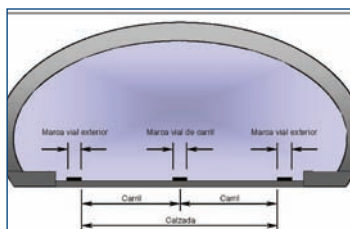


Diseño de la sección transversal de túneles de carretera bidireccionales



Cross section design for bi-directional road tunnels

Comité de túneles de carretera

Grupo de trabajo wg4: Sistemas de comunicaciones y geometría

Resumen

El trabajo en este documento se inició en septiembre de 2001 como continuación del desarrollado por el GT4 entre los años 1998 y 2001, que concluyó con el informe titulado CROSS SECTION GEOMETRY IN UNI-DIRECTIONAL ROAD TUNNELS "GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE TÚNELES DE CARRETERA UNIDIRECCIONALES", publicado por la AIPCR en marzo de 2001 [1]. El presente informe comparte la terminología y los planteamientos generales del documento anterior, si bien los adapta y extiende a los túneles de un solo tubo y doble sentido de circulación. En el desarrollo del informe se han examinado normativas y recomendaciones nacionales sobre la materia, así como los diversos documentos de la AIPCR y otros organismos internacionales que han aparecido recientemente en respuesta a los trágicos accidentes acontecidos en los túneles desde 1999.

En la redacción del documento en inglés intervino Joan Almirall Bellido, junto con Ben Rigter, Harald Buvik y Torsten Bergh entre otros. Tony Rock realizó una detallada labor de corrección de los textos y la traducción al español fue coordinada y supervisada por Rafael López Guarga.

Las conclusiones y recomendaciones del informe están basadas en la práctica común en diversos países, así como en la opinión de los expertos del GT4 del comité de la AIPCR. Sin embargo, pueden existir otras soluciones a los problemas tratados aquí, y las normativas nacionales pueden diferir en ciertos aspectos de los planteamientos realizados.

PALABRAS CLAVES: diseño, sección transversal y túnel.

Abstract

This document has been prepared under the supervision and with the approval of the PIARC Road Tunnels Committee, by Working Group nr. 4 dealing with "Communications Systems and Geometry".

This document was started in September 2001 following the initiated work of GT4 between 1998 and 2001, which resulted in the report entitled CROSS SECTION GEOMETRY IN ROAD TUNNELS UNI-DIRECTIONAL "GEOMETRY OF THE CROSS SECTION OF ROAD TUNNELS SENSORS" published by PIARC in March 2001 [1]. This report shares the terminology and general approach of the previous document, although it is adapted and extended to a single tube tunnels and two-way traffic. In this report national standards and recommendations on this subject have been examined, as well as documents from PIARC and other international organizations recently appeared in response to the tragic accidents occurred in the tunnels since 1999.

Joan Almirall Bellido prepared the document in English, together with Ben Rigter, Harald Buvik and Torsten Bergh, among others. Tony Rock made a detailed correction of the texts and the translation into Spanish has been coordinated and supervised by Rafael López Guarga.

The conclusions and recommendations of the report are based on common practice in several countries as well as in the opinion of GT4 experts from the PIARC Committee. However, there may be different solutions to the problems discussed here, and local regulations may differ in certain respects from these approaches.

KEY WORDS: design, cross section, tunnel.

1. Introducción

1.1. Objeto del documento

Se pretende con el presente informe ofrecer una síntesis de la experiencia, así como de las recomendaciones y normativas internacionales, que ofrezca soluciones viables y proporcione criterios de diseño para la elección de secciones transversales de túneles de carretera bidireccionales.

En el informe se tratan también diferentes aspectos del diseño de túneles bidireccionales, tales como la capacidad y la intensidad de tráfico, la pendiente longitudinal y los radios de curvatura, considerados desde la perspectiva de la seguridad y de la eficiencia en la circulación en condiciones normales y excepcionales, y también desde la perspectiva de la explotación del túnel y de su mantenimiento.

1.2. Consideraciones sobre seguridad

El criterio principal para decidir la construcción de un túnel de un sólo tubo o de dos tubos, debiera ser el volumen de tráfico previsto y la seguridad. Se deben tomar asimismo en cuenta otros aspectos, tales como: el porcentaje de vehículos pesados, la longitud y la pendiente, etc. Cuando una previsión a largo plazo muestre que el tráfico diario (IMD) excederá de 10.000 vehículos por carril, debe proyectarse un doble túnel con tráfico unidireccional, para que entre en servicio al sobrepasarse dicha intensidad. También debe considerarse que un doble túnel unidireccional cuesta menos del doble que un túnel bidireccional, aún sin tener en cuenta los ahorros en salidas de emergencia.

Los criterios básicos de diseño de la sección transversal de túneles bidireccionales no son muy distintos de los que llevan a la determinación de secciones transversales en carreteras a cielo abierto para intensidades de circulación semejantes. Sin embargo,

existen diversos aspectos que diferencian las soluciones a adoptar en el túnel respecto a las de exterior.

Los túneles difieren, entre otros aspectos, de las carreteras a cielo abierto en:

- No existe actividad externa que distraiga la atención, pero hay riesgo de monotonía.
- Las condiciones de viento son moderadas.
- Condiciones de iluminación constantes en el día y en el año, con la excepción de las zonas de entrada.
- Dificultad en percibir las rampas y las pendientes.
- Dificultad en estimar las distancias a los otros vehículos.
- Acceso difícil para los servicios de seguridad y de emergencia.

Estas condiciones hacen que el diseño de ciertos elementos del túnel debe diferir de los usados en carreteras a cielo abierto. Existen dos criterios que son de aplicación en todos los túneles bidireccionales, y que deben usarse para determinar sus secciones transversales:

- Los criterios de **seguridad** frente a accidentes, en particular accidentes o incidentes que resulten en colisiones frontales, o deriven en incendio, por el agravamiento de las condiciones resultantes que representa el confinamiento de un túnel. En general, los túneles deben diseñarse para que los usuarios puedan actuar para preservar su seguridad por sí mismos en el caso de una emergencia.
- Los derivados del **coste** de construcción de la infraestructura, puesto que en el caso de un túnel el coste por metro puede ser varias veces superior a los órdenes de magnitud de la misma vía adyacente en el exterior. Adicionalmente, debe considerarse que el coste de construcción de un túnel aumenta mucho más rápidamente con el incremento de la sección transversal que en el exterior.

Estos dos grupos de criterios conducen a un desafío y pueden causar dificultades en el diseño de túneles de carretera. Normalmente, los criterios de seguridad tienden a aumentar la sección (arcenes amplios, aceras fácilmente transitables, facilidades para los disminuidos físicos, distancias de visibilidad largas, posibilidad de adelantar a un vehículo detenido en todo punto, etc.), mientras que los criterios económicos presionan para hacer secciones transversales más estrictas que las que se usarían a cielo abierto para intensidades de tráfico, o como mucho condiciones geométricas similares.

Existen, sin embargo, algunos principios básicos que se considera necesario mantener en túneles bidireccionales:

- El diseño de los túneles debe incorporar las condiciones geométricas de iluminación, señalización y balizamiento que mejor faciliten e incrementen las condiciones de seguridad en la conducción.
- El adelantamiento de un vehículo pesado detenido debe ser posible para otro vehículo pesado, sin interrumpir por completo el tráfico en el sentido contrario.
- Si existe un solo carril en uno o en los dos sentidos, los adelantamientos deben estar severamente prohibidos.
- Un estrechamiento de la sección transversal debe situarse antes del túnel o en la entrada, para cada sentido de circulación, no debiendo situarse nunca en el interior o a la salida.

No se trata en este documento de las medidas de seguridad a adoptar en la infraestructura del túnel (salidas de emergencia, galerías de evacuación, garajes, zonas de giro para vehículos), ni de las instalaciones necesarias en función del tipo y longitud del túnel, o de la intensidad media diaria de tráfico, ni consecuentemente, de sus sistemas de

ventilación, detección de incidentes, detección y extinción de incendios u otros similares. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el diseño de la sección transversal de un túnel todas estas consideraciones son críticas, puesto que pueden interactuar con sus dimensiones. En los apartados siguientes se enumeran las medidas a adoptar para que la sección transversal permita garantizar una circulación fluida y segura, debiendo considerar el proyectista cualquier variación del proyecto que sea realizada con otros fines, así como las distintas instalaciones necesarias para cada tipo determinado de túnel.

Tampoco se discuten en este documento las disposiciones de la señalización, la iluminación, los colores y las formas de las paredes, calzada, techo y del resto de los elementos del túnel, si bien todos ellos son aspectos importantes, cuyo diseño adecuado puede incrementar la seguridad en la circulación.

Como resumen de nuestro convencimiento, podemos decir que “los túneles son generalmente más seguros que las secciones parecidas a cielo abierto y pueden construirse con un alto nivel de seguridad a un coste razonable”.

1.3. Conceptos y elementos

Para facilitar la comunicación internacional y la comparación, es aconsejable un conjunto mínimo de términos, elegidos de modo que su significado sea intuitivamente obvio. En la Tabla 1 y en las figuras 1, 2 y 3 se proponen y definen dichos términos.

De acuerdo con la estructura de la publicación anterior del Grupo de Trabajo: “Cross Section Geometry in Uni-directional Road Tunnels AIPCR - 2001” [1], existen dos partes principales en la sección transversal:

1. Calzada, que es el área comprendida entre los bordes interiores de las marcas viales de arcén.
2. Exterior a la calzada, que comprende las zonas a ambos

Tabla 1^a: Terminología y Definiciones usadas en este informe en orden alfabético.

Término	Definición
Acera	Área para la circulación a pie del personal de mantenimiento y de los conductores detenidos por una emergencia o incidente .
Arcén	Zona comprendida entre los bordes internos de las marcas viales más exteriores y los bordillos o barreras de seguridad, si existen. Si no los hay, llega hasta el hastial del túnel.
Autopista	Nombre genérico en este documento para las vías de altas prestaciones con doble calzada, donde la circulación de vehículos muy lentos, peatones y ciclistas está prohibida.
Barrera flexible	Sistema de contención de vehículos de acero soportado en postes usado para evitar los choques de vehículos con el hastial del túnel.
Barrera rígida o de tipo New Jersey	Sistema de contención de vehículos de hormigón diseñado para guiar a los vehículos que colisionen con él, retornándolos a la dirección del tráfico.
Bordillo	Elemento constructivo que limita la acera en el lado calzada.
Bordillo montable	Bordillo bajo, que no es cruzado por el tráfico en circulación normal, pero que sí puede serlo en caso de detención por una avería o incidente.
Calzada	Parte de la vía destinada a la circulación de los vehículos, comprendida entre los bordes interiores de las marcas viales de arcén
Capacidad	Intensidad máxima sostenible de vehículos que pueden atravesar una sección o una zona uniforme de una vía.
Carril lento o vía lenta	Carril adicional de circulación situado a la derecha de la calzada, en países de circulación por la derecha, y a la izquierda en los que se circula por la izquierda, que permite a los vehículos que circulan con menor velocidad desviarse de los carriles principales, facilitando el adelantamiento por los vehículos más rápidos.
Carril de circulación	Área de la carretera para la circulación de una fila de vehículos. Comprende desde el borde interior de la marca vial del arcén al centro de la marca vial central entre carriles
Carril de emergencia	Banda de arcén para detener el vehículo en una emergencia.
Carril peatonal	Parte de la acera utilizable por los peatones con seguridad.
Carriles adicionales	Cualquiera de los carriles adicionales al primero, en la misma dirección del túnel, cuando todos ellos son usados por vehículos de todo tipo, proporcionando un incremento de la capacidad.
Despeje lateral	Franja comprendida entre la posición del conductor y la pared u otro obstáculo del túnel necesaria para que sea visible un objeto sobre la calzada con tiempo suficiente para reaccionar y detener el vehículo.
Distancia al objeto	Tamaño mínimo del arcén (puede incluirse la acera) para dar seguridad y confort.
Factor de hora punta C_{HP}	Factor que indica la variación del tráfico en la hora punta. Referido a un período de 15 minutos, se calcula dividiendo el flujo total en la hora por cuatro veces el número de vehículos en el cuarto de hora máximo en la hora.
Gálibo de construcción	Altura entre el pavimento y el techo, considerando el gálibo permanente, las holguras de construcción y repavimentación, y los márgenes para situar los equipamientos
Gálibo de la acera	Gálibo a mantener sobre las aceras.

Tabla 1b: Terminología y Definiciones usadas en este informe en orden alfabético.

Término	Definición
Gálibo geométrico	Contorno en el espacio del túnel dentro del cual no se permite obstáculo, obstrucción ni estructura alguna.
Gálibo mínimo	Altura de proyecto permitida a los vehículos pesados, más un margen necesario para hacer posibles los movimientos dinámicos.
Gálibo permanente (libre disponible) (Gálibo mínimo + Margen de seguridad)	Gálibo que debe mantenerse en todo momento, por ejemplo tras un refuerzo del pavimento, para que se permita el paso a los vehículos autorizados.
IMD	Intensidad Media Diaria. Tráfico total en un año, dividido por 365 días. Se expresa en vehículos por día
Marca vial	Marcaje en el pavimento para señalar y delimitar las zonas de la calzada.
Marca vial de carril	Marca indicadora de la separación entre carriles.
Margen de seguridad para los peatones	Zona en la acera entre el bordillo y el carril peatonal.
Nivel de Servicio	Medida cualitativa, descriptiva de las condiciones de circulación de una corriente de tráfico, considerando la velocidad, el tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, el confort, las interrupciones de tráfico y de seguridad.
Plataforma	Zona del túnel destinada al uso de los vehículos con seguridad. Comprende la calzada y los arcenes.
Túnel de carretera *	Estructura de carretera cubierta de longitud superior a cinco veces la anchura de la calzada.
Velocidad en régimen fluido VRF	Velocidad media espacial de los vehículos presentes en el tramo considerado, cuando la intensidad de tráfico es baja y no existen vehículos pesados.
Velocidad de proyecto	Velocidad teórica que permite definir las características geométricas mínimas de los elementos del trazado de una carretera. El límite de velocidad establecido y el proyectado puede ser, en ciertos países, diferente.
Velocidad de referencia	Límite de velocidad establecido.
Velocidad media espacial	Velocidad media de los vehículos presentes en un instante dado a lo largo de una cierta longitud de un carril o carretera.
Velocidad media temporal	Velocidad media de los vehículos que pasan, durante un cierto intervalo de tiempo, por un punto fijo de un carril o una carretera.
Zona de corrección	Parte del arcén, medida desde el borde exterior de la marca vial de arcén, usada para corregir la trayectoria en caso de cruzar accidentalmente la línea del arcén.
Zona exterior a la calzada	Área entre el borde interno de la marca vial más exterior y el hastial del túnel, incluyendo las marcas viales exteriores de los carriles, los arcenes, los carriles de emergencia, las aceras y las barreras de seguridad.
Zona pavimentada (Calzada + arcén + acera)	Zona con pavimento entre las paredes del túnel. Incluye la plataforma (calzada y arcenes), y las aceras, si las hay.

lados de la calzada, incluyendo las marcas viales de arcén, los arcenes, las bermas, las zonas de detención de emergencia, las aceras, los apartaderos y las barreras de seguridad.

Esta distinción se justifica debido a que existe un acuerdo muy amplio en cuanto al uso y las dimensiones de la calzada, mientras que las dimensiones y los requerimientos de los elementos externos a ella difieren en gran medida entre países.

2. Síntesis de las principales recomendaciones y normas internacionales sobre túneles bidireccionales

Tan solo algunos países tienen reglamentaciones sobre túneles bidireccionales de carretera. Este tipo de normas o de recomendaciones debe entenderse en su contexto, por lo que se relacionan país a país, dado que una comparación parámetro a parámetro podría ser inapropiada, e incluso dificultaría la comprensión de la normativa.

FRANCIA – Dossier pilote des tunnels. Geometrie. CETU 1990 [5]

- Capacidad:
 - En túneles bidireccionales urbanos: 2200 vl/h (Vehículos ligeros por hora), aunque se han detectado valores superiores a los 3000 vl/h;
 - En túneles bidireccionales de montaña: 2350 vl/h.
- Velocidad: se recomienda velocidad no superior a los 80 km/h.
- El adelantamiento está prohibido en túneles bidireccionales de 2 carriles.
- En general, no se permiten bifurcaciones ni incorporaciones en el

* En la norma española se define como: "estructura de longitud superior a 200 m que, independientemente de su modo de construcción, permite el paso de vehículos entre dos puntos de la carretera, estando cerrada en todo su perímetro".

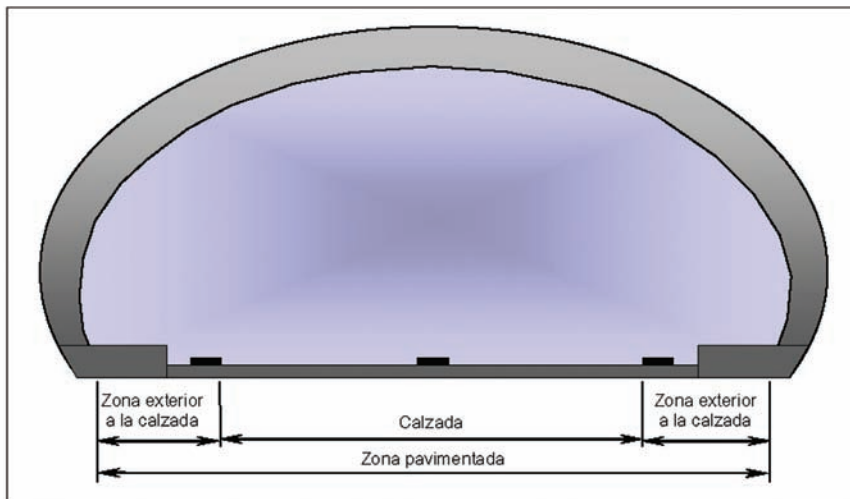


Figura 1: Configuración básica de la zona pavimentada.

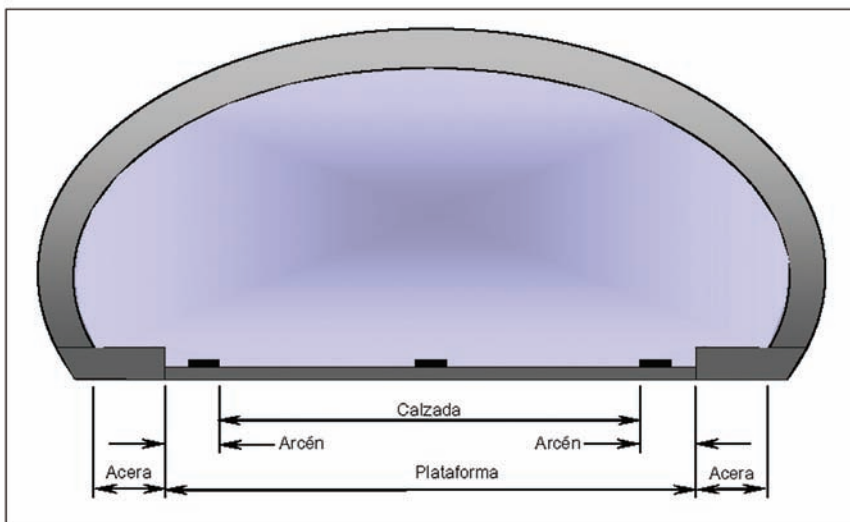


Figura 2: Configuración de la zona pavimentada y de la plataforma.

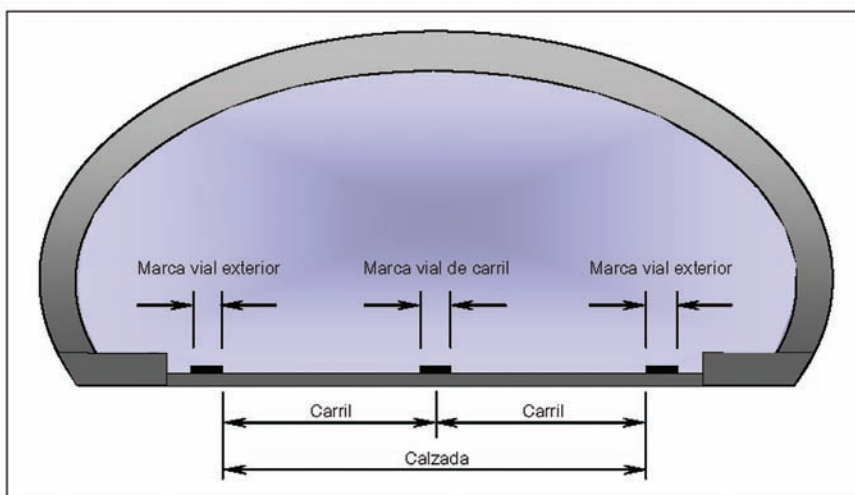


Figura 3: Definición de carriles y marcas viales.

interior de los túneles, excepto en casos imprescindibles en zona urbana, en cuyo caso se requiere un estudio especial.

- Se recomiendan pendientes no superiores al 2% si la longitud supera los 400 m.
- Se sugiere añadir una vía lenta si la velocidad de los vehículos pesados baja de 50 km/h. La anchura de este carril adicional debe de ser de 3,00 m.
- Se recomiendan aceras de ancho mínimo 60 cm.
- Anchuras de carril: mínimo en zona urbana 3,00 m, en general 3,50 m.
- Se prohíben los arcenes de anchos comprendidos entre 1,00 y 2,00 m. (tabla 2)
- Los principios para seleccionar la sección para un túnel bidireccional son:
 - Homogeneidad con las vías de acceso;
 - Satisfacer las necesidades del: tráfico (IMD, porcentaje de pesados, crecimiento hasta el año horizonte, etc.);
 - Mantener el nivel de servicio, teniendo en cuenta las necesidades derivadas del tipo de itinerario y los riesgos derivados de una avería o por la congestión;
 - Coste de la infraestructura;
 - Necesidades derivadas de las instalaciones del túnel;
 - El ancho mínimo debe de ser de 8,85 m, con el fin de permitir el cruce de camiones, a velocidad muy reducida, junto a otro vehículo pesado detenido por avería;
 - Las distancias de visibilidad requeridas deberán ser acordes con la tabla de este documento;
 - Se propone adoptar una banda central de seguridad (mediana central);
 - Si se desea instalar barreras de seguridad en mediana, su altura debe ser por lo menos de 45 cm;
 - Altura libre (gálibo): 4,50 m en carreteras principales y 4,30 m como mínimo.

NORUEGA – Norwegian Design Guide for Road Tunnels [2]

- Define diversos tipos de túnel (T5.5 a T9.5), con anchuras totales entre hastiales de entre 5,5 m a 9,5 m, en función de su categoría.
- Las categorías, denominadas A, B, C, D, E y F se definen en función del tráfico (IMD e intensidad horaria máxima IHmax) y de la longitud del túnel. (tabla 3)
- Si la longitud supera los 2,5 Km, la categoría del túnel puede subir un grado. (tabla 4)
- Carriles lentos de anchura 3,50 m (mínimo 3,0 m).
- Carriles: 3,50 m (mínimo 3,0 m).
- Altura libre (gálibo) en carriles y arcenes (mínimo 4,10 m).
- Establece distancias de visibilidad, acordes con la tabla de este documento.
- Inclinación máxima de la rasante en función de la IMD, longitud y existencia de vía lenta. (tabla 5)
- Si existe vía lenta, puede aumentarse un 1% la pendiente.
- Carril lento: si la rampa supera 1 km, o la inclinación supera el 6%, debe habilitarse un carril adicional a partir de la sección en la que la diferencia de velocidad entre vehículos ligeros y pesados supere los 15 km/hora, en cuyo caso debe mantenerse al menos durante 1km.

ESPAÑA – Norma 3.1 – IC Instrucción de Carreteras. Febrero 1996* [4]

- Sección transversal: debe diseñarse para alcanzar la capacidad en un horizonte de 20 años.
- En carreteras principales, al llegar al año horizonte se debe disponer de un cierto margen de capacidad.
- Se dispone banda central de mediana por motivos de seguridad.
- Dimensiones de la sección transversal: (tabla 6)

* Borrador disponible cuando la redacción. El texto definitivo se aprobó el 27 de diciembre de 1999.

Tabla 2. Normativa francesa.

Secciones tipo	Carriles	Arcenes	Acera
T10.2 Sección grande	2*3,50 m	2*1,00 m	2*0,60 m
T9.4 Sección media	2*3,50 m	2*0,60 m	2*0,60 m
T8.8 Sección mínima	2*3,50 m	2*0,30 m	2*0,60 m
Secciones sin marcas viales de arcén (*)			
T8.20	2*3,50 m	-	2*0,60 m
T7.20	2*3,00 m	-	2*0,60 m

(*) Para estas secciones se recomienda pintar las marcas viales junto a los bordillos.

Tabla 3. Normativa noruega.

Categoría de túnel	IMD Veh/día	Sección Tipo
A	<300	T5.5
B	<5000	T8.5
C	<7500	T9.5
D	<10000	T9.5
E	<15000	Doble túnel (2xT8.5)
F	>15000	Doble túnel (2xT9.5)

Tabla 4. Normativa noruega.

Secciones de túneles Bidireccionales	Carriles	Arcenes	Acera
T5.5 Categoría A en vías locales o secundarias	2*2,75 m	-	-
T8.5 Categoría B o C en vías principales	2*3,25 m	2*1,00 m	-
T9.5 Categoría C o D en vías principales	2*3,50 m	2*1,25 m	-
T11.5 Categoría B,C y D cuando son necesarios tres carriles o carril de emergencia	2*3,25 + 1*3,00 m	2*1,00 m	-
			-

Tabla 5. Normativa noruega.

Tabla de pendientes máximas				
Tipo de túnel	Bidireccional		Unidireccional	
IMD (Veh/día)	≤1.500 veh/d	>1.500 veh/d	≤15.000 veh/d	>15.000 veh/d
Pendiente máxima	8 %	7 %	7 %	6 %

Vías lentas:

- Deben evitarse las vías lentas en el interior de los túneles.
- Es necesario disponer una vía lenta cuando se da una de las siguientes características:
 - nivel de servicio peor que la capacidad en el año horizonte;
 - la velocidad de los vehículos pesados es menor de 40 km / h.

Inclinaciones de la rasante:

- Los túneles con longitud < 500 m deben tener una pendiente constante.
- Deben evitarse rampas superiores al 3%.
- Deben evitarse las vías lentas en los túneles, proyectando las rampas para que las velocidades de los vehículos pesados no bajen de 60 km / h.

REINO UNIDO – BD2 (DMRB 1.1) part III, and TD27/96 Cross sections and headrooms [3]

- Deben evitarse las intersecciones en túneles.
- Se acepta reducir la sección transversal en los túneles respecto a la de cielo abierto.
- Capacidad básica de 1800 veh/hora por carril, con un 5% de vehículos pesados, previendo ajustes en función de la variación (gradiente) y la presencia de otros porcentajes de vehículos pesados. (tabla 7)
- Efectúa los cálculos de capacidades según el HCM-1995 [14] *. (* La versión actual es la HCM-2000 [15])
- Propone velocidades de proyecto mínimas para túneles. (tabla 8)
- Propone utilizar coeficientes de rozamiento mayores en túnel que en el exterior.
- Permite el adelantamiento en túneles bidireccionales, en caso de buena visibilidad, pero lo desaconseja si L<400 m.

Tabla 6. Normativa española.

Túneles bidireccionales			
	Longitud ≤ 500 m	Longitud > 500 m	
		Vías principales	Otras vías
Ancho de carril	Como en el exterior	3,50	3,50
Arcenes	Como en el exterior	1,50	1,00
Banda central de separación	No	1,00	1,00
Aceras	0,75	0,75	0,75
Gálibo sobre carriles y arcenes	5,00	5,00	5,00
Gálibo sobre las aceras	2,00	2,00	2,00

Tabla 7. Normativa del Reino Unido.

Tabla de correcciones a la capacidad básica por carril (%)		
% Pesados	Gradiente (%)	
	< 2%	< 4%
5 %	-	-15%
10%	-5%	-20%
15%	-10%	-25%
20%	-15%	-30%

Tabla 8. Normativa del Reino Unido.

Velocidad de proyecto mínima (km/h)	Tipo de túnel	
	Falso túnel	Excavado
deseable	Como en el exterior	85
mínimo absoluto	Como en el exterior	70

- Establece distancias de parada acordes con las de la tabla de este documento.
- Pendientes no mayores del 6%.
- No aconseja carriles lentos.
- Altura libre (gálibo) sobre aceras: 2,30m.
- Altura libre en carriles y aceras (como la del exterior + 0,50 m).
- Aceras para peatones de 1,00 m de los que 0,6 m deben tener altura libre no restringida. A pesar de ello los peatones no se permiten en la práctica.
- Altura de aceras sobre la calzada: 0,075 m. Se sugieren bordillos montables.
- Ancho de carriles: 3,60 m (norma RD27 standard).
- Ancho de arcenes mayor o igual a 1,15 m (norma RD27 standard).

3. Velocidades de circulación e intensidades de tráfico

3.1. Características generales del tráfico

- La circulación en un túnel bidireccional es similar, pero no idéntica, a la de una sección equivalente a cielo abierto. Parecen detectarse capacidades algo superiores en el túnel, que según diversos estudios [16] se derivan del mayor nivel de atención de los conductores y de una menor presencia de maniobras que produzcan discontinuidades en el flujo de vehículos.
- El documento de referencia utilizado en este capítulo para calcular la capacidad es el Highway Capacity Manual del año 2000

[15], que considera diversas tipologías viarias para la circulación en doble sentido. Estas tipologías son: carreteras de dos carriles bidireccionales, caracterizadas por la total interacción entre los flujos en ambas direcciones, y carreteras multicarril, en las que los sentidos de circulación están separados diferentes medios, desde una barrera física no franqueable hasta simples marcas viales. En dichas carreteras multicarril, ambos flujos circulatorios no se interaccionan o lo hacen en mínimo grado.

- A cielo abierto, en una sección tipo de carretera, con un carril en cada sentido y sin separación física entre ambos, existe con una fuerte interacción entre las dos corrientes de tráfico. Así pues, el comportamiento está notablemente influenciado por la posibilidad de adelantamiento, previa comprobación de disponer suficiente distancia de visibilidad, en ausencia de otras regulaciones.
- Cuando la interacción entre sentidos es muy pequeña, sea por la existencia de una separación física o por una regulación que no permita el adelantamiento en ningún caso en que deba invadirse el sentido contrario, el funcionamiento de la vía se asemeja en gran medida al de una carretera multicarril.
- El caso de túneles de dos carriles y doble sentido de circulación presenta multitud de similitudes con el funcionamiento de una carretera multicarril, más que con el de una carretera bidireccional. No se da aquí con tanta frecuencia el fenómeno, predominante en los túneles unidireccionales, de que su presencia creciente hace que los conductores, se habitúen a atravesarlos y que no presten especial atención a la circulación. Por el contrario, aún en la actualidad, el cruce de un túnel bidireccional aumenta

la atención del conductor, que por otra parte sabe que no debe adelantar en todo el túnel. Según ciertos estudios ([10], [11]) la inferior interdistancia entre vehículos en los carriles de un túnel, claramente menor que en el exterior, representa una evidencia de la mayor atención durante la conducción.

- El caso de túneles bidireccionales con varios carriles en el mismo sentido suele estar aún más claramente situado en el terreno de las carreteras multicarril. No son muy habituales los túneles bidireccionales de más de cuatro carriles en total, excepto en zonas urbanas, y generalmente disponen de mediana con separación física. Estos túneles con varios carriles por sentido, sobre todo si las condiciones geométricas y de iluminación son de alta calidad, pueden llegar a comportarse como los túneles unidireccionales, en cuyo caso la capacidad y las velocidades deben estudiarse según el procedimiento del correspondiente apartado del documento "Cross section geometry on uni-directional road Tunnels" publicado por la AIPCR en marzo de 2001 [1].
- Un caso particular es la existencia de una vía lenta en el sentido ascendente del túnel. En este caso debe adoptarse una decisión respecto a las condiciones predominantes de circulación en cada caso concreto:
 - Si el carril adicional se comporta esencialmente como específico para vehículos pesados, que circulan con elevada diferencia de velocidad respecto a los que circulan por el carril rápido, el comportamiento es el de una vía lenta típica;
 - Si el carril adicional es usado por todo tipo de vehículos y su funcionamiento es similar al de los otros carriles, proporcionando únicamente un incremento de la

capacidad, debe tratarse como un carril de una vía multicarril.

- Cuando se realice un estudio de capacidad, debe decidirse si se consideran por separado diferentes tramos o secciones del túnel o es más apropiado estudiar el túnel en su conjunto. Desde luego, si varía la sección transversal, la sección mínima marcará la capacidad del conjunto. Con respecto al perfil longitudinal, debe hacerse un estudio para determinar si se pueden combinar una sucesión de rampas y pendientes de diversas inclinaciones en una sola, o si cada una debe estudiarse por separado. En estos casos hay que hacer algunos tanteos para determinar el punto más limitativo para la capacidad. Este punto coincide usualmente con el punto de mínima velocidad para los vehículos pesados.
- Así pues, y con las limitaciones indicadas, este capítulo describe las variaciones en la capacidad de un túnel bidireccional en función de las variaciones geométricas y de trazado del mismo, y de las oscilaciones y la composición del tráfico. Con este fin se han adaptado los cálculos de Highway Capacity Manual 2000 [15] y de otros estudios al caso de túneles bidireccionales con un máximo de cuatro carriles. Las tablas, los coeficientes y los procedimientos generales son los del HCM-2000 [15], aunque, en ocasiones, la presentación de los cálculos difiere significativamente del documento de procedencia. Los factores de equivalencia de camiones en rampa son una excepción, pues son los de la versión de 1995 del HCM [14], dado que en la versión de 2000 se obtienen los factores para camiones con una relación potencia / peso muy elevada, que no se adapta adecuadamente al comportamiento habitual en la mayoría de los países.

3.2. Cálculos de velocidad y capacidad

El procedimiento para estimar la capacidad de un túnel pasa por calcular por separado las capacidades parciales de cada sentido de circulación.

En el caso más frecuente de tener un único carril por sentido, la capacidad se calcula usando la metodología para carriles de uso general que se expone a continuación. Por el contrario, si existe más de un carril por sentido de circulación debe comenzarse el análisis por la determinación del flujo de circulación predominante en cada sentido, en condiciones de tráfico denso, es decir en condiciones próximas a una situación de plena capacidad o saturación. Tal y como se ha indicado anteriormente puede ocurrir que los dos carriles de circulación en un mismo sentido sean ocupados indistintamente por todo tipo de vehículos, o bien que el carril lento esté reservado casi exclusivamente para los vehículos pesados.

Para diferenciar ambos casos, puede indicarse que la existencia de fuertes inclinaciones de subida o de bajada, y un elevado porcentaje de vehículos pesados tienden a especializar el carril lento como vía lenta específica, mientras que un trazado suave y poca o ninguna presencia de vehículos pesados tienden a producir situaciones de carretera multicarril. En los túneles es más frecuente que, en condiciones próximas a la capacidad, los carriles tiendan a usarse de forma parecida, con algo mayor presencia de vehículos pesados sobre el carril lento, mientras que con intensidades de tráfico reducidas, se produce una especialización de los camiones exclusivamente en el carril lento, usándose el carril rápido sólo para adelantar. Respecto a este hecho, resulta recomendable que los responsables de la explotación del túnel intenten que los carriles rápidos de un túnel con más de un carril por sentido se usen tan solo si la capacidad del carril lento no resulta suficiente para alojar la

intensidad de circulación, dado que la seguridad del tráfico es mayor si se mantiene un carril libre entre ambos sentidos del túnel. Por supuesto, en el caso que esté prohibido el adelantamiento de vehículos pesados a otros vehículos pesados en el interior del túnel, el carril rápido estará libre de este tipo de vehículos. Esta medida de regulación tiende a incrementar la seguridad en condiciones de baja a media intensidad de tráfico, pero puede, ciertamente, limitar la capacidad del túnel, al imponer de hecho sobre el carril lento la velocidad del vehículo más lento de los que circulen por él.

Si la situación predominante es la de carril lento específico, el procedimiento a seguir será determinar la capacidad de ese carril, y por separado la del carril rápido con muy pocos o ningún vehículo pesado. En primer lugar se indica el procedimiento de cálculo de la capacidad de un carril normal, o de los dos con un uso predominante parecido, y a continuación se estima la capacidad adicional que proporciona una vía lenta específica.

3.2.1 Capacidad Teórica y Capacidad Práctica

La capacidad teórica de un tramo de carretera, se define como la máxima intensidad de vehículos que puede ser soportada durante un periodo de 15 minutos, expresada en términos de vehículos por hora. Dicho valor no es un máximo absoluto sino que corresponde a un valor razonablemente repetible. Expresada así, la capacidad sólo depende de la geometría del tramo. No depende del porcentaje de vehículos pesados, puesto que la intensidad será claramente la máxima cuando el tráfico esté formado exclusivamente por vehículos ligeros y conductores habituales.

Cuando se desee relacionar la capacidad con el número de vehículos considerando la existencia de un porcentaje de vehículos pesados, debe hacerse referencia a la capacidad

práctica. Ésta se define como la máxima intensidad de vehículos por hora que pueden atravesar una sección en un periodo de quince minutos, en función de la composición del tráfico predominante en ese lugar.

3.2.2 Capacidad de los carriles de uso general

Este apartado es de aplicación para todos los casos en los que un solo carril es tenido en cuenta para cada sentido de circulación, así como para el cálculo de la capacidad del carril rápido, cuando el carril lento esté especializado como vía lenta, que debe estudiarse por separado. También puede aplicarse este apartado al caso de la determinación de la capacidad total del conjunto de dos carriles con un uso similar en un mismo sentido de circulación.

La determinación de la capacidad se realiza en dos etapas, en la primera de ellas se calcula la capacidad teórica a partir de la velocidad en régimen fluido VRF. Después se ajusta la capacidad teórica en función del porcentaje de vehículos pesados y del tipo de conductores, obteniendo la capacidad práctica.

La VRF es la velocidad media de los vehículos ligeros cuando no hay mucho tráfico que de lugar a unos vehículos retrasen a otros. Para determinar la VRF puede recurrirse a la estimación directa, cuidando que la intensidad sobre el carril de que se trate no supere los 1400 vl/h (vehículos ligeros por hora), y que no exista otro tipo de vehículos. Si la VRF se mide directamente, no son necesarios ajustes, pero debe tenerse la precaución de medir correctamente las velocidades en el conjunto de la longitud del túnel o del tramo en estudio. Dichas velocidades deben medirse promediando los tiempos de recorrido sobre el tramo, no debiendo hacerse el cálculo promediando las velocidades instantáneas en un punto, lo que falsearía los resultados.

Si no se puede recurrir a la estimación directa se pueden basar los cálculos en la velocidad base en régimen fluido (VBRF) que sólo depende de la geometría y de los límites de velocidad. Se estima que esta velocidad es ligeramente inferior (de 5 a 10 km/h) que la velocidad de proyecto del tramo, o ligeramente superior (de 8 a 15 km/h) que la limitación de velocidad existente.

A partir de la VBRF se determina la VRF mediante la aplicación de unos coeficientes de reducción que dependen de los elementos siguientes:

- C_A : anchura de los carriles, cuando ésta es inferior a 3,60 m
- C_W : despeje lateral a ambos lados en el sentido de circulación (zona exterior a la calzada + mediana central, si existe)
- C_M : tipo de separación entre sentidos.

$$VRF = VBRF - C_A - C_W - C_M$$

Los coeficientes de ajuste por anchura de carriles y por despeje lateral, corresponden a los indicados en las tablas siguientes:

(tabla 9 y 10)

Los anchos de carril no deben incluir las marcas viales, excepto las de separación entre carriles del mismo sentido de circulación, que se consideran incluidas en los carriles adyacentes.

El despeje lateral debe comprender toda la zona exterior a la calzada más la banda central de separación de sentidos de circulación, si existe. Para el cálculo no tendrán en cuenta los anchos superiores a 1,80 m para cualquiera de los dos coeficientes es decir que los anchos de zona exterior a la calzada y de banda central de separación superiores a 1,80 m se considerará: como 1,80 m. El ancho de las aceras se incluirá en el despeje lateral excepto si se encuentran fuertemente sobre elevadas respecto al arcén. Si la separación entre sentidos es únicamente una línea pintada en el pavimento, simple o doble, el despeje lateral en el centro será cero.

El coeficiente de reducción por el tipo de mediana C_M , sólo se tendrá en cuenta si no existen barreras fijas entre sentidos de circulación ni bandas de mediana central, en cuyo caso tiene un valor de 2,5 km/h. Esta reducción se debe al efecto de inseguridad que causa la circulación en doble sentido, que no afecta sensiblemente a los conductores cuando existe una barrera de mediana o una banda central de seguridad.

Una vez calculada la VRF, en km/h, mediante estimación directa o por reducciones a la VBRF, la capacidad teórica por carril CT/c se calcula mediante:

$$CT/c = (VRF \times 10 + 1.200) \text{ en vehículos ligeros por hora y carril vl/h,c}$$

Así pues, para una VRF de 70 km/h, la CT/c es de 1.900 vl/h,c. No se han observado capacidades teóricas superiores a los 2.200 y no existen datos fiables para velocidades en régimen fluido por debajo de los 60 km/h.

Si existen dos carriles en un mismo sentido, no siendo el carril lento del tipo especializado, la capacidad del túnel en este sentido es dos veces la de un carril.

A partir de la Capacidad Teórica, CT/c, se obtiene la capacidad práctica, CP/c, mediante la aplicación de los coeficientes de reducción siguientes:

- Factor de hora punta, C_{HP} , que representa la relación de la intensidad horaria a máxima capacidad frente al cuádruple del número máximo de vehículos durante un periodo de 15 minutos de la hora punta. Este factor tiene en cuenta la dispersión de las intensidades durante el período de hora punta y se emplea para calcular la capacidad real, que se expresa en términos de la intensidad máxima sostenible durante periodos de 15 minutos. Este factor suele oscilar entre 0,92, para casos en que el flujo sea muy uniforme, hasta 0,80. Su valor debe obtenerse por observación o utilizando valores empleados por defecto.
- Coeficiente según el conductor, C/C_c , que refleja el grado de conocimiento y hábito de uso del túnel por los conductores. Sus valores están comprendidos entre 1,00 y 0,85, correspondiendo el valor 1,00 a conductores que son habituales en el túnel y el 0,85 a una población de comportamiento recreacional, o que no han usado anteriormente éste u otros túneles similares.
- Factor de vehículos pesados en rampas, C_{VP} , que corresponde al efecto de los vehículos lentos sobre el flujo de vehículos ligeros. El coeficiente de ajuste por la presencia de vehículos pesados C_{VP} se obtiene a partir del coeficiente de equivalencia Eq de un vehículo

Tabla 9

Ajuste por anchura de carriles C_A	
Ancho de carril	Reducción de la VBRF (en km/h)
3,60 m	0,0
3,50 m	1,0
3,40 m	2,1
3,30 m	3,1
3,20 m	5,6
3,10 m	8,1
3,00 m	10,6

Tabla 10

Ajuste por despeje lateral C_W	
Ancho total de despeje lateral	Reducción de la VBRF (en km/h)
3,60 m	0,0
3,00 m	0,6
2,40 m	1,5
1,80 m	2,1
1,20 m	3,0
0,60 m	5,8
0,00 m	8,7

pesado (autobús o camión) en vehículos ligeros. Éste se determina como la relación entre la intensidad de vehículos pesados (camiones, autobuses, vehículos articulados) y la intensidad de turismos. El factor de equivalencia E_q varía entre 1,5 y 10 para camiones y autobuses, dependiendo de la longitud y de la inclinación. Sus valores se muestran en la tabla de la página siguiente.

Una vez determinado el coeficiente E_q , en función de la inclinación y de la longitud de la rampa, así como del porcentaje de vehículos pesados, el Coeficiente C_{vp} se calcula como sigue:

$$C_{vp} = 1 / (1 + P_c (E_q - 1))$$

Donde P_c es el porcentaje de vehículos pesados sobre el total del tráfico.

La capacidad práctica, CP, se calcula multiplicando la capacidad teórica, CT, por los tres coeficientes indicados.

$$CP = CT * C_{HP} * C_{vp} * C_c$$

(tabla 11)

3.2.3 Capacidad de una vía lenta específica

En el caso en el que el carril lento sea específico, su capacidad práctica puede estimarse a partir de la intensidad total de vehículos pesados que puede soportar dicho carril, en función de su inclinación y de su longitud. Para ello se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$CPcl = (10 * V_p + 1.200) / E_T$$

Donde V_p es la velocidad media de los vehículos pesados en la rampa en condiciones de alta intensidad de tráfico. En el caso en el que no pueda determinarse directamente, puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$V_p = [0,30 * (\text{potencia} / \text{peso})] / (i + 0,015)$$

Tabla 11

Inclinación (%)	Longitud de la rampa (m)	E_q Coeficiente de equivalencia en rampa					
		Porcentaje de vehículos pesados (%)					
		4	6	8	10	15	20
< 2	Todos	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
2	0 - 400	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	800 - 1200	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1200 - 1600	2	2	1,5	1,5	1,5	1,5
	1600 - 2400	3	3	2,5	2,5	2	2
	> 2400	3,5	3	2,5	2,5	2	2
3	0 - 400	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	2,5	2	2	2	2	1,5
	800 - 1200	4	3,5	3,5	3	2,5	2
	1200 - 1600	5,5	4,5	4	4	3,5	3
	1600 - 2400	6	5	4,5	4	4	3
	> 2400	6	5	4,5	4,5	4	3
4	0 - 400	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	4	3,5	3	3	3	2,5
	800 - 1200	7	6	5,5	5	4,5	4
	1200 - 1600	8	6,5	6	5,5	4	4,5
	> 1600	8	7	6	6	5	5
5	0 - 400	2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	400 - 800	4,5	4	3,5	3	3	2,5
	800 - 1200	7	6	5,5	5	4,5	4
	1200 - 1600	9	8	7	7	6	6
	1600 - 2400	9,5	8	7,5	7	6,5	6
	> 2400	9,5	8	7,5	7	6,5	6

Donde la relación potencia/peso de los vehículos pesados está expresada en KW por tonelada y la inclinación de la rampa "i" en tanto por uno.¹

E_T es el equivalente para vehículos pesados o camiones, calculado según la tabla anterior, en la columna correspondiente al 20% o más de vehículos pesados. Si el número de camiones y de vehículos pesados no es suficientemente elevado como para saturar la vía lenta, la capacidad de ésta no estará totalmente utilizada. Algunos vehículos ligeros podrán circular por ella entre los camiones pero el resto de su capacidad no estará aprovechada de forma eficiente.

A título de ejemplo, una vía lenta de 3.000 m de longitud con una pendiente del 3% de lugar a un E_T de 3,0, mientras que la velocidad media V_p para camiones de 8 KW/t de potencia es de 53 km/h. Así pues la capacidad práctica del carril es de:

$$CPcl = (10 * 53 + 1.200) / 3,0 = 577 \text{ vehículos por hora}$$

¹ Esta fórmula permite estimar la velocidad constante de los vehículos pesados en rampas prolongadas, sin tener en cuenta el efecto de resistencia del aire y suponiendo que la capacidad de transmisión del motor del camión es un 80% y el coeficiente de resistencia a la rodadura es de 15 k/t.

3.2.4 Distribución del tráfico entre sentidos de circulación

Cuando se han determinado las capacidades de cada uno de los sentidos de circulación del túnel por separado, ambos valores deben combinarse para determinar la capacidad total. Si en el momento actual, o en el futuro, existe suficiente intensidad de tráfico como para saturar ambos sentidos simultáneamente, la capacidad total es, simplemente, la suma de las capacidades de ambos sentidos.

Sin embargo, es frecuente que en uno de los sentidos exista poca intensidad mientras que en el otro sea máxima. Si ello es lo habitual, la capacidad del túnel será la suma de la capacidad máxima de uno de los sentidos más la intensidad en el otro en el mismo período horario, caso de que esta última sea inferior a la capacidad calculada. En efecto, el túnel podría tener mayor intensidad en uno de los dos sentidos, pero si no puede soportarla, el túnel queda saturado (al menos en uno de sus sentidos) con una intensidad total, suma de ambos sentidos, menor que la capacidad práctica calculada.

3.2.5 Capacidad diaria

Resulta también frecuente expresar la capacidad práctica en vehículos al día, en vez de vehículos por hora. La relación entre la IMD máxima y la capacidad depende del tipo de tráfico y del entorno del túnel, siendo del orden de 11 veces superior la IMD en vías urbanas o metropolitanas muy saturadas y hasta 6 veces superior en vías rurales y con tráfico de tipo turístico.

4 Frecuencias de incidentes y accidentes

- Resulta difícil comparar datos entre distintos países, debido a la diferente definición de los heridos, incidentes, etc. Sin embargo,

pueden indicarse algunos aspectos que son comunes a todos los datos disponibles.

- Aproximadamente, la tasa de incidentes en túneles bidireccionales se encuentra en torno a los 750 incidentes por cada 10^8 vehículos por kilómetro, con una dispersión de $\pm 40\%$. Este valor es, aproximadamente, un 25% superior a la de los túneles unidireccionales. Se denomina incidente a la detención de un vehículo en el interior del túnel por cualquier causa, excepto la congestión del tráfico. ([6], [7]).
- La pendiente del túnel tiene una significativa influencia en el número y frecuencia de los incidentes, siendo claramente superior en el sentido ascendente que en el descendente. Este fenómeno parece derivarse de la tendencia de los conductores a salir del túnel por sus propios medios, si les resulta posible. ([6], [7], [9]).
- Además de la pendiente en el interior del túnel, las pendientes fuertes o prolongadas en los accesos al túnel incrementan la tasa de incidentes dentro del mismo. [7].
- El gráfico muestra la relación entre las pendientes longitudinales medias de túneles y las tasas de incidentes, en los casos en que se dispone de datos diferenciados por sentidos en el túnel ([6], [7], [9]).
- En los túneles que disponen de apartaderos, incluso en los casos en que éstos estén claramente señalizados, es raro que su uso sea superior al 40% de las detenciones [7]. Así pues, la presencia de apartaderos puede ayudar notablemente, pero no parece sustituir totalmente a la necesidad de una zona de detención de vehículos adyacentes a la calzada.
- Las tasas de accidentes en túneles son mucho menores que las de incidentes. Existe una gran dispersión entre las definiciones de herido leve y de herido grave entre los diversos países, e incluso en algunos casos las muertes por accidente de circulación sólo se incluyen en las

estadísticas si se producen en un lapso breve desde el siniestro. En consecuencia, a continuación se indican tan sólo tendencias generales, debiendo considerarse las cifras como propias de cada túnel y de las circunstancias del túnel en cuestión.

- En general, los túneles tienen una tasa de accidentes similar o inferior a la de las vías equivalentes a cielo abierto ([8], [9], [12]), siendo en ciertos casos incluso muy inferior. Los túneles bidireccionales presentan tasas de accidentalidad con heridos de entre un 25 a un 30% superiores a las de los unidireccionales. Sin embargo no todos los estudios y obtienen los mismos resultados. Puede observarse que el aumento del porcentaje es similar a lo indicado anteriormente respecto a las tasas de incidentes ([6], [7], [12]).
- Existe una zona de concentración de accidentes en las proximidades de las bocas de los túneles, que según ciertas referencias [8] se extiende a unos cincuenta metros en el exterior. Las causas de ello parecen ser las maniobras de cambio de sentido, relativamente frecuentes en dichas zonas. Otro factor que parece determinante es la calidad de la iluminación, tanto en los accidentes a la entrada por una defectuosa adaptación a la oscuridad, como en los accidentes en la zona central, cuando no existe iluminación en el túnel [8]. Las zonas centrales de los túneles son, sin embargo, las más seguras.
- Los accidentes debidos a colisión frontal aumentan mucho cuando los carriles son inferiores a los tres metros [8]. Los accidentes debidos a alcances aumentan al crecer la intensidad de tráfico IMD, por los efectos de la congestión.
- La tasa de accidentes, expresada en accidentes con heridos por cada cien millones de vehículo-kilómetro, disminuye con la longitud del túnel y con la IMD. La causa de la disminución ligada a la longitud del túnel es el efecto de la zona

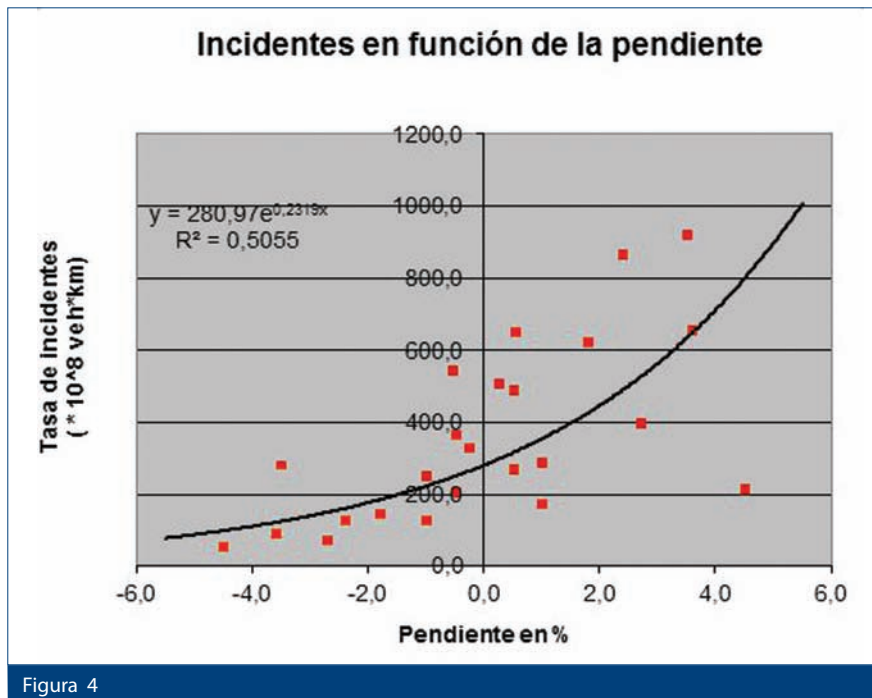


Figura 4

próxima a las bocas, relativamente menos importante en túneles largos, mientras que la disminución de la tasa al crecer la IMD se produce también en todos los tipos de vías, incluso a cielo abierto.

- La adición de un carril para vehículos lentos parece mejorar la seguridad en los túneles [8].
- Las fuertes pendientes (superiores al 9%) aumentan el número de accidentes [8]. No está, sin embargo claro el efecto de las pendientes o rampas cuando las inclinaciones son pequeñas.
- No existen estudios que permitan relacionar con claridad las características de trazado (curvaturas en planta y en alzado) ni los anchos de despeje lateral con las tasas de accidentes. Sin embargo, algunas situaciones específicas parecen conducir claramente a mayores tasas de accidentes. A pesar de ello, los túneles diseñados con buenas condiciones geométricas muestran una disminución notable en los indicadores de accidentalidad.
- Existen evidencias de que los túneles con incorporaciones o salidas en su interior llegan a tener tasas de accidentabilidad varias veces superiores a las de los túneles similares sin estos puntos especiales [5].

5. Trazado en planta

- Las curvaturas en planta tendrán los radios mínimos que correspondan a la velocidad de proyecto del túnel. Adicionalmente debe comprobarse que el despeje lateral en las curvas a derecha en el sentido de circulación proporcione suficiente visibilidad de parada. Las normas y recomendaciones de trazado propias de cada país proponen valores similares para estos parámetros, por lo que no es necesaria una ulterior armonización.
- No se desaconsejan las alineaciones rectas, pero conviene que no tengan más de 1500 m de longitud por el efecto de excesiva concentración de la vista en un punto que puede distraer al conductor, o incluso inducirle a aumentar inconscientemente la velocidad.
- Por el mismo motivo, conviene que los últimos metros del túnel tengan una suave curvatura en planta, preferiblemente en el sentido en el que no quede limitada la visibilidad. En túneles bidireccionales resulta más conveniente proporcionar mayor visibilidad en el sentido de entrada, dado que es en el que la variación de iluminación causa una mayor pérdida de visión. Esta

disposición se hace especialmente necesaria si la orientación del túnel es este-oeste, para evitar el deslumbramiento a la salida, en la puesta o salida del sol.

- Tanto en la entrada como en la salida del túnel, que son lugares con cierta tendencia a la concentración de accidentes, conviene disponer los medios que sean necesarios para una adaptación gradual a sus condiciones de iluminación. Además de en la propia iluminación del túnel, se puede actuar en el diseño de las bocas, en la orientación del trazado y en otra serie de medidas que tiendan a centrar la atención de los conductores.
- Si se quiere mantener una determinada velocidad media en el túnel, los radios mínimos en planta deben diseñarse para permitir esa velocidad. Sin embargo, en tramos curvos, y especialmente en curvas que limiten la visibilidad, la velocidad admisible depende de que el despeje lateral permita la visibilidad de parada. Las anchuras de despeje precisas para determinadas combinaciones de velocidades y radios de curvatura pueden ser difíciles de conseguir en túneles, por lo que el proyectista debe considerar en detalle esta circunstancia (Ver capítulo 7.6)
- Se recomienda que los túneles bidireccionales tengan limitada su velocidad máxima a 90 Km/hora o a un valor inferior si su geometría (sección, radios o pendientes) tiene factores limitativos. En este caso, la velocidad permitida debe ser la correspondiente a una velocidad segura para las condiciones del túnel y del tráfico.
- Aunque los túneles no padecen los efectos de la lluvia que disminuyen el coeficiente de resistencia al deslizamiento, tampoco gozan de las ventajas de limpieza del pavimento que ella produce, por lo que se recomienda que los valores de dicho coeficiente se consideren similares o algo inferiores a los del exterior,

a los efectos de cálculos de los radios admisibles y de las distancias de parada.

6. Trazado en alzado

- Es muy frecuente que los túneles se proyecten con un punto alto en su interior, en cuyo caso, análogamente a cuando lo que se disponga sea de un punto bajo, debe verificarse si ello puede originar problemas en cuanto a la ventilación.
- Elevadas inclinaciones de la rasante (superiores al 3,5%) dificultan la ventilación dado que el efecto chimenea (tendencia ascendente de los gases por la diferencia de alturas entre puntos del túnel respecto al nivel de referencia) es muy importante, por lo que debe vencerse una fuerte resistencia para establecer un flujo de aire que lo supere [13]. Ello es mucho más importante en caso de incendio dada la mayor tendencia ascendente de los humos calientes.
- La pendiente longitudinal no debe superar el 4% en túneles bidireccionales. En caso de ser necesario, deberá tenerse en cuenta en el proyecto del sistema de ventilación.
- Si se dispone un carril adicional en rampa para vehículos lentos, éste deberá proyectarse, siempre que sea posible, con su inicio y final en el exterior del túnel, con el fin de evitar que las maniobras de incorporación y adelantamiento puedan ser causa de mayor riesgo en el túnel.
- Cualquier cambio en la pendiente de un túnel debería cumplir con los mismos requisitos geométricos que en el exterior. En el caso de túneles con gálibo vertical reducido, se deberá prestar especial atención a las condiciones fuera del túnel en caso de que cualquier cambio cóncavo en la pendiente pueda reducir de forma importante la distancia de visibilidad.
- Siguiendo el criterio de no disponer de secciones de mínima capacidad

dentro del túnel, resulta preferible que cualquier variación de pendiente se realice con transiciones de mayor a menor rampa. Cuando esta disposición no sea posible, como por ejemplo en túneles sumergidos, se debe prestar especial atención a la posible formación de retenciones por disminución de la capacidad de la vía en el interior.

7. Geometría de la sección transversal

En este capítulo se establecen determinadas consideraciones sobre las distintas partes de la sección transversal de los túneles bidireccionales, basadas en las normativas internacionales y en los resultados de diversos estudios sobre la materia. En el apartado correspondiente a recomendaciones se hace una síntesis de ellas.

7.1 Anchuras de carril

- En general existe una gran coincidencia entre las recomendaciones internacionales que proponen que los carriles tengan anchuras iguales o superiores a los 3,25 m, siendo el valor deseable el de 3,50 m, que debe disponerse siempre que en el túnel se permita el tráfico de pesados. Esta anchura puede incluir la parte proporcional de marcas las viales del eje. En América del Norte, la anchura recomendada para los carriles es de 3,65 m (12 pies).
- Las marcas viales del eje deberían ser del tipo doble línea continua, para prohibir efectivamente el adelantamiento. La anchura de cada línea no debería ser inferior a 15 cm.
- Se recomienda que las marcas viales del eje del túnel sean rugosas para que contribuyan a disminuir las colisiones frontales por invasión del carril contrario. También da buenos resultados el balizamiento con ojos de gato asociados a las marcas viales o pequeñas balizas fijadas al pavimento, con el fin de

mejorar el guiado y disminuir el riesgo de invasión inadvertida del sentido contrario [11].

7.2 Anchuras de arcén

Existe una gran diferencia entre las recomendaciones de los distintos países en esta materia, que se reduce si se consideran conjuntamente los arcenes y las aceras, es decir la totalidad del espacio exterior a la calzada.

La zona exterior a la calzada comprende los arcenes y las aceras. También debe haber espacio suficiente para las barreras de seguridad, si es que están previstas en el tramo. Ello queda ilustrado en las figuras 4, 5 y 6.

- En túneles bidireccionales, ambos arcenes, izquierdo y derecho, deben tener igual anchura. La única excepción, tal y como se indica más adelante, podría ser en los túneles con más de un carril en el mismo sentido.
- Cuando sus dimensiones son máximas, las funciones de los arcenes son:
 - Incrementar la capacidad del carril;
 - Proporcionar una franja de espacio de seguridad permitiendo a los conductores que sobrepasen el borde del carril corregir trayectoria;
 - Proporcionar espacio para vehículos averiados;
 - Proporcionar un carril de emergencia para dar acceso a los servicios de socorro;
 - Facilitar las tareas de mantenimiento.
- Es importante respetar el criterio de seguridad que requiere un ancho mínimo circuleable (carriles + arcenes) de 8,50 m, necesario para el adelantamiento de un vehículo pesado a otro vehículo detenido, sin impedir totalmente el paso en dirección contraria. ($3 \times 2,50 + 4 \times 0,25$ m) Este criterio debería respetarse en todos los casos, por lo

que el ancho del arcén debe completar al de los carriles en lo necesario para alcanzar esta anchura total. Sin embargo, existen países europeos en los que el adelantamiento no se permite aunque se produzca una detención por avería, lo que da lugar a una anchura necesaria menor, permaneciendo el tráfico detenido en ese sentido hasta que se resuelve el incidente.

- En algunos países se recomienda que los arcenes permitan la detención de un vehículo, no impidiendo ni restringiendo la circulación en sentido contrario. Ello significa que el ancho del carril más el ancho del arcén debería superar los 5,50 m, tal y como se indica en la mayoría de las recomendaciones internacionales para túneles bidireccionales de cierta importancia.
- La situación ideal sería que el arcén permitiese la detención de un vehículo totalmente fuera de la calzada, para lo cual se necesitaría un ancho mínimo de 2,50 m.
- Algunos países [5] consideran adicionalmente el espacio necesario para el descenso del conductor del vehículo, aumentando el ancho del arcén a 3,00 m.
- Los anchos de arcén entre 0,75 y 2,00 metros no son recomendados en algunos países, excepto en el caso de que también exista mediana central o se disponga de más de un carril en el mismo sentido. Un arcén inferior a 2,00 metros puede inducir a los vehículos con dificultades a detenerse ocupando parcialmente el carril pudiendo dar lugar en ese caso a una situación peligrosa cuando les rebase el tráfico que les sigue.
- En el caso de utilizar barreras de seguridad, flexibles o de hormigón, en el margen exterior del arcén, o adyacentes al hastial si existe acera, el espacio para colocarla debe dar lugar a incrementar la anchura del túnel, debiendo mantenerse los anchos establecidos para el arcén y la acera.

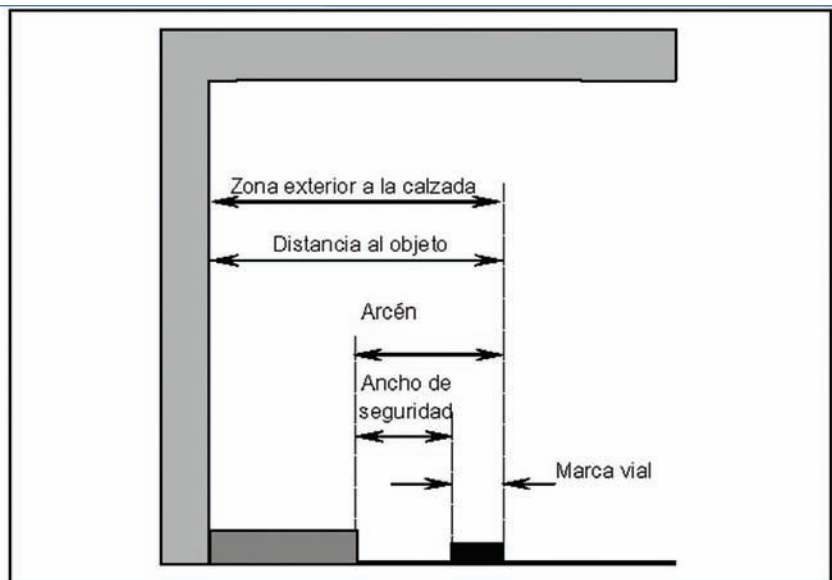


Figura 5. Elementos y funciones de la zona exterior en caso de haber aceras.

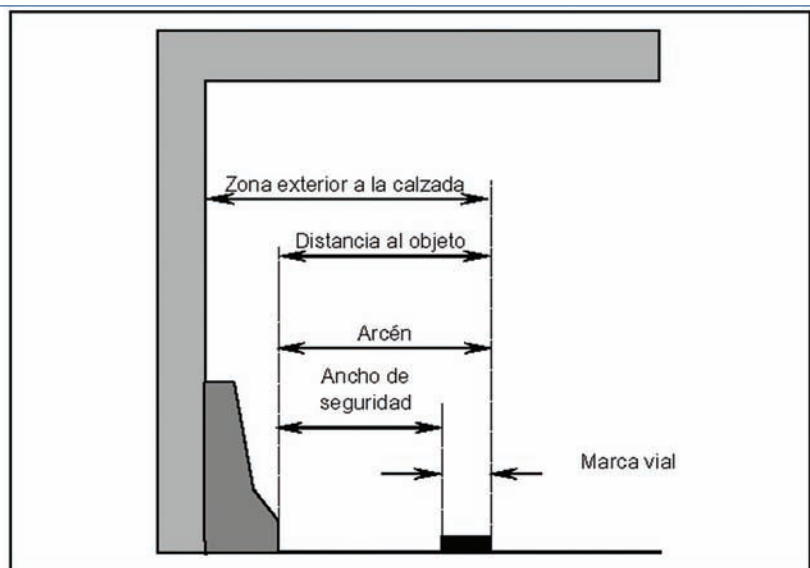


Figura 6. Elementos y funciones de la zona exterior en caso de barreras de seguridad rígidas.

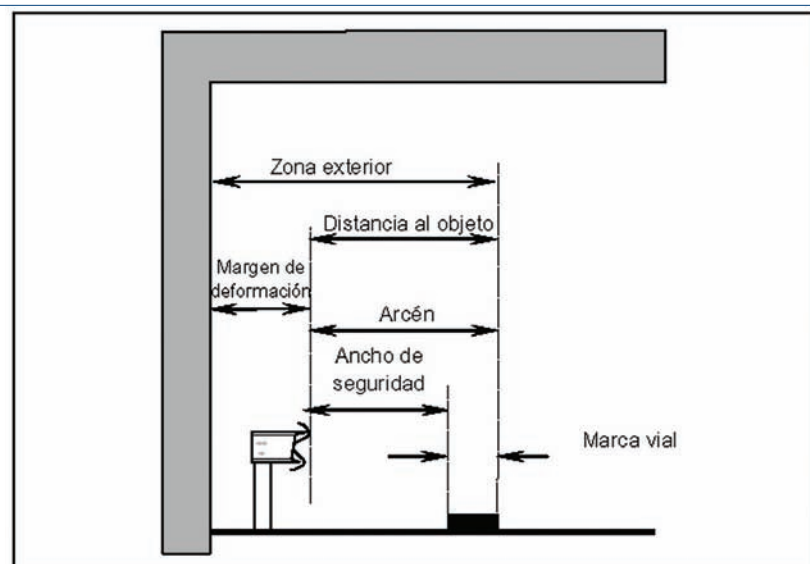


Figura 7. Elementos y funciones de la zona exterior en caso de existir barreras flexibles.

7.3 Mediana

- Una de las posibles soluciones para limitar el ancho total de un túnel bidireccional sin comprometer excesivamente la seguridad, consiste en disponer una franja central, mediana, prohibida a la circulación que separe los dos sentidos. La mediana tiene las siguientes funciones:
 - Separar los dos sentidos de circulación, mejorando la seguridad en el túnel;
 - Sustituir parcialmente a los arcenes, permitiendo rebasar a un vehículo detenido en el lateral, sin invadir el carril de sentido contrario;
 - Proporcionar un eventual carril libre para el acceso de los vehículos de los servicios de emergencia.
- Sin embargo, la mediana puede resultar peligrosa en determinados casos:
 - Detención en la mediana. Debería estar estrictamente prohibida la detención de un vehículo averiado en ella excepto en el caso de vehículos de explotación que deberá hacerse con la adecuada señalización y balizamiento. Para disminuir este riesgo conviene señalar con claridad la mediana para que no pueda confundirse con un carril de circulación ni con un espacio destinado al aparcamiento o estacionamiento.
 - Detención en el arcén. Si un vehículo se detiene junto al arcén en un punto de mala visibilidad (curva a derecha en los países donde se conduce por la derecha), con insuficiente visibilidad de parada, debido a radios reducidos o a un despeje lateral insuficiente, puede ser peligrosa la disposición de una mediana combinada con arcenes de pequeña anchura o inexistentes. En estos casos

resulta muy conveniente disponer arcenes de anchura suficiente para la parada segura de vehículos, no reduciendo su anchura aunque exista adicionalmente mediana.

- En caso de disponer mediana ésta debe tener un ancho entre uno y dos metros y medio, siendo posible disminuir en cierta magnitud la anchura de los arcenes, con las excepciones indicadas, hasta dejarlos en 0,50 m como mínimo.

7.4 Aceras

- Casi todas las reglamentaciones internacionales recomiendan que los túneles incluyan aceras para uso del personal de mantenimiento y, en caso de incidentes accesibles a los peatones. Las aceras tienen las siguientes funciones:
 - Aumentar el nivel de servicio. Su anchura incrementada a la del arcén aumenta la capacidad de la vía, aunque ello no es apreciable con anchuras superiores a 1,80 m (arcén + acera);
 - Guiar a los conductores, gracias a la línea marcada por los bordillos;
 - Impedir que los vehículos que hayan sobrepasado la marca vial del arcén colisionen con el hastial. Sin embargo esta función, que es la misma que se atribuye a las barreras de seguridad, es poco efectiva con las alturas habituales de los bordillos;
 - Permitir la apertura de las puertas de los vehículos que han tenido que detenerse, y las de los equipamientos del túnel (salidas de emergencia, nichos de seguridad, etc);
 - Permitir que los usuarios de la vía, que han tenido que detener su vehículo, puedan dirigirse sin peligro a los puntos de aviso de emergencia;

- Ocasionalmente, permitir que los usuarios en espera de auxilio por avería o accidente tengan unas mejores condiciones de seguridad;
 - Favorecer la seguridad del personal que hace las labores de mantenimiento;
 - Proporcionar espacio para albergar conducciones, cables y otros elementos de las instalaciones del túnel.
- Deben distinguirse tres casos:
 - a) Aceras únicamente utilizadas para las funciones definidas anteriormente. La anchura mínima debe de ser de 0,60 m y recomendable de 0,75 m. La acera debe estar sobreelevada entre 7 y 15 cm y el bordillo debe de ser no montable. El gálibo libre sobre la acera debe de ser de 2,30 m. Parece conveniente que todos los túneles dispongan de este tipo de aceras.²
 - b) Aceras utilizadas por cierto número de peatones y de ciclistas.
 - En general se desaconseja esta función y no debe ser aplicada salvo que no exista otra alternativa. En la medida de lo posible, los peatones y los ciclistas deben circular por otro túnel o por un tubo separado del de carretera.
 - Si fuese necesario utilizar la acera para ese fin, deberá sobreelevarse como mínimo 50 cm y deberá instalarse una barandilla de protección, debiendo ser compatible con

² A pesar de ello, algunos países prefieren que no existan bordillos en túneles bidireccionales, puesto que consideran que pueden ser peligrosos para las personas discapacitadas y que una colisión contra un bordillo puede, en algunos casos, provocar un vuelco. Sin embargo indican que un bordillo dificulta los eventuales cambios de sentido (giros en U) que los conductores puedan verse tentados a hacer en el túnel.

las necesidades de los otros usuarios, por lo que deberán diseñarse accesos desde los carriles de circulación.

c) Aceras montables.

- Este tipo de aceras permite que los vehículos con una emergencia se detengan en parte sobre la acera.
- Con esta disposición se pretende que los vehículos detenidos por avería u otra causa ocupen la menor anchura posible de la calzada, acercándose más al hastial del túnel.
- Existen opiniones que indican que las ocasionales pérdidas de trayectoria de los vehículos, que son el motivo más frecuente de accidente con un único vehículo implicado, pueden tener consecuencias menores con este tipo de bordillo. Esta cuestión es, sin embargo, objeto de fuerte controversia, y antes de aceptar o rechazar la hipótesis sería necesario disponer de otras experiencias.

En caso de utilizar este tipo de acera, su disposición habitual debe de ser la siguiente:

- El bordillo será montable, con inclinación máxima de 30° con la horizontal. Su altura será de entre 7 y 15 cm respecto de la calzada.
- Debe poder resistir el peso de ejes de 10,5 t para que los vehículos pesados no la puedan deteriorar ni a los equipamientos que estén alojados bajo ella.
- El galíbo vertical libre sobre la acera debe de ser superior al indicado anteriormente, siendo ideal que pudiera ser igual al disponible sobre la calzada.
- La mitad de la anchura de la acera puede contabilizarse como ancho de arcén, disminuyendo acordemente la anchura del mismo.

7.5 Recomendaciones

A continuación se incluye un cuadro resumen con las características recomendadas para túneles bidireccionales. Las dimensiones indicadas como mínimas, se considera deberían cumplirse para cualquier intensidad de tráfico o longitud de túnel. Las dimensiones correspondientes a una sección restringida pueden usarse para túneles de cierta importancia aunque, siempre que sea posible, conviene adaptar la sección a las dimensiones no restringidas.

Estas recomendaciones están basadas en la práctica habitual en varios países y en la opinión de expertos del Grupo de Trabajo 4 del Comité de la AIPCR. Sin embargo, pueden existir otras soluciones para los problemas planteados y las normativas nacionales pueden adoptar enfoques diferentes para resolver las situaciones tratadas en este informe.

(tabla 12)

En el caso de carriles adicionales se recomienda un ancho de 3,50 m. para éstos No conviene reducir la anchura del arcén en el sentido del túnel con más de un carril dado que la detención de cualquier vehículo podría ser causa de tener que realizar maniobras peligrosas, incluso con baja intensidad de tráfico.

Algunos países recomiendan anchuras de acera mayores de 0,60 m y en el caso de que se prevea espacio para sillas de ruedas se consideran anchuras de entre 1,00 y 1,20 m.

7.6 Anchuras de la zona exterior a la calzada y distancias de visibilidad

- Se entiende por zona exterior a la calzada el espacio suma del arcén y de la acera. Esta banda, además de proporcionar las funciones propias de cada una de sus

partes, adicionalmente debe proporcionar, en el caso de curvas en el interior del túnel, una distancia de visibilidad suficiente para detener con seguridad al vehículo en caso de existir un obstáculo.

- La mayoría de las normativas de trazado de los distintos países incluyen este tipo de consideraciones, relacionando el despeje para la visibilidad de parada con la velocidad, el radio de la curva y la pendiente de la carretera.
- En el cuadro se presentan las distancias de despeje que se requieren en la mayoría de países bajo condiciones similares y a diversas velocidades de circulación³. (tabla 13)
- En el siguiente cuadro se indican las distancias de visibilidad que proporcionan diversas anchuras de zona exterior a la calzada, en función del radio de la curva. (tabla 14)
- Por último, en el cuadro siguiente se indica la máxima velocidad segura, es decir la que permite disponer de visibilidad suficiente para detener el vehículo frente a un obstáculo, en función, igualmente, del radio de curvatura y de la distancia libre desde el carril al obstáculo lateral. (tabla 15)
- En caso de no disponer de suficiente distancia de visibilidad, se recomienda reglamentar la velocidad de recorrido del túnel para mantener los niveles de seguridad deseables.

7.7 Barreras de seguridad para separar los sentidos de circulación

El principal peligro para la circulación en un túnel bidireccional es la

³ Las distancias de parada segura están calculadas suponiendo el 0% de inclinación, 2 segundos de tiempo de percepción y reacción y coeficientes de rozamiento que varían entre 0,35 (90 km/h) y 0,39 (40 km/h)

colisión frontal dado que este tipo de accidente es el que suele causar las consecuencias más graves y, al mismo tiempo, es también el tipo de accidente con mayor probabilidad de derivar hacia un incendio. Mucho menos graves son las colisiones por alcance de un vehículo con el que le antecede, circulando ambos en el mismo sentido. Este tipo de accidente suele deberse a una pérdida momentánea de atención del conductor del vehículo que colisiona, a veces agravada por una visibilidad y distancia de parada insuficientes en relación con la velocidad de circulación.

Las posibilidades de un accidente por colisión frontal pueden disminuirse en gran medida mediante la instalación de barreras de seguridad que separen ambos sentidos. En la consideración de la conveniencia de estas barreras deben tenerse en cuenta diversos aspectos:

- La barrera no debe impedir el adelantamiento de un vehículo detenido por avería. Así pues, el espacio disponible para cada sentido no debe ser menor de 5,50 m, correspondiente a dos vehículos pesados más las holguras de paso.
- El espacio ocupado por la barrera es del orden de 0,50 m. Adicionalmente deben disponerse arcenes a ambos lados, no menores de 0,50 m cada uno. Como resultado, la mediana central mínima con barrera es de 1,50 m ($2 * 0,50$ arcenes + 0,50 de la barrera). De acuerdo con los criterios anteriores, no deberían instalarse barreras fijas y no franqueables si la anchura del túnel no supera los 12,50 metros.
- Las barreras impiden los giros en "U", por lo que si dichos giros se consideran convenientes en determinadas circunstancias de emergencia no deberían instalarse.
- Las labores de mantenimiento de las instalaciones del túnel deben

Tabla 12. Secciones transversales recomendadas.

Secciones recomendadas						
Tipo de sección	Mediana central (m)	Carriles (m)	Arcenes (m)	Aceras (m)	Aceras montables (m)	Ancho total entre hastiales (m)
Mínima sin aceras	-	3,50	0,75	-	-	8,50
Mínima con aceras	-	3,50	0,75	0,60	-	9,70
Mínima con aceras montables	-	3,50	0,50	-	0,60	9,20
Restringida con aceras	-	3,50	2,00	0,60	-	12,20
Restringida con aceras montables	-	3,50	1,75	-	0,60	11,70
Restringida con mediana central	2,00	3,50	0,50	0,60	-	11,20
No restringida	-	3,50	2,50	0,60	-	13,20

Tabla 13. Distancias de despeje lateral.

Velocidad media (km/h)	40	60	80	100	120
Radio mínimo (m)	100	160	260	470	800
Distancia de parada segura (m)	40	80	130	180	280
Despeje lateral necesario(m)	2,0	4,9	8,0	8,5	12,2
Ancho de la zona exterior a la calzada, suponiendo al conductor situado a 1,50 m del borde del arcén	0,5	3,4	6,5	7,0	10,7

Nota: Si el carril está en pendiente, la distancia de parada segura debe incrementarse.

Tabla 14. Distancias de visibilidad en función del despeje lateral.

Distancia de visibilidad proporcionada (m)					
Zona exterior disponible (m)	Radio de curvatura (m)				
	100	160	260	470	800
1	45	57	72	97	127
2	53	67	86	115	150
3	61	76	97	130	170
4	67	85	108	144	188

Nota: Las distancias del cuadro consideran que el conductor está situado a 1,5 m del borde exterior del carril.

Tabla 15. Velocidades máximas, según el radio de curvatura y el despeje.

Máxima velocidad segura (km/h)					
Zona exterior disponible (m)	Radio de curvatura (m)				
	100	160	260	470	800
1	40	50	60	70	80
2	50	55	65	80	90
3	55	60	70	85	95
4	55	65	80	90	100

Nota: Las velocidades están calculadas con las condiciones indicadas anteriormente.

Nota: Si el carril desciende, la máxima velocidad segura debe disminuirse.

planearse teniendo en cuenta la presencia de la barrera.

- Las barreras pueden hacer más difícil el acceso de los vehículos de emergencia.
- Cuando se ha decidido instalar barreras en la mediana de un túnel, debe indicarse que el funcionamiento del túnel se simplifica en gran medida si el tipo de barrera adoptado es rígido (barrera de hormigón), debido principalmente a que dicho tipo de barrera requiere mucho menos mantenimiento que la flexible metálica.
- La barrera de tipo rígido es mucho más segura que la flexible para accidentes de turismos, e incluso de vehículos pesados, puesto que es mucho más difícil el que sea franqueada. Dado que la mayor parte de las colisiones serán con ángulos pequeños, no resulta tan crítica la ventaja de redireccionamiento que proporciona la barrera flexible.
- Otra posibilidad es la instalación de barreras rígidas desmontables, formadas por piezas apoyadas en el pavimento y unidas entre sí para mejorar la respuesta a la colisión.
- Aunque su efecto sea óptico, en vez de una contención física real, la utilización para la separación de ambos sentidos de circulación de marcas viales rugosas, ojos de gato o balizas, mejora considerablemente la seguridad en el túnel. El único efecto indeseable de estas medidas son los daños a vehículos o los accidentes que pueden causar en caso de eventuales desprendimientos por arrollamiento, por lo que conviene elegirlos considerando esta posibilidad.
- La utilización de este tipo de barreras debe de ser sólo de forma temporal, por operaciones de mantenimiento o por alguna otra razón. En caso de necesidad permanente, conviene plantearse la opción de dos túneles unidireccionales.

Tabla 16. Comparación internacional de gálibos permanentes (disponibles).

País y denominación de la normativa o recomendación	Gálibo mínimo sobre la calzada (m)	Gálibo permanente (libre disponible) sobre la calzada (m)	Margen adicional de seguridad para señales, luminarias, ventiladores etc. (m)	Holgura para señales, luminarias, ventiladores, etc. (m)	Holguras para futuros refuerzos del pavimento (m)
Austria RVS 9.232		4,70	n.e.	min. 0,20	n.e.
Dinamarca (práctica habitual)	n.e.	4,60	0,20	n.e.	n.e.
Francia CETU		4,50 (carreteras internacionales) 4,75 (vías principales)	0,10	n.e.	0,05 – 0,10
Alemania RAS-Q1996/RABT 94	4,20	4,50	n.e.	n.e.	n.e.
Japón (Road Structure Ordinance)		4,50	n.e.	n.e.	n.e.
Holanda ROA	4,20	4,50	0,20	0,30	n.e.
Noruega. Design Guide Road Tunnels	n.e.	4,60	0,10	n.e.	0,10
España Norma 3.1-IC	n.e.	5,00	n.e.	n.e.	n.e.
Suecia Tunnel 99		4,50	0,20	0,40	
Suiza (túneles rectangulares)	n.e.	4,50	0,20	0,40	
Suiza (túneles ovales)	n.e.	4,50			
Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2)	5,10	5,35	0,25	0,40	n.e.
Estados Unidos AASHTO	n.e.	4,90 (autopistas) 4,30 (otras vías)	n.e.	n.e.	n.e.

n.e. = no especificado

7.8 Gálibo vertical

La siguiente tabla muestra una relación de los gálibos y las holguras utilizadas en diversos países.

(tabla 16)

- El gálibo mínimo sobre la calzada debe ser al menos igual a la máxima altura de diseño de los vehículos pesados que esté permitida en la carretera, incrementada con el espacio necesario para permitir los movimientos dinámicos de los vehículos debido a las irregula-

ridades del pavimento y a la suspensión. Este espacio adicional tiene una función similar a la diferencia entre el ancho de los carriles y el ancho de los vehículos. En la Unión Europea la máxima altura de los vehículos pesados es 4,00 m. Si a esta altura máxima se le añade un margen de 0,20 m para absorber los movimientos verticales de los vehículos la mínima altura requerida es 4,20 m.

- Adicionalmente a este mínimo, se requiere un espacio extra

para que los conductores los de camiones se sientan cómodos. Dicho margen de comodidad es equivalente a la distancia horizontal hasta los obstáculos. El gálibo mínimo más la altura adicional de margen de confort da como resultado el gálibo permanente (libre disponible). Si para este margen de comodidad o distancia a los objetos se toma un valor de 0,30 el gálibo permanente (libre disponible) es al menos 4,50 m.

- Para prevenir daños en el equipamiento suspendido sobre la calzada, por ejemplo a causa de lonas sueltas, a menudo se aplica una holgura adicional.
- Finalmente hay que prever también un margen por las inexactitudes en la construcción, curvatura del techo y un posible pavimento posterior.

Como resultado de estas consideraciones se debe concluir que:

- El gálibo permanente (libre disponible) es la suma de la altura de diseño de los vehículos pesados, asumiendo un espacio necesario para los movimientos dinámicos y una distancia de confort en la conducción.
- Esta altura tiene que ser incrementada con holguras para prevenir daños al equipamiento, futuras capas de refuerzo del pavimento, y para tener en cuenta las inexactitudes de la construcción.

8. Elementos especiales

El diseño de la entrada y la salida de un túnel debe cuidarse especialmente. Se trata, como ya se ha indicado anteriormente, de zonas con concentración de accidentes y, en todo caso, son zonas en las que cambian rápidamente las condiciones de iluminación.

Debe procurarse que la forma, el balizamiento y la iluminación de las bocas no causen distracciones, sino que, más bien, centre la atención de

los conductores, y mejoren el guiado hacia el centro del carril.

Cualquier disposición que suavice los cambios en el nivel de iluminación, como una zona de transición en el exterior del túnel, mediante un falso túnel con aberturas en la bóveda cada vez más reducidas, mejora efectivamente la adaptación luminosa en la zona de entrada. Igualmente, la mejora de las marcas viales y el diseño de la boca sin elementos que distraigan excesivamente la atención, pueden ayudar a mejorar la seguridad. Según un estudio austriaco, las entradas de los túneles de colores claros y con un cierto abocinamiento son los que dan una mayor sensación de seguridad y de guiado a los conductores, mientras que las entradas oscuras y las que están rodeadas de un muro o frontal muy visible y perpendicular a la dirección de la circulación son las que se perciben como menos seguras [10].

Cualquier variación en el número de carriles en el interior de un túnel debe ser únicamente una solución excepcional, dado que puede producir maniobras repentinas y forzadas y cambios en el flujo de tráfico. Si la calzada debe perder un carril, se recomienda que no lo haga en el interior del túnel. Sin embargo, existen casos en los que la calzada debe ganar un carril, coincidiendo con un incremento en la pendiente longitudinal, al efecto de no producir un punto de restricción de capacidad en el interior del túnel. En este caso es mejor iniciar igualmente el carril lento antes de empezar el túnel y, si no es posible, la zona de ensanchamiento debe ser objeto de un estudio de visibilidad, balizamiento y señalización especial.

En general, las incorporaciones y salidas de la calzada en túneles son también disposiciones poco recomendables, dado que suelen ser, igualmente que a cielo abierto, zonas con elevado índice de accidentalidad. Algunas normas nacionales

prohíben estas disposiciones ([3], [5]). Sin embargo, pueden ser necesarias en algunos casos especiales, sobre todo en túneles en zonas urbanas. Cuando se proyecte alguno de estos casos debe hacerse un estudio específico de su trazado, visibilidad, iluminación y marcas viales, considerando la posibilidad de prolongar el carril de aceleración, en el caso de incorporaciones, o de deceleración, en el caso de salidas, hasta el exterior del túnel.

9. Operaciones de mantenimiento

La complejidad de las instalaciones en los túneles modernos requiere operaciones de mantenimiento constantes. Los dispositivos de seguridad a adoptar, incrementados en muchas normativas nacionales e internacionales tras los desgraciados accidentes ocurridos en los años 1999 y 2000, han dado lugar a niveles de equipamiento de complejidad creciente. Estos equipamientos precisan operaciones de verificación funcional, limpieza y mantenimiento necesarias para asegurar su correcto funcionamiento en todo momento. Por lo tanto es conveniente realizar un estudio previo de selección de los equipamientos a instalar en un túnel, atendiendo tanto a consideraciones técnicas, funcionales y económicas, como a las exigencias de mantenimiento que requieren.

Resulta especialmente importante prever las operaciones de mantenimiento que afecten a la circulación de los vehículos, dado que pueden ser causa de accidentes, tanto para los usuarios, como para los operarios del equipo de explotación. Si es posible, conviene utilizar disposiciones de los equipamientos que disminuyan la necesidad de operaciones que afecten a la circulación, o que expongan a riesgos a los operarios de mantenimiento. Muchas de estas disposiciones deben incluirse en el

Tabla 17. Velocidades máximas de circulación en zona de trabajos, según la normativa francesa.

Anchura de carril disponible	Velocidad máxima recomendada
3,50 m	La regulada en el túnel, o un máximo de 80 km/h
3,00 m	60 km/h
2,70 m	10 a 20 km/h
< 2,70 m	Circulación alternativa

proyecto de la infraestructura o de las instalaciones, dado que resulta caro y es, a veces, imposible realizar las correcciones necesarias cuando el túnel está en servicio.

- Conviene, por ejemplo, disponer los equipamientos en el túnel de modo que la mayor parte de las operaciones de mantenimiento puedan hacerse en locales técnicos, centros de transformación u otros lugares donde no sea necesario afectar a la circulación. Asimismo deben disponerse lugares de aparcamiento seguros para los vehículos del personal que vaya a realizar el mantenimiento con el fin de que las distancias que deban recorrer por las aceras sean reducidas.
- Los equipamientos cuyo mantenimiento deba afectar necesariamente a la circulación (luminarias, equipos de ventilación suspendidos en la bóveda, etc.) conviene situarlos de modo que se afecte lo menos posible a la zona de calzada.
- La existencia de una zona de trabajos en el interior de un túnel debe señalizarse intensivamente, y siempre debe iniciarse la preseñalización de las obras en el exterior en ambos sentidos.
- En la zona de trabajos, la velocidad debe regularse de acuerdo a la anchura efectiva de carril disponible. Dicha anchura disponible no incluye el espacio necesario para la señalización y el balizamiento en la zona de trabajos, ni el necesario para la protección de la obra. En la tabla siguiente, basada en la normativa francesa, se

indican las velocidades de circulación máximas que se recomiendan en función de la anchura de carril efectiva disponible.

(tabla 17)

- Algunos países tienen una limitación general para las zonas de trabajo, regulando las velocidades a una velocidad máxima entre 30 y 50 km/h.
- En el caso que la anchura disponible de los carriles no supere los 2,70 m, debe regularse la circulación de modo alternativo, en un solo sentido de marcha a la vez, mediante semáforos o barreras. La circulación alternativa conviene establecerla a lo largo de todo el túnel, separando los carriles con conos o barreras ligeras, que se intensificarán con dispositivos adicionales al aproximarse y en la propia zona de obras. El paso alternativo reduce fuertemente la capacidad del túnel, en mayor medida cuanto más largo sea, ya que la detención en cada boca debe mantenerse durante todo el tiempo que se permita la circulación desde la boca contraria, y asimismo en el tiempo necesario para que el último vehículo del grupo recorra todo el túnel. Conviene reforzar la señalización desde unos 200 m antes de la zona de obras, con los medios de balizamiento adecuados y acordes a las disposiciones de cada túnel particular, aumentando la intensidad del nivel de iluminación en la zona, y con los mensajes de advertencia que se consideren convenientes.

10. Referencias

- [1] Cross section design for uni-directional road tunnels. C5 - WG4 Committee on Road Tunnels. 2001.
- [2] Norwegian Design Guide for Road Tunnels. 2002.
- [3] Design of Road Tunnels. (Draft 1998) and BD2 (DMRB 1.1) part III, and TD27/96 Cross sections and headrooms. UNITED KINGDOM.
- [4] Norma 3.1-IC Instrucción de Carreteras. Trazado. Ministerio de Fomento. ESPAÑA. Febrero 1996 (borrador). Diciembre 1999.
- [5] Dossier pilote des tunnels. Geometrie. CETU- 1990.
- [6] Pannes, accidents et incendies dans les tunnels routiers français. S. Lingelser CETU - 1998.
- [7] Road Safety in Tunnels. AIPCR C5 - WG4 Committee on Road Tunnels 1995.
- [8] Studies on Norwegian Road Tunnels. Norwegian Public Roads Administration. 1997.
- [9] Accidents i Incidents als Túnel de Vallvidrera. TABASA 1996 a 2001. España.
- [10] Psychological aspects of tunnel safety. Österreichische Autobahnen und Schnellstrassen. AG. 2002.
- [11] Driving behaviour and subjective experience. A driving simulator study. TNO Human Factors. The Netherlands. 2002.
- [12] Tyne & Wear Traffic Accident Data Unit. Report 2000. UK.
- [13] Fire and smoke control in road tunnels. C5 Committee PIARC - 1999.
- [14] HCM-1995. Highway Capacity Manual. Special Report 209. TRB. 1995.
- [15] HCM-2000. Highway Capacity Manual. TRB. 2000.
- [16] World Road Congresses; Technical Committee on Road Tunnels PIARC; Vienne 1979, Sydney 1983; Brussels 1987, Montreal 1995. ❖