

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 5. Proyecto de ejecución de un túnel



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología
de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

TEMA 5: PROYECTO DE EJECUCIÓN DE UN TÚNEL

5.1. Introducción.

5.2. Trazado.

5.3. Sección tipo.



«Cross-Section Rendering of State St. Subway» (1941).

<https://www.flickr.com/photos/ctaweb>.

<https://flic.kr/p/b8CWAT>.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/>.



«Waiting for the last train home-Estación de ferrocarril de Pradell de la Teixeta» (Tarragona, España). José Franganillo.

<https://www.flickr.com/photos/franganillo>.

<https://flic.kr/p/heiBaU>.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Los cuatro documentos fundamentales a considerar en los proyectos de túneles, al igual que en otros proyectos ingenieriles, son la **Memoria**, los **Planos**, el **Pliego** y el **Presupuesto**. Los dos primeros recogen el diseño de la obra, mientras que los dos últimos atienden a normas, recomendaciones, y la propia situación del mercado.

La interactividad con el entorno resulta superior con respecto a otras estructuras ingenieriles, jugando el propio macizo un papel de gran importancia, que puede condicionar la metodología y el sistema o procesos constructivos. Entre los aspectos que el proyectista debe tener en cuenta son:

- 🔗 **Objeto de la obra.**
- 🔗 **Geometría.**
- 🔗 **Geología y geotecnia.**
- 🔗 **Sistema constructivo.**
- 🔗 **Cálculo estructural.**
- 🔗 **Instalaciones.**
- 🔗 **Riesgos.**
- 🔗 **Financiación.**

COSTES APROXIMADOS DE UN TÚNEL (%)			
Datos del túnel	Longitud (m)	< 500	500 - 1500
	Sección (m ²)	90 - 105	100 - 120
Costes (%)	Excavación	30 - 40	40 - 50
	Sostenimiento	20 - 45	20 - 45
	Revestimiento y acabados	10 - 20	8 - 15
	Impermeabilización	1 - 5	1 - 5
	Ventilación	0 - 3 - (8)	5 - 12
	Iluminación	4 - 10	8 - 12
	Suministro de energía	Variable	
	Inyecciones	1 - 5	1 - 5
	Otras instalaciones de control	Variable	
	Bocas	Variable	

Fuente: Romana García, M. (1998): «Túneles de carretera. Planificación, Trazado y Túneles Urbanos». En López Jimeno, C. (Ed.). «IngeoTúneles, Vol. 2».

Criterios para adoptar el túnel como alternativa

VENTAJAS

- 🗝 **Monteras superiores a 80-100 m en suelos y 50 en roca. (Orografía).**
- 🗝 **Ahorro de tiempo, manejando en algunos casos como criterio un ahorro de tiempo de 30 minutos sobre otras alternativas.**
- 🗝 **Exigencia de trazado asociada a la velocidad de la vía.**
- 🗝 **Evitar obstrucciones de paso por condiciones climáticas.**
- 🗝 **Protección de parajes de especial interés.**
- 🗝 **Menor impacto ambiental que el mismo trazado a cielo abierto.**
- 🗝 **Menor impacto visual.**
- 🗝 **Menor drenaje sobre el macizo que el mismo trayecto a cielo abierto, pero inferior que una carretera superficial.**

DESVENTAJAS

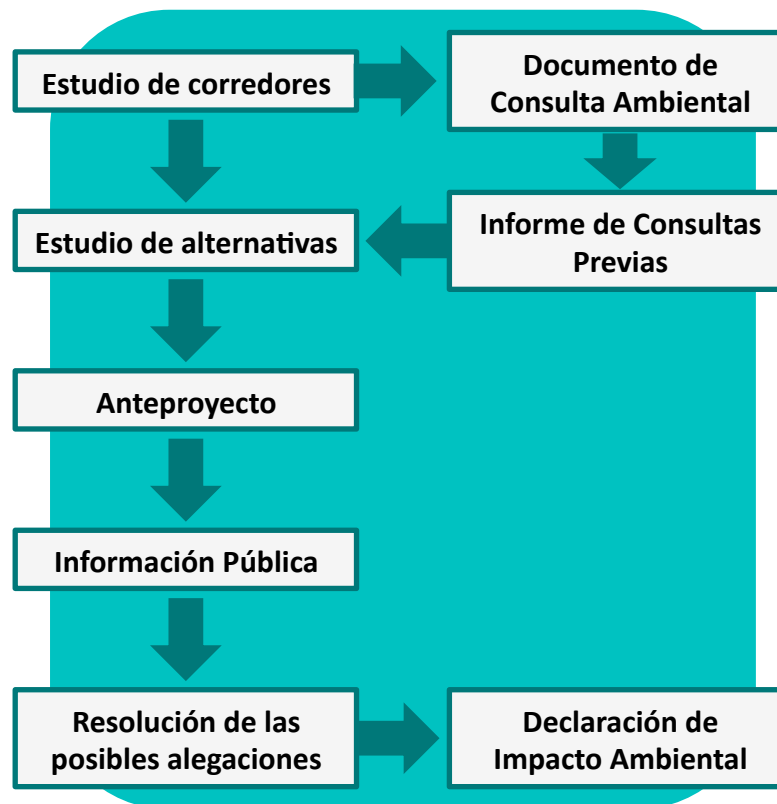
- 🗝 **Mayor coste de ejecución.**
- 🗝 **Mayores plazos que las obras a cielo abierto.**
- 🗝 **Mayores costes de explotación y conservación (equipos de mantenimiento, posible existencia de centro de control con personal, costes asociados al suministro eléctrico y de ventilación, etc.**

Introducción

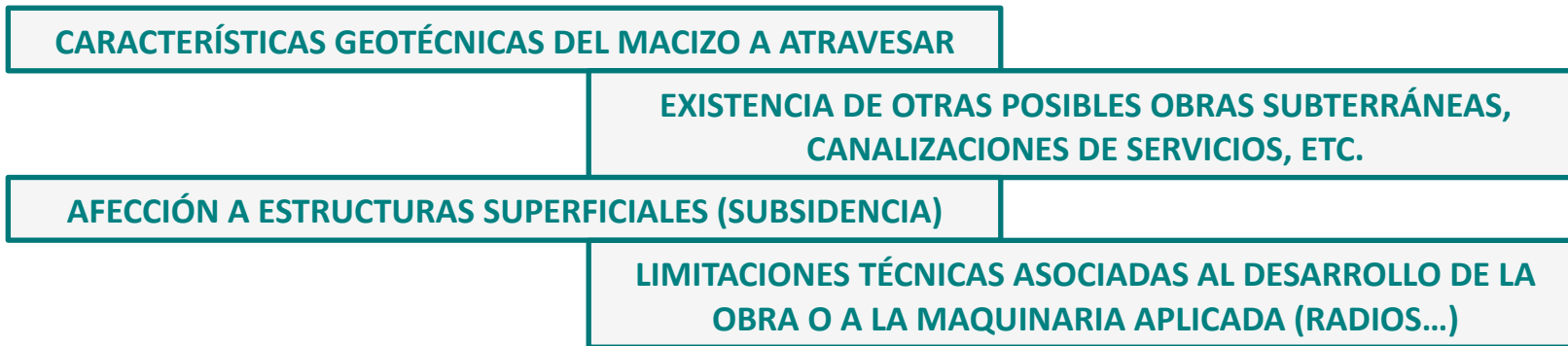
Fases del proyecto

- 🗑️ Estudios previos.
- 🗑️ Estudio Informativo.
 - Estudio de corredores. Escala 1:50 000.
 - Estudio de alternativas. Escala 1:25 000.
 - Anteproyecto. Escala 1:5 000.
- 🗑️ Declaración de Impacto Ambiental.

- ↓
- 🗑️ Proyectos Básico y de Construcción.
 - 🗑️ Ejecución de las obras.
 - 🗑️ Explotación.



Aspectos condicionantes en la determinación del trazado



Fuente: López Jimeno, C (1997): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Madrid: Entorno Gráfico. 1082 pp.

- ❖ El trazado no responde a un único planteamiento, dependiendo de la longitud, ubicación del túnel e incidencia en la ladera que vaya a afectarse. Resulta muy importante evitar pérdidas de trazado en la salida, ya que las modificaciones lumínicas dificultan la percepción de la vía, pudiendo ocasionar reducciones en la velocidad que redunden en la capacidad de túneles carreteros.
- ❖ La orientación del túnel juega un papel importante desde el punto de vista de la iluminación: el Azimut Este-Oeste hace la conducción más incomoda por la propia iluminación.
- ❖ En la medida de lo posible tratándose de túneles cortos (inferiores a 200 m), la alineación debe ser recta para favorecer la visión de la salida: se le indica al conductor que el cambio de condiciones será breve, puede percibir a contraluz objetos sobre la calzada, y la propia luz natural evitará deslumbramientos a la salida.
- ❖ Si la longitud es elevada (más de 1000 - 1500 m), es importante ubicar curvas en la boca para evitar deslumbramientos (facilitan la transición). Curvas intermedias son adecuadas en túneles muy largos para evitar la monotonía/somnolencia.

Trazado en planta. Consideraciones para túneles de carretera

TRAZADO EN PLANTA. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

ALINEACIÓN RECTA

La recta está indicada en carreteras de dos carriles para obtener suficientes oportunidades de adelantamiento y en cualquier tipo de carretera para adaptarse a condicionamientos externos obligados.

Para evitar problemas diversos (cansancio, deslumbramientos, excesos de velocidad, etc.), deben limitarse las longitudes máximas de las alineaciones rectas. Para que se produzca una acomodación y adaptación a la conducción es deseable establecer unas longitudes mínimas de las alineaciones rectas.

A efectos de la presente Norma 3.1-IC, las longitudes mínima admisible y máxima deseable, en función de la velocidad de proyecto, serán las dadas por las expresiones siguientes:

$$L_{\text{mín.s}} = 1,39 \cdot V_p$$

$$L_{\text{mín.o}} = 2,78 \cdot V_p$$

$$L_{\text{máx}} = 16,70 \cdot V_p$$

Donde :

- 🔗 **L_{mín.s} = longitud mínima (m) para trazados en «S».**
- 🔗 **L_{mín.o} = longitud mínima (m) para el resto de casos (alineación recta entre alineaciones curvas con radios de curvatura del mismo sentido).**
- 🔗 **L_{máx} = longitud máxima (m).**
- 🔗 **V_p = velocidad de proyecto (km/h).**

Vp (km/h)	Lmín.s (m)	Lmín.o (m)	Lmáx (m)
40	56	111	668
50	69	139	835
60	83	167	1002
70	97	194	1169
80	111	222	1336
90	125	250	1503
100	139	278	1670
110	153	306	1837
120	167	333	2004

Trazado en planta. Consideraciones para túneles de carretera

TRAZADO EN PLANTA. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

ALINEACIÓN CURVA

Fijada una cierta velocidad de proyecto, el radio mínimo a adoptar en las curvas circulares se determinará en función de:

- ❖ El peralte y el rozamiento transversal movilizado.
- ❖ La visibilidad de parada en toda su longitud.
- ❖ La coordinación del trazado en planta y alzado, especialmente para evitar pérdidas de trazado.

El desarrollo mínimo de la curva será una variación de acimut entre sus extremos mayor o igual que **veinte gonios (20 gon)**, pudiendo aceptarse valores entre veinte gonios (20 gon) y nueve gonios (9 gon) y sólo excepcionalmente valores inferiores a nueve gonios (9 gon).

RELACIÓN VELOCIDAD ESPECÍFICA - RADIO - PERALTE
PARA AUTOPISTAS, AUTOVÍAS, VÍAS RÁPIDAS
Y CARRETERAS C-100 (GRUPO 1)

VELOCIDAD ESPECÍFICA (km/h)	RADIO (m)	PERALTE (%)
80	250	8
85	300	8
90	350	8
95	400	8
100	450	8
105	500	8
110	550	8
115	600	8
120	700	8
125	800	7,51
130	900	6,97
135	1050	6,25
140	1250	5,49
145	1475	4,84
150	1725	4,29

RELACIÓN VELOCIDAD ESPECÍFICA - RADIO - PERALTE
PARA CARRETERAS C-80, C-60 Y C-40
(GRUPO 2)

VELOCIDAD ESPECÍFICA (km/h)	RADIO (m)	PERALTE (%)
40	50	7
45	65	7
50	85	7
55	105	7
60	130	7
65	155	7
70	190	7
75	225	7
80	265	7
85	305	7
90	350	7
95	410	6,5
100	485	5,85
105	570	5,24
110	670	4,67

Trazado en planta. Consideraciones para túneles de carretera

TRAZADO EN PLANTA. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

CURVAS DE TRANSICIÓN

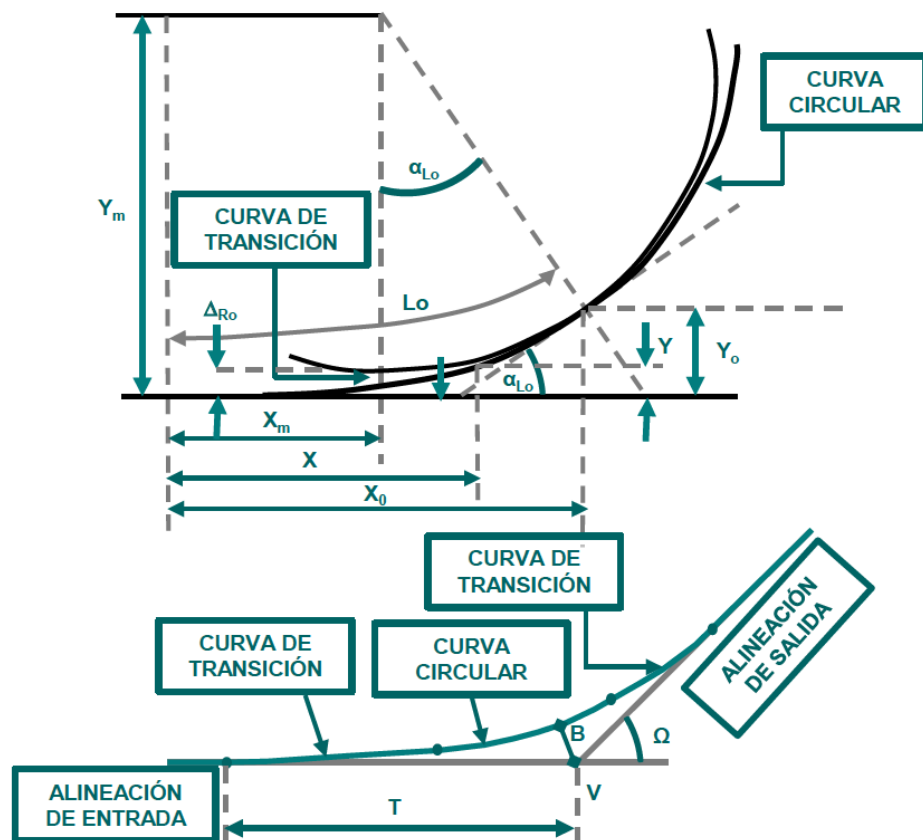
Las curvas de transición evitan las discontinuidades en la curvatura de la traza, por lo que deben ofrecer las mismas condiciones de seguridad, comodidad y estética que el resto de los elementos del trazado.

Se adoptará en todos los casos como curva de transición la clotoide, cuya ecuación intrínseca es:

$$R \cdot L = A^2$$

Donde:

- R = radio de curvatura en un punto cualquiera.
- L = longitud de la curva entre su punto de inflexión ($R = \infty$) y el punto de radio R.
- A = parámetro de la clotoide, característico de la misma.



Trazado en planta. Consideraciones para túneles ferroviarios

El trazado se apoyará igualmente en tramos rectos (ideales), alineaciones curvas circunferenciales y curvas de transición (clotoides).

ALINEACIONES CURVAS

Los radios en las curvas se limitan con el fin de reducir el riesgo de descarrilamiento, los desplazamientos en la vía como consecuencia de la fuerza transversal realizada por el vehículo sobre los raíles, y las aceleraciones laterales que reducen el confort de los viajeros. Los radios mínimos serán función de la velocidad de tránsito por el carril.

VELOCIDAD (Km/h)	ANCHO DE VÍA (mm)	RADIO MÍNIMO (m)
140	1668	1000
160	1668	1300
200	1668	2000
200	1435	2100
250	1435	3300
300	1435	4700

TIPO DE LÍNEA	RADIO NORMAL (m)
Línea convencional	1000 - 4000
Línea de alta velocidad	5000 - 7000

Radio mínimos según normativa RENFE: NRV 0200, NVR 0201. Fuente: Zuferrí Arqué, D. (2010): «Experiencia en la Construcción de túneles en líneas de Alta Velocidad». UPC.

Trazado

Trazado en alzado

CARRETERAS ORDINARIAS

Por lo general los túneles presentan tráfico en los dos sentidos. Rampas superiores al 5% dificultan la ventilación, siendo éste el límite admisible, marcado igualmente por la seguridad en la circulación descendente.

AUTOVÍAS

Por lo general los túneles presentan circulación en un único sentido. Para túneles de más de medio kilómetro de longitud se recomiendan pendientes ascendentes de no más del 2%, que podrían alcanzar en tramos concretos cortos el 4%. Cifras superiores complican la ventilación y conllevan disminuciones en las velocidades medias, circunstancia que se debe tratar de evitar en este tipo de vías. En el caso de circulación descendente, no conviene superar el 2% por cuestiones de seguridad, debiendo reducir la velocidad límite en caso de requerir incrementarla por encima de dicho umbral.

FERROCARRILES

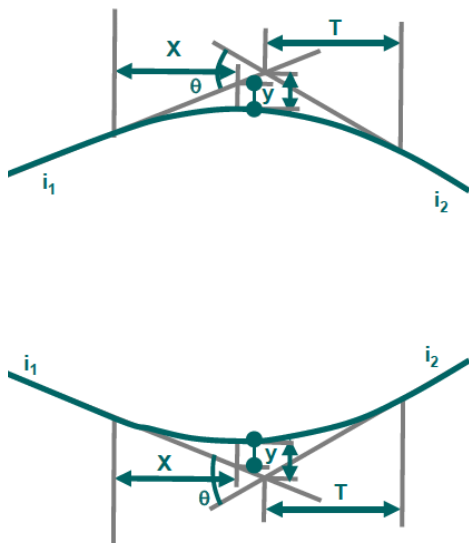
Pueden establecerse como valores orientativos máximos el 2,0% en tramos largos, y un máximo del 3 - 4% en tramos cortos, siendo esto último frecuente en puntos singulares de ferrocarriles metropolitanos. Para alta velocidad las pendientes se deben mantener por debajo del 1%, con radios superiores a los 2000 metros.

Fuente: Zuferrri Arqué, D. (2010): «Experiencia en la Construcción de túneles en líneas de Alta Velocidad». UPC.

PENDIENTES MÁXIMAS RECOMENDABLES (‰)		
Línea convencional	≤ 140 km/h	20
	≈ 160 km/h	15
	≈ 200 km/h	16
Línea de alta velocidad	Tráfico de viajeros	25
	Tráfico mixto	15

Trazado en alzado. Consideraciones para túneles de carretera

JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE UNIFORMIDAD EN LA PENDIENTE



$$y = \frac{x^2}{2 \cdot Kv}$$

En la medida de lo posible deben evitarse los **acuerdos verticales** (tanto cóncavos y convexos), salvo que no existan puntos altos o bajos (mínimos o máximos relativos o absolutos a lo largo del trazado del túnel), que el parámetro del propio acuerdo sea muy grande, evitando pérdidas de trazado y claustrofobia.

Los puntos altos suponen zonas para la acumulación de aire caliente y viciado, dificultando la ventilación.

Los puntos bajos a lo largo del trazado dificultan el drenaje e incrementan la sensación de confinamiento, dificultando además la evacuación de vehículos averiados sin remolque.

La necesidad de una uniformidad en la pendiente responde a varios aspectos, particularmente en túneles largos:

Vp (km/h)	MÍNIMO		DESEABLE	
	Kv CONVEXO (m)	Kv CÓNCAVO (m)	Kv CONVEXO (m)	Kv CÓNCAVO (m)
120	15276	6685	30780	9801
100	7125	4383	15276	6685
80	3050	2636	7125	4348
60	1085	1374	3050	2636
40	303	568	1085	1374

TRAZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

Trazado en alzado. Consideraciones para túneles ferroviarios

JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE UNIFORMIDAD EN LA PENDIENTE

🐼 En trazados ferroviarios los acuerdos verticales circulares son más comunes que los parabólicos.

RADIOS DE CURVATURA EN TRANSICIÓN VERTICAL RECOMENDABLES		
TIPO DE LÍNEA	VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN (km/h)	RADIO (m)
Línea convencional	80	3200
	100	5000
	140	9800
Línea de alta velocidad	300	45000
	350	61250

Fuente: Gómez Ruano, A. (2010): «Las líneas de Alta Velocidad frente a las convencionales. Adaptación de las líneas convencionales a Velocidad Alta». UPC.

Trazado en alzado. Consideraciones para túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

5.2.3. TÚNELES

«Los túneles de longitud igual o menor que quinientos metros (500 m) tendrán una sola inclinación de la rasante, salvo justificación en contrario.

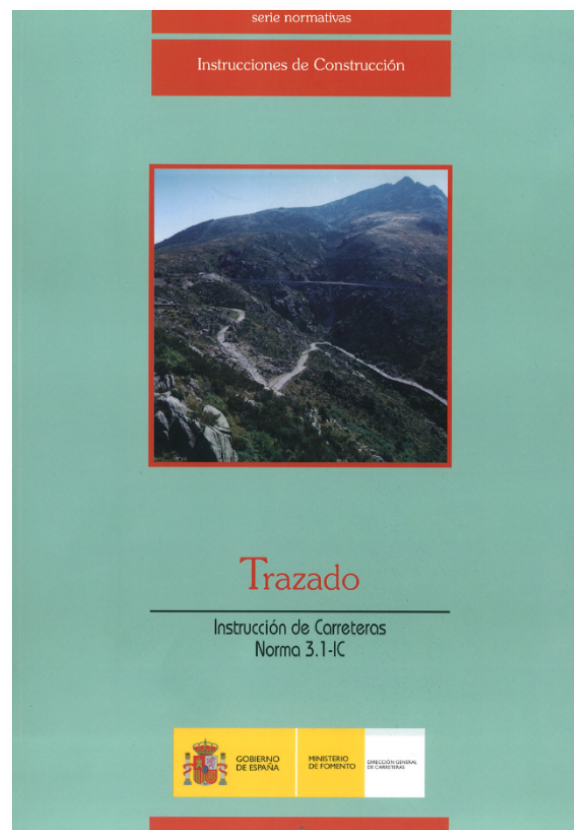
En carreteras de calzadas separadas, se evitarán rampas mayores del tres por ciento (3%), y pendientes mayores del cinco por ciento (5%). En carreteras de calzada única, se evitarán inclinaciones de rasante mayores del tres por ciento (3%).

Cuando la longitud del túnel sea mayor que quinientos metros (500 m), la inclinación de la rasante será objeto de un estudio específico.

En general, la combinación de inclinación y longitud de las rampas en túneles, deberá ser tal que no obligue al diseño de carriles adicionales.

En cualquier caso, salvo justificación en contrario, el trazado en alzado del túnel será tal que en toda su longitud la velocidad de los vehículos pesados no sea inferior a sesenta kilómetros por hora (60 km/h).

Se establecerán carriles adicionales según lo previsto en el apartado 7.4.3 de la presente Norma».



La sección tipo de un túnel está condicionada tanto por el gálibo funcional necesario como por la forma óptima desde una óptica geotécnica, que buscará aproximarse (sección circular). La funcionalidad que vaya a darse a la obra condiciona de forma significativa el gálibo, por lo que habrán de tenerse en cuenta una serie de consideraciones propias de los túneles de carretera, otras asociadas a los ferroviarios, y habrá otras que serán de común aplicación a ambos.

CONSIDERACIONES PARA LA SECCIÓN EN TÚNELES DE CARRETERA

Deberán tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- ❁ Gálibos requeridos por tráfico, necesidades de aceras o arcenes, espacios de servicios, drenajes, etc.
- ❁ Necesidad de ventilación, especialmente para longitudes > 250 m. Implica reservar espacio para ventiladores o conductos de aire.
- ❁ En grandes autopistas, la circulación en dos carriles requiere una luz de excavación máxima recomendable no debe pasar de los 20 m (esto admite 3 carriles de 3,50 m de ancho más: 1 carril de incidencias y arcenes laterales. Tanto hacia la acera como hacia el bordillo). Esto se debe a que el coste es superior si se superan los 20 m que si se construye un túnel paralelo.



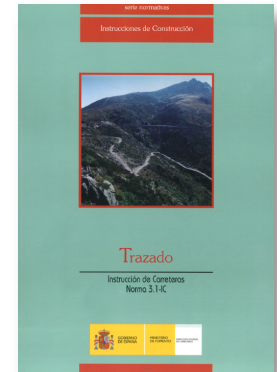
«Túnel en la AP-9 sentido Ferrol». Robert.
<https://www.flickr.com/photos/robertrd>.
<https://flic.kr/p/auhiwr>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/>.

Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.3.7. ALTURA LIBRE

«En túneles la altura libre no será inferior a cinco metros (5 m) en ningún punto de la plataforma ni en las zonas accesibles a los vehículos. Cualquier modificación de las alturas libres mínimas prescritas en este apartado deberá ser debidamente justificada».



7.4. SECCIONES TRANSVERSALES ESPECIALES

«Se considerarán secciones transversales especiales las que se indican a continuación:

- 👉 **Túneles.**
- 👉 **Obras de paso.**
- 👉 **Carriles adicionales.**
- 👉 **Carriles de cambio de velocidad.**
- 👉 **Confluencias y bifurcaciones.**
- 👉 **Carriles de espera.**
- 👉 **Pasos de mediana.**
- 👉 **Lechos de frenado».**

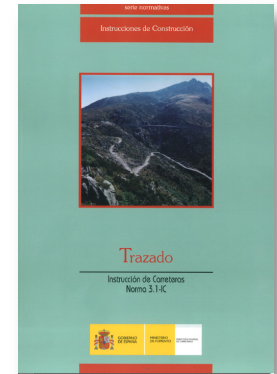
«Sin perjuicio de otras limitaciones más restrictivas (7.4.5) y salvo debida justificación, no podrá realizarse ningún tipo de conexión, nudo o glorieta en la calzada, ni modificación del número de carriles, en los doscientos cincuenta metros (250 m), anteriores o posteriores, del inicio y final de un tramo afectado en toda su longitud por una de las secciones transversales especiales siguientes:
– Túneles(...)».

Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4. SECCIONES TRANSVERSALES ESPECIALES

«Dadas las dificultades que en general se presentan en la ampliación de túneles y de determinadas obras de paso, se deberá tener en cuenta en la definición de las secciones transversales que en dichas obras el año horizonte se sitúa con posterioridad a los veinte (20) años después de la entrada en servicio indicados en el apartado 7.1. No obstante, además de esta consideración, se podrán tener en cuenta otros criterios suficientemente justificados que permitan su optimización».



7.1. GENERALIDADES

La sección transversal se fijará en función de la intensidad y composición del tráfico previsible en la hora de proyecto del año horizonte, situado veinte (20) años después de la entrada en servicio. En cada caso deberá justificarse la hora de proyecto adoptada, que no será inferior a la hora treinta (30) ni superior a la hora ciento cincuenta (150)*. Se considerará justificación suficiente de las características generales de la sección transversal (no de las características de detalle), el que éstas se hayan definido en un estudio de carreteras debidamente aprobado.

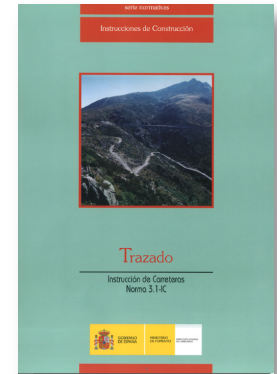
*** Intensidades superadas solo durante 30 Y 150 horas al año.**

Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4. SECCIONES TRANSVERSALES ESPECIALES

«Dadas las dificultades que en general se presentan en la ampliación de túneles y de determinadas obras de paso, se deberá tener en cuenta en la definición de las secciones transversales que en dichas obras el año horizonte se sitúa con posterioridad a los veinte (20) años después de la entrada en servicio indicados en el apartado 7.1. No obstante, además de esta consideración, se podrán tener en cuenta otros criterios suficientemente justificados que permitan su optimización».



7.4.1. TÚNELES

«En los túneles, salvo expresa justificación en contrario, se adoptarán las siguientes secciones»:

CARRETERAS DE CALZADAS SEPARADAS

Calzada con dos carriles sin previsión de ampliación

Calzada con dos carriles con previsión de ampliación

Calzada de tres carriles

Sección tipo

Consideraciones para la sección en túneles de carretera

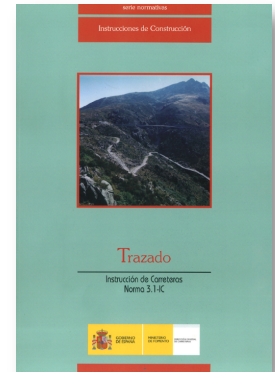
TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4.1. TÚNELES

CARRETERAS DE CALZADAS SEPARADAS

Calzada con dos carriles sin previsión de ampliación

«La sección tipo estará formada por: arcén 1,0 m + 2 carriles de 3,5 m + arcén 2,5 m = 10,5 m (esta sección permitiría el paso de tres (3) carriles sin arcenes). Para los túneles en los que la velocidad esté limitada o controlada mediante señalización variable, con tráfico poco intenso (saturación a más de 20 años) o en terrenos geológicamente desfavorables se podrá justificar la reducción a una sección más estricta no inferior a: arcén 0,5 m + 2 carriles de 3,5 m + arcén 1,0 m = 8,5 m. Aunque no se permita el tránsito de peatones, se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho, para facilitar las operaciones de conservación».



Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4.1. TÚNELES

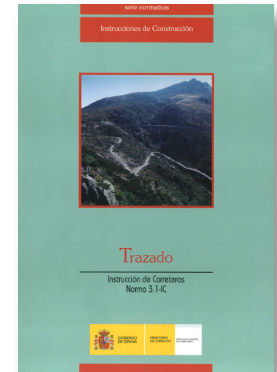
CARRETERAS DE CALZADAS SEPARADAS

Calzada con dos carriles con previsión de ampliación

«La sección tipo una vez ampliada será: arcén 1,0 m + 3 carriles de 3,5 m + arcén 1,0 m = 12,5 m. Antes de la ampliación se dispondrá dentro de la plataforma de 12,5 m una sección de: arcén 1,0 m + 2 carriles de 3,5 m + arcén 2,5 m = 10,5 m. Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».

Calzada de tres carriles

«La sección tipo será:
Arcén 1,0 m + 3 carriles de 3,5 m + arcén 1,0 m = 12,5 m.
Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».



Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4.1. TÚNELES

CARRETERAS DE CALZADA ÚNICA

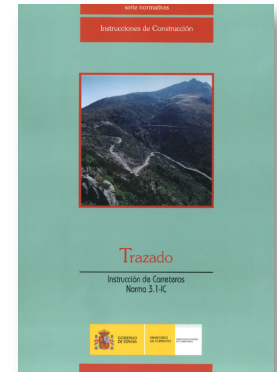
«La sección tipo será simétrica, sin espacio para la detención de un vehículo en el arcén; se incluirá en las vías rápidas y en las carreteras C-100 y C-80 una zona intermedia cebreada en la que no se permitirá la circulación de vehículos, que evite la reducción excesiva de velocidad y reduzca la posibilidad de invasión del carril contrario. La sección tipo será»:

Vías rápidas

«Arcén 1,0 m + carril 3,5 m + zona intermedia 1,5 m + carril 3,5 m + arcén 1,0 m = 10,5 m. Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».

Carreteras convencionales C-100 y C-80

«Arcén 1,0 m + carril 3,5 m + zona intermedia 1,0 m + carril 3,5 m + arcén 1,0 m = 10,0 m. Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».



Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4.1. TÚNELES

CARRETERAS DE CALZADAS SEPARADAS

Carreteras convencionales C-60

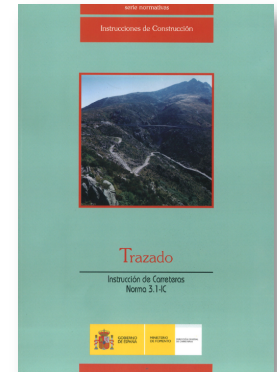
«Arcén 1,0 m + 2 carriles de 3,5 m + arcén 1,0 m = 9,0 m. Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».

Carreteras convencionales C-40 con carriles de 3,50 m

«Arcén 0,50 m + 2 carriles de 3,5 m + arcén 0,50 m = 8,0 m. Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».

Carreteras convencionales C-40 con carriles de 3 m

«Se dispondrán a ambos lados aceras elevadas de setenta y cinco centímetros (75 cm) de ancho».



Consideraciones para la sección en túneles de carretera

TRAZADO EN ALZADO. INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, NORMAS 3.1-IC

7.4.1. TÚNELES

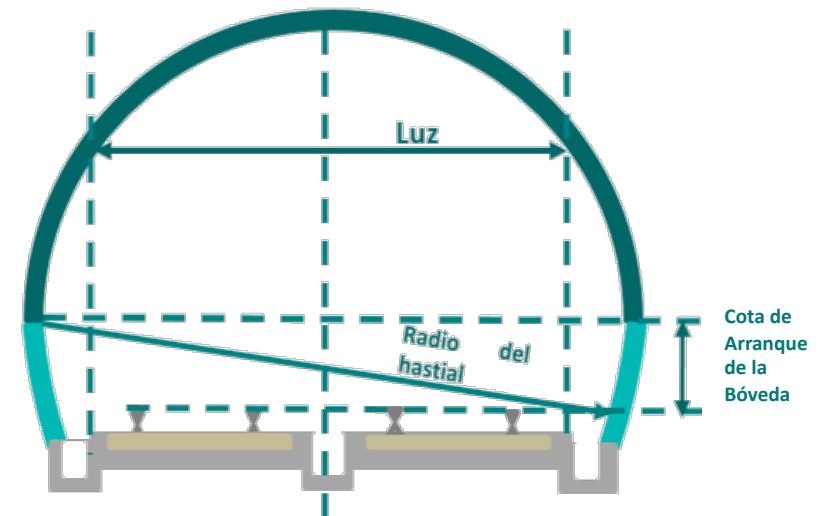
TIPO CARRETERA		SECCIÓN NORMAL*	TÚNELES
CALZADAS SEPARADAS	2 Carriles sin posible ampliación Excepción	$1,0 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 10,5$	$1,0 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ $0,5 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 8,5$
	2 Carriles con posible ampliación	$1,0 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 10,5$ $1,0 / 3 \times 3,5 / 2,5 = 14,0$ Ampliada	$1,0 / 3 \times 3,5 / 1,0 = 12,5$
	3 Carriles	$1,0 / 3 \times 3,5 / 2,5 = 14,0$	$1,0 / 3 \times 3,5 / 1,0 = 12,5$
VÍAS RÁPIDAS		$2,5 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 12,0$	$1,0 / 3,5 / 1,5 / 3,5 / 1,0 = 10,5$
CARRETERAS CONVENCIONALES	C-100 con arcenes de 2,50 m	$2,5 / 2 \times 3,5 / 2,5 = 12,0$	$1,0 / 3,5 / 1,0 / 3,5 / 1,0 = 10,0$
	C-100 con arcenes de 1,50 m C-80	$1,5 / 2 \times 3,5 / 1,5 = 10,0$	$1,0 / 3,5 / 1,0 / 3,5 / 1,0 = 10,0$
	C-60 con arcenes de 1,50 m	$1,5 / 2 \times 3,5 / 1,5 = 10,0$	$1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$
	C-60 con arcenes de 1,00 m	$1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$	$1,0 / 2 \times 3,5 / 1,0 = 9,0$
	C-40 con carriles de 3,50 m	$0,5 / 2 \times 3,5 / 0,5 = 8,0$	$0,5 / 2 \times 3,5 / 0,5 = 8,0$
	C-40 con carriles de 3,00 m	$0,5 / 2 \times 3,0 / 0,5 = 7,0$	$0,5 / 2 \times 3,0 / 0,5 = 7,0$

*Anchuras de la plataforma de los túneles sin incluir las aceras elevadas.

Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios

La sección de un túnel deberá ser tal que su amplitud permita la adecuada circulación de los túneles por la misma. La determinación del gálibo puede resultar compleja, ya que deberán tenerse en cuenta muchos aspectos, tales como la propia suspensión de los vagones, que podría modificar el nivel al que el tren se encuentre. Entre los aspectos a considerar para definir la sección se pueden destacar:

- Plataforma de vía, sistema de toma de corriente, o gálibo cinemático de los equipos de mayor tamaño que puedan circular por la vía. En el caso de trenes de alta velocidad, el efecto de las ondas de presión ha de tenerse en cuenta con una mayoración adecuada.





TÚNELES DE VÍA SIMPLE

EJEMPLOS DE SECCIONES COMUNES

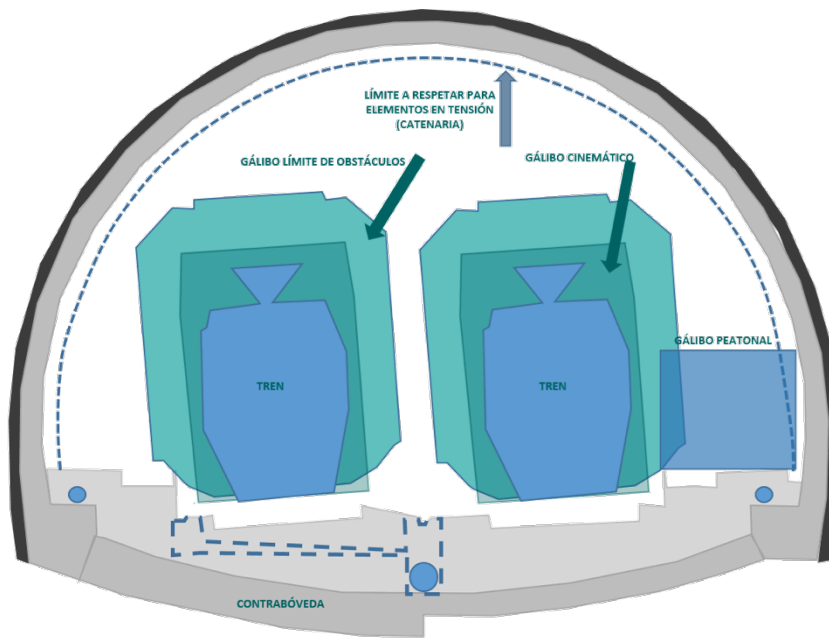
- Vía en recta:** luz = 5 m, altura de hastial sobre carriles: 2,75 m. Bóveda semicircular de 5 m de diámetro.
- Vía en curva:** es conveniente conservar la coincidencia del eje del túnel de trazado o de la vía. Túnel de 5,50 m de luz, con altura de hastial de 2,50 m sobre carriles, y bóveda semicircular de 5,50 m de diámetro.


Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios


TÚNELES DE VÍA DOBLE

-  **Vía en recta:** luz de 9 m, bóveda semicircular arrancando a 1,6 m sobre carriles y hastiales circulares de 9 m de radio.
-  **Vía en curva:** luz de 9,5 m, bóveda semicircular arrancando a 1,90 sobre carriles, con hastiales circulares (9,5 m de radio).

EJEMPLOS DE SECCIONES COMUNES



 **EL GÁLBO DE OCUPACIÓN CINEMÁTICO** tiene en cuenta el desplazamiento de un vehículo por una curva a una velocidad determinada y con una aceleración lateral no compensada, y además considera los desplazamientos cuasiestáticos producidos por una insuficiencia o exceso de peralte mayor de 50 mm.

 **GÁLBO LÍMITE DE OBSTÁCULOS** es propio de cada red y se emplea para que circulen por ella de forma excepcional ciertos vehículos ferroviarios.

Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios

La selección de las dimensiones del túneles debe basarse en **cri- terios económicos** asociados al coste de ejecución, limitándose de esta manera unas dimensiones máximas, pero además habrá de considerar el efecto de una serie de **fenómenos físicos** no deseados, como consecuencia del tránsito del tren a lo largo del túnel.



CRITERIO DE CONFORT



CRITERIO DE SALUD



La entrada en un túnel ocasiona una onda de presión que se desplazará hasta la salida, donde se refleja y retorna como una onda de depresión. El ingreso del vagón de cola produce una onda de depresión que al alcanzar la salida del túnel genera una onda de presión al ser reflejada. Este fenómeno acontece hasta que las ondas se amortiguan, y pueden producir molestias a los viajeros en los oídos.

«La sección geométrica mínima no deberá ser inferior a los 52 m², (diámetro aproximado de 8.50) en túneles de vía única, ni a 75 m² en los de vía doble (11,35 m de diámetro), ni a otros mínimos que pueda exigir cualquier normativa específica».

Fuente: «Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos sobre los viajeros». Ministerio de Fomento.

<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewFile/1322/1536>

PARÁMETROS INFLUYENTES

- 🛡️ **Dimensiones, aspectos aerodinámicos y estanqueidad del tren.**
- 🛡️ **Dimensiones y aerodinámica del túnel**
- 🛡️ **Velocidad del tren, cruces con otros trenes.**
- 🛡️ **Condiciones del aire.**



«AVE Class 100s at Seville St Justa». Matthew Black.

<https://www.flickr.com/photos/matthewblack>

<https://flic.kr/p/6821X9>

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>

Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios

CRITERIO DE CONFORT

El criterio de confort auditivo consiste en la limitación de la máxima variación de presión en un intervalo de 4 segundos. Se han establecido metodologías y límites propios para la evaluación para trenes estancos y no estancos, así como para túneles de simple y doble vía.

VELOCIDAD (km/h)	MÁXIMA VARIACIÓN DE PRESIÓN EN 4 SEGUNDOS DP(4) (Kpa)	TIPO DE TÚNEL	TIPO DE TREN
220 (Velocidad máxima de tren convencional no estanco)	2	Vía única	Tren convencional moderno no estanco, al ser más desfavorable que el de alta velocidad estanco
330/220, o sustituyendo la primera de las velocidades por la de proyecto en el túnel, incrementada en un 10% si el resultado es inferior a 300, con un mínimo de 220	4	Vía doble	Hipótesis de cruce de tren estanco con otro no estanco, siendo éste último el que recibe los efectos más desfavorables sobre los viajeros

Fuente: «Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos sobre los viajeros». Ministerio de Fomento.

Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios

CRITERIO DE CONFORT

El criterio de salud auditivo consiste en la limitación de la máxima variación de presión a lo largo del tiempo de tránsito del tren en el túnel. Se comprueba con un tren de 12 m², máxima sección prevista para tráfico de alta velocidad, y secciones de 100, 200 y 400 m. En el caso de los trenes de vía doble, con el fin de no sobredimensionar las secciones, se limitan las velocidades máximas de los trenes.

VELOCIDAD (km/h)	MÁXIMA VARIACIÓN DE PRESIÓN EN 4 SEGUNDOS DP(4) (Kpa)	TIPO DE TÚNEL	TIPO DE TREN
350 (Velocidad máxima de tren convencional no estanco)	10	Vía única	Tren de alta velocidad carenado no estanco
300, o sustituyendo la primera de las velocidades por la de proyecto en el túnel, incrementada en un 10% si es inferior a 300	10	Vía única	Cruce de dos trenes de alta velocidad carenados no estancos, con desfase pésimo

Fuente: «Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos sobre los viajeros». Ministerio de Fomento.

Sección tipo

Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios

CRITERIO DE SALUD

Variación máxima admisible de presión en el intervalo de tiempo de tránsito del tren en el túnel:
 $D_p (T) = 10 \text{ KPa}$.

VÍA SIMPLE

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel en m^2 para $D_p (T) \geq 10 \text{ Kpa}$ a distintas velocidades		
	V = 350 km/h	V = 380 km/h	V = 400 km/h
500	< 52	< 52	54
1000	< 52	< 52	52
1500	< 52	< 52	52
2000	< 52	< 52	< 52
3500		< 52	< 52
5000		< 52	< 52
7500			< 52
10 000			< 52

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel en m^2 para $D_p (T) \geq 10 \text{ Kpa}$ a distintas velocidades		
	V = 350 km/h	V = 380 km/h	V = 400 km/h
500	< 52	< 52	53
1000	< 52	< 52	55
1500	< 52	< 52	55
2000	< 52	< 52	53
3500	< 52	< 52	< 52
5000		< 52	< 52
7500		< 52	< 52
10 000			< 52

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel en m^2 para $D_p (T) \geq 10 \text{ Kpa}$ a distintas velocidades		
	V = 350 km/h	V = 380 km/h	V = 400 km/h
1000	< 52	< 52	60
1500	< 52	< 52	59
2000	< 52	< 52	56
3500	< 52	< 52	53
5000	< 52	< 52	< 52
7500		< 52	< 52
10 000			< 52

Tren de diseño:

- Longitud: $L_t = 100$ metros.
- Sección: $St = 12 \text{ m}^2$.
- Estanqueidad dinámica: $t_{din} = 0s$.

Tren de diseño:

- Longitud: $L_t = 200$ metros.
- Sección: $St = 12 \text{ m}^2$.
- Estanqueidad dinámica: $t_{din} = 0s$.

Tren de diseño:

- Longitud: $L_t = 400$ metros.
- Sección: $St = 12 \text{ m}^2$.
- Estanqueidad dinámica: $t_{din} = 0s$.

Sección tipo

Consideraciones para la sección en túneles ferroviarios

CRITERIO DE SALUD

Variación máxima admisible de presión en el intervalo de tiempo de tránsito del tren en el túnel:
 $D_p (T) = 10 \text{ KPa}$.

VÍA SIMPLE

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel en m ² para $D_p (T) \geq 10 \text{ Kpa}$ a distintas velocidades			
	V = 250 km/h	V = 300 km/h	V = 350 km/h	V = 400 km/h
200	< 75	< 75	< 75	117
500	< 75	< 75	94	118
1000	< 75	< 75	80	100
1500	< 75	< 75	< 75	98
2000	< 75	< 75	< 75	98
3500		< 75	< 75	93
5000		< 75	< 75	91
7500		< 75	< 75	80
10 000		< 75	< 75	75

Tren de diseño:

- Longitud: $L_t = 100$ metros.
- Sección: $St = 12 \text{ m}^2$.
- Estanqueidad dinámica: $t_{din} = 0s$.

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel en m ² para $D_p (T) \geq 10 \text{ Kpa}$ a distintas velocidades			
	V = 250 km/h	V = 300 km/h	V = 350 km/h	V = 400 km/h
200	< 75	< 75	< 75	80
500	< 75	75	104	133
1000	< 75	75	102	122
1500	< 75	< 75	89	120
2000	< 75	< 75	86	109
3500	< 75	< 75	77	109
5000	< 75	< 75	75	107
7500	< 75	< 75	75	100
10 000	< 75	< 75	< 75	96

Tren de diseño:

- Longitud: $L_t = 200$ metros.
- Sección: $St = 12 \text{ m}^2$.
- Estanqueidad dinámica: $t_{din} = 0s$.

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel en m ² para $D_p (T) \geq 10 \text{ Kpa}$ a distintas velocidades			
	V = 250 km/h	V = 300 km/h	V = 350 km/h	V = 400 km/h
200		< 75	< 75	81
500	< 75	< 75	94	94
1000	< 75	77	80	150
1500	< 75	86	< 75	155
2000	< 75	85	< 75	159
3500	< 75	83	< 75	131
5000	< 75	82	< 75	126
7500	< 75	76	< 75	123
10 000	< 75	< 75	< 75	117

Tren de diseño:

- Longitud: $L_t = 400$ metros.
- Sección: $St = 12 \text{ m}^2$.
- Estanqueidad dinámica: $t_{din} = 0s$.

Consideraciones generales

- ❁ Se debe respetar un margen para sostenimiento flexible de tipo medio que va aplicarse a la sección (8 - 10 cm a lo largo de una gran zona del túnel).
- ❁ El gálibo para el sostenimiento debe estimarse a priori. Debe ser siempre el máximo previsto en dicha sección tipo.
- ❁ Los espacios requeridos para los servicios en túneles de ferrocarril o de carretera pueden llegar a hacer precisa la construcción de un túnel o galería auxiliar de servicio.
- ❁ En túneles de gran longitud para carretera o ferrocarril está justificada la construcción de un túnel auxiliar paralelo para servir de obra piloto que permita conocer el terreno que atravesará la obra principal.
- ❁ En terrenos de calidad dudosa se opta por la construcción de túneles gemelos (*twin tunnels*), sobre todo si se añade la presencia de un nivel freático.
- ❁ El macizo de roca entre dos secciones contiguas no ha de ser inferior a los 2 diámetros (o 2 veces la dimensión mínima, normalmente la altura de la excavación).



«Hindhead Tunnel 12». Highways Agency.
<https://www.flickr.com/photos/highwaysagency/>
<https://flic.kr/p/eHWF1X>
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>

Consideraciones generales

En casos de túneles de sección pequeña (< 10 - 12 m²) además del gálibo funcional hay que considerar otros condicionantes que pueden resultar determinantes en los aspectos geométricos:

**CONDICIONANTES
CONSTRUCTIVOS**

Requerimientos mínimos impuestos por los propios equipos y servicios asociados a la ejecución de la obra

**CONDICIONANTES EN
EXPLOTACIÓN**

En determinadas circunstancias puede requerirse que la obra sea plenamente accesible por un vehículo para tareas de control y mantenimiento.

**CONDICIONANTES
GEOTÉCNICOS**

La poca competencia de los terrenos puede hacer necesario recurrir a geometrías ovaladas.

Sección tipo

Consideraciones generales

 **Requisitos en materia de seguridad pueden influir de forma sustancial en la sección de los túneles.**

REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

2.1. Número de tubos y carriles:

- 2.1.1. Los principales criterios para decidir si se construye un túnel de un tubo o de dos serán el volumen de tráfico previsto y la seguridad, teniendo en cuenta aspectos como el porcentaje de vehículos pesados, la pendiente longitudinal y la longitud.
- 2.1.2. En cualquier caso, tratándose de túneles que se encuentren en fase de proyecto, **cuando las previsiones al término de un periodo de 15 años muestren que el volumen de tráfico pudiese superar los 7.500 vehículos por día y carril, el túnel deberá disponer de al menos dos tubos de tráfico unidireccional en el momento en que se exceda dicho valor.**
- 2.1.3. Con excepción del carril de emergencia, se mantendrá el mismo número de carriles, tanto dentro como fuera del túnel. Cualquier cambio del número de carriles se producirá a una distancia suficiente de la boca del túnel. Esta distancia será, como mínimo, la distancia recorrida en 10 segundos por un vehículo que se desplace a la velocidad máxima autorizada. Si circunstancias geográficas impidiesen que pueda respetarse esta distancia, se tomarán medidas adicionales o reforzadas para aumentar la seguridad.

Sección tipo

Consideraciones generales

 **Requisitos en materia de seguridad pueden influir de forma sustancial en la sección de los túneles.**

REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

2.2. Geometría del túnel:

- 2.2.1.** Se tendrá especialmente en cuenta la seguridad al proyectar la geometría de la sección transversal y la alineación horizontal y vertical del túnel y sus vías de acceso, ya que sus parámetros tienen una gran influencia en la probabilidad y gravedad de los accidentes. Se cumplirán los criterios y especificaciones recogidas en la Norma de trazado 3.1-IC de la Instrucción de Carreteras.
- 2.2.2.** En los túneles con pendientes superiores al 3%, se adoptarán medidas adicionales o reforzadas, o ambas, para incrementar la seguridad, basándose en un análisis de riesgo.
- 2.2.3.** Cuando la anchura del carril para vehículos lentos sea inferior a 3,5 metros y se permita la circulación de vehículos pesados, se adoptarán medidas adicionales o reforzadas, o ambas, para incrementar la seguridad, basándose en un análisis de riesgo.
- 2.2.4.** Se estudiarán las medidas conducentes a eliminar o paliar el posible efecto del deslumbramiento del conductor del vehículo a la salida del túnel, en especial cuando la alineación de la vía en esta zona coincida con la orientación de los rayos solares en algunas horas del día. En general, no se proyectarán alineaciones en planta con orientación este-oeste.

Sección tipo

Consideraciones generales

 **Requisitos en materia de seguridad pueden influir de forma sustancial en las sección de los túneles.**

REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

2.4. Aceras:

- 2.4.1.** En los túneles nuevos sin carril de emergencia, se habilitarán aceras, preferentemente elevadas, para que los usuarios del túnel las empleen en caso de avería o accidente. Esto no será de aplicación cuando las características de la construcción del túnel no lo permitan o sólo lo permitan con costes desproporcionados y cuando el túnel sea unidireccional y disponga de vigilancia permanente y de sistema de cierre de los carriles.
- 2.4.2.** En los túneles ya existentes que no tengan ni carril de emergencia ni acera, se tomarán medidas adicionales o reforzadas para proporcionar seguridad.

2.5. Salidas de emergencia y vías de evacuación:

- 2.5.1.** Las salidas de emergencia permitirán a los usuarios del túnel utilizarlas para abandonar el túnel sin sus vehículos y llegar a un lugar seguro en caso de accidente o incendio y también proporcionarán acceso a pie a los servicios de emergencia del túnel. Dichas salidas podrán ser: salidas directas del túnel al exterior, conexiones transversales entre tubos de túnel, salidas a galería de emergencia.
- 2.5.2.** No se construirán refugios que carezcan de salida a vías de evacuación al exterior.
- 2.5.3.** En el diseño de las salidas de emergencia y vías de evacuación se prestará especial atención a la seguridad de las personas con discapacidad.

Consideraciones generales

 **Requisitos en materia de seguridad pueden influir de forma sustancial en las sección de los túneles.**

REAL DECRETO 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.

2.5. Salidas de emergencia y vías de evacuación:

- 2.5.4.** Además de los casos indicados en el apartado 2.2.1, se habilitarán salidas de emergencia en aquellos casos en que los análisis de riesgo pertinentes, entre ellos la extensión del humo y su velocidad de propagación en las condiciones locales, demuestren que la ventilación y demás medidas de seguridad son insuficientes para garantizar la seguridad de los usuarios del túnel. En los túneles existentes de longitud superior a 1000 metros se evaluará la viabilidad y eficacia de crear nuevas salidas de emergencia.
- 2.5.5.** En túneles unidireccionales, cuando se hayan habilitado salidas de emergencia, la distancia entre dos salidas consecutivas no superará en ningún caso los 400 metros en los túneles interurbanos sin retenciones y cada 200 metros en los túneles urbanos e interurbanos en los que se produzcan retenciones al menos 5 días al año y no dispongan de control de accesos.
- 2.5.6.** En túneles bidireccionales, cuando se habiliten salidas de emergencia, éstas se dispondrán cada 400 metros en los túneles interurbanos sin retenciones y cada 150 metros en los túneles urbanos y en los interurbanos en los que se produzcan retenciones al menos 5 días al año y no dispongan de control de accesos.
- 2.5.7.** Se impedirá por medios adecuados la propagación de humo y de calor a las vías de evacuación situadas tras las salidas de emergencia, de forma que los usuarios del túnel puedan llegar al exterior y los servicios de emergencia puedan acceder al túnel con seguridad.

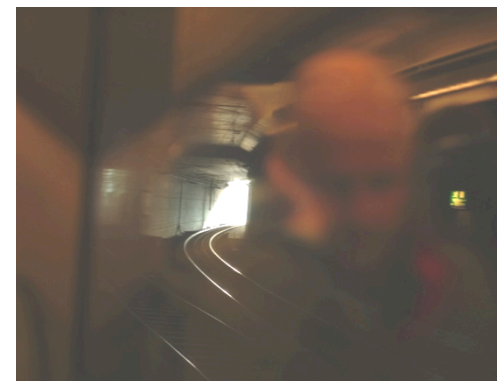
Consideraciones generales

- Requisitos en materia de seguridad pueden influir de forma sustancial en las sección de los túneles.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INTEROPERABILIDAD DE SEGURIDAD DE TÚNELES + IGP 2011 (ADIF)

- Salidas de emergencia en túneles cuya longitud supere 1 km:**
 - Espaciado entre pasillos transversales a otro túnel o galería: 400 m.
 - Separación entre salidas directamente conectadas al exterior: 1000 m.
 - Dimensiones mínimas de las galerías: 2,25 · 2,25.
- Zonas seguras/de rescate:**

Se dispondrán zonas de rescate de un mínimo de 500 m² cerca del túnel en las vías de acceso, (con espacio mínimo para 300 personas). Las vías existentes pueden considerarse zonas de rescate. Si el acceso a una carretera no es practicable dentro de lo razonable, se aportarán soluciones alternativas consultando a los servicios de rescate. Deberán contar con conexión con las bocas del túnel o con salidas de rescate.



«The railway branches south to Copenhagen airport. Next to that tunnel there is an emergency exit».
Sigfrid Lundberg.
<https://www.flickr.com/photos/sigfridlundberg>.
<https://flic.kr/p/mFBvti>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>.