

Determinación de la sección transversal de túneles ferroviarios en líneas de alta velocidad

ANTONIO LOZANO DEL MORAL (*)

RESUMEN El artículo describe el fenómeno físico que experimenta un tren de alta velocidad cuando entra en un túnel. Pasa revista a los criterios analizados por la Unión Internacional de Ferrocarriles para entender los fenómenos aerodinámicos que se producen así como distintos fundamentos teóricos para desarrollar un modelo de cálculo teórico que permitiese los estudios paramétricos del problema, la validación del programa de cálculo así como determinar los efectos que las variaciones de presión tenían sobre el oído humano. La necesidad de trenes estancos y la cuantificación de sus grados de estanqueidad es puesta de manifiesto. La normativa de aplicación para la determinación de la sección transversal de los túneles en España es detallada. Asimismo se describe el contenido y aplicación de la ficha de la UIC 779-11. Se dedican dos puntos a poner de manifiesto el concepto de longitud crítica y a la necesidad de determinar en desfase crítico en el caso de túneles de vía doble. Se complementa el análisis tratando la problemática de la resistencia al avance en túneles. El artículo termina con las secciones mínimas aplicadas en el ferrocarril español de alta velocidad y las conclusiones al respecto.

DETERMINATION OF RAILWAY TUNNEL CROSS-SECTIONAL AREAS IN HIGH SPEED LINES

ABSTRACT The article describes the physical phenomenon that experiences a high speed train as it enters a tunnel. Reviews the criteria considered by the International Union of Railways to understand the aerodynamic phenomena that occur as different theoretical model to develop a theoretical calculation that would allow parametric studies of the problem, the validation of the calculation program and to identify effects of pressure variations have on the human ear. The need to sealed trains and quantification of their degree of tightness is underlined. The implementing legislation for the determination of the cross section of the tunnels in Spain is detailed. It also describes the content and implementation of leaflet UIC 779-11. Two points are dedicated to highlight the concept of critical length and the need to determine the critical time gap of the passing trains in the case of double track tunnels. It complements the analysis by treating the problem of drag in tunnels. The article ends with the minimum sections applied in the high-speed rail Spanish and conclusions.

Palabras clave: Fenómenos aerodinámicos, Flujo isentrópico, Ondas, Estanqueidad, Criterio de salud y confort, Coeficiente de bloqueo, Desfase de tiempo, Resistencia al avance.

Keywords: Aerodynamic phenomena, Isentropic flow, Waves, Water tightness, Health and comfort criteria, Rate lock, Time delay, Drag.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de velocidad llevado a cabo en el proceso de modernización de ciertos corredores ferroviarios europeos con existencia de túneles de sección reducida con el objetivo de disminuir los tiempos de viaje, y por tanto hacer más competitivo al modo de transporte ferroviario, puso de manifiesto un problema hasta ese momento (primeros años

70) inexistente en el mundo ferroviario, al constatar que algunos viajeros experimentaban en sus oídos sensaciones desagradables llegando incluso al dolor al paso por los túneles, lo que obligó a reducir la velocidad al paso por los mismos.

Esta situación, así como la ya existente planificación de futuras líneas de alta velocidad con existencia de túneles llevó a la Unión Internacional de los Ferrocarriles (UIC) a aprobar la realización de los pertinentes estudios para, en una primera fase, comprender el fenómeno y validar sistemas de predicción, dejando para una segunda fase el desarrollo de aplicaciones prácticas que facilitasen el diseño de los futuros túneles.

(*) Consejero Tecnológico. Fundación Caminos de Hierro. Consultor. Ing. de Caminos, Canales y Puertos. E-mail: alozanodelmoral@gmail.com

Los estudios tenían como misión tres aspectos complementarios:

- Desarrollar un modelo de cálculo teórico permitiendo un estudio paramétrico del problema.
- Realizar un conjunto de ensayos a escala real que permitiesen la validación del programa de cálculo.
- Determinar los efectos que las variaciones de presión tenían sobre el oído humano.

A estos efectos, a través de la UIC se constituyó un Comité multidisciplinar (C-149 de la Oficina de Investigación y Ensayos -ORE- de la UIC).

Antes del desarrollo y divulgación de estos conocimientos la sección transversal de los túneles, incluso en líneas de alta velocidad, se determinaban con criterios puramente empíricos (por experiencia específica o por comparación con otros ferrocarriles más avanzados) así se fijó la sección de los túneles de la primera línea de alta velocidad en España (Madrid-Sevilla) en 75m^2 . En las siguientes líneas ya se tuvieron en cuenta los estudios realizados y los túneles fueron dimensionados de forma científicamente más racional.

2. EFECTOS AERODINÁMICOS EN LOS TÚNELES. CONSIDERACIONES BÁSICAS

Cuando la cabeza de un tren entra en un túnel, al 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 boca de salida del túnel se refleja como onda de depresión en dirección a la boca de entrada. Por otra parte, cuando la cola del tren entra en un túnel, se produce una caída de presión (onda de depresión) que también se propaga hacia la cabeza del tren a la velocidad del sonido, cuando alcanza la boca de salida se refleja como onda de presión. Este fenómeno se repite hasta que las ondas son amortiguadas totalmente (Figura 1).

Este conjunto de ondas (de presión y depresión) de distinto signo chocan contra el tren mientras dura su tránsito por el túnel produciéndose unas bruscas variaciones de presión en

el exterior del mismo (Figura 2). Estas variaciones de presión afectarán a los pasajeros del tren en mayor o menor medida según las características tanto del tren como del túnel. En la parte inferior de la figura se recogen las variaciones de presión en las tres partes más características del tren (cabeza, centro y cola). Con cabeza de flecha se indican los impactos de las ondas contra la cabeza del tren.

En caso de un túnel de doble vía la complejidad de las historias de presión se puede incrementar por la existencia de un segundo tren en sentido contrario. En la Figura 3 se ha recogido en la parte superior el diagrama de ondas y en inferior las variaciones de presión en la cabeza del tren.

3. APROXIMACIÓN TEÓRICA AL FENÓMENO

En un túnel de sección uniforme, los principales parámetros que hay que considerar para la cuantificación de las variaciones de presión son los siguientes:

- Velocidad del tren.
- Sección transversal del tren.
- Longitud del tren.
- Forma de la cabeza y cola del tren.
- Forma y rugosidad de la superficie exterior del tren.
- Sección del túnel.
- Longitud del túnel.
- Rugosidad del revestimiento del túnel.
- Condiciones medioambientales (presión y temperatura).

A estos parámetros, y en el caso de un túnel de vía doble hay que añadir las características del segundo tren y el tiempo de desfase de su entrada respecto al primero. El efecto del parámetro desfase se puede observar en la Figura 4 donde se reflejan la variación de presión en la cabeza con un desfase a la entrada de 5 segundos. En la misma se puede observar la reducción de presión respecto a la entrada simultánea (que no tiene por qué ser la más crítica).

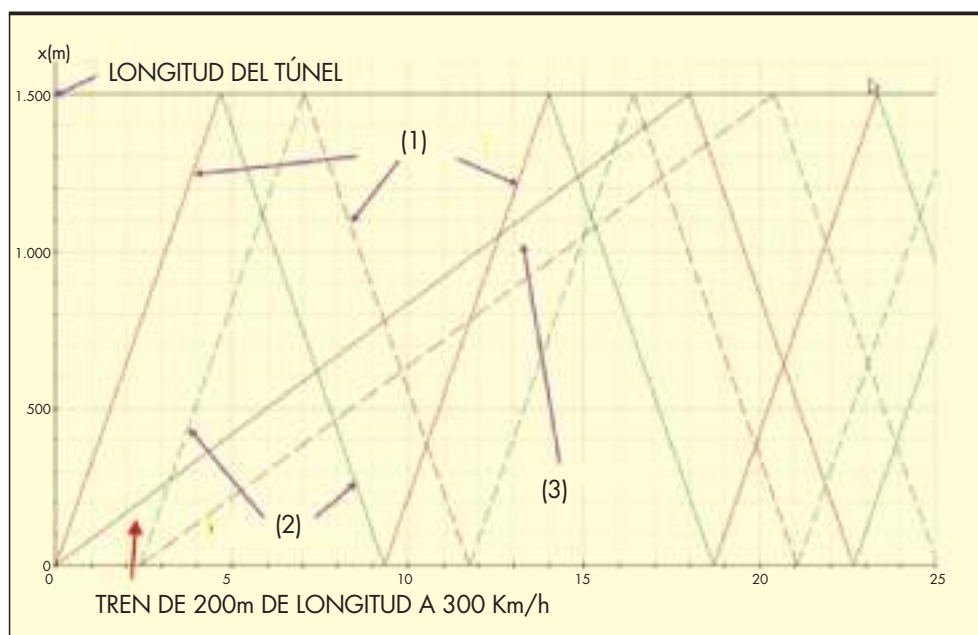


FIGURA 1. Diagrama de ondas con un solo tren.
(1) Ondas de presión.
(2) Ondas de depresión.
(3) Trayectoria del tren.

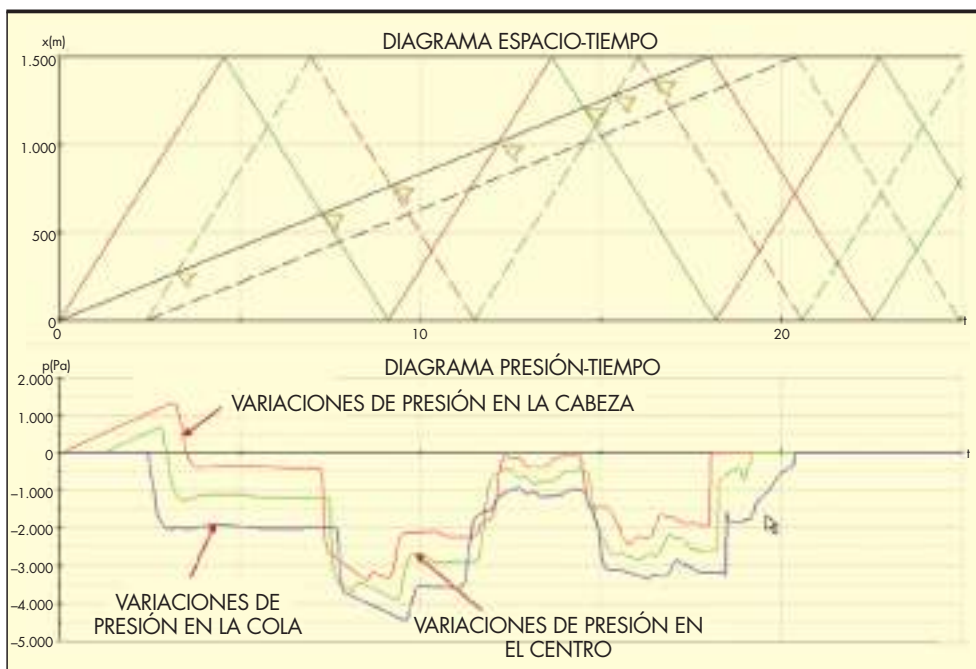


FIGURA 2. Descripción del fenómeno aerodinámico.

Desde el punto de vista de la dinámica de fluidos existen varios métodos de cálculo para el análisis teórico del fenómeno habiendo sido analizados los siguientes:

- Flujo no isentrópico.
- Flujo isentrópico con rozamiento.
- Flujo isentrópico sin rozamiento.
- Flujo con densidad del aire y velocidad del sonido constantes.

- Flujo incomprensible (velocidad del sonido infinita y densidad del aire constante).

En el modelo (a), la propagación de las ondas y los efectos térmicos se representan de acuerdo con las ecuaciones de continuidad, de cantidad de movimiento y energía y a la primera y segunda ley de la termodinámica, siendo el más riguroso. Los otros modelos representan el comportamiento de los flujos de una manera simplificada, aunque solo los modelos (b) y (d) lo hacen de una manera suficientemente realista.

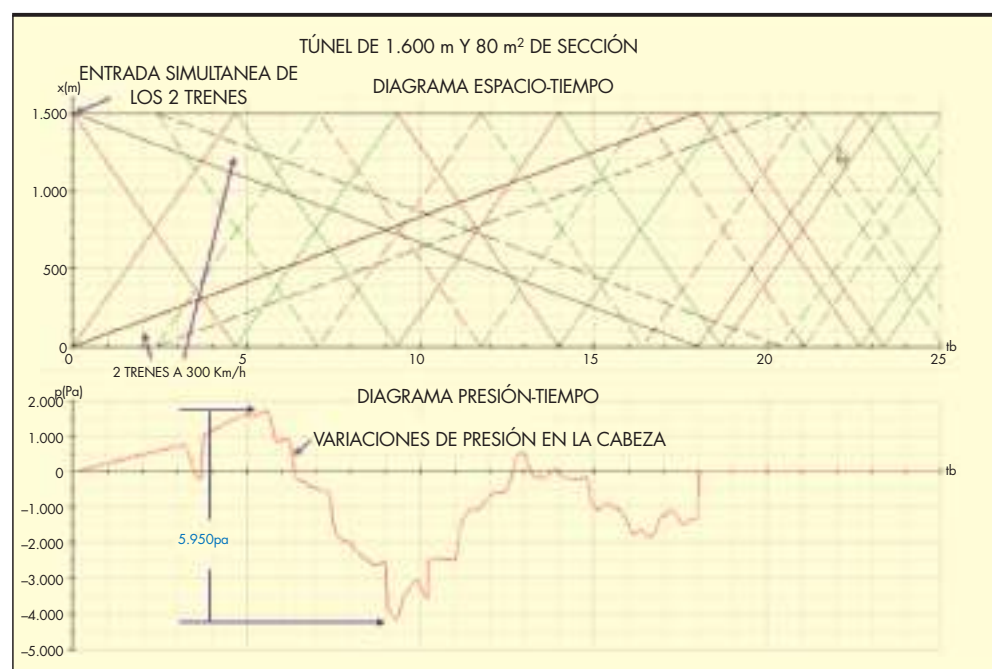


FIGURA 3. Cruce de dos trenes con entrada simultánea.

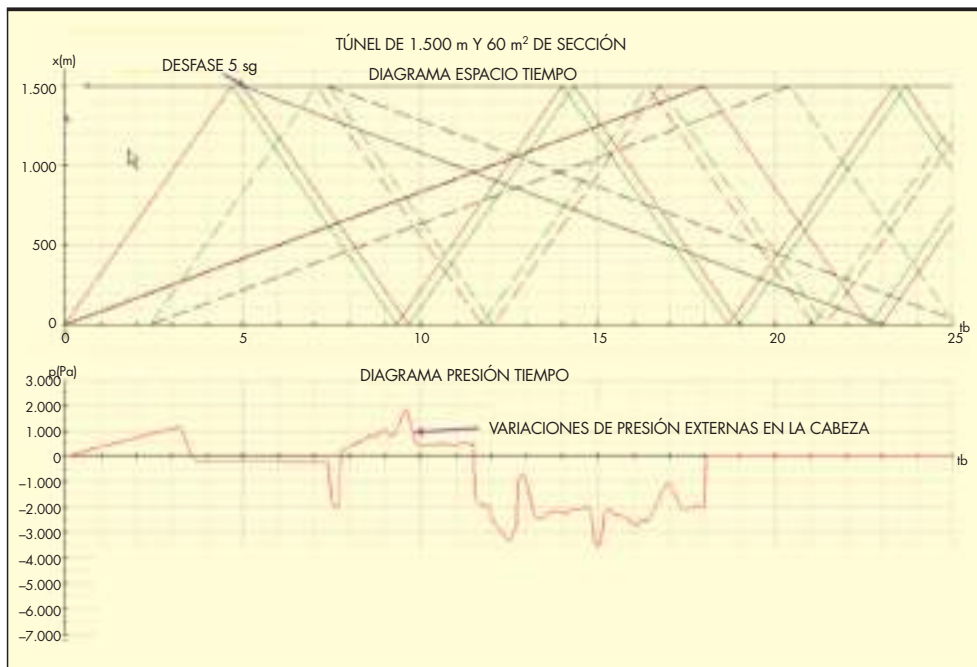


FIGURA 4. Diagrama de ondas, cruce de 2 trenes con desfase (5 sg) a la entrada.

El Comité mencionado anteriormente consideró que el modelo (b) tenía la ventaja de un proceso de cálculo relativamente sencillo y suficiente aproximación con las siguientes condiciones:

- No debían darse situaciones donde las transferencias de calor fueran importantes.
- El túnel debía ser lo suficientemente largo para los flujos se comportasen como no estacionarios en un tubo, pudiendo tratarse como unidimensionales.

El problema físico, en este caso, se resuelve aplicando las ecuaciones de continuidad, de la cantidad de movimiento y aplicando la condición de flujo isentrópico. La validación de la precisión en la estimación de las variaciones de presión con este método de cálculo se realizó en múltiples ensayos reales. En la Figura 5 se puede observar el alto grado de precisión entre la variación de presión calculada y la medida.

También se determinó que el criterio de diseño de los túneles debería estar basado en limitar la máxima variación de

presión que puede afectar a los pasajeros en determinado periodo temporal, que fue fijado en 3 o 4 segundos que es el tiempo que normalmente se tarda en equilibrar las presiones internas y externas del tímpano. Asimismo, se hicieron múltiples ensayos en cámaras de presión para evaluar las variaciones de presión consideradas como aceptables o como molestas por distintos colectivos de personas. Dada la heterogeneidad de las respuestas no se estableció ningún límite de confortabilidad recomendado por la U.I.C., siendo su definición potestad de cada ferrocarril.

En el punto 6 esta cuestión será ampliada.

4. EXPLOTACIÓN CON TRENES ESTANCOS

A partir de ciertas velocidades para obtener unas variaciones de presión acotadas y admisibles para los criterios de confort recomendables y que serán expuestos posteriormente, serían necesarias secciones muy grandes y por tanto tremendamente costosas, para no penalizar el confort o la velocidad al paso por los túneles.

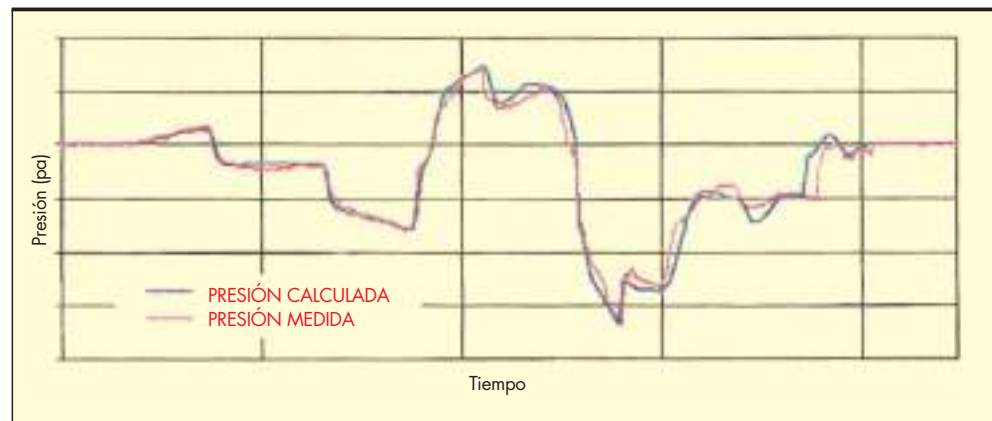


FIGURA 5. Comparación entre cálculo y medición.

Esta situación ya había sido considerada por los fabricantes de trenes que vieron como una necesidad del mercado la fabricación de los trenes llamados estancos.

Esta realidad añade un elemento nuevo de complejidad al diseño de los túneles, ya que el término estanco no es concepto absoluto: un tren no es o es estanco, sino que en el segundo caso tiene un cierto grado de estanqueidad que hay que conocer para determinar el grado de confort al que estarán sometidos los viajeros. La definición de los coeficientes de estanqueidad se trata a continuación:

Coeficientes de estanqueidad (E).-

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

1. El coche se deforma por la presión exterior. Como consecuencia del cambio de volumen, la presión interna puede llegar a variar en un porcentaje apreciable de la presión externa.
2. La diferencia de presión conduce el aire a través de ciertas zonas de fugas de forma que la presión interna tiende a seguir a las fluctuaciones de presiones externas, con un cierto desfase de tiempo.

Para cuantificar este fenómeno, se ha definido el concepto de grado de estanqueidad. Asimismo, para simplificar, se considera que el volumen del tren se mantiene constante a pesar de la deformabilidad del mismo, ignorando por tanto los efectos del punto 1, considerando exclusivamente los efectos de las fugas de aire.

Existen dos tipos diferentes de coeficientes de estanqueidad, el coeficiente de estanqueidad cuasi-estático E_{est} y el coeficiente de estanqueidad dinámico E_{din} . Es el dinámico el coeficiente de estanqueidad que verdaderamente describe las fluctuaciones de presiones externas e internas. Sin embargo, debido a las dificultades para una medición con la suficiente precisión de este coeficiente, erróneamente se utiliza la medición efectuada en un coche estacionario aislado E_{est} como una aproximación del mismo. E_{est} es varias veces superior (2 o 3 veces) al E_{din} .

Coeficiente de estanqueidad estático, E_{est} .-

E_{est} se determina fácilmente aplicando una sobrepresión interna a un coche aislado y midiendo el cambio temporal de presión interna cuando se ha eliminado la sobrepresión manteniendo constante la presión externa (normalmente la presión atmosférica). En este caso,

$$E_{est} = \frac{t}{Ln[\Delta p(0) / \Delta p(t)]}$$

Siendo:

t = tiempo.

$\Delta p(0)$ = Diferencia de presión al inicio.

$\Delta p(t)$ = Diferencia de presión al final.

Si el experimento termina cuando la presión diferencial ($\Delta p(t_2)$) ha caído hasta el 36.8% del valor inicial ($\Delta p(0)$), entonces $Ln(\Delta p(0) / \Delta p(t_2)) = 1$ y $E_{est} = t$,

Coeficiente de estanqueidad dinámico, E_{din} .-

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

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

En la cual,

$\Delta P(t)$ = diferencia de presiones, ($P_e - P_i$), en el tiempo t.

P_e = presión exterior al tren, varía con el tiempo.

P_i = presión interior del tren, varía con el tiempo.

E_{din} es siempre positivo y varía de 0 a ∞ , siendo 0 para un tren completamente no estanco e ∞ para un tren ideal, perfectamente aislado.

La medida de la estanqueidad dinámica requiere una combinación de experimentos y análisis teóricos. La prueba dinámica conlleva primeramente la medida de las presiones externas dinámicamente variable en el mismo sitio y al mismo tiempo que las variaciones de presión internas.

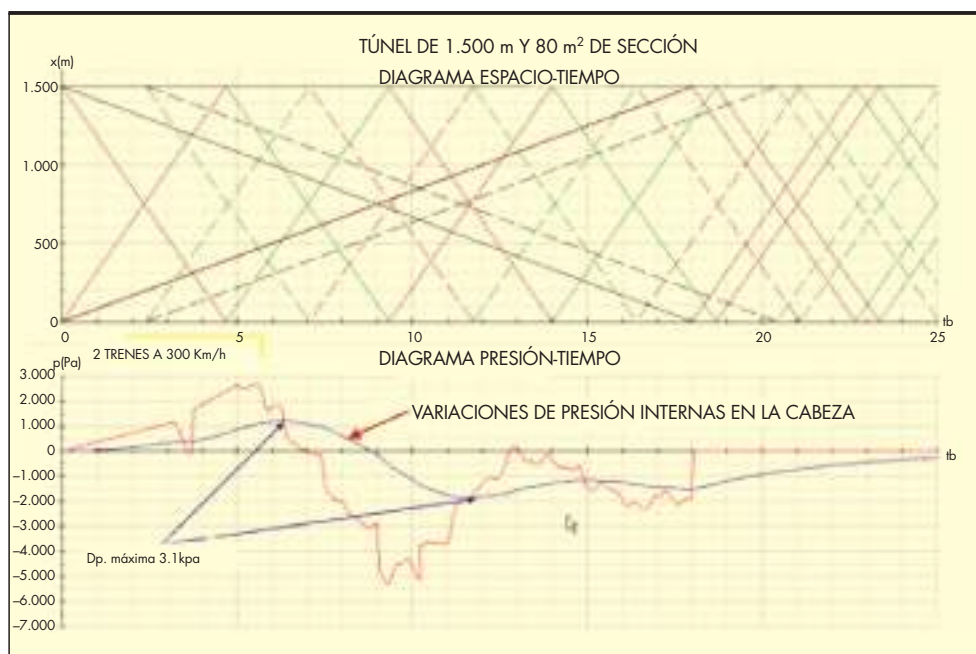


FIGURA 6. Cruce de 2 trenes con estanqueidad media/baja (4sg).

con unos sistemas de estanqueidad altos ($E_{din} > 6$ segundos) los efectos que sobre la salud de los viajeros pudiesen tener las variaciones de presión habían sido razonablemente desdiseñados dado el amplio margen existente entre los niveles de confort existentes, el umbral de percepción del dolor y el potencial daño (umbral de salud).

Sin embargo, con los nuevos trenes se podría dar la situación de unas variaciones de presión muy altas en el exterior que siendo adecuadamente filtradas en el interior por los sistemas de estanqueidad garantizasen un óptimo grado de confort pero que en caso de no funcionamiento de la misma comprometiese la salud de los pasajeros. Por tanto era necesario fijar el umbral de salud, que tiene que ser un límite irrevasable en cualquier circunstancia y de obligado cumplimiento.

Para definir ese límite se creó un grupo de trabajo al que fueron convocados un conjunto de médicos especializados en otorrinolaringología de diversos países de reconocido prestigio a nivel internacional, y que después de múltiples reuniones y discusiones acordaron el siguiente criterio:

“La máxima variación de presión (pico a pico), a la que los pasajeros y la tripulación de un tren pueden ser sometidos, no debe exceder de 10 kPa en cualquier intervalo de tiempo a lo largo del tránsito del tren en cualquier túnel”.

Esta definición del criterio de salud fue incorporada a la Especificación Técnica de Interoperabilidad del subsistema de Infraestructura siendo por tanto de obligado cumplimiento.

El tren de cálculo para asegurar el cumplimiento del requisito obligatorio tiene que ser el tren límite interoperable definido en la ETI del subsistema Material Rodante. Este tren límite está definido tanto en sus aspectos geométricos básicos: longitud máxima de 400m, sección transversal de 12m², como en sus aspectos aerodinámicos, viniendo estos definidos por su firma aerodinámica límite (curva característica tren-túnel-presión), que viene precisada en la normativa europea EN 14067-5 con el esquema de la Figura 9.

En la misma $\Delta P_N \leq 1600$, $\Delta P_N + \Delta P_{fr} \leq 3000$ y $\Delta P_N + \Delta P_{fr} + \Delta P_T \leq 4100$ pa

Estos valores corresponderían a un tren a una velocidad de 250km/h, y con una sección del túnel de 63m².

La firma aerodinámica de un tren se obtiene midiendo las variaciones de presión que se obtienen en un punto determinado en un túnel que cumpla una distancia mínima a la boca

de entrada a la entrada del tren objeto de la medición. La distancia mínima está definida mediante la expresión siguiente:

$$X_p = \frac{c \cdot L_{tr}}{c - V_{tr}} + \Delta X_1$$

Siendo c la velocidad del sonido, L_{tr} y V_{tr} la longitud y velocidad del tren y donde la distancia adicional ΔX_1 garantiza una buena separación temporal de las variaciones individuales de presión (unos 100 m se consideran suficientes).

En la Figura 10 se ha incluido un ejemplo de evaluación de la firma/huella aerodinámica de un tren:

Criterio de confort

A diferencia del criterio de salud, a nivel internacional no ha habido consenso para fijar el límite de confort, considerándose como un criterio a fijar por cada operador ferroviario. Al no ser considerado este criterio como un requerimiento esencial en la ETI no se fijaron límites al respecto, excepto los siguientes límites recomendados como no rebasables por la UIC y la norma UNE - EN 14067-5 (anexo B-3).

Trenes no estancos:

- 4.5 kPa en un periodo de 4 segundos para el caso de trenes que se crucen en un túnel con el desfase pésimo.
- 3.0 kPa en un periodo de 4 segundos para el caso de un túnel de vía única.

Trenes estancos:

La presión experimentada por un pasajero a bordo de un tren no debe exceder los siguientes cambios:

- 1000Pa en un periodo de 1 segundo.
- 1600Pa en un periodo de 4 segundos.
- 2000Pa en un periodo de 10 segundos.

El criterio en este caso es tanto para los trenes de vía única como para los de vía doble con el desfase crítico.

6. EL DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES EN ESPAÑA

Los documentos de referencia para el dimensionamiento de los túneles en España son:

- “Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos de presión sobre viajeros” **redactado por el Ministerio de Fomento.**

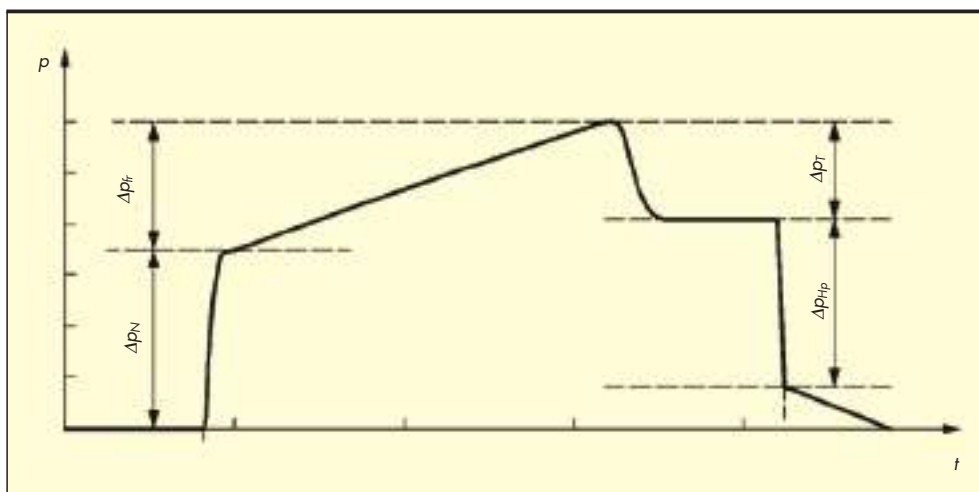


FIGURA 9. Firma aerodinámica del tren límite interoperable.

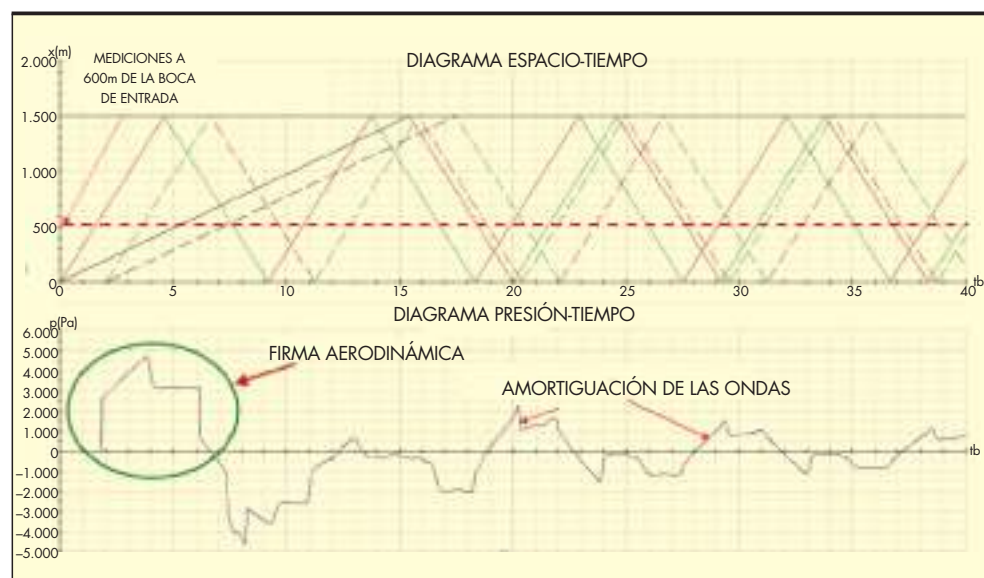


FIGURA 10. Ejemplo de caracterización de la firma/huella aerodinámica de un tren.

- “Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma, IGP-2008, IGP-4.1” de ADIF.

En ambos documentos se utilizan dos criterios complementarios:

- Criterio de salud
- Criterio de confort.

A continuación se analizan ambos criterios.

6.1. CRITERIO DE SALUD

6.1.1. Túneles de vía única:

Velocidad del tren: 350km/h.

La máxima variación de presión no debe superar los 10kpa durante todo el tránsito del tren en el túnel considerado el tren como no estanco. Los cálculos se deberán realizar para trenes de longitudes de 100, 200 y 400 m de longitud y con una sección transversal de 12 m² (máxima sección contemplada en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad en el subsistema Material Rodante).

6.1.2. Túneles de vía doble

Se analiza el caso de cruce de dos trenes no estancos a 300 km/h ó la velocidad de proyecto en el túnel incrementada en un 10% si el resultado es inferior a 300 km/h., con el desfase a la entrada pésimo. La máxima variación de presión no debe superar los 10 kpa durante todo el tránsito del tren en el túnel.

Las características de los trenes son las mismas que en el caso anterior.

6.2. CRITERIO DE CONFORT

6.2.1. Túneles de vía única

Se considera un tren convencional moderno no estanco a la velocidad de 220 km/h, limitándose a 2 kpa la máxima variación de presión en 4 segundos. El tren de cálculo tendrá una longitud de 200 m y una sección transversal de 10 m².

6.2.2. Túneles de vía doble

Se considera el cruce de dos trenes, con el desfase pésimo, uno de alta velocidad a 300 km/h y otro convencional a 220 km/h (en caso de la velocidad del proyecto sea inferior se conside-

rá la velocidad del mismo incrementada en un 10%, con un mínimo de 220 km/h), limitándose a 4 kpa en 4 segundos la máxima variación de presión que puede experimentar el tren convencional.

Adicionalmente, las “Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma” (IGP-2008) de ADIF consideran la comprobación del confort de los trenes con estanqueidad activa. En este caso se definen los límites de variación de presión interiores en 3 intervalos temporales siguientes:

- 1.0kPa en un intervalo de 1segundo.
- 1.6kPa en un intervalo de 4 segundos.
- 2.0kPa en un intervalo de 10 segundos.

Valores coincidentes con los límites recomendados por la norma europea y UIC.

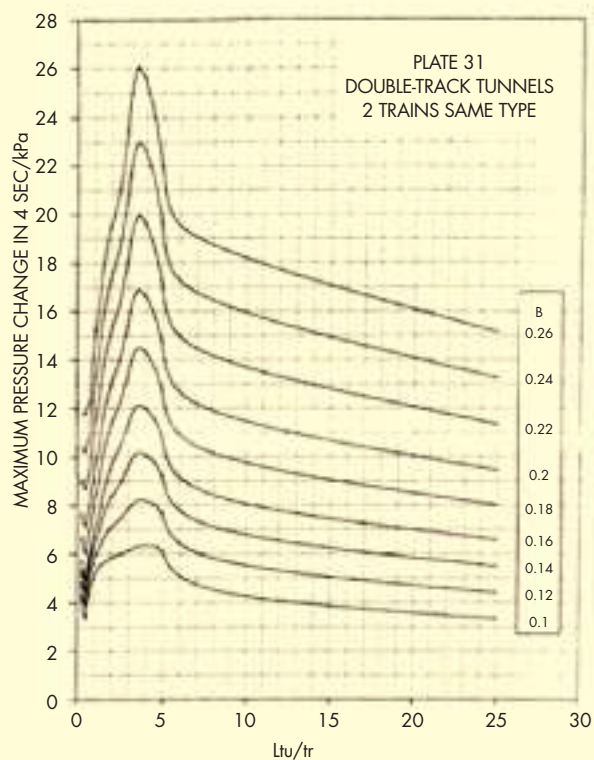
Los trenes tendrán las mismas características que en caso anterior y con una estanqueidad dinámica de 6 segundos. Dado que los trenes actuales de alta velocidad tienen una estanqueidad dinámica superior a 6 segundos los valores de diseño se consideran adecuados aunque sean los valores límite recomendados para trenes con estanqueidad activa.

7. EL PREDIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES. FICHA UIC 779/11

La UIC publica en el año 1995¹ el primer documento oficial orientado a servir como guía para la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en la problemática de los túneles en líneas de alta velocidad. Este primer documento se refirió exclusivamente a la consideración de trenes no estancos. Fue reeditado en el año 2005 con la inclusión de los resultados obtenidos en los trabajos realizados hasta el año 1998 que consistieron en recomendaciones para la definición de criterios de diseño y la potencial utilización de chimeneas para la reducción de las variaciones de presión como método alternativo o complementario en el diseño de los túneles.

¹ Trabajos dirigidos por el autor del presente artículo a la sazón Presidente del Subcomité de Túneles de dicho Organismo Internacional (1994-1998).

G.4.7. - STREAMLINED HIGH SPEED TRAIN, SPEED 300 km/h



G.5.5. - STREAMLINED HIGH SPEED TRAIN, SPEED 330 km/h

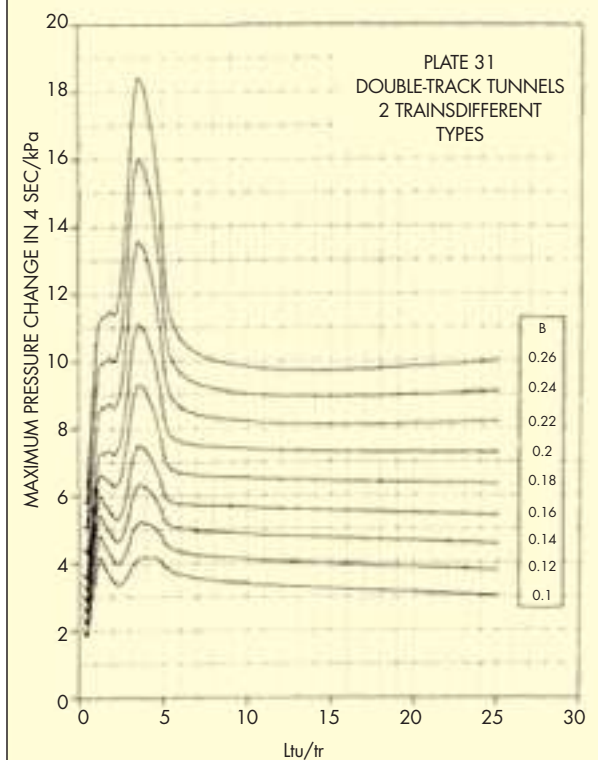


FIGURA 11 y 12. Gráficos ficha UIC 779/11.

El objetivo de este documento (ficha 779-11) era la confección de un documento de fácil uso que sirviese de guía para una predeterminación de la sección necesaria y que cubriese la mayor parte de los casos posibles:

En concreto, y para los trenes no estancos tiene en cuenta las siguientes funcionalidades y escenarios de explotación:

- Trenes de velocidad alta (remolcados): 180 a 220 Km/h.
- Ramas de alta velocidad: 200 a 350 Km/h.
- Los tipos de operación considerados fueron:
- Ramas de alta velocidad en vía única o doble (con cruces a la misma velocidad).
- Cruces de trenes de velocidad alta con ramas de alta velocidad.

Para cada combinación del tipo de túnel (vía única o doble), el tipo de tren y su velocidad, los resultados de la máxima variación de presión en diversos plazos temporales fueron dibujados como ordenadas para cada ratio de longitudes (longitud de túnel dividido por la longitud del tren) en abscisas y para un conjunto de coeficientes de bloqueo (sección transversal del tren dividido por la sección transversal del túnel). Esto fue realizado para los plazos temporales 1, 4 y 10 segundos (1 y 10 solo para vía única) para tener en cuenta los distintos criterios de diseño existentes en diversas Administraciones Ferroviarias (Figuras 11 y 12).

Utilización de la Ficha

Para la determinación de la sección de un túnel, es esencial tener definido el criterio de confortabilidad auditiva, las ca-

racterísticas de los trenes que lo utilizarán y sus posibles combinaciones y las velocidades máximas de los mismos.

Para cada combinación y entrando en la gráfica adecuada se puede obtener directamente la relación de bloqueo necesario. La obtención de la sección del túnel necesaria (sección libre a efectos aerodinámicos) se obtiene por una simple división entre la sección del tren y la menor de las relaciones de bloqueo calculadas para las distintas combinaciones de trenes.

Dada la complejidad de cálculo y las simplificaciones que hubo que realizar para dibujar las curvas, se recomienda que el uso de la ficha sea exclusivamente para el prediseño ya que, en ciertos casos, las diferencias entre los resultados de aplicación de la ficha y el cálculo específico pueden ser importantes, como por otra parte indica la propia ficha.

8. LONGITUD DE TÚNEL CRÍTICA

Como se indicó en el punto 3 y se puede comprobar en la forma de las curvas de las gráficas de la ficha de la UIC la longitud del túnel es relevante en relación a las máximas variaciones de presión que se generen. Se denomina longitud crítica de túnel la que da lugar a la presión negativa más importante y que en el caso de un túnel de vía única es aproximadamente:

$$L_{tu,crit} \approx \frac{L_{tr}}{4} \frac{c}{v_{tr}} \left(1 + \frac{c}{v_{tr}} \right)$$

Siendo c la velocidad del sonido y L_{tr} y V_{tr} la longitud y velocidad del tren.

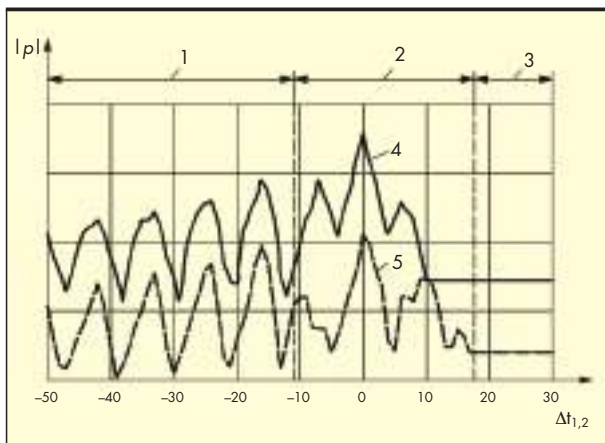


FIGURA 13. Presiones según desfase a la entrada.

En el caso de un túnel de vía doble la longitud crítica adopta el siguiente valor:

$$L_{tu,crit} \approx \frac{c}{2} \left(\frac{L_{tr,1}}{v_{tr,1}} + \frac{L_{tr,2}}{v_{tr,2}} \right)$$

Correspondiendo los subíndices 1 y 2 a los trenes que se pueden cruzar en el interior del túnel.

Como ejemplo y para una velocidad de 300 km/h, la longitud del túnel crítico es, aproximadamente, de 5 veces la longitud del tren si se trata de vía única y de 4 veces en caso de doble vía (cuando los dos trenes tienen la misma velocidad y longitud).

9. TÚNELES DE VÍA DOBLE. DETERMINACIÓN DEL DESFASE CRÍTICO

Como se ha comentado en los puntos anteriores, en el caso de túneles de vía doble se deben determinar las presiones con el desfase de entrada de los dos trenes que aseguren que estas son las mayores posibles, para ello es esencial determinar el desfase crítico. Según EN 14067-5 las franjas temporales para asegurar la captación de los picos debe ser: $\Delta t \leq L_{tu} / (5c)$.

En la Figura 13 se muestran los máximos valores absolutos de diferencias de presión en función del momento relativo

de entrada de dos trenes idénticos que circulan a la misma velocidad.

Siendo:

$|p|$ valores absolutos de diferencia de presión.

$\Delta t_{1,2}$ tiempo relativo de entrada del tren 1 y del tren 2, en s.

1 tren contrario abandona el túnel antes de la entrada del tren 1 (cruce virtual).

2 ambos trenes en el túnel.

3 tren contrario entra en el túnel después de la salida del tren 1 (caso de un solo tren).

4 $p-p_0 > 0$.

5 $p-p_0 < 0$.

Se puede observar que las presiones máximas se producen cuando están los dos trenes en el interior del túnel (parte 2 de la Figura). El máximo número de cruces o simulaciones (N_c) para asegurar que se ha captado la situación crítica es por tanto:

$$N_c = \frac{t}{\Delta t} = \frac{L_{tu}/V}{L_{tu}/5c} = \frac{5c}{V}$$

Es decir, el número de simulaciones/cálculos es independiente de la longitud del túnel, dependiendo exclusivamente de la velocidad del tren de cálculo.

10. CONSIDERACIONES ADICIONALES: RESISTENCIA AL AVANCE

El cálculo de la sección de un túnel no se debe considerar aisladamente del diseño de la línea, esta idea es especialmente relevante cuando se trata de túneles de cierta longitud, y aquí aparece un nuevo concepto a considerar que es el de **resistencia al avance**.

En general, las formulas de resistencia al avance al aire libre de un tren cualquiera vienen definidas por expresiones polinómicas del tipo:

$$R = C_1 + C_2 V + C_3 V^2$$

Siendo V la velocidad del tren y los C_i coeficientes específicos para cada tipo de tren. El primer término (C_1) es la resistencia mecánica a la rodadura y es una función lineal de la masa del tren. $C_2 V$ representa principalmente la resistencia por pérdidas de aire de los sistemas de refrigeración de las lo-

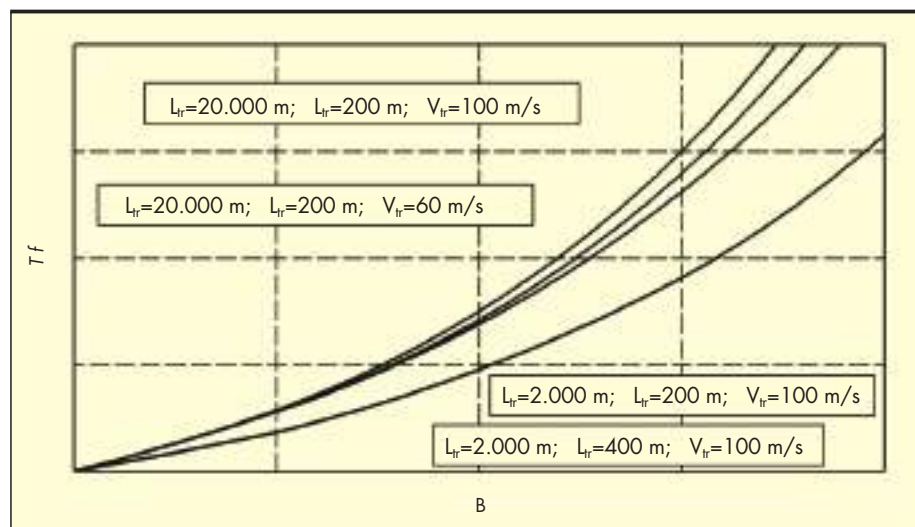


FIGURA 14. Valores Tf promediados de un tren de alta velocidad (EN 14067-3).

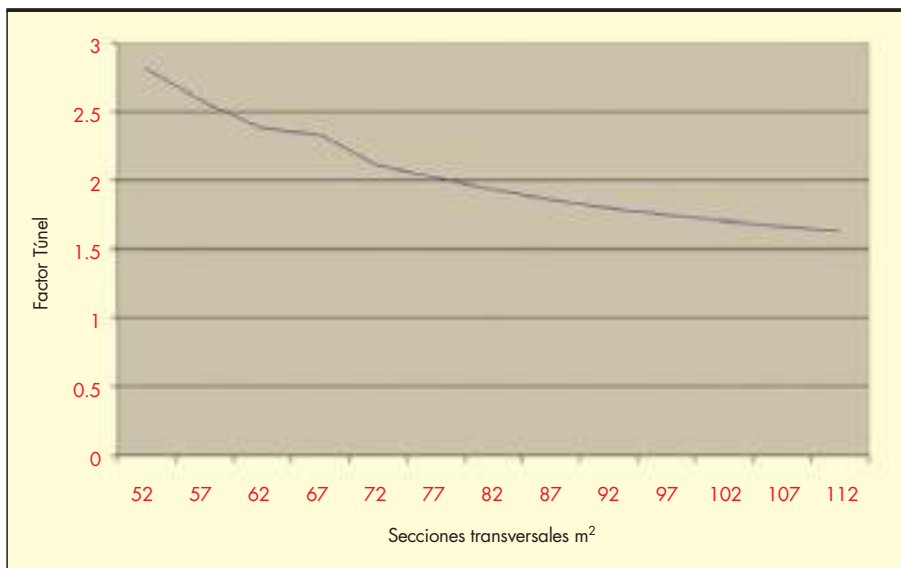


FIGURA 15. Factor túnel función de la sección transversal del túnel.

comotoras y de climatización de los coches de viajeros, siendo $C_2 = Q\rho$, donde Q es el caudal volumétrico total de aire de la ventilación forzada y ρ la densidad del aire. El tercer término agrupa la resistencia a la presión externa y la debida al rozamiento aerodinámico.

En el caso de una vía en rampa, a esta expresión hay que añadirle la resistencia gravitatoria para superar la diferencia de cota (función exclusiva del peso del tren y de la rampa). Esta resistencia para una rama tipo AVE (S 100) y una rampa de 12.5 ‰ es del mismo orden de magnitud a la resistencia al avance para velocidades de 300 km/h (5268 daN vs 5798 daN).

La resistencia al avance en el interior de un túnel se incrementa al multiplicarse la componente aerodinámica por el factor túnel (T_f) convirtiéndose la formula anterior en:

$$R = C_1 + C_2 V + T_f C_3 V^2$$

T_f es la relación (≥ 1) entre la resistencia aerodinámica en túnel y la resistencia aerodinámica al aire libre.

En la Figura 14 está reflejado de forma cualitativa algunas curvas para casos específicos.

Este factor depende de numerosos factores, siendo la relación de bloqueo B (sección tren/sección túnel) el más importante, aunque también afectan el tipo de tren y su longitud, y en túneles cortos (< 2000 m), la longitud y la velocidad del tren.

De forma cuantitativa en la Figura 15 se ha incluido la curva con valores de T_f en función de la sección transversal del túnel para un AVE (S 100) circulando a 300 km/h.

Por tanto, la potencia de un tren al pasar por un túnel debe ser suficiente para vencer su resistencia al avance a la velocidad objetivo, superando el efecto túnel (con la relación de bloqueo calculada con las metodologías y criterios de confort mencionados) y además vencer la fuerza gravitatoria en caso de vía en rampa. Este conjunto de factores puede hacer que el tren de alta velocidad no tenga potencia suficiente para mantener la velocidad requerida. En este caso, se puede actuar aumentando la sección del túnel (menor relación de bloqueo) o modificando el trazado para disminuir la rampa, o incluso aceptando que la velocidad máxima no podrá ser alcanzada por algunas circulaciones por insuficiencia de po-

tencia (ramas más potentes o con menor sección transversal podrían alcanzar la velocidad objetivo).

Un análisis económico con la valoración de las alternativas que puedan plantearse (a nivel de anteproyecto) debe ser la única manera de obtener la solución óptima. Independientemente del estudio de alternativas, es recomendable intentar minimizar la declividad de la vía a su paso por los túneles, especialmente en túneles largos, para evitar que el afecto del factor túnel se añada al correspondiente a la rampa.

11. SECCIONES MÍNIMAS

Independientemente de las consideraciones aerodinámicas mencionadas, por consideraciones de gálibo y exigencias de la Directiva de Seguridad en Túneles Ferroviarios (fundamentalmente en la necesidad de arcones de evacuación), las secciones se recomiendan que no sean inferiores a los siguientes valores (valores aplicados por ADIF):

- Vía única: 52 m².
- Vía doble: 85 m².

12. CONCLUSIONES

La determinación de la sección transversal de los túneles de alta velocidad ha dejado de ser algo empírico, y basado en criterios poco o nada científicos, para convertirse en componentes de la infraestructura cuyo diseño/cálculo se optimiza en función tanto de los requerimientos funcionales generales de la línea en la que están situados como de las características geométricas específicas del trazado del mismo.

13. BIBLIOGRAFÍA

- Reports ORE C 149 (1985). *Problèmes soulevés par la circulation des trains à grande vitesse dans les tunnels*.
 Ficha UIC 779/11 (1995-2005). *Determination of tunnels cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations*.
 EN 14067-3. *Aplicaciones ferroviarias. Aerodinámica dentro de túneles*.
 EN 14067-5. *Aplicaciones ferroviarias. Requisitos y métodos de ensayo aerodinámico dentro de túneles*.