

INFLUENCIA EN LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES DE CARRETERAS DE LOS REVESTIMIENTOS TERMOPLÁSTICOS PARA HASTIALES

J. Tort, J. Berenguer
Barnices Valentine, S.A.U.

En la seguridad de los túneles de carretera intervienen múltiples factores como son su configuración, iluminación, ventilación, etc.... Un aspecto a considerar con detenimiento por las implicaciones que se detallan en esta comunicación, es el tipo de acabado de sus paredes que, en algunos casos, consiste en un revestimiento termoplástico sobre la superficie del hormigón.

Este revestimiento termoplástico no cumple tan sólo una función estética, sino que además está diseñado para tener, entre otras, unas propiedades fotométricas particulares, con un color y reflectividad optimizados, contribuyendo a incrementar la seguridad del túnel y el confort visual de los usuarios del mismo.

La correcta elección del tipo de revestimiento permite una reducción de la iluminación necesaria para cumplir con los requerimientos de luminosidad en los diferentes tramos del túnel, con la consiguiente reducción de costes tanto en las fases de diseño y ejecución del túnel como en sus fases de explotación y mantenimiento.

Otras propiedades del revestimiento a tener en cuenta son aquellas que le permiten ofrecer una protección integral del hormigón, evitando la carbonatación del mismo,

el cumplimiento de la normativa actual en lo referente a la reacción al fuego de los materiales, así como la simplificación de las tareas de mantenimiento de la instalación.

La versatilidad de los revestimientos termoplásticos permite su aplicación tanto en túneles de nueva construcción, como en otros ya construidos y no interfiere en el proceso de instalación de los otros elementos de seguridad reglamentarios: señales, semáforos, B.I.E.'s, etc.

1. Introducción

El diseño de túneles de carreteras debe de tener en cuenta diferentes aspectos técnicos y económicos, estando todos ellos supeditados al principal objetivo que es la seguridad de los túneles, tal como recoge la normativa vigente. Estos requisitos referentes a medidas de seguridad quedan regulados en el RD 635/2006 de 27 de Mayo de 2006, que transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva europea 2004/54/CE.

Uno de los aspectos más importantes en la seguridad de un túnel de carretera es el de la visibilidad en su interior. En concreto, la razón principal de la iluminación de un túnel es asegurar en todo momento la visibilidad de los obstáculos que se encuentran en su interior. Para ello se exige que sus usuarios puedan diferenciar claramente el obstáculo situado en la calzada respecto del fondo, compuesto por la calzada y las paredes del túnel.

Se puede caer en la tentación de considerar que el acabado de las paredes es un aspecto menor en el diseño del túnel al tratarse de un tema puramente estético. Por el contrario, en esta comunicación se pretende remarcar el impacto positivo para la seguridad que puede significar un acabado de los hastiales del túnel con revestimiento termoplástico diseñado a tal efecto.

A título de ejemplo se puede decir que un acabado oscuro disminuye la capacidad de detección de obstáculos en la calzada y la sensación de guiado de la conducción. Por otra parte, un acabado excesivamente brillante puede resultar en un “efecto espejo”, provocando deslumbramientos y distracciones a los conductores.

2. Seguridad en un túnel

El concepto de seguridad en el túnel engloba múltiples aspectos a tener en cuenta y de entre todos ellos parece oportuno destacar los siguientes por tener una inciden-

cia en todas las fases del proyecto, diseño, ejecución, explotación y mantenimiento:

- Los niveles de luminosidad en todos los tramos del túnel deben de cumplir unos requerimientos mínimos, permitiendo la detección de obstáculos en la calzada, ofreciendo un adecuado nivel de confort a los usuarios, y su implementación debe de ser totalmente compatible con los sistemas de seguridad tipo D.A.I. C.C.T.V.
- Los valores de brillo de las paredes del túnel deben de ser los adecuados para no perturbar la conducción, evitando por ejemplo reflejos que provoquen deslumbramientos perturbadores a los usuarios.
- Los materiales utilizados en la construcción del túnel deben de ofrecer una adecuada reacción al fuego en caso de accidente, evitando la propagación del mismo y no contribuir a la generación de humos densos y opacos.
- Dichos materiales deben de estar adecuados a las condiciones de aplicación durante las fases de ejecución y mantenimiento. Tanto en lo que se refiere a aspectos relacionados con la no utilización de productos nocivos para los aplicadores, como en lo que se refiere a la facilidad, y en consecuencia a su rapidez, de aplicación y mantenimiento.
- La solución constructiva utilizada en sus paredes debe de ser resistente a las condiciones atmosféricas propias de este tipo de infraestructura, y en el caso de los hastiales de hormigón, éstos deben de ser tratados para evitar patologías, como su carbonatación, que puede conllevar el desprendimiento de fragmentos de las paredes. Relacionada con las patologías del sustrato, la posibilidad de poder inspeccionar fácilmente su estado interfiriendo mínimamente en el tráfico rodado es también un factor a considerar.
- El acabado final de los hastiales debe de ser resistente a las vibraciones y succiones provocadas por el tráfico rodado, y se debe de minimizar la posible proyección de fragmentos como consecuencia de impactos.



Imagen 1.- Dos ejemplos de diseño de túneles. En el segundo caso, los grados de visibilidad y confort han sido notoriamente incrementados.

3. Acabado de las paredes de un túnel de carretera

De lo expuesto en el punto anterior se puede observar que aspectos con una influencia significativa en la seguridad de un túnel de carretera están directamente relacionados con la solución diseñada para el acabado de sus hastiales.

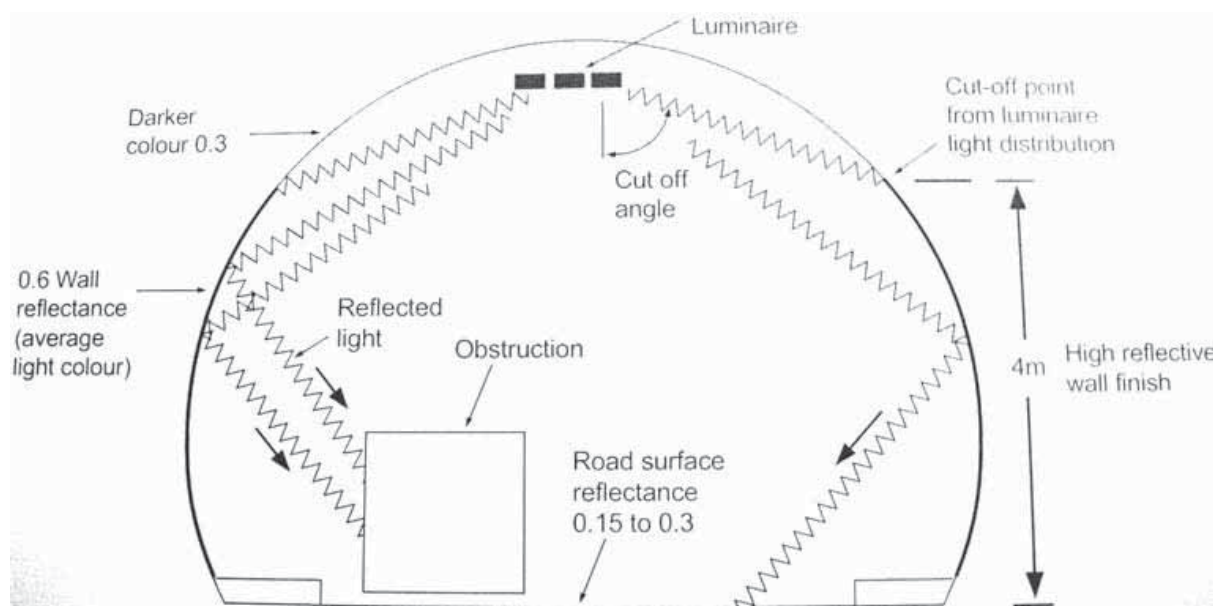
No es la intención de esta comunicación disertar extensamente sobre los diferentes acabados de los túneles. De una manera muy simplificada y pragmática, se puede decir que en función de la composición del terreno donde se construye el túnel, ya sea duro, blando o de consistencia quebradiza, será necesario realizar un acabado determinado o bien dejarlo a roca viva.

Así, nos podemos encontrar con unas paredes de Hormigón proyectado, Dovelas o segmentos y encofrados, Roca viva, etc. Cada uno de los diferentes acabados resultará en una superficie que podrá ser o bien rugosa (por ejemplo el gunitado) o bien más o menos lisa, pero que en cualquier caso presentará una características que no serán todo lo óptimas que se podrían conseguir si se dota al túnel de un revestimiento o acabado termoplástico que le confiera las propiedades requeridas. Un acabado termoplástico también significará por supuesto una mejora a nivel estético del acabado de los hastiales.

4. Iluminación y revestimientos

Los estudios realizados por diferentes organismos internacionales como la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.) o el Centre d'Études des Tunnels (C.E.T.U.) han permitido poner de relevancia el rol fotométrico jugado por los revestimientos utilizados en los túneles, tanto en la calzada como en las paredes del mismo. En concreto se ha podido demostrar la influencia real de los revestimientos utilizados sobre las necesidades de luminosidad del túnel y por lo tanto en el diseño de su sistema de iluminación.

Existe una influencia real del revestimiento de la calzada y hastiales en los niveles de luminancia en los diferentes tramos del túnel, que a su vez se traducen en el dimensionado de las necesidades de iluminación. El esquema siguiente muestra gráficamente la relación entre el revestimiento de los hastiales y la iluminación (extraído de “Design Manual for Road and Bridges”, parte 9, “Design of Road tunnels”, UK).



Esquema 1: Recorrido de los haces de luz desde el punto de luz hasta el obstáculo a través de los hastiales

La CIE utiliza un sistema simplificado de dos coeficientes para caracterizar fotométricamente un revestimiento. A través de este sistema simplificado se puede a su vez, pasar del nivel de luminancia [candelas/m²] requerida por la normativa a las necesidades de iluminación [lux]. Los coeficientes mencionados son:

- Luminancia Media (Q0), que describe la claridad de la superficie. Aumenta proporcionalmente al porcentaje de luz recibida que es reenviada.
- Especificidad (S1), que caracteriza la capacidad de reenviar la luz recibida en una dirección privilegiada. Aumenta si el revestimiento tiene tendencia a comportarse como un espejo.

Estos dos coeficientes son independientes entre sí. Por ejemplo, una pintura lacada negra presenta un S1 elevado y un Q0 bajo, mientras que una pintura blanca mate tiene un S1 bajo y un Q0 elevado.

En un túnel con un sistema de alumbrado simétrico, sistema que permite una buena visibilidad de los obstáculos y ausencia de deslumbramiento, se aconseja que fotométricamente el pavimento de la calzada y las paredes del túnel sean superficies difusoras y claras. Es decir, con un coeficiente S1 bajo y un coeficiente Q0 lo más elevado posible.

Los estudios realizados con un alumbrado simétrico han demostrado que la claridad de los revestimientos (Q0) influye claramente sobre las necesidades de iluminación:

la utilización de revestimientos muy claros puede llegar a reducir a la mitad las necesidades de iluminación requeridas en el caso de utilizar revestimientos oscuros.

Por otro lado, la especularidad del revestimiento (S_1) tiene una influencia real pero limitada sobre las necesidades de iluminación. En el caso de un sistema de alumbrado simétrico, los revestimientos poco especulares son más ventajosos.

En un túnel con un sistema de alumbrado a contraflujo, los obstáculos se destacan oscuros sobre el fondo claro de la calzada y las paredes del túnel. En este sistema de alumbrado debe limitarse el deslumbramiento controlando la intensidad luminosa emitida por las luminarias, siendo aconsejable fotométricamente la utilización de pavimentos y revestimientos especulares y claros, es decir, con un coeficiente S_1 elevado y un coeficiente Q_0 también lo más elevado posible.

Como en el caso de un sistema simétrico, la utilización de revestimientos claros puede llegar a reducir a la mitad las necesidades de iluminación. La influencia de la especularidad del revestimiento también es más limitada, pero en este caso, los revestimientos especulares presentan una cierta ventaja.

5. Características deseables de un acabado termoplástico

De las numerosas propiedades de los acabados de tipo termoplástico, y teniendo en cuenta las premisas expuestas anteriormente, buscando que su aplicación en los hastiales de un túnel no presente ningún tipo de contribución negativa y si por el contrario el máximo de contribuciones positivas, se han seleccionado las siguientes propiedades que deberían de considerarse a la hora de diseñar un revestimiento adaptado a tal fin:

- Reflectancia, brillo y color.
- Reacción al fuego.
- Protección integral del sustrato.
- Ausencia de disolventes en su composición.
- Durabilidad de la película termoplástica.
- Posibilidad de repintado y aplicaciones parciales.

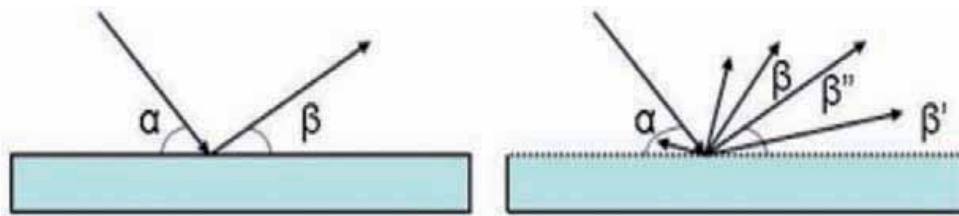
Se detallan a continuación las particularidades de las propiedades mencionadas:

a. Reflectancia, color y brillo

Se entiende como reflectancia la propiedad de una superficie de reflejar una parte más o menos importante de la luz que le llega. Es de sobras conocido que

las superficies negras no reflejan la luz (por eso son negras), y las blancas, al contrario, reflejan (casi) toda la luz que les llega. La reflectancia puede equiparse con el valor de la coordenada L^* del sistema CIELAB (propuesto por la C.I.E.), coordenada que oscila entre el 0 para el color negro absoluto y el 100 para el blanco perfecto.

El valor de reflectancia depende tanto del color del revestimiento como de su superficie, ya que superficies muy lisas tendrán una reflectancia mayor que las superficies rugosas, que reflejan la luz incidente en múltiples direcciones y no en una dirección determinada como se observa en el esquema siguiente.



Esquema 2: Diferente reflectividad en función de la superficie del objeto iluminado

Los revestimientos termoplásticos no pueden, por sí mismos, convertir una superficie muy rugosa en una de lisa, pero sí pueden ajustar la rugosidad de superficies ligeramente rugosas, como sería el caso de un hastial de hormigón. Normalmente, se asimila el concepto liso-rugoso a la idea brillante-mate. Cuanto más lisa es la superficie a nivel microscópico, más brillante es el revestimiento. Pero a la vez, cuanto más brillante es más “efecto espejo” puede presentar, y tal como se ha comentado anteriormente, en el caso de túneles con sistema de iluminación simétrico, se tienen que evitar revestimientos muy brillantes por producir deslumbramientos a los conductores.

b. Reacción al fuego

Durante la vida útil del túnel es lamentablemente probable que se produzcan accidentes en su interior. Dichos accidentes pueden provocar incendios que lleguen a quemar el revestimiento de las paredes. Obviamente, es necesario disponer de productos que reduzcan al máximo la propagación del fuego y que los humos generados durante su combustión, sean pocos y poco opacos.

Para poder evaluar el comportamiento frente al fuego de los materiales se dispone de la Norma UNE EN.13501-1.2007, que permite cuantificar los siguientes parámetros:

- comportamiento frente al fuego: clasifica los productos según favorezcan o no el desarrollo del fuego
- producción de humo: generación de humos en el momento de quemarse
- gotas en llamas: observa si al quemarse el producto se producen gotas en llamas que puedan favorecer la propagación
- opacidad de humos: los humos densos reducirán la visibilidad dentro del túnel en caso de incendio

c. Protección integral del sustrato

El hormigón utilizado en el recubrimiento de las paredes de los túneles, presenta un grado de porosidad tal que no impide la entrada de contaminantes como el agua y el anhídrido carbónico. El tránsito de estos elementos hasta el armazón metálico del hormigón armado puede producir una reacción química conocida como carbonatación. Esta reacción química se traduce en un incremento del volumen del armazón que a su vez provoca la fisuración del hormigón y la pérdida de resistencia del mismo. Para ayudar a prevenir esta patología, es posible revestir el hormigón con una película que lo impermeabilice impidiendo la entrada de los contaminantes mencionados, así como ataques químicos de otros agentes contaminantes presentes en el interior de un túnel.

La selección de un revestimiento termoplástico que tenga unas propiedades de muy baja permeabilidad al agua líquida y al CO₂ es la opción idónea para la protección de una pared de hormigón.

d. Presencia de disolventes

En las propiedades que inciden en aspectos que afectan a la fase de ejecución del túnel, en primer lugar tenemos que considerar que el revestimiento se aplicará en un ambiente con una ventilación limitada y, normalmente, con un grado de humedad ambiental relativamente elevado. En estas condiciones se precisa poder utilizar un producto cuya aplicación no se vea condicionada por factores ambientales adversos. Por lo tanto, el producto ideal no es en fase disolvente, ya que al evaporarse el disolvente cargaría en demasía el ambiente dentro del túnel, pudiendo producir problemas de salud en los aplicadores. En este caso es mejor aplicar un revestimiento en fase acuosa.

e. Durabilidad

Otra de las propiedades no relacionadas directamente con la seguridad, sino con la fase de explotación del túnel, es la durabilidad del revestimiento de los hastiales.

Teniendo en cuenta que la atmósfera dentro de un túnel en funcionamiento está cargada de sustancias despididas por los motores de los vehículos, las paredes tienen tendencia a ensuciarse rápidamente si su superficie presenta un elevado grado de rugosidad y porosidad como pueda ser el caso de las paredes de hormigón.

La aplicación de un revestimiento liso que dificulte la adherencia de la suciedad y que sea fácilmente lavable es la solución apropiada para este caso. El revestimiento debe permitir su lavado con agua a presión y detergentes de manera habitual y todo ello sin perder sus propiedades. De esta manera se garantiza la vida útil del revestimiento sin tener que aplicar nuevas capas. Es necesario destacar que el facilitar las tareas de limpieza permite minimizar el impacto de estas labores en el tráfico rodado en el interior del túnel.

La caracterización del revestimiento en lo referente a su resistencia al lavado se puede cuantificar tanto por su Resistencia a la Abrasión en Seco (método Taber, norma ASTM D4060), como por su Resistencia a Frotés en Húmedo (Norma DIN 53778).

f. Aplicación parcial – Repintado

Así mismo, es posible que durante la vida útil del túnel se realicen obras de mantenimiento que conlleven reparaciones parciales de las paredes del túnel. Una vez efectuada la reparación, el revestimiento termoplástico debe de permitir aplicaciones posteriores manteniendo la uniformidad en el conjunto del revestimiento. En este caso se debe de garantizar que el revestimiento aplicado permite el repintado de manera ilimitada previa preparación adecuada del sustrato (reparación, limpieza, etc...).



Imagen 2.- Sistema de aplicación del producto.

g. Otros aspectos a considera

En caso de accidente y de producirse un impacto directo, al tratarse de un revestimiento completamente solidario con lo hastiales del túnel, se minimiza la probabilidad de que fragmentos potencialmente peligrosos salgan despedidos aumentando la gravedad de los posibles daños.

La aplicación de un recubrimiento termoplástico directamente sobre los hastiales, sin crear cámaras o espacios huecos, no dificulta las tareas de inspección del hormigón de las paredes del túnel.

La utilización de un revestimiento termoplástico sobre los hastiales no interfiere de manera negativa en la implantación de los demás sistemas de seguridad reglamentarios: Semáforos, B.I.E.'s, Señales, etc...



Imagen 3.- La aplicación del revestimiento termoplástico simplifica la instalación de otros elementos de seguridad reglamentarios

**6. Características técnicas del revestimiento termoplástico
propuesto: C-POX W200 HB**

Teniendo en cuenta lo expuesto en los puntos anteriores, el revestimiento termoplástico diseñado para su aplicación en los hastiales de los túneles tiene que presentar las siguientes características:

- Color claro.
- Reflectancia superior a 60%, idealmente entre 83-85%.
- Buen comportamiento frente al fuego (contribución limitada al fuego, baja generación de humos, baja opacidad de estos humos, no desprende partículas en llamas).
- Protección integral del hormigón (impidiendo la carbonatación y otros ataques químicos).

- No contener otros disolventes que no sea el agua.
- Elevada resistencia a la abrasión (lavabilidad).
- Posibilidad de repintado y aplicaciones parciales.

En base a estas propiedades, el departamento de I+D de Barnices Valentine, S.A.U. ha diseñado un revestimiento, el C-POX W200 HB, con las siguientes propiedades:

- Dispersión Epoxídica en Base Acuosa
- Color: RAL 9010 (Blanco Puro)
- Reflectancia: 82%
- Aspecto: desde brillante hasta medio mate
- Comportamiento al fuego: clasificación B (contribución muy limitada al fuego)
- Producción de humo. Clasificación S2 (producción media de humos)
- Gotas de llamas: clasificación d0 (no se producen partículas/gotas)
- Opacidad de humos: satisface los mínimos de la norma BS 6856/1987
 - A0 ON = 0,18 (deseado < 1,0)
 - A0 OFF = 0,21 (deseado < 1,5)
- Resistencia a la abrasión: Norma ASTM D4060
 - Razón de desgaste: 0,1 (mg de pintura eliminados por ciclo y por kg de pintura original)
- Resistencia al frote húmedo: Norma DIN 53778
 - Superior a 10.000 ciclos
- Protección integral del hormigón (carbonatación y corrosión por picaduras).
- Secado: 16 horas.
- Repintado: ilimitado.

7. Conclusiones

El estudiado diseño de un revestimiento para los hastiales de un túnel de carretera pensado en los requerimientos de seguridad y confort marcados por la normativa actual, permite a Barnice Valentine, S.A.U. proponer una solución técnica que ofrece múltiples ventajas en todas las fases del proyecto:

Reducción de las necesidades de iluminación en todos los tramos del túnel, con la consiguiente reducción del coste económico en las fases de diseño, ejecución, explotación y mantenimiento.

Contribución a la mejora de los niveles de seguridad y confort de los usuarios, incidiendo en aspectos como la adecuada reacción al fuego y la ausencia de disolventes en su composición.

Bajo impacto en el tráfico viario en el momento de realizar mantenimientos, limpiezas e inspecciones.

Contribución a la protección integral de los hastiales del túnel, evitando entre otras patologías su carbonatación.



Imagen 4.- La aplicación del revestimiento termoplástico C-POX W200 HB de Barnices Valentine incide significativamente en múltiples aspectos de la seguridad y confort en los túneles de carretera.

8. Bibliografía

- Ministerio de Fomento, RD 635/2006 de 26 de Mayo de 2006 (Requisitos mínimos de Seguridad en los túneles de carreteras del Estado).
- Recomendaciones para la Iluminación de Carreteras y Túneles – 1999. Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras.
- Dossier Pilote des Tunnels, Équipement, Séction 4.2, Éclairage – 2000. Centre d’Études des Tunnels. Ministère de l’Équipement, des Transports et du Logement. Direction des Routes.
- BD 78/99 Design Manual for Roads and Bridges, Volume 2, Section 2, part 9, “Colour and Surface Reflectance”.
- Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting, Publication 30/2 – 1982. Commission Internationale de l’Éclairage(CIE).
- Norma EN 13501-1:2007
Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.
- Norma BS 6853:1987
Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains (Opacidad de Humos).

- Norma ASTM D4060-07
Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser (Método Taber - Resistencia a la Abrasión).
- Norma UNE-EN ISO 1522:2007
Pinturas y barnices. Ensayo de amortiguación del péndulo (ISO 1522:2006).