

Una propuesta para el proyecto de firmes y pavimentos en túneles

A proposal for the design of pavements in road tunnels

Miguel Ángel del Val Melús. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Universidad. Departamento de Ingeniería Civil-Transportes. UPM. miguel.delval@upm.es

Manuel G. Romana García. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de Universidad. Departamento de Ingeniería Civil-Transportes. UPM. mromana@caminos.upm.es

Ricardo Galvis. Ingeniero Civil
Venezuela. inricgalc@yahoo.es

Resumen: Ante la ausencia de recomendaciones y normas, se presenta una visión personal del tema, así como una propuesta de criterios técnicos y reglas prácticas para el diseño y la ejecución de firmes en túneles, a fin de facilitar la labor del ingeniero proyectista que se enfrenta a estas tareas. Se empieza por proporcionar la información general que, de manera imprescindible, se ha de tener en cuenta en la toma de decisiones durante el proceso de diseño. Se exponen a continuación los criterios que se han de seguir para evaluar el tráfico esperado y las condiciones del cimiento del firme. A partir de ahí se propone un catálogo de secciones, adaptadas a las diversas situaciones posibles de los firmes, tanto con pavimento asfáltico como de hormigón. El artículo culmina con unas recomendaciones adicionales sobre los procesos constructivos.

Palabras Clave: Túnel, Firme, Pavimento, Explanada

Abstract: Given the absence of specifications and recommendations on the subject of pavement sections in tunnels, this article presents the personal view of the authors, along with a proposal of criteria and materials for the design and construction of these pavements. It begins with a set of general review of tunnel conditions, since they must be borne in mind in order to make the necessary decisions during the design period. Then the criteria to evaluate the loads (traffic category) and pavement foundation are given. Two catalogues are given, the first of different solutions to build the pavement foundations and the second to decide on materials and layer thicknesses for pavement sections, with alternative solutions based on bituminous materials and concrete. Finally, the article contains additional guidance on the factors that need to be pondered before deciding on pavement type, and some recommendations on the construction processes for each material type.

Keywords: Tunnel, Pavement, Subgrade

1. Introducción

El firme es un elemento de los túneles de carreteras que influye en la seguridad y en la comodidad de los usuarios. Por otro lado, hay que atender también a su durabilidad, para que las necesidades de conservación sean mínimas y así reducir la incidencia de esas tareas en la explotación del túnel.

Análogamente a lo que ocurre en las estructuras, el coste relativo del firme es muy bajo en los túneles:

menos del 5 % de la obra. Pero al contrario que en aquéllas, en éstos es relativamente habitual disponer la sección estructural completa. Además debe destacarse que, incluso si el material en el que se excava el túnel, que constituiría el cimiento del firme, es de buena calidad, es especialmente difícil terminar la excavación con la regularidad precisa para que pueda servir de apoyo a las capas del firme.

Ante la ausencia de recomendaciones y normas para el diseño de los firmes en túneles, se pretende

ofrecer en este artículo una visión personal y una propuesta de criterios técnicos y reglas prácticas para su proyecto y su ejecución. Se incluye también alguna información general sobre materiales y métodos constructivos, a fin de proporcionar una ayuda para la toma de decisiones durante el diseño. En última instancia, se pone a disposición de los proyectistas una gama de posibles soluciones, entre las que han de elegir la más adecuada en base a consideraciones técnicas, de seguridad y económicas sobre el caso a resolver. Se pretende asimismo unificar criterios sobre las secciones estructurales de los firmes en los túneles.

2. Clasificación de túneles

Atendiendo únicamente a la infraestructura, los túneles pueden ser clasificados, entre otros criterios, por su sección transversal, por su sostenimiento, por la naturaleza del cimiento de su firme, por el método constructivo empleado y por el acabado del túnel.

Existen cuatro tipos principales de secciones transversales en túneles:

- Circulares
- Rectangulares
- De herradura
- Ovaladas

La forma de la sección tiene relación con las condiciones del terreno y con el método constructivo empleado. A este respecto no debe olvidarse que algunos túneles viarios aparentan ser rectangulares en su interior, debido al pavimento y a la losa de techo, y sin embargo la sección de la excavación, que es la que define realmente el tipo, es diferente. Por otro lado, en algunos túneles se combinan distintos procedimientos constructivos, debido a los cambios de las condiciones del terreno.

Según su sostenimiento, los túneles pueden ser clasificados como:

- Con sostenimientos flexibles: con bulones y hormigón proyectado y cerchas.
- Con cerchas y hormigón bombeado.
- Revestidos por segmentos.
- Con anillos de hormigón in situ.

Tabla 1. Relación entre la forma del túnel y el método constructivo

Método constructivo	Forma de la sección		
	Circular	Herradura	Rectangular
Trinchera		X	X
Escudo	X		
Excavación con tuneladora	X		
Voladura	X	X	
Tubos sumergidos	X		X
Excavación secuencial		X	
Escarificación/Pala	X	X	
Rozadoras	X	X	
Pantalla			X
Fresado	X	X	

En los túneles, el apoyo del firme suele ser bueno, bien porque el terreno natural sea de alta calidad, como ocurre si la excavación se realiza en roca, o bien porque se dispone una contrabóveda para cerrar la sección con hormigón donde el terreno es de menos calidad.

Como se ha indicado, el procedimiento de excavación utilizado determina en buena medida la forma de la sección transversal. En la tabla 1 se presentan los diferentes métodos constructivos y su relación con la forma de la sección.

En un túnel el firme puede ser, en principio, de cualquier tipo: flexible, semiflexible, semirrígido o rígido. En consecuencia, su superficie podría estar formada, como se analiza con detalle más adelante, tanto por una mezcla asfáltica como por un pavimento de hormigón. Desde un punto de vista funcional, el acabado del pavimento debería en todo caso proporcionar una diferenciación cromática entre la calzada y los hastiales y la bóveda, para que se produzca un efecto de guía positivo para mejorar la comprensión del túnel por parte de los conductores; la diferenciación cromática influye también en la reducción de la claustrofobia relativa, y ambos factores permiten disminuir la monotonía de la conducción dentro del túnel.

En su *Directiva sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras*, de abril de 2004, la Unión Europea ha establecido una clasificación de túneles basada en tres aspectos (tabla 2): circulación en un único sentido o en ambos, intensidad del tráfico y longitud. Según esta clasificación, la longitud mínima considerada

Tabla 2. Clasificación de los túneles según la Directiva 2004/54/CE

Circulación	Intensidad de circulación	Longitud (m)
Doble sentido	> 2000 veh/día y carril	> 1500 ¹
Cualquiera	< 2000 veh/día y carril	500 a 1000 > 1000
Cualquiera	> 2000 veh/día y carril	500 a 1000 1000 a 3000 > 3000

Nota 1: Estos túneles deben tener apartaderos a una distancia inferior a 1000 m
 Nota 2: La Directiva establece, además, la obligatoriedad de disponer tubos de sentido único cuando las previsiones a 15 años muestren que el volumen de tráfico llegará a superar los 10 000 vehículos por día y carril y se alcance este valor.

Tabla 3. Clasificación de los túneles según el Real Decreto 635/2006

Circulación	Intensidad de circulación	Entorno y longitud (m)
----	Cualquiera	> 1000 ¹
Doble sentido	> 1000 veh/día y carril	> 1000 ²
Doble sentido	> 2000 veh/día y carril	> 1500 ³
Sentido único	Cualquiera	> 1000
	≤ 2000 veh/día y carril	500 a 1000
	> 2000 veh/día y carril	500 a 1000
	Cualquiera	Urbano ≤ 200
	≤ 2000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500
Doble sentido	≤ 1000 veh/día y carril	> 1000
	> 1000 veh/día y carril	> 1000
	≤ 1000 veh/día y carril	500 a 1000
	> 1000 veh/día y carril	500 a 1000
	Cualquiera	Urbano ≤ 200
	≤ 1000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500
	> 1000 veh/día y carril	Urbano 200 a 500

Nota 1: Estos túneles deben tener pavimento de hormigón (artículo 2.3.1)
 Nota 2: Estos túneles deben tener medidas especiales de ventilación, pero sólo si tienen centro de control y ventilación semitransversal o transversal (artículo 2.11.7)
 Nota 3: Estos túneles deben tener apartaderos a una distancia inferior a 1000 m.

para la aplicación de los requisitos establecidos en la Directiva es de 500 m. Este valor es razonable para redes viarias en campo abierto, en las que es raro que existan estructuras de soterramiento entre 60 y 500 m; en entornos urbanos, por el contrario, sería conveniente tratar como un túnel, a efectos de los requerimientos específicos de seguridad, a cualquier tramo soterrado de más de 200 m.

La pretensión primordial de la clasificación de la tabla 2 es ordenar las inversiones que son necesarias en materia de seguridad de la infraestructura, y su definición es producto de un análisis de las longitudes de túneles viarios en distintos países desarrollados, y de las conclusiones de diversos grupos de expertos tras los últimos incendios en túneles de los Alpes (de los que los más relevantes fueron los de Mont Blanc en 1999, Tauern en 2000 y San Gotardo en 2003). Esos incendios han supuesto una auténtica revolución en los criterios de seguridad que se aplican en los túneles, comenzando por una revisión completa de la infraestructura y su funcionamiento, y provocando unos cambios en la filosofía del diseño y, especialmente, en las necesidades de equipamientos para detección de incendios y de información y evacuación de usuarios en caso de incidente.

Los firmes no han sido omitidos en esta revisión de necesidades y funcionamiento en caso de incendio, habiendo sido analizada su carga de fuego (aunque no es una característica de diseño fundamental, como se verá más adelante) y su funcionalidad en una situación de emergencia. En consecuencia, la clase a la que pertenezca el túnel es un factor que debería ser considerado a la hora de establecer el tipo de firme que ha de construirse en él.

En España se publicó en mayo de 2006 el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado (Boletín Oficial del Estado nº 126 de 27 de mayo de 2006, y corrección de errores en el nº 181 de 31 de julio de 2006), que es una trasposición parcial de la Directiva de la Unión Europea: su ámbito de aplicación se circunscribe a los túneles de la Red de interés general del Estado, con lo que quedan excluidos, al menos en principio, los túneles de la Red Transeuropea situados dentro del territorio español, pero no dependientes del Ministerio de Fomento. En este Real Decreto se establecen las clases de túneles que se recogen en la tabla 3.

3. Bases del diseño

El diseño de secciones de firme para túneles que se presenta en este artículo se ha basado en el procedimiento propuesto en la Norma 6.1 IC de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento: se consideran como parámetros básicos la categoría del tráfico pesado y las condiciones de la explanada; entre las posibles soluciones para cada combinación de los parámetros básicos se ha de seleccionar en cada caso concreto la más adecuada técnica y económicamente.

En relación con la explanada es preciso hacer de entrada algunas matizaciones. Como se ha señalado, la calidad del cimiento del firme en los túneles suele ser relativamente alta. Dado que en las excavaciones en roca, la naturaleza y el estado de ésta tienen una cierta influencia, se hace a continuación una referencia a las clasificaciones geomecánicas de las rocas, que se basan en la diferencia existente entre las propiedades de la roca madre y las del macizo, que puede presentar diferentes grados de fracturación y de meteorización. Entre las clasificaciones más empleadas hay que destacar el RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski. Esta clasificación fue establecida en 1979, y se basa en un indicador semiobjetivo que varía entre 0 y 100, que es la suma de valores correspondientes a cinco parámetros (tabla 4).

Tabla 4. Parámetros y valoración en la clasificación RMR

Parámetro	Valoración
Resistencia a compresión simple	0 - 15
RQD (Rock Quality Designation)	0 - 20
Espaciado de las juntas	0 - 30
Presencia de agua	0 - 15

Tras la valoración global, debe realizarse una corrección dependiendo de la dirección del buzamiento y del buzamiento de las juntas en relación con la dirección de la excavación del túnel. Finalmente, el macizo se encuadra en una clase de las cinco indicadas en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de Bieniawski de un macizo rocoso

ROCA	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena
RMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100

Adicionalmente, en base a otros criterios complementarios sobre recomendaciones de excavación y sistemas constructivos de túneles, se puede afirmar lo siguiente:

- Con valores de RMR mayores de 50, el cimiento del firme puede ser la propia roca o una losa estructural, la cual se dispondrá sólo, por razones de geometría de la sección transversal de la calzada, si la excavación se ejecuta con tuneladora¹.
- Con valores de RMR entre 35-40 y 50 la excavación se ejecuta usualmente en avance y destroza, haciéndose necesario el uso de sostenimientos. El sistema constructivo recomendado varía, siendo también posible el uso de tuneladoras. Se puede deducir que en estos casos el apoyo será la propia roca si $40 < RMR < 50$, o una losa o solera si el valor de RMR es menor o si se requiere por razón de la geometría de la sección transversal.
- Con valores de RMR menores a 35-40, la excavación se realiza con contrabóveda, normalmente empleando varias galerías de avance. El sistema constructivo recomendado varía: excavación convencional, fresado, escarificación o escudo. En principio, el cimiento del firme estaría constituido por losas estructurales. Sin embargo, si la cota de la contrabóveda está más de 100 cm por debajo de la explanada, el necesario relleno sería el apoyo del firme. Dicho relleno podría proceder de la propia excavación (si tiene una calidad suficiente) o estar formado por un hormigón de baja resistencia.

Las posibilidades de formación de las explanadas de las distintas categorías se recogen en la figura 1, dependiendo de la clasificación de la roca y de la profundidad de la contrabóveda; su selección dependerá en última instancia de las características de los materiales disponibles. El espesor del relleno será el necesario para que se pueda apoyar el firme, teniendo en cuenta las dimensiones del túnel y el gálibo requerido.

(1) Es importante recordar que en túneles de carretera la excavación con tuneladora sólo es viable, en general, con longitudes de túnel mayores de 2.000 m.

		RMR ≤ 40 (2)			
		RMR >40	LOSA HORIZONTAL	CONTRABOVEDA < 100cm	CONTRABOVEDA > 100cm
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	 Relleno con suelo tolerable 0
	E2	No es aplicable	No es aplicable	No es aplicable	 Relleno con suelo adecuado 1
	E3	(1)	 (1)	(1)	 Relleno con suelo adecuado 1
		Losa	Roca	Losa	Relleno con suelo tolerable 0

FIGURA 1. FORMACIÓN DE LA EXPLANADA

NOTAS:

- (1) Si existe una losa de cierre, ésta constituye directamente la explanada
- (2) Si el relleno es de suelo adecuado se puede formar directamente una explanada E1
Si el relleno es de suelo seleccionado se puede formar directamente una explanada E2
- (3) Este espesor se reduce a 25 cm si el relleno se lleva a cabo con suelo seleccionado

Suelo tolerable	Suelo estabilizado in situ
Suelo adecuado	Suelo estabilizado in situ
Suelo seleccionado	Suelo estabilizado in situ
Suelo seleccionado con CBR ≥ 20	Hormigón de baja resistencia (resistencia a compresión simple no superior a 12,5 MPa)

Para una correcta aplicación de la figura 1 se deberá tener en cuenta que todos los espesores que se indican son los mínimos especificados para cualquier punto de la sección transversal de la explanada, que dicha figura se estructura según la profundidad de la contrabóveda y que los materiales empleados han de cumplir las prescripciones contenidas, según corresponda, en los artículos 330 o 512 del PG-3.

4. Constitución del cimiento del firme

En rocas regulares y buenas (RMR > 40) el material tiene una capacidad de soporte sobrada para ser el

apoyo del firme. En estos casos las mayores dificultades residen en lograr un acabado suficientemente regular y que no queden piedras sueltas. Si se logra al menos lo segundo, puede formarse la explanada de cuatro maneras diferentes:

- En primer lugar, la superficie de apoyo puede ser muy adecuada para recibir una capa granular que sirva de regularización y de subbase del firme, que podría ser en este caso de cualquier tipo.
- La segunda opción es rellenar las irregularidades con un hormigón de baja resistencia (no superior a 12,5 MPa de resistencia a compresión simple). Esta tarea lleva un componente impor-

tante de mano de obra, frente a la opción anterior que es más fácilmente mecanizable.

- En tercer lugar, es posible rellenar todo el fondo de excavación con suelocemento, hasta lograr un espesor de mínimo del orden de 25 cm sobre suelos con menos del 35 % de finos y CBR superior a 5, o de 50 cm sobre suelos de peor calidad.
- Finalmente, puede optarse por disponer una solera de hormigón que cierre la sección del túnel. De esta manera la solera constituye un apoyo de excelente calidad para el firme.

En caso de excavar un túnel en suelos que no tengan empuje ni hinchamientos, hay que formar la explanada de la misma manera que se haría en un fondo de desmonte realizado en un suelo de esas mismas características. Cuando se trata de túneles excavados en materiales que producen empujes excesivos tras las construcción, como es el caso de los suelos expansivos, de las rocas deformables y con grandes empujes ("*squeezing rock*", en inglés), de las anhidritas y de otros materiales de comportamiento similar, lo más adecuado es establecer una sección de túnel con curvatura en todas sus partes, disponiendo una contrabóveda. Es posible así resistir las presiones transmitidas por el terreno con una estructura de hormigón en masa o, como mucho, ligeramente armado, con una forma que se aproxime al antifunicular de las cargas.

La anchura de la sección utilizada determina el relleno de la parte inferior, hasta que la cuerda del arco tenga la longitud deseada (el espacio entre el arco y la cuerda es importante). Como quiera que estas secciones se dan en terrenos de mala calidad, la solución más adecuada para este relleno no es ejecutarlo con el material excavado, salvo en casos excepcionales. Contando con que en este espacio deben disponerse los sistemas de drenaje que sean oportunos y algunos conductos auxiliares para instalaciones u otras infraestructuras, ya sean secundarias o de comunicaciones, una buena solución es rellenar con hormigón de baja resistencia, lo que proporciona un apoyo estable, de alta rigidez y de relativamente fácil regularización superficial. Además, este hormigón proporciona un margen adicional de seguridad, ya que colabora algo a la resistencia a eventuales cargas

del terreno. En consecuencia, lo más adecuado en estos casos es contar con un cimiento de excelente calidad, sobre el que podrá disponerse cualquier tipo de firme.

Las tuneladoras, conocidas con los nombres de topas, escudos o, más comúnmente, como máquinas tuneladoras integrales (TBM en inglés, "*tunnel boring machine*"), permiten la ejecución del túnel en un proceso continuo a sección completa, y con un proceso limpio y seguro, con rendimientos muy elevados (con una media superior a los 500 m al mes). Sin embargo, su empleo está limitado por diversas causas:

- Un coste muy elevado.
- Plazos de fabricación (en caso de ser una tuneladora nueva) o de rehabilitación (si se trata de una máquina que ya ha ejecutado otro túnel) importantes: entre 7 y 15 meses; a este plazo hay que añadir un tiempo de montaje de dos a tres meses
- Un espacio dedicado a instalaciones de más de 100 m de longitud, y alrededor de dos decenas de metros de anchura.

A la vista de estas circunstancias, es evidente que el empleo de tuneladoras compensa únicamente en túneles muy largos (más de 2 km de longitud, salvo excepciones).

Con estos equipos, la forma de la sección es circular. Dada la situación de la cuerda de longitud necesaria para la calzada, el espacio entre el firme y la contrabóveda o parte inferior del túnel es aún mayor que el existente en túneles con contrabóveda. Proceder simplemente al relleno de este volumen sería desaprovechar un espacio que resulta muy caro de excavar. Por ello, en la parte inferior de la sección se suele disponer una vía para el acceso exclusivo de personal de asistencia y emergencia. La estructura que está entre este espacio y la calzada principal, realizada in situ o prefabricada, debe tener un canto limitado, a fin de poder lograr el máximo gálibo en la máxima anchura posible; esto obliga a valorar la sobrecarga que supone el firme: lo ideal sería que dicha estructura tuviese la terminación adecuada para poder circular directamente sobre ella, lo que en teoría es factible, pero no tanto en la práctica.

5. Consideraciones sobre la elección del tipo de pavimento

Como se ha indicado, en los túneles es posible en principio el empleo tanto de pavimentos de hormigón como de pavimentos asfálticos. A veces se recomienda especialmente el pavimento de hormigón por su mayor durabilidad teórica y valorando la dificultad de cualquier tarea de conservación dentro de un túnel. Pero las causas de los deterioros que aparecen prematuramente dependen no tanto de la naturaleza del pavimento como del proceso de ejecución: impericia del constructor, desconocimiento del director de las obras, o incluso porque la calidad de los materiales o el espesor de las capas no son los previstos; en otras ocasiones lo que ocurre simplemente es que el crecimiento de la intensidad del tráfico pesado ha sido superior al que era razonable considerar en las fases de planeamiento y de proyecto.

Entre los factores que deben ser considerados a la hora de elegir el tipo de pavimento de un túnel están el terreno en el que se excava, el entorno, la longitud del túnel, la existencia o no de desvíos alternativos, la posibilidad de interrupción de la circulación, la escasez de espacio disponible en la sección (alternativamente, el coste de disponer de espacio adicional), el tipo de pavimento del resto de la vía y la *comprensión* de la sección por parte del conductor. Debe tenerse en cuenta que:

- no son factores independientes, de manera que cada uno de ellos influye en los demás;
- todos los factores citados son relativos, siendo posible encontrar ejemplos y contraejemplos para lo que se quiera; en cualquier caso, la existencia de un ejemplo nunca debe producir automáticamente la inferencia de una regla.

En cuanto a la longitud, es importante distinguir los túneles que permiten razonablemente la adopción de un tipo de pavimento diferente del existente en el resto de la vía (y no sólo una sección estructural distinta con un pavimento del mismo tipo). Un criterio habitual es permitir distintas secciones estructurales con un mismo pavimento a partir de longitudes de 200 m, mientras que para un tipo de pavimento diferente la longitud mínima habitual es de 3 km: esta longitud es la total dentro de una

misma obra, por lo que podría alcanzarse sumando las longitudes de varios túneles en el tramo. En operaciones de construcción de un eje viario completo podría ser posible coordinar varias obras para lograr un fin como el de construir tramos cortos en cada obra, pero esto no siempre ocurre en la práctica, debido a problemas logísticos y de organización económica de las obras.

La posible existencia de desvíos alternativos que no supongan un excesivo aumento del tiempo de viaje puede influir en la elección del tipo de pavimento, pues si es de hormigón puede resultar complejo (aunque siempre posible) realizar reparaciones manteniendo la circulación por los carriles adyacentes. En túneles con calzadas separadas (tubos dobles o triples) o en entornos urbanos los desvíos suelen ser sencillos, y en estos últimos es posible cortar la circulación en períodos de demanda relativamente baja durante varias horas. En túneles de montaña en tramos convencionales de dos carriles y doble sentido de circulación es difícil realizar cortes que no sean excepcionales, y difícilmente durante más de 12 horas.

En el túnel se produce simultáneamente una relativa escasez de espacio y otra de gálibo, cerca de los hastiales. Las secciones de dos carriles en túneles excavados en mina suelen tener unos 80 m² libres, pero las estructuras soterradas pueden tener espacios menores (60 a 70 m²), y los gálibos libres (medidos bien en borde de carril o, deseablemente, en borde de arcén) varían entre algo más de 4 m en los túneles urbanos en los que no se permite la circulación de camiones grandes, y los 5 o 5,5 m de los túneles más espaciosos. Por otro lado, hay que considerar que tanto el espacio como el gálibo inicialmente disponibles para la construcción del firme (los ventiladores, conductos de ventilación, luminarias, etc., se pueden y se suelen instalar después) pueden ser considerablemente mayores cuando se llevan a cabo las tareas de conservación y de rehabilitación, con todas las instalaciones ya en su lugar.

El tipo de pavimento del resto del tramo influye en la elección del pavimento de los túneles situados en él. Puede ser aconsejable, pero no imprescindible, que la capa de rodadura en el túnel sea similar a la del resto del tramo. Por otro lado, en ningún caso es recomendable cambiar el pavimento para longitudes de túneles relativamente

cortas, debido a que eso implicaría costos adicionales injustificados e iría probablemente en detrimento de la calidad final. En un itinerario de montaña con numerosos túneles y estructuras, lo que debe pesar son los túneles. En casos en los que un túnel tiene un peso relativamente bajo en el conjunto de la obra, el pavimento del túnel debe ser del mismo tipo que en el resto, para facilitar no ya la construcción, sino también la conservación y las rehabilitaciones.

El entorno en el que se encuentra el túnel puede ser montañoso, rural, metropolitano o urbano: influye en el trazado, en los itinerarios alternativos y en las posibilidades de corte. Aparte de lo ya dicho, es posible que en entornos montañosos la inclinación de la rasante en el túnel sea elevada, y con ello se penalizarían los pavimentos de hormigón, en los que los empujes longitudinales podrían ocasionar incluso el pandeo o el cabalgamiento de las losas. Los radios en túneles nuevos suelen ser relativamente generosos, pero también podría aplicarse un razonamiento similar al indicado si fueran muy reducidos: las pavimentadoras de encofrados deslizantes tienen radios de giro relativamente amplios.

Para su empleo en los túneles las capas de mezcla asfáltica tendrían en su contra, al menos en teoría, un apreciable poder calorífico. En ellas, según diversos estudios, el punto de ignición, que marca el inicio de la combustión, se sitúa entre 425 y 530 °C, pero las llamas que podrían producirse serían sólo superficiales y no se propagarían. Mientras el potencial calorífico de un coche de tipo medio, en una combustión completa, sería del orden de 18000 MJ, el de una superficie equivalente (8 m²) de firme con un espesor total de 15 cm de mezclas bituminosas sería de 6400 MJ; es cierto que esto supondría un incremento notable de la carga de fuego, pero sólo en la medida en que fuese posible que las mezclas bituminosas ardieran totalmente en todo su espesor, lo cual no ha sucedido en ninguno de los accidentes que se han producido en los años pasados y que son el origen directo de las preocupaciones actuales sobre la seguridad en los túneles (realmente, se ha comprobado que la ignición no afecta más que superficialmente a la capa de rodadura). Finalmente, teniendo en cuenta la pequeña proporción de betún en las mezclas, la cantidad de humo que se puede llegar a formar

debido a la ignición de éstas es pequeña en comparación con el que se produce al arder los vehículos y sus combustibles. Como muestra de que el poder calorífico de las mezclas bituminosas no es un argumento concluyente para no ser utilizadas en los pavimentos de los túneles, debe destacarse el que la Directiva 2004/54/CE no incluye ninguna especificación sobre la naturaleza del firme, ni tan siquiera criterios de resistencia ante el fuego de los materiales empleados en él.

En cuanto a la capa de rodadura, hay que tener en cuenta que en Europa se ha adoptado con generalidad el criterio de prohibir en los túneles las mezclas asfálticas drenantes, por su capacidad de permitir que los combustibles o líquidos inflamables vertidos se desplacen por su interior, lo que facilitaría la propagación del fuego en caso de incendio; por las mismas razones, en España se ha considerado que la prohibición debía extenderse a las mezclas tipo M (microaglomerados con una acusada discontinuidad granulométrica), mientras que con las tipo F (microaglomerados con una discontinuidad granulométrica menos marcada que en las mezclas M) se consiguen unas buenas características funcionales, pero sin un incremento de los riesgos en el caso de un incidente.

Como ya se ha indicado, la gran ventaja conceptual de los pavimentos de hormigón, que resultaría especialmente valiosa en túneles, es su gran durabilidad con unas reducidas necesidades de conservación, incluso a largo plazo, si ha sido correctamente ejecutado. Con los pavimentos de hormigón se podrían evitar actuaciones que siempre resultan más complejas en el interior de túneles largos y para las que se requieren medidas complementarias en la prestación del servicio; además, no se plantearían los problemas derivados de futuras rehabilitaciones, como la disminución de los gálbos debido a los recrecimientos. Pero esos argumentos a favor de los pavimentos de hormigón por razones de conservación, que serían en buena medida también aplicables en los tramos al aire libre, no tienen nada que ver con eventuales argumentos referidos a la seguridad en la explotación, que es lo que debe valorarse por encima de todo.

Además de las posibles complicaciones constructivas y de su influencia en los plazos de ejecución, un problema del pavimento de hormigón es

el de ofrecer una cierta dificultad para conseguir una regularidad superficial suficientemente buena, teniendo en cuenta que muchas veces se parte de una regularidad inevitablemente mediocre (si el pavimento se apoya en una losa de hormigón in situ). No se olvide que la regularidad superficial influye no sólo en la comodidad de la circulación, sino también en su seguridad. Finalmente, con análogos espesores, parece que es algo más fácil conseguir una buena regularidad superficial con mezclas asfálticas, pues éstas se disponen en varias capas y no en una sola.

Dejando de lado la viabilidad de la ejecución de un pavimento de hormigón, así como las supuestas ventajas que podría comportar desde el punto de vista de la conservación a medio y a largo plazo, es necesario valorar también el comportamiento de este material frente al fuego, aunque su poder calorífico sea nulo. Con las altas temperaturas que se producen en un incendio existe un riesgo de lajeo ("*spalling*", en inglés), es decir, de estallido del hormigón cercano a la superficie libre con posible proyección de partículas. Este fenómeno preocupa mucho en relación con los revestimientos, pero debería preocupar también en relación con el pavimento, pues además del peligro para los usuarios y para los equipos de socorro, el pavimento quedaría inutilizado y, al contrario que con uno asfáltico, su reparación exigiría tener cerrado el túnel un tiempo elevado, algo que puede ser incompatible con la normal prestación del servicio si no hay vías alternativas.

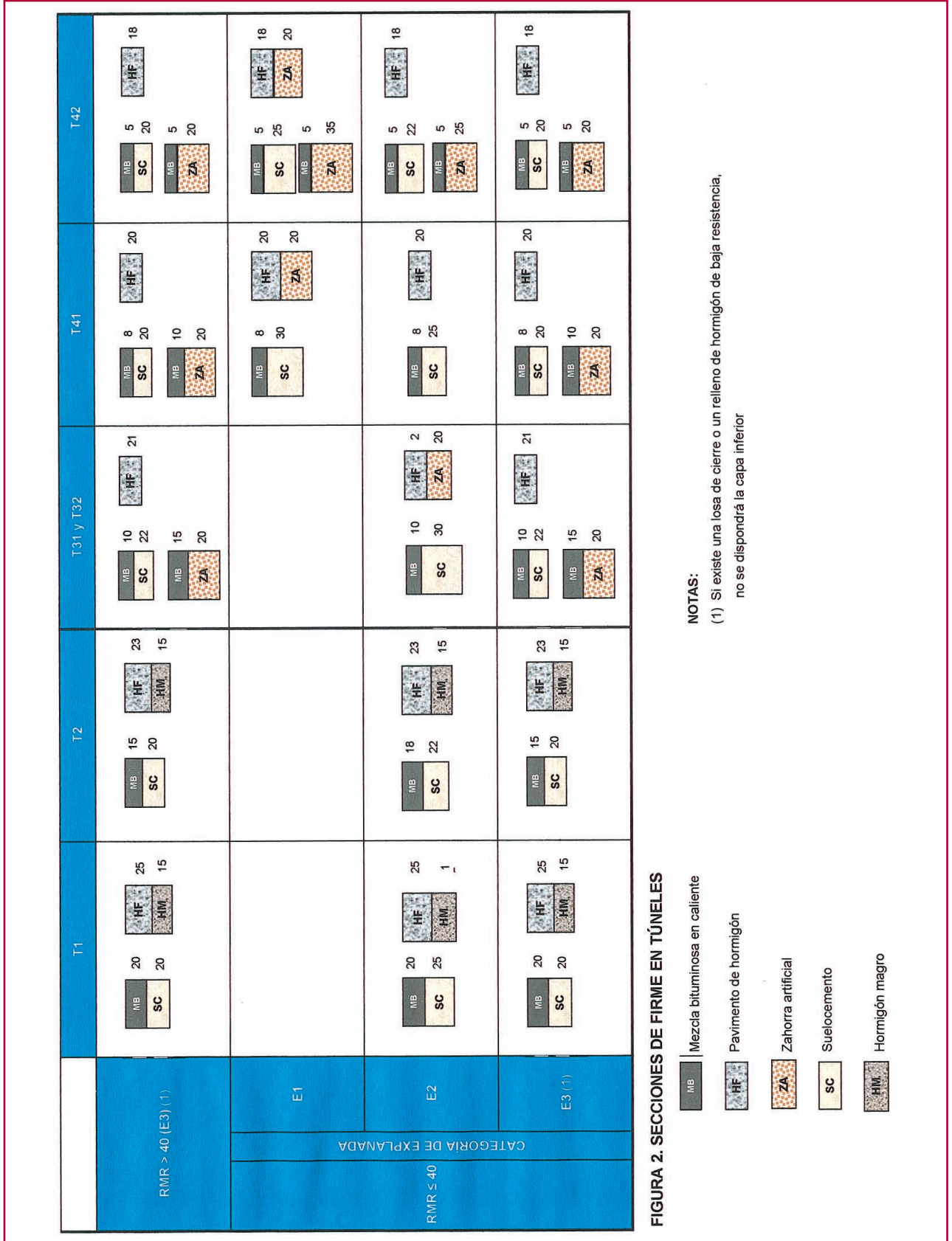
Otro aspecto que debe ser analizado en relación con la pavimentación de los túneles es el del contraste de las marcas viales. Con elevadas intensidades, e independientemente de la naturaleza del pavimento, en la separación entre carriles de túneles relativamente largos son necesarias pinturas con un alto contenido de microesferas de vidrio que garanticen una elevada reflectancia, consiguiéndose así un buen contraste con cualquier superficie (no debe olvidarse que en esos túneles hay una iluminación permanente y es obligatorio circular con las luces encendidas). No hay que olvidar tampoco que a largo plazo cualquier superficie utilizada para la circulación de vehículos tiende a oscurecer por los humos y por el desgaste de los neumáticos y que, en cualquier caso, lo que acaba predominando es el color de los áridos empleados.

En este sentido, la elección entre pavimento asfáltico y de hormigón resultaría indiferente.

La superficie de hormigón resalta más en principio los ocasionales obstáculos y permite a los usuarios visualizar mejor la anchura de carril, aun con poca luz, lo cual incrementa la seguridad, y permite menores consumos. Sin embargo, para disminuir la monotonía de la conducción y la claustrofobia relativa en un túnel largo será necesaria una mayor dotación de pintura en las marcas viales, con una conservación más frecuente, así como disponer de una intensa diferenciación cromática con los hastiales y la bóveda. En el caso de los pavimentos asfálticos ocurre lo contrario, por cuanto existe en principio un mayor contraste entre las marcas viales y la mezcla asfáltica; sin embargo, es necesario dotar al túnel de un buen sistema de iluminación que incremente la seguridad del usuario.

En cualquier caso, hay que ser muy exigentes tanto con la resistencia al deslizamiento como con la regularidad superficial: deben ser acordes con las velocidades de circulación previstas. Debe quedar garantizada siempre una elevada resistencia al deslizamiento, aunque se sobrepasen los límites de velocidad establecidos: incluso a los infractores hay que ofrecerles una seguridad suficiente. Por otro lado, aunque dentro de un túnel no llueva, no se puede ser más tolerante en los tramos subterráneos que en los situados en el exterior, entre otras razones porque, debido precisamente a la total ausencia de lluvia, se acumulan en la calzada partículas sólidas (procedentes de la combustión, de los vertidos, del desgaste de los neumáticos) que tienen una cierta influencia negativa en la resistencia al deslizamiento.

El pavimento debe tener asimismo una elevada microtextura, que ha de permanecer con valores prácticamente invariables a lo largo del tiempo, una suficiente macrotextura (la propia del tipo de superficie adoptado) y una megatextura nula, que sólo sería el reflejo de una deficiente puesta en obra y que sería de todo punto inaceptable. Para intentar conseguir una buena regularidad superficial, el fresado no es sino la última opción; si bien es cierto que se pueden reducir así sustancialmente las irregularidades, se pueden introducir respuestas extrañas en el pavimento desde el punto de vista de la sonoridad y, lo que es más grave, desde el punto de vista de la resistencia al deslizamiento;



aunque actualmente una buena alternativa son los microfresados, el resultado puede ser dudoso desde los puntos de vista señalados.

6. Determinación de espesores y catálogo de secciones estructurales de firme

Una vez definidos los factores de diseño, el catálogo de secciones estructurales de firmes es la forma más práctica y ventajosa de determinar el espesor de firme que se necesita en cada caso, de la misma forma que se hace en la normativa general de firmes de carreteras (Norma 6.1 IC del Ministerio de Fomento). Como en ésta, la elección entre las diferentes opciones debe basarse en cada caso en aspectos tales como los costes relativos de las posibles soluciones, las condiciones de puesta en obra y las estrategias previstas de conservación. De manera análoga a como se hace en la Norma 6.1 IC, la figura 2 recoge las secciones de firme según la categoría de tráfico pesado y la categoría de la explanada, si bien se han excluido las categorías de tráfico pesado T00 y T0, que requerirían un análisis especial que excede del objetivo perseguido en este artículo.

7. Algunas recomendaciones para la construcción de los firmes en los túneles

Uno de los factores que más contribuye a la reducción de la vida útil del firme en los túneles es la presencia de agua en cualquiera de las capas que forman aquél, lo que se puede deber fundamentalmente a fallos en la impermeabilización o en el sistema de drenaje. Como ya se ha señalado, el terreno tiene una importancia decisiva en el procedimiento constructivo y en el tipo de revestimiento: ambos elementos influyen asimismo al elegir el tipo de impermeabilización.

Los túneles pueden estar situados en zonas de aguas subterráneas, en zonas de saturación o en la franja capilar. Las técnicas de impermeabilización deben adaptarse a estas distintas situaciones.

En algunos túneles se producen importantes infiltraciones procedentes de la parte inferior de la sección, y pueden afectar a todos los materiales que constituyen el firme y más aún a la explanada.

Si esta infiltración es localizada, la mejor solución puede ser disponer de una sobreexcavación que se rellena con material drenante, conduciendo a continuación por un colector el agua captada. Hay que disponer de una capa impermeable entre el relleno drenante y el firme, formando la explanada por encima de esta capa. Si, por el contrario, la infiltración es muy generalizada, son posibles dos soluciones. Siempre que el presupuesto lo permita es aconsejable disponer una impermeabilización completa de la sección, con el fin de aislar las corrientes de agua; esto puede lograrse mediante una combinación de un geotextil, (normalmente con una lámina impermeable y otra filtrante), inyecciones en el terreno e inyecciones entre el conjunto terreno-sostenimiento-revestimiento. Cuando la impermeabilización supone un coste demasiado elevado para la obra, debe construirse una capa drenante con capacidad suficiente para conducir el agua hasta un dren lateral.

Si no se impermeabiliza el túnel en su totalidad el agua infiltrada en clave y hombros puede gotear (o, lo que resultaría ya inaceptable, chorrear) sobre la calzada. En estos casos es muy recomendable colocar geotextiles que conduzcan el agua al nivel de la calzada, y sumideros para llevar el agua fuera de la sección de firme tan pronto como sea posible. Es imprescindible examinar de manera continuada y en detalle el estado de un pavimento que pueda presentar humedades durante una buena parte del año, en primer lugar por la incidencia de este hecho en la seguridad vial.

Si el firme se apoya en roca, es imprescindible evitar la retención del agua en la explanada mediante un sistema de drenaje y de relleno adecuados, para lo cual hay que disponer un hormigón de baja resistencia o un suelo estabilizado in situ con cemento, con espesores entre 20 y 30 cm. En casos especiales en los que el agua aflora bajo la solera se recomienda recogerla mediante una base granular drenante situada bajo el firme, tal como se ha indicado.

Si el soporte del firme es una losa estructural, se deberían sellar sus juntas, a fin de minimizar los riesgos de su reflexión en la superficie del pavimento. Asimismo, en el caso de pavimentos asfálticos, se debe colocar una capa intermedia con el fin de evitar tanto la transmisión de grietas y juntas como

para mejorar la regularidad superficial. Incluso, aunque no sea una práctica habitual en España, es también recomendable disponer dicha capa de mezcla asfáltica bajo un pavimento de hormigón, de entrada para asegurar una plataforma suficientemente regular para su colocación.

8. Conclusiones y recomendaciones

- Este artículo se ha redactado debido a la ausencia de una normalización específica para el diseño de los firmes en túneles, con la intención de aportar criterios básicos y reglas prácticas.
- Los firmes en los túneles suelen tener espesores menores que en los tramos exteriores, debido a la mejor calidad de los materiales de apoyo, pues se trata en muchos casos de roca sana o de hormigón.
- Se debe tener siempre presente al elegir el tipo de pavimento que lo más importante no es tanto su naturaleza como la calidad de su ejecución, dadas las dificultades de los cortes de tráfico y la escasez de espacio para llevar a ca-

bo las actuaciones de reparación o de conservación preventiva.

- En los túneles el pavimento puede ser asfáltico o de hormigón, pero su acabado debe proporcionar una diferenciación cromática de la calzada respecto a los hastiales y la bóveda, de manera que exista un efecto de guía sobre el conductor.
- Para la definición de la sección estructural del firme debe evaluarse no solamente el coste de construcción, sino también tener en cuenta criterios técnicos: características funcionales y estructurales, proceso constructivo, necesidades de conservación; además, en el análisis económico, deben valorarse los costes de conservación y los inducidos a los usuarios por las labores de conservación.
- Un criterio fundamental al elegir el pavimento en un túnel es la solución adoptada en el resto de la vía, y en especial la posible alternancia de túneles con estructuras y con tramos sobre obras de tierra. La ingeniería resulta más eficiente si se consideran todos los factores y a cada uno de ellos se le asigna el peso adecuado. ♦

Referencias:

- (1) Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR), *Classification of Tunnels. Existing Guidelines and Experiences*, 1999.
- (2) CANCELA, M. D., *Manual sobre pavimentos en túneles*, Ponencia presentada en el IV Congreso Nacional de Túneles, Asociación Técnica de Carreteras, Andorra, octubre de 2005.
- (3) Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, *Normativa y recomendaciones sobre diseño de firmes y pavimentos para túneles en Europa: fases 1 y 2* (Informe parcial, tomo único, clave CEDEX: 31-403-3-078), 39 pág. más anejos, Madrid, julio de 2004.
- (4) GALVIS, R., *Guía para el diseño de pavimentos en túneles*, XVII Curso Internacional de Carreteras (Trabajo final de Especialización), Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2003
- (5) GALVIS, R., DEL VAL, M. A. Y ROMANA, M. G., *Criterios para el diseño de pavimentos en túneles*, Comunicación presentada en el XIII Congre-

- so Iberoamericano del Asfalto, San José (Costa Rica), noviembre de 2005.
- (6) Geoconsult, 1996, *Manual de túneles interurbanos de carretera*, Madrid, 1996.
- (7) KRAEMER, C. y otros, *Ingeniería de Carreteras* (Tomo II), 555 pág., McGraw-Hill, Madrid, 2004.
- (8) Ministerio de Fomento, *Secciones de firme (Norma 6.1 IC)*, 41 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid, diciembre de 2003.
- (9) Ministerio de Fomento, *Firmes y pavimentos* (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3), 116 pág., Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, Madrid, abril de 2004.
- (10) Ministerio de Fomento, *Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado*, Boletín Oficial del Estado nº 126, pp. 19970-19985, Madrid, 27 de mayo de 2006.
- (11) NOUMOWÉ, A., *Revêtement de chaussée en enrobé hydrocarboné ou en béton en si-*

- tuation d'incendie*, Université de Cergy-Pontoise, EPU (Editions Publibook Université), París, 2003.
- (12) ROCCI, S. y DEL VAL, M. A., *El proyecto de la nueva M-30*, pp. 27-46, Revista de Obras Públicas, nº 3454, Madrid, abril de 2005.
- (13) ROMANA, M. G., *Túneles de carretera. Planificación, trazado y túneles urbanos*, Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1997.
- (14) ROMANA, M. G., 2003, *Pavimentos en túneles: factores a considerar para su tipo y diseño*. Ponencia, III Congreso Venezolano del Asfalto - III CONVEAS, Barquisimeto, Estado Lara, Venezuela
- (15) ROMANA RUIZ, M., *Geología de túneles*, España.
- (16) Unión Europea, *Directiva 2004/54/CE del Parlamento y Consejo europeos, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras*, Diario Oficial de la Unión Europea, Bruselas, 2004.