrededor de las penetraciones de los clavos.

Un innovador sistema de malla de drenaje podría ser una buena alternativa (ver Figura 3). Estos sistemas pueden incorporarse dentro de la capa reguladora (adherida) y están hechos de LDPE, conocido por su durabilidad. La esperanza de vida de algunos productos es de alrededor de 120 años, frente a los 50 años de los sistemas de drenaje convencionales.

Este producto se utilizó por primera vez en Canadá en el marco del proyecto REM (doble arco, tramo sur). Cada panel mide 800 x 1,200 mm (1 m<sup>2</sup>). Cada medio tubo mide 14 mm, con la finalidad de que se empotre fácilmente en una capa lisa (regulada) típica de 30 a 40 mm. Si se instala de forma continua entre el revestimiento primario y la capa niveladora, podría disminuir considerablemente la entrada de agua. Para uno de estos productos, el revestimiento interior permanece adherido al revestimiento primario, proporcionando un revestimiento monolítico (Poulsen, 2019).



▲ Figura 3. Instalación de Dolenco Drain malla de drenaje entre las costillas de acero y en los muros cabeceros como parte del proyecto REM (doble arco, sección sur), Montreal, Canadá.

## ARTÍCULO TÉCNICO

Cada hueco en forma de rombo en la malla es de unos 100 x 40 mm, proporcionando una superficie de contacto de aproximadamente el 70% entre dos capas consecutivas de concreto lanzado. Si el revestimiento primario es permanente, podrían instalarse antes de la aplicación del revestimiento primario (sobre el “flashcoat”).

Con base en nuestra experiencia, deben utilizarse suficientes clavijas para fijar el panel al sustrato. De lo contrario, los paneles podrían desprenderse durante la posterior proyección de concreto. Esto podría complicar la situación, ya que toda el agua podría acumularse en un solo lugar. Los paneles son bastante flexibles, por lo que podrían doblarse en una esquina, por ejemplo, desde la circunferencia hasta los muros cabeceros. Las gotas de agua ocasionales y aisladas podrían gestionarse mediante lechada. Sin embargo, los sistemas de malla de drenaje son adecuados para recoger goteos de agua más generalizados (ver Figura 3).

#### 4. Control de calidad

Como ocurre con cualquier material construido *in situ*, un control de calidad sólido y sistemático y una buena mano de obra desempeñan papeles importantes. Las pruebas previas a la construcción y el uso de obreros capacitados son vitales para el éxito de la aplicación.

##### 4.1. Temperatura y humedad

Un factor importante para el buen desempeño de las membranas son las condiciones ambientales del sitio de la obra al momento de la aplicación y durante el curado. La temperatura y la humedad relativa pueden tener un efecto significativo en el comportamiento durante la aplicación y el curado. Durante la aplicación, es importante garantizar un control adecuado de la temperatura (ambiente y del concreto), la velocidad del aire y la humedad, para asegurarse de que se mantienen dentro de los límites recomendados. También es importante que la ventilación funcione durante y después de la aplicación, al menos hasta la aplicación del revestimiento secundario.

La temperatura recomendada en el caso de las membranas a base de polímero EVA durante al menos cinco días después de la aplicación es de entre +5 y +40°C. Las fluctuaciones de temperatura durante este periodo no deben superar los 10 grados.

##### 4.2. Control del grosor

Para verificar el grosor de la membrana obtenido, se utilizan medidores de película húmeda y piezas de prueba recortadas típicamente de 50 x 50 mm. ITAtech recomienda un mínimo de 10 mediciones del espesor de la película húmeda por cada 100 m<sup>2</sup> de membrana.

Un contraste de color entre dos capas diferentes sería una gran ventaja tanto para el contratista de proyección como para el control de calidad, ya que las zonas de bajo espesor se hacen evidentes visualmente.

No es posible mantener un espesor mínimo de 3 mm de la membrana en todas partes. Este dependerá de la ondulación y de la rugosidad del sustrato. Se recomienda que el diseñador sea razonablemente conservador a este respecto. Por ejemplo,

si se requieren 3 mm para el proyecto, el especificar un mínimo de 4 mm nos asegurará que se tendrá un mínimo de 3 mm de espesor en todas partes, específicamente en las intersecciones y transiciones bruscas (zonas propensas al agrietamiento). El consumo de membrana podría aumentar considerablemente cuando la superficie no es uniforme. El grosor de la membrana también puede comprobarse cortando parches a intervalos regulares a lo largo del túnel y midiendo físicamente el grosor.

#### 4.3. Identificación de fugas

Si se detectan defectos antes de la aplicación del revestimiento secundario, pueden repararse mediante inyección adicional o añadiendo morteros de sellado de agua y, por último, proyectando capas adicionales de membrana. Si se detecta una fuga de agua tras la aplicación del revestimiento secundario, en teoría debería ser fácil encontrar el origen de la fuga debido a la naturaleza adherente del SAWM (es decir, el agua no puede moverse lateralmente, ITAtech, 2013).

#### 5. Discusiones y conclusiones

La impermeabilización de estructuras subterráneas mediante SAWM es un problema complejo y conseguir una estanqueidad del 100% no es tarea fácil. Antes de adoptar una solución SAWM, debe evaluarse cuidadosamente la cantidad de entrada de agua activa prevista, ya que las condiciones podrían dictar el uso de una pre-inyección sistemática con microcementos o ser más adecuadas para una solución de membrana en láminas (Thomas 2019). La inyección es costosa, y una eficiencia al 100% es cuestionable, a menos que se adopte un patrón ajustado en el sitio de la obra. Las innovadoras mallas de drenaje podrían minimizar los trabajos de inyección en túneles parcialmente drenados, si se instalan correctamente y de forma continua.

El revestimiento primario podría no ser tan duradero como el secundario, debido a la presencia de zonas de sombra específicamente en la proximidad de las costillas metálicas y de las vigas de celosía. Si el revestimiento primario está diseñado para ser permanente, es importante sellar las fisuras y grietas tanto como sea posible antes de la aplicación de la membrana. En túneles drenados, la malla de drenaje podría instalarse antes de la aplicación del concreto lanzado permanente (primario o secundario) para ayudar a proteger el revestimiento permanente contra el deterioro a largo plazo por corrosión y congelación/descongelación.

La mayoría de los resultados de las pruebas sobre la interfaz de membrana se basan en las condiciones de laboratorio y en ausencia de cualquier tipo de agua subterránea o humedad. El revestimiento de membrana compuesta requiere de un programa de control de calidad exhaustivo. Por lo tanto, el diseño de SAWM debe ser razonablemente conservador en cuanto a los supuestos en términos de resistencia de adherencia, debido a los datos limitados sobre el comportamiento a largo plazo de las membranas. A este respecto, Thomas (2019) recomienda un factor de seguridad de 2.0.

Con base en nuestra experiencia, los factores clave para una aplicación exitosa de SAWM son la gestión del agua, la preparación del sustrato, el control de calidad, la mano de obra y los obreros calificados y el respeto del tiempo mínimo de

curado. El uso de membranas bicapa simplifica enormemente el control de calidad y de grosor en la obra. La calidad de la unión entre el concreto y la membrana es el aspecto clave de la aplicación de SAWM. Si la unión falla, el agua puede fluir y encontrar una forma de entrar en el túnel y no sería fácil encontrar el punto dañado y repararlo. Esta unión podría fallar por las condiciones húmedas del sustrato o por la proyección de un revestimiento secundario de manera prematura o demasiado tarde durante el proceso de curado de la membrana.

Los resultados de los ensayos de arranque *in situ* en condiciones secas en una membrana a base de EVA, basados en 15 pruebas, indicaron una resistencia media de la unión de 0.6 MPa, que es considerablemente inferior a los valores presentados por el proveedor (1.5 MPa). Las propiedades indicadas en las fichas técnicas de los productos se basan en pruebas de laboratorio y variarán cuando se apliquen en una obra en la que las condiciones no sean similares. Las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, el polvo, las aguas subterráneas y/o los errores humanos en la dosificación, la relación agua/cemento, el espesor de aplicación uniforme y la preparación adecuada de la superficie son riesgos adicionales para el sistema SAWM.

#### 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a REM, NouvLR y sus subcontratistas y proveedores por algunos de los datos utilizados en el presente artículo.

#### 7. Referencias

- CSA A23.2.19: Test methods and standard practices for concrete, (6B): Determination of bond strength of bonded toppings and overlays and of direct tensile strength of concrete, mortar, and grout.
- Dimmock, R. H., Haig, B., & Su, J. 2011. “Spray applied waterproofing membranes: key success factors and development of efficient sprayed concrete tunnel linings”. En Sixth International Symposium on Sprayed Concrete, Tromsø, Noruega (pp. 110-124).
- Garshol, K. F. 2009. “Cost Efficient waterproof tunnel linings”, en Engineering Conferences International, proceedings of Shotcrete for Underground Support.
- Holter, K. G. 2016. “Performance of EVA-Based membranes for SCL in hard rock”. En Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(4), 1329-1358.
- ITAtech Activity Group, T.M. 2013. ITAtech Design guidance for spray applied waterproofing membranes, p. 64.
- Johnson, R. P., Swallow, F. E., & Psomas, S. (2016). “Structural properties and durability of a sprayed waterproofing membrane for tunnels”. En Tunnelling and Underground Space Technology, 60, 41-48.
- Lemke, S., & Moran, P.S. 2015. “A controversial discussion regarding the use of spray-applied waterproofing for tunnel applications”. En Rapid Excavation and Tunneling Conference 2015.
- Luciani, A., & Peila, D. 2019. “Tunnel waterproofing: available technologies and evaluation through risk analysis.” En International Journal of Civil Engineering, 17(1), 45-59.
- Ma, J. Q. 2011. “Application of spray-on waterproofing membrane in tunnels”. En Advanced Materials Research (Vol. 168, pp. 822-826). Trans Tech Publications Ltd.
- MacDonald, M., 2009. Product Evaluation of MASTERSEAL 345, Assessment, Application and Specification.

Nakashima, M., Hammer, A. L., Thewes, M., Elshafie, M., & Soga, K. (2015). “Mechanical behaviour of a sprayed concrete lining isolated by a sprayed waterproofing membrane”. En Tunnelling and Underground Space Technology, 47, 143-152.

Pelz, U., & Karlovšek, J. 2022. “Spray-applied waterproofing membranes in tunnelling: Application and research directions in Australia”. En Tunnelling and Underground Space Technology, 122, 104364.

Pickett, A., & Thomas, A. 2013. “Where are we now with sprayed concrete lining in tunnels.” En Tunnelling Journal.

Pisova, B., & Hilar, M. 2017. “Spray-applied waterproofing membranes: effective solution for safe and durable tunnel linings?” En IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 236, No. 1, p. 012087). IOP Publishing.

Poulsen, J. R. 2019. “Relieving shotcrete and other linings from pressure with innovative drainage solution”. En Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art (pp. 2891-2897). CRC Press.

Sivakanthan, S., Ferreira, P., Wright, P., & Wimpenny, D. 2020. “September. Waterproofing Sprayed Concrete Linings-Existing Methods and Potential Developments”. En World Tunneling (pp. 1655-1664). ITA-AITES.

Su, J., Bloodworth, A., & Haig, B. 2013. “Experimental investigations into the interface properties of composite concrete lined structures”. En Proceedings of World Tunnel Congress, Geneva. Taylor & Francis, Londres, Inglaterra.

Su, J., & Bloodworth, A. 2016. “Interface parameters of composite sprayed concrete linings in soft ground with spray-applied waterproofing”. En Tunnelling and Underground Space Technology, 59, 170-182.

Su, J., & Bloodworth, A. 2019. “Simulating composite behaviour in SCL tunnels with sprayed waterproofing membrane interface: A state-of-the-art review”. En Engineering Structures, 191, 698-710.

Su, J., & Thomas, A. 2015. “Design of sprayed concrete linings in soft ground—a Crossrail perspective”. En Crossrail Project: Infrastructure design and construction, 1, 123-136.

Su, J., Uhrin, M., & MacDonald, M. 2016. “Primary-secondary lining interactions for composite sprayed concrete lined tunnels using sprayed waterproofing membrane”. En Proc. Int. Conf. World Tunnel Congress 2016 (San Francisco, USA).

Thomas, A.H. Sprayed concrete lined tunnels, CRC Press, Boca Raton, USA, ISBN: 9780367209759 - <https://www.crcpress.com>

Thomas, A.H. & Dimmock, R. 2018. “The design philosophy for permanent sprayed concrete linings”, Sprayed Concrete Symposium 2018, Trondheim.