



Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos de presión sobre viajeros



serie normativas

Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos de presión sobre viajeros



2011

Trabajo realizado por el Área de Supervisión y Apoyo Técnico de la Dirección General de Ferrocarriles del MINISTERIO DE FOMENTO, con la colaboración de RENFE y GIF.

Personal técnico que ha intervenido:

Ignacio Alonso Berrioategortua (Ministerio de Fomento)

Elías García González (Consultor)

Paloma Iribas Forcat (Ministerio de Fomento)

Antonio Lozano del Moral (RENFE)

José Antonio Mas González (GIF)

Julián Santos Mesa (Ministerio de Fomento)

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es>

Tienda virtual de publicaciones del Ministerio de Fomento:

www.fomento.es

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento©

NIPO:

Papel: 161-11-122-8

Línea: 161-11-121-2

INDICE

1. OBJETO	5
2. CONSIDERACIONES BÁSICAS	7
3. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO	9
3.1. Criterio de salud	9
3.1.1. Vía única	10
3.1.2. Vía doble	10
3.2. Criterio de confort	10
3.2.1. Vía única	11
3.2.2. Vía doble	12
APÉNDICES	13
A. Efectos aerodinámicos en túneles	15
1. Descripción del fenómeno	15
2. Efectos de las variaciones de presión en los viajeros	15
3. Parámetros determinantes	15
4. Análisis teórico	16
B. Métodos alternativos al incremento de sección	19
C. Método de dimensionamiento de túneles para trenes no estancos empleado en la ficha UIC 779/11	21
D. Tablas de dimensionamiento para el criterio de salud	23
E. Método de dimensionamiento de túneles para trenes estancos	27
1. Coeficientes de estanqueidad	27
1.1. Estanqueidad estática	27
1.2. Estanqueidad dinámica	28
2. Criterio de confort para trenes estancos	28
F. Criterios de confort para líneas de alta velocidad en distintas administraciones ferroviarias	31
G. Características de túneles ferroviarios en líneas de alta velocidad	33

1.

OBJETO

El objeto de este documento es definir los criterios para determinar la sección transversal mínima en túneles ferroviarios nuevos de líneas de alta velocidad, teniendo en cuenta exclusivamente los efectos aerodinámicos producidos por el paso de los trenes (velocidades superiores a 250 Km/h) (1), en lo que se refiere a variaciones de presión soportadas por los viajeros.

La sección resultante deberá ser siempre superior a la necesaria por condicionantes geométricos, derivados de la necesidad de dar cabida a los vehículos ferroviarios (gálibo cinemático), instalaciones (catenaria, ventilación, etc.), rutas de evacuación, etc.

(1) La Directiva 96/48/CE del Consejo de la Unión Europea relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, anejo A1, considera como límite inferior de alta velocidad 250 Km/h.

2.

CONSIDERACIONES BÁSICAS

La entrada de un tren en un túnel crea una onda de presión, que se propaga por su interior hasta la salida, donde se refleja como onda de depresión.

Asimismo, al entrar la cola del tren, se produce una onda de depresión que al alcanzar la boca de salida se refleja como onda de presión. A su vez estas ondas, al incidir en el tren y en las bocas, producen nuevas ondas reflejadas. El fenómeno se repite hasta que las ondas se amortiguan totalmente.

Esta secuencia de ondas genera en cada punto del túnel bruscas variaciones de presión que se traducen en molestias a los viajeros, las cuales varían en función del grado de estanqueidad del tren. En el caso de un túnel de vía doble la complejidad del fenómeno puede aumentar por la existencia de un segundo tren circulando por la otra vía.

Las molestias en los oídos se deben a desequilibrios instantáneos de las presiones a ambos lados de la membrana del tímpano, no equilibrados mediante los mecanismos reflejos del cuerpo humano.

Los parámetros más relevantes que intervienen en el fenómeno se pueden agrupar en cuatro bloques:

- Relacionados con el tren: longitud, sección transversal, estanqueidad (hermeticidad), forma de la cabeza y de la cola, y coeficiente de rozamiento de su superficie exterior.
- Relacionados con el túnel: longitud, sección transversal y coeficiente de rozamiento del revestimiento.
- Relacionados con la explotación: velocidad del tren y, en el caso de cruces con otros trenes, velocidades de los otros trenes y tiempo de desfase entre la entrada de cada uno de ellos al túnel.
- Condiciones del aire: densidad, humedad, etc.

Del análisis de la longitud de los trenes modernos que circulan a grandes velocidades se deduce que, la gran mayoría de los que existen y se construyen, tienen longitudes en el entorno de los 200 m, siendo menos frecuentes los de 100 y 400 m. La longitud máxima de explotación, según lo definido en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad para el material rodante, es de 400 m, resultante de una composición fija de 400 m, o bien de la unión de dos unidades de 200 m.

La sección transversal de este tipo de trenes varía, en general, entre 8 y 10 m², aunque ocasionalmente se utilizan unidades de dos pisos de 11 m². Por otro lado, la sección máxima de explotación es de 12 m², según lo definido en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad para el material rodante.

El aumento de la velocidad del tren incrementa las presiones generadas en el túnel, y en consecuencia, el riesgo de molestias a los viajeros y la resistencia al avance de los trenes (muy superior a la de cielo abierto), lo que se traduce en un mayor consumo energético. Por ello, a veces, en vez de aumentar la sección, puede ser más aconsejable reducir la velocidad al paso por determinados túneles, siempre que esta reducción de velocidad tenga escasa relevancia en el tiempo total del viaje.

En el apéndice A se explica con más detalle el fenómeno de generación de ondas de presión en el túnel, sus parámetros más influyentes y los modelos de cálculo existentes.

En cuanto al diseño del túnel hay que señalar que, sin recurrir a proyectar secciones más grandes, existen sistemas alternativos para reducir las variaciones de presión. Entre éstos, se pueden citar:

- Las actuaciones en las boquillas del túnel: abocinamientos, apertura de huecos o ventanas, etc.
- La ejecución de chimeneas (pozos) en zonas intermedias del túnel. Esta puede ser la solución más conveniente en túneles existentes de sección reducida, que se quieran acondicionar para la circulación de trenes a velocidades superiores.

En el apéndice B se analizan con más detalle algunos sistemas alternativos para reducir las variaciones de presión.

3.

CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

En el dimensionamiento de la sección transversal, además de los criterios de salud y confort, deberá considerarse la exigencia de una sección mínima por condicionamientos geométricos debidos a la necesidad de:

- Dar cabida al gálibo cinemático de las circulaciones de mayor tamaño que puedan operar en la línea.
- Realizar la captación de corriente para la tracción de forma segura y estable. Esto influye en la disposición y altura de catenaria, resguardos, etc.
- Dar cabida a las instalaciones de seguridad y permitir la evacuación rápida de los viajeros en caso de accidente. Para ello se deberán respetar las especificaciones técnicas vigentes sobre esta materia.

El proyectista, una vez analizados los condicionantes anteriores, definirá una sección geométrica mínima que no deberá ser inferior a los 52 m² (diámetro aproximado de 8,50 m) en los túneles de vía única, ni a los 75 m² (diámetro aproximado de 11,35 m) en los de vía doble, ni a cualquier otro mínimo exigido en normativas específicas.

3.1. CRITERIO DE SALUD

El criterio de salud consiste en limitar la máxima variación de presión a lo largo de todo el tiempo de tránsito del tren en el túnel.

La Directiva 96/48/CE del Consejo de la Unión Europea relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, considera que «*la salud de los usuarios del tren debe garantizarse en cualquier circunstancia*». Esto implica que la verificación del criterio de salud se ha de realizar para el caso más desfavorable desde el punto de vista de la explotación y considerando nula la estanqueidad de los trenes ($\tau = 0$), en previsión de fallo de este sistema. Así pues, la comprobación habrá de realizarse, en principio, con los trenes más desfavorables desde el punto de vista de sección y longitud, circulando a la velocidad máxima de la línea y, en el caso de cruce, con el desfase pésimo.

Por tanto, para la comprobación de este criterio se considera una sección de tren de 12 m², que es la máxima prevista para tráfico de alta velocidad según las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad, con las longitudes normalizadas de tren de 100, 200 y 400 m.

En el caso de vía doble, con el fin de no sobredimensionar las secciones resultantes, se han limitado las velocidades máximas de los trenes. Ello resulta aconsejable debido a que:

- La comprobación con trenes de gran longitud (400 m), recogidos en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad, es muy limitativa. Además estos trenes tienen mayor dificultad de captación de corriente a altas velocidades, al encontrarse el segundo pantógrafo una catenaria más perturbada, lo que limita su velocidad.
- La comprobación con trenes de gran sección (12 m²), recogidos asimismo por las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad, es muy exigente, ya que se trata de una sección atípica superior incluso a la de los trenes habituales de dos pisos.

Además, la circulación de trenes por los túneles a velocidades superiores a 300 Km/h supone un consumo energético muy superior al de cielo abierto y que, en general, actúa como elemento disuasorio.

La limitación de la velocidad no se ha establecido para vía única, dado que las secciones resultan siempre inferiores a las mínimas exigidas por otros condicionantes.

Puesto que en la mayoría de los casos los trenes utilizados por los operadores serán más favorables que los de diseño, el gestor de la infraestructura podrá autorizar, en cada caso, velocidades máximas de circulación de estos trenes superiores a las de diseño aquí fijadas, siempre que se respete el criterio de salud. Para ello, y en el caso de doble vía, se tendrá en cuenta la posibilidad de cruce con el tren más desfavorable que circule por la línea.

Para el cálculo de las secciones de túnel derivadas de la aplicación de los criterios expresados en este apartado, y a falta de herramientas de cálculo más precisas y específicas, previamente validadas por UIC o CEN, se podrán utilizar las fichas de la UIC-779, cuya metodología se describe en el Apéndice C.

El uso de programas de cálculo más precisos se hace especialmente necesario en túneles largos, donde la sección transversal tiene una mayor repercusión en el coste de ejecución del túnel.

Como complemento, en el Apéndice D, se dan unas tablas con las secciones mínimas de túnel obtenidas de la aplicación del criterio de salud a la circulación de los trenes de diseño indicados.

3.1.1. Vía única

TÚNELES DE VÍA ÚNICA
(Hip.: Un tren de alta velocidad carenado no estanco)

Velocidad del tren (Km/h)	Máxima variación admisible de presión durante el período de tránsito del tren en el túnel [Dp (T)] (KPa)
350	10

3.1.2. Vía doble

TÚNELES DE VÍA DOBLE
(Hip.: cruce de dos trenes de alta velocidad carenados no estancos y con el desfase pésimo)

Velocidad de los trenes dentro del túnel (Km/h)	Máxima variación admisible de presión durante el período de tránsito del tren en el túnel [Dp (T)] (KPa)
300 ó la velocidad de proyecto en el túnel incrementada en un 10%, si el resultado es inferior a 300	10

3.2. CRITERIO DE CONFORT

El criterio de confort auditivo consiste en limitar la máxima variación de presión en un intervalo de 4 segundos.

Para la comprobación de este criterio se ha optado por suponer situaciones «normales», frente a las hipótesis «pésimas» contempladas en el criterio de salud. En este sentido se ha supuesto la coexistencia en explotación de trenes de alta velocidad carenados y estancos con trenes convencionales modernos no estancos. En cuanto a las características de los trenes, se han considerado secciones de 10 m² y longitudes de 200 m, limitándose la velocidad del tren estanco a 300 km/h.

Para los túneles de vía doble se han admitido valores mayores de la variación de presión que para los de vía única, dada la reducida probabilidad de que el cruce de los trenes se produzca dentro del túnel (función de la densidad de túneles de la línea y de la frecuencia de paso de los trenes) y que además dicho cruce se produzca en la situación más desfavorable (desfase pésimo, máximas velocidades, etc.).

En algunos casos, puede resultar más conveniente limitar la velocidad de cruce en el túnel, con el fin de no producir variaciones de presión superiores a las permitidas, antes que aumentar la sección del túnel (2).

Para el cálculo de las secciones de túnel derivadas de la aplicación de los criterios expresados en este apartado, y a falta de herramientas de cálculo específicas previamente validadas por UIC o CEN, se podrán utilizar las fichas de la UIC-779 cuya metodología se recoge en el Apéndice B. En el caso de disponer de programas de cálculo específicos se puede considerar una τ_{din} de 0'5 seg. en el tren no estanco.

Al igual que se indica en la comprobación del criterio de salud, el uso de programas de cálculo más precisos se hace especialmente necesario en túneles largos donde la optimización de sección transversal tiene una mayor repercusión en el coste de ejecución del túnel.

A nivel informativo se incluye un apéndice E sobre la estanqueidad en trenes, así como criterios de confort aplicables en fase de explotación a los trenes estancos, lo que permite fijar sus velocidades máximas en función de su grado de estanqueidad.

En el Apéndice F se recogen criterios de confort utilizados en líneas de alta velocidad de distintas Administraciones Ferroviarias.

3.2.1. Vía única

TÚNELES DE VÍA ÚNICA
(Hip.: tren convencional moderno no estanco)

Velocidad del tren (Km/h)	Máxima variación admisible de presión en 4 segundos [Dp (4)] (KPa)
220	2

Para la comprobación se ha elegido un tren convencional no estanco a su velocidad máxima (220 km/h), al ser más desfavorable que el de alta velocidad estanco (300 Km/h con $\tau_{din}=4$ seg.). Esto permite, además, independizar el criterio de comprobación, del grado de estanqueidad de los trenes, al ser este último un factor en evolución.

(2) Un equipamiento ERTMS nivel 2 permite prever el lugar de cruce de dos trenes y puede dar instrucciones de reducción de velocidad si éste se produce dentro de un túnel.

3.2.2. Vía doble

TÚNELES DE VÍA DOBLE

(Hip.: cruce de tren de alta velocidad carenado y estanco con tren convencional moderno no estanco y con el desfase pésimo)

Velocidad de cruce de los trenes dentro del túnel (Km/h)	Máxima variación admisible de presión en 4 segundos [Dp (4)] (KPa)
300/220 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

En este caso, se ha elegido la hipótesis de cruce de un tren estanco con otro no estanco, al ser este último el que recibe los efectos más desfavorables sobre los viajeros.

APÉNDICES

APÉNDICE A EFECTOS AERODINÁMICOS EN TÚNELES

1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

Cuando la cabeza de un tren entra en un túnel, el aire que se encuentra a la entrada se comprime creando una onda de presión que se propaga a lo largo del mismo a la velocidad del sonido. Esta onda, al llegar a la salida del túnel, se refleja hacia el interior como onda de depresión.

Por otra parte, cuando la cola del tren entra en el túnel, se produce una caída de presión (onda de depresión) que también se propaga hacia la salida del túnel a la velocidad del sonido. Cuando alcanza la boca de salida se refleja como onda de presión. A su vez las ondas reflejadas, al incidir en la cabeza y en la cola del tren, así como en las bocas, producen nuevas ondas que se reflejan en sentido contrario. Este fenómeno se repite hasta que las ondas se amortiguan totalmente.

De esta forma el aire que se encuentra en cualquier sección del túnel, se ve sometido a sucesivas compresiones y expansiones a lo largo del tiempo. Estas variaciones de presión se transmiten a los viajeros en mayor o menor medida según el grado de estanqueidad del tren. En el caso de túneles de vía doble la complejidad en las secuencias de las ondas de presión y depresión aumenta debido a los efectos derivados de la circulación de un segundo tren por el túnel.

2. EFECTOS DE LAS VARIACIONES DE PRESIÓN EN LOS VIAJEROS

Las molestias originadas en los oídos se deben a que las presiones a uno y otro lado de la membrana del tímpano, que en condiciones normales son iguales, se desequilibran cuando la presión exterior cambia tan rápidamente que no da tiempo a que la interior se iguale mediante los mecanismos reflejos o conscientes de que dispone el cuerpo humano: comunicación refleja de la cara interior de la membrana del tímpano con el aire ambiental a través de la trompa de Eustaquio, bostezo, deglución, etc.

Con el fin de evaluar las variaciones de presión perceptibles como aceptables o como molestas por distintas personas, se han realizado ensayos de laboratorio en cámaras de presión y en trenes circulando por túneles reales. Destaca en primer lugar la heterogeneidad de las respuestas obtenidas, influyendo mucho en la apreciación subjetiva de las variaciones de presión, la frecuencia con la cual se producen éstas a lo largo de un viaje. Así un pasajero tiende a soportar peor las máximas variaciones de presión cuanto mayor sea la frecuencia con la que se producen durante el trayecto, por ejemplo, en zonas con gran número de túneles. Por el contrario, si la línea tiene pocos túneles, el viajero puede admitir variaciones de presión más altas.

3. PARÁMETROS DETERMINANTES

Los parámetros que intervienen en el fenómeno de las variaciones de presión soportadas por los viajeros se pueden agrupar en:

- Relacionados con el tren: longitud, sección transversal, forma de la cabeza y de la cola del tren, coeficiente de rozamiento de su superficie y grado de estanqueidad.
- Relacionados con el túnel: longitud, sección transversal y coeficiente de rozamiento del revestimiento.
- Relacionados con la explotación: velocidad del tren y, en caso de cruces con otros trenes, velocidades de éstos y tiempo de desfase entre ellos.
- Condiciones del aire: densidad, humedad, temperatura...

A continuación se analiza la influencia de algunos de los parámetros más relevantes.

a) Velocidad

Para el caso de un solo tren atravesando un túnel, la variación de presión que se produce es sensiblemente proporcional al cuadrado de la velocidad del tren. Así pues, si se conoce previamente (por cálculo o por ensayo) la variación de presión para una determinada velocidad es posible extrapolar fácilmente los resultados a otra velocidad cualquiera.

En el caso de dos trenes iguales que se cruzan a igual velocidad en un túnel, las máximas variaciones de presión pueden oscilar desde un valor similar al de circulación de un solo tren, hasta más del triple, dependiendo sobre todo del desfase entre las entradas de ambos trenes en el túnel.

Así pues la velocidad de los trenes y el desfase entre las entradas son los parámetros que más influyen en las variaciones de presión.

b) Relación sección tren/sección túnel

Un factor de la máxima importancia es la relación entre las secciones transversales del tren y del túnel, denominado coeficiente de bloqueo. Cuanto menor sea éste, menor será la variación de presión que se produce.

c) Relación longitud túnel/longitud tren

Es un factor muy importante. Para los trenes y velocidades más frecuentes las relaciones más desfavorables son las comprendidas entre 3 y 5.

d) Rozamiento aire-tren

También tiene influencia en los resultados la forma más o menos aerodinámica de la cabeza y de la cola del tren, así como el rozamiento aire/tren, que está ligado a la forma y rugosidad del carenado.

e) Rozamiento aire-túnel

El rozamiento aire/túnel, ligado al tipo de revestimiento y al número y tipo de instalaciones adosadas, tiene escasa influencia en los valores de la variación de presión, sobre todo en el caso de túneles revestidos.

f) Estanqueidad

Si el tren tiene un elevado coeficiente de estanqueidad, que es la tendencia actual en trenes que pueden circular a más de 300 Km/h, la variación de presión que se experimenta en el interior es muchísimo menor que en un tren no estanco, a igualdad en el resto de los parámetros. Ello es debido a que se produce una atenuación o suavizado de los «picos» de presión. Así, los trenes estancos resultan más «confortables» para el oído. Un riesgo de los trenes estancos es que pueden dejar de serlo instantáneamente por fallo del sistema (rotura de ventanilla, etc.).

4. ANÁLISIS TEÓRICO

Los movimientos de masas de aire en un túnel son un fenómeno físico de flujo en régimen no permanente, por lo que se pueden utilizar distintos modelos de cálculo que den aproximaciones mayores o menores al fenómeno físico real, en función de las simplificaciones que se adopten. Los modelos utilizados son los siguientes:

- Flujo no isentrópico.
- Flujo isentrópico con rozamiento.
- Flujo isentrópico sin rozamiento.
- Flujo con densidad constante y velocidad del sonido finita y constante.
- Flujo incompresible (velocidad del sonido infinita y densidad del aire constante).

a) Flujo no isentrópico

En este modelo, la propagación de las ondas y los efectos térmicos se representan de acuerdo con las ecuaciones de continuidad y la primera y segunda ley de la termodinámica. Del cálculo se obtienen velocidades, presiones y temperaturas. Es el modelo que debe aplicarse en los casos donde las transferencias de calor sean importantes, pero su utilización es costosa y difícil de generalizar a configuraciones de túneles complejas (pozos de ventilación, galerías transversales...). El profesor Sockel de la Universidad de Viena ha desarrollado un método de cálculo basado en este tipo de flujo. También Woods/Pope han desarrollado un método de cálculo basado en este modelo. El resto de modelos son simplificaciones de éste.

b) Flujo isentrópico con rozamiento

El método (desarrollado por el profesor Vardy) es relativamente sencillo y suficientemente aproximado para las siguientes condiciones:

1. Cuando sean despreciables las transferencias de calor.
2. Cuando el túnel sea lo suficientemente largo (más de 500 metros) para que los flujos se comporten como no estacionarios en el mismo, pudiendo ser tratados como unidireccionales.

Este método, con ligeros cambios para poder ser aplicado también a túneles cortos, es el seguido en la ficha UIC 779/11. En el apéndice C se hacen algunos comentarios sobre esta ficha.

c) Flujo isentrópico sin rozamiento

Con este modelo se obtienen estimaciones poco realistas de todas las variables, al no tener en cuenta de ninguna manera los rozamientos aire/tren y aire/túnel.

d) Flujo con densidad constante y velocidad del sonido constante

Proporciona buenos pronósticos de velocidades y presiones y es fácil de generalizar al caso de configuraciones complejas de túneles.

e) Flujo incompresible

La estimación de las velocidades resulta razonable, pero no lo es la de las variaciones de presión de corta duración.

APÉNDICE B MÉTODOS ALTERNATIVOS AL INCREMENTO DE SECCIÓN

Existen distintas formas de disminuir las sobrepresiones en los túneles, que pueden considerarse como alternativas al incremento de su sección transversal. Estos métodos pueden ser de interés en los siguientes casos:

- En líneas ya existentes en las que se quiere aumentar la velocidad de los trenes pero en las que el incremento de sección transversal no resulta viable.
- En líneas en estudio en las que resulte económicamente ventajoso mantener la sección mínima necesaria y reducir las sobrepresiones por alguno de estos métodos.

Algunos métodos alternativos son los siguientes:

- Conexiones transversales entre túneles independientes.
- Creación de resistencias locales en la boquilla de salida.
- Modificaciones de la velocidad del tren.
- Boquilla abocinada a la entrada.
- Boquilla perforada a la entrada.
- Boquilla abocinada o perforada a la salida.
- Chimeneas.

A continuación, se comenta brevemente cada uno de ellos:

a) Conexiones transversales entre túneles independientes

En este caso sólo se producen disminuciones sensibles de las sobrepresiones en las situaciones de circulación de un solo tren por uno de los dos túneles.

b) Creación de resistencias locales en la boquilla de salida

En este caso, el incremento de la resistencia en la boca de salida modifica la amplitud de las ondas reflejadas, produciendo un beneficio sensible, aunque éste no se ha cuantificado al carecer de experiencias al respecto.

c) Modificaciones de la velocidad del tren

Una manera eficaz y barata de disminuir las perturbaciones, sobre todo en túneles de gran longitud, es reducir la velocidad del tren en la entrada del túnel, en la salida y en los cruces, en el caso de vía doble.

d) Boquilla abocinada a la entrada

El abocinamiento de la boquilla puede ser interno, si se hace dentro del túnel, o externo, si se hace en prolongación de éste (en este caso hay un incremento de la longitud de túnel). Los beneficios obtenidos suelen superar el 30%, en términos de variación de presión en un intervalo de 4 segundos. Además, hay que tener en cuenta que:

- La efectividad de este método aumenta cuando lo hacen los ratios, tanto de las longitudes, como de las secciones, entre el abocinamiento y el túnel (L_a/L_T y S_a/S_T).
- La longitud del abocinamiento debe ser superior a 300 metros. Por debajo de esta longitud, no tiene una eficacia sensible en el confort de los viajeros.
- El área se debe reducir más lentamente cerca de la boquilla.
- Este método es menos eficaz según aumenta la velocidad del tren.

e) Boquilla perforada a la entrada

En este caso, el tramo con perforaciones puede ser interno, si se hace dentro del túnel, o externo, si se hace en prolongación de éste (en este caso hay un incremento de la longitud de túnel). Los beneficios obtenidos fluctúan en torno al 10%, y al igual que en el caso anterior:

- La efectividad aumenta con la longitud tratada.
- El método es menos eficaz según se incrementa la velocidad del tren.

f) Boquilla abocinada o perforada a la salida

En general los beneficios para abocinamiento interno y para boquillas perforadas internas y externas (que incrementan la longitud del túnel) son del orden del 5%, 19% y 14%, respectivamente. El abocinamiento externo a la salida no supone un beneficio apreciable.

g) Chimeneas

Su uso es el más extendido. Sus beneficios fluctúan del 34%, a más del 60% y, en general, se puede afirmar que:

- En túneles de vía única, las chimeneas en la primera mitad del túnel son más eficaces que en la segunda mitad.
- Las chimeneas no deben estar cercanas a las bocas.
- La efectividad tiende a aumentar cuando el área total de las chimeneas es del orden del 50% al 75% de la sección del túnel, en el caso de vía doble.
- En vía única, el área óptima de las chimeneas está entre el 10% y el 20%.

APÉNDICE C

MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES PARA TRENES NO ESTANCOS EMPLEADO EN LA FICHA UIC 779/11

El método empleado en la confección de la ficha UIC 779-11 corresponde al de flujo isentrópico con rozamiento. El profesor Vardy desarrolló un programa de cálculo denominado Thermotun/4 que aplicado a un gran número de casos permitió la confección de unos gráficos de fácil aplicación, recogidos en la citada ficha UIC. A partir de éstos se obtiene el hueco libre mínimo de la sección transversal del túnel necesario para limitar las variaciones de presión sufridas en el interior de los trenes no estancos. Se toma como referencia exclusivamente la afección timpánica sobre los viajeros. No contempla ningún aspecto sobre gálibos, ventilaciones, protecciones anti-incendio, distancias eléctricas de seguridad, etc.

Se aplica a túneles de sección constante, tanto de vía única, como doble. Queda fuera de su campo de aplicación el tráfico de mercancías a gran velocidad.

En los túneles de vía única, se considera un solo tren circulando por el túnel; en los túneles de vía doble, se estudian los casos de cruce de dos trenes en el túnel, con el decaje pésimo en el cruce.

Las circulaciones que se han tenido en cuenta son las de trenes modernos de tipo convencional (velocidades de 180 a 220 Km/h), las de trenes de alta velocidad carenados (de 200 a 350 Km/h) y una combinación de ambas. No obstante, los coeficientes utilizados para caracterizar la aerodinámica del tren corresponden a los de los trenes ingleses de alta velocidad (unos 200 Km/h), que son superiores a los de los trenes modernos por lo que las secciones de túnel que se obtienen están del lado de la seguridad.

Para cada combinación de tipo de túnel (vía única o doble), tipo de tren (convencional o carenado), velocidad e intervalo de tiempo en el que se considera la variación de presión, se tiene una figura donde en ordenadas se representan las variaciones máximas de presión, y en abscisas los ratios de longitudes de túnel y de tren, para un conjunto de coeficientes de bloqueo (cociente entre la sección del tren y la sección libre del túnel).

Para la determinación de la sección de un túnel, se parte de un criterio de confort auditivo (variación de presión en intervalos temporales de 1, 4 y 10 segundos para vía única, y 4 segundos para vía doble), de las características de los trenes y sus posibles combinaciones y de las velocidades máximas en el túnel. Para cada combinación y entrando en la gráfica adecuada se puede obtener directamente el coeficiente de bloqueo necesario. La obtención de la sección de túnel se obtiene por una simple división entre la sección del tren y el menor de los coeficientes de bloqueo calculados para las distintas combinaciones de trenes.

APÉNDICE D TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO PARA EL CRITERIO DE SALUD

TÚNELES DE VÍA ÚNICA

Criterio de salud:

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

Tren de diseño:

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

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel (m^2) para $D_p(T) \leq 10 \text{ KPa}$ a distintas velocidades		
	V=350 Km/h	V=380 Km/h	V=400 Km/h
500	<52	<52	54
1.000	<52	<52	52
1.500	<52	<52	52
2.000	<52	<52	<52
3.500		<52	<52
5.000		<52	<52
7.500			<52
10.000			<52

TÚNELES DE VÍA ÚNICA

Criterio de salud:

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

Tren de diseño:

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

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel (m^2) para $D_p(T) \leq 10 \text{ KPa}$ a distintas velocidades		
	V=350 Km/h	V=380 Km/h	V=400 Km/h
500	<52	<52	53
1.000	<52	<52	55
1.500	<52	<52	55
2.000	<52	<52	53
3.500	<52	<52	<52
5.000		<52	<52
7.500		<52	<52
10.000			<52

TÚNELES DE VÍA ÚNICA

Criterio de salud:

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

Tren de diseño:

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

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel (m^2) para $D_p(T) \leq 10 \text{ KPa}$ a distintas velocidades		
	V=350 Km/h	V=380 Km/h	V=400 Km/h
1.000	<52	<52	56
1.500	<52	<52	60
2.000	<52	<52	59
3.500	<52	<52	56
5.000	<52	<52	53
7.500		<52	<52
10.000			<52

TÚNELES DE VÍA DOBLE

Criterio de salud:

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

Tren de diseño:

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

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel (m^2) para $D_p(T) \leq 10 \text{ KPa}$ 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
1.000	<75	<75	80	100
1.500	<75	<75	<75	98
2.000	<75	<75	<75	98
3.500		<75	<75	93
5.000		<75	<75	91
7.500		<75	<75	80
10.000		<75	<75	75

TÚNELES DE VÍA DOBLE

Criterio de salud:

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

Tren de diseño:

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

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel (m^2) para $D_p(T) \leq 10\text{KPa}$ 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
1.000	<75	75	102	122
1.500	<75	<75	89	120
2.000	<75	<75	86	109
3.500	<75	<75	77	109
5.000	<75	<75	75	107
7.500	<75	<75	75	100
10.000	<75	<75	<75	96

TÚNELES DE VÍA DOBLE

Criterio de salud:

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

Tren de diseño:

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

Longitud del túnel (m)	Sección mínima de túnel (m^2) para $D_p(T) \leq 10\text{KPa}$ 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	80	94
1.000	<75	77	111	150
1.500	<75	86	120	155
2.000	<75	85	118	159
3.500	<75	83	104	131
5.000	<75	82	95	126
7.500	<75	76	94	123
10.000	<75	<75	92	117

APÉNDICE E MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES PARA TRENES ESTANCOS

Aunque en este documento se ha optado por definir criterios de confort sobre la base de suponer trenes no estancos, a continuación se incluyen unos comentarios e indicaciones para el caso de trenes estancos.

A partir de ciertas velocidades con trenes no estancos, para obtener variaciones de presión admisibles con los criterios de confort recomendados, serían necesarias secciones de túnel muy grandes.

Los trenes estancos (casi todos los trenes de alta velocidad que se construyen actualmente lo son), permiten reducir las variaciones de presión experimentadas por los pasajeros. Esta es la solución habitual para velocidades superiores a 300 Km/h. Así, por ejemplo, para circular a 350 Km/h con trenes estancos pueden ser necesarios túneles de 100 m², necesitándose 150 m² si se circula con trenes no estancos. Sin embargo, ésta no es la única solución ya que en líneas con pocos túneles, puede resultar más económico aumentar la sección de éstos que exigir al operador trenes estancos.

La UIC ha desarrollado el programa SEALTUN, para trenes con cualquier coeficiente de estanqueidad, circulando a velocidades entre 200 y 400 Km/h, y con longitudes entre 100 y 400 m. El programa obtiene las presiones internas y externas en cabeza, cola y centro del tren, en cualquier periodo temporal que se determine.

1. COEFICIENTES DE ESTANQUEIDAD

Las exigencias habituales de confort y de seguridad (confort térmico, estanqueidad de puertas y ventanas...), aportan con frecuencia un nivel apreciable de estanqueidad a los trenes, sean éstos o no de alta velocidad. Se han medido atenuaciones de presión de hasta el 25% en trenes de alta velocidad no estancos de las primeras generaciones.

Las variaciones de presión en el exterior de un tren estanco pueden modificar las presiones internas a través de dos mecanismos:

- a) El coche se deforma por la presión exterior.
- b) La diferencia de presión conduce el aire a través de zonas de fuga, de forma que la presión interna tiende a seguir a las fluctuaciones de presiones externas, con un cierto desfase de tiempo.

El primero de los aspectos es poco significativo y no se suele considerar. El segundo aspecto se cuantifica a través del coeficiente de estanqueidad:

Existen dos tipos diferentes de coeficientes de estanqueidad: el estático y el dinámico. El dinámico es el que realmente describe las fluctuaciones de presiones externas e internas.

1.1. Estanqueidad estática

El nivel de estanqueidad de un coche aislado se suele definir como una constante asociada con el tiempo de descenso de la presión del coche (inicialmente sometido a una sobrepresión), según la siguiente ley:

$$P_i = P_1 \left(1 - e^{-\tau_{est}/t} \right)$$

siendo:

P_i : presión interna en un instante t

P_1 : presión interna inicial ($P_1 \geq P_i$)

t : tiempo en segundos

τ_{est} : constante de tiempo (estanqueidad estática)

1.2. Estanqueidad dinámica

La estanqueidad de un coche sometido dinámicamente a una presión externa variable se puede expresar por el coeficiente de estanqueidad dinámico, que se define por la expresión:

$$\tau_{din} = \frac{\Delta P(t)}{dP_{int} / dt}$$

en la cual:

$\Delta P(t)$: diferencia de presión entre el exterior y el interior del coche en el tiempo t , es decir

$$(P_{ext} - P_{int})$$

P_{ext} : presión exterior del tren, que varía con el tiempo

P_{int} : presión interior del tren, que también varía con el tiempo

τ_{din} : es siempre positivo y varía de 0 a ∞ , siendo 0 para un tren completamente no estanco e ∞ para un tren ideal, perfectamente estanco. Para los trenes convencionales modernos sin ningún sistema de estanqueidad activa puede considerarse que tienen una τ_{din} mínima de 0,5 segundos.

Un tren de baja estanqueidad puede tener una τ_{din} de 2 segundos. El AVE español tiene una τ_{din} del orden de 4.5 segundos. Uno de estanqueidad alta (como los que se construyen en la actualidad) tiene una τ_{din} de más de 6 segundos, y uno de muy alta estanqueidad, como el ICE III alemán, tiene una τ_{din} en torno a los 12 segundos.

2. CRITERIO DE CONFORT PARA TRENES ESTANCOS

Las máximas variaciones de presión recomendadas por criterios de confort, en el caso de trenes estancos, se indican en las tablas siguientes. Estos criterios podrán ser utilizados por el gestor de la infraestructura para fijar las condiciones de explotación de los distintos operadores en función de las características reales (longitud, sección y grado de estanqueidad) de los trenes que vayan a circular.

Asimismo, cada operador, en función del grado de satisfacción que pretenda dar a sus clientes, puede elegir trenes con distintos grados de estanqueidad circulando en un rango de velocidades con el límite máximo permitido por el gestor de la infraestructura.

TÚNELES DE VÍA ÚNICA
(Hip.: Un tren de alta velocidad carenado y estanco)

Máxima variación admisible de presión durante el período de tránsito del tren en el túnel [Dp (T)] (KPa)	Máxima variación de presión recomendada en n segundos [Dp(n)]
2	Dp(1)=0,7 Dp(3)=1,0 Dp(10)=1,4

TÚNELES DE VÍA DOBLE
(Hip.: Un tren de alta velocidad carenado y estanco)

Máxima variación admisible de presión durante el período de tránsito del tren en el túnel [Dp (T)] (KPa)	Máxima variación de presión recomendada en n segundos [Dp(n)]
1,5	Dp(1)=0,5 Dp(3)=0,8 Dp(10)=1,0

En túneles de vía doble para la comprobación de este criterio, se supone el paso de un único tren por una de las vías.

Para el dimensionamiento de la sección transversal de los túneles con los criterios expuestos, deben utilizarse programas de cálculo validados por la UIC o por el CEN. Estos programas, en general permiten el cálculo de las variaciones de presión en cabeza, centro y cola del tren. En estos casos se puede admitir sobrepasar ligeramente (10% en vía única y 5% en vía doble) el valor límite en alguno de estos puntos, siempre que la media de los tres valores (cabeza, centro y cola) no lo supere.

APÉNDICE F CRITERIOS DE CONFORT PARA LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD EN DISTINTAS ADMINISTRACIONES FERROVIARIAS

ORGANISMO	Dp(n) (KPa)	vía	tren no estanco	tren estanco	v (Km/h)	∅ túnel
UIC (valores mínimos)	Dp(4)=3 Dp(4)=4,5	VU VD (cc)	X X			
	Dp(túnel)=3 Dp(1)=1 Dp(4)=1,6 Dp(10)=2	VU-VD VU-VD(cc) VU-VD(cc) VU-VD(cc)		X X X X		
SHINKANSEN (**)	Dp(n)=1	VD		X	210-240-270	Pequeño
DB AG	Dp(1)=0,5 Dp(3)=0,8 (ó Dp(4)=0,85) Dp(10)=1	VU-VD(sc)		X X X	240-280	Grande
SNCF (*)	Dp(3)=5 Dp(10)=1			X		
FS (*)	Dp(n)=1,5			X	Alta Velocidad	Medio
BR	Dp(4)=2 Dp(4)=3,5	VU VD(cc)	X X		225-300	
GIF Calatayud-Ricla y Zaragoza-Lérida	Dp(4)=5	VD(cc)	X			
GIF Madrid-Zaragoza	Dp(4)=2,5 Dp(4)=5	VU VD(cc)	X X		350 350/350	

(*) Además, $dp/dt < 0,5$ KPa/s

(**) Además, $dp/dt < 0,2$ KPa/s (flexible a 0,3-0,4)

cc = con cruce en el túnel

sc = sin cruce en el túnel

APÉNDICE G CARACTERÍSTICAS DE TÚNELES FERROVIARIOS EN LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

LÍNEA	velocidad (Km/h)	Km	% túneles	Sección (m ²)	Comentarios
Tokaido (Tokio-Osaka)	300	515	13%	61 (VD)	11 trenes (estancos)/hora
Sanyo (Osaka-Hakata)	300	554	48%	62 (VD)	11 trenes (estancos)/hora
Tohoku	300		23%	62 (VD)	11 trenes (estancos)/hora
Joetsu	300		39%	62 (VD)	11 trenes (estancos)/hora
Tramo de ensayo	500	18,4	87%	70 (VD)	tracción magnética, sección tren: 9m ²
Hannover-Würzburg	280	327	32%	82 (VD)	trenes muy estancos
Manheim-Stuttgart	280	100	25%	82 (VD)	trenes muy estancos
Nürnberg-Ingolstadt (en construcción)	300	90		100 (VD)	
Colonia-Frankfurt (en construcción)	300	186		100 (VD)	trenes muy estancos
Paris-Lyon	260	417	0%		trenes no estancos
TGV Atlántico trenes no estancos	220	282	6%	46 (VU), 71 (VD)	Dp(3)=5 KPa en cruces,
TGV Este	400				
TGV Mediterráneo	400				
París-Chunnel	300				
TGV Ródano-Alpes (túnel)		5,2	100%	100 (VD)	
TGV Corea (proyecto)	300			100 (VD)	trenes estancos
Roma-Florenca	250	248	32%	54-61-66 (VD)	Trenes estancos a 300 Km/h
Milán-Génova (proyecto)	300			82-100 (VD)	trenes estancos
Madrid-Sevilla	250	441	3%	75 (VD)	
Madrid-Zaragoza-Lérida	350	420	7%	75-115 (VD)	

