

ALGUNOS EFECTOS AERODINÁMICOS Y LOS TÚNELES DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD MADRID-SEVILLA

(SOME AERODYNAMIC EFFECTS AND THE TUNNELS ON THE MADRID-SEVILLA ROUTE OF THE HIGH SPEED TRAIN)

Elías García González, Asesor Dir. Gral. Téc. INECO

520-4

Fecha de recepción: 6-VII-92

RESUMEN

Es probable que, si el lector tiene oídos delicados, y viaja por alguna de las numerosas líneas ferroviarias con túneles que tiene España, haya experimentado, al circular por los mismos, alguna sensación de obturación en los oídos que puede llegar a ser algo molesta, aunque de muy breve duración, apenas dos o tres segundos. A medida que las velocidades aumentan, estas sensaciones, para algunos viajeros, pueden ser francamente desagradables. Sobre ésta y otras cuestiones, relacionadas con las altas velocidades ferroviarias y sus efectos en los túneles, así como de las medidas para su anulación o atenuación, trata el presente artículo.

SUMMARY

It is likely that if the reader has sensitive ears and has travelled on one of the numerous trains in Spain which pass through tunnels, he may have experienced the sensation of his ears plugging up. This sensation, although lasting very briefly, scarcely two or three seconds, can be somewhat irritating. As speed increases, this sensation becomes downright disagreeable for some travelers. This article discusses this and other questions related to high speed trains and their effects in tunnels, as well as the measures which can be taken to reduce or eradicate them.

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes velocidades tienen un gran atractivo para grandes sectores de la población, debido a que pueden reducir drásticamente la duración de los viajes. En el caso de la nueva línea Madrid-Sevilla, por ejemplo, el mejor tiempo de viaje, antes de su inauguración, era de 5 h 52 min, y ahora es de 2 h 45 min. Es decir, se reduce en cada viaje 3 h y 2 minutos.

Además, a pesar de que las velocidades son mucho mayores, el viaje es bastante más confortable que en las líneas convencionales.

Para ello ha sido necesario estudiar muy minuciosamente un sinnúmero de problemas y de efectos en los ámbitos de la vía y del tren, así como de la interacción del tren con

el mundo que le rodea. Y, muy en particular, con:

- la vía,
- la catenaria,
- el aire.

La interacción del tren con el aire que lo rodea, por ejemplo, es la que induce las acusadas líneas aerodinámicas de todo el contorno exterior de los modernos trenes, y en particular el de sus morros, que rivalizan en esbeltez con el de los aviones.

Pues bien, la interacción aire/tren, en los túneles, ha suscitado toda una problemática nueva, algunos de cuyos aspectos no son aún perfectamente conocidos, y cuya resolución ha requerido (requiere) el concurso de disciplinas tan distantes como la ingeniería ferroviaria, la medicina y la aerodinámica.

2. ALGUNOS FENÓMENOS AERODINÁMICOS ASOCIADOS A LA CIRCULACIÓN FERROVIARIA EN TÚNEL

Cuando un tren arranca suavemente, como suelen hacerlo en una estación, aumentando pausadamente su velocidad, se establece un flujo del aire a su alrededor que, si la atmósfera es estable, tiene características de flujo permanente. Es decir, las acciones del aire sobre el tren se traducen en presiones y succiones de ubicación bien definida y de intensidad constante.

Esto permite, por ejemplo, ubicar adecuadamente las tomas o escapes de aire de diverso uso u origen a lo largo del tren.

Este régimen permanente (y simétrico, si el viento se encuentra en calma), se rompe en presencia de fuertes vientos, complicándose las cosas en diversas direcciones y cuantías.

Por ejemplo, en algunos países como Japón⁽¹⁾, hay sistemas de alarma que, a partir de cierta velocidad del viento, provocan la disminución de la velocidad de sus trenes para eludir el riesgo de vuelco y descarrilamiento.

En el caso del aire de los túneles (en un túnel de 1 km de longitud y 50 m² de sección libre, puesto que la densidad del aire es del orden de 1,25 kg/m³, hay aproximadamente 75 t de aire), cuando un tren entra a gran velocidad se produce una especie de percusión, que origina una compresión local del aire, la cual se transmite, con la velocidad del sonido en el aire (unos 340 m/s), a lo largo del túnel. Al llegar la onda a la boca opuesta se refleja como onda de dilatación. Otra compresión se produce al llegar esta onda al morro de la locomotora. También se produce otra dilatación al entrar la cola del tren en el túnel, etc... Como consecuencia de esta entrada brusca del tren en el túnel, y de la serie de ondas que origina, se establece en el aire del mismo un régimen transitorio muy acusado, muy alejado del régimen permanente que surgiría si la entrada fuese con velocidad imperceptible, y fuese creciendo suavemente como en el proceso de arranque de los trenes.

De esta forma las variables termodinámicas asociadas al flujo del aire en el túnel (y en el tren, si éste no es estanco), en particular la presión, la velocidad y la temperatura varían a lo largo del tiempo (y del túnel y del tren) de forma compleja.

Como ejemplo, puede verse en la Fig. 1 el diagrama de presiones del aire en el vagón más próximo a la locomotora que arrastra un tren no hermético, de 200 m de longitud, 10 m² de sección transversal, y buenas características aerodinámicas, circulando a 200 km/h por un túnel de 1.000 m de longitud. Una de las curvas corresponde al caso de un túnel de 20 m² de sección, y la otra a 70 m².

Se aprecia la irregular distribución de las presiones del aire a lo largo del tiempo, aumentando y disminuyendo respecto a la presión atmosférica, p_0 . No obstante, algunos puntos de estos diagramas tienen interpretación sencilla.

Por ejemplo, los puntos M_1 corresponden al instante en que la onda de dilatación, provocada por la entrada de la cola del tren en el túnel, llega al vagón considerado. Se observa cómo el aire, que se encontraba comprimido en la zona de este vagón (próximo a la cabeza del tren), sufre una brusca caída de presión, debido a la llegada de la onda de dilatación. Conociendo las velocidades del tren (V) y del sonido (C), y la longitud del tren (L_t), se obtiene fácilmente la abscisa de los puntos M_1 (instante de encuentro de la onda y del vagón):

$$t_1 = \frac{C}{V(C-V)} L_t \quad (1)$$

Que, en nuestro caso, da $t_1 = 4,3$ segundos, sensiblemente coincidente con lo que se aprecia en la Fig. 1 para las abscisas de los dos puntos M_1 .

Los puntos M_2 corresponden al instante en que la onda (también de dilatación), reflejada de la de compresión producida por la entrada del morro del tren en el túnel, llega al vagón que venimos considerando. Conociendo, además de las velocidades del tren (V) y del aire (C), la longitud del túnel (L_g), ese instante (medido a partir de la entrada de la cabeza del tren en el túnel) viene dado por:

$$t_2 = \frac{2}{V+C} L_g \quad (2)$$

Que, en nuestro caso, nos da $t_2 = 5,0$ segundos, prácticamente coincidente con lo que se aprecia para la abscisa de los puntos M_2 . Se constata una nueva caída de la presión, provocada por la onda depresiva que acaba de llegar.

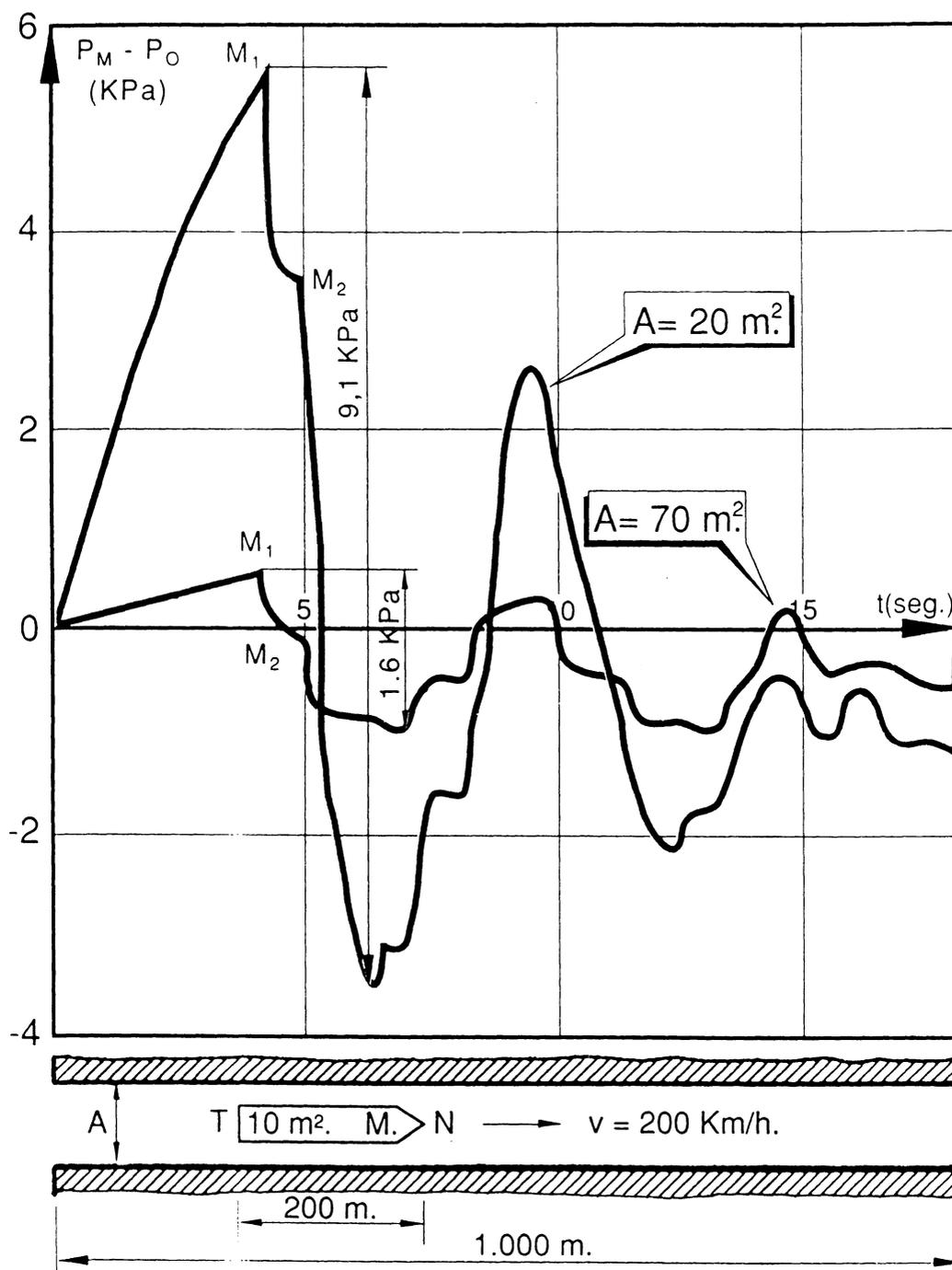


Fig. 1. Presión del aire, a lo largo del tiempo, en el vagón de cabeza, M, de un tren que circula a 200 km/h por un túnel de 1.000 m de longitud. Una de las curvas corresponde a una sección del túnel de 20 m², y la otra a 70 m².

En la Fig. 1 se observa que aunque las dos curvas, representativas de túneles de secciones muy distintas (20 m² y 70 m²), tienen abscisas sensiblemente iguales para los puntos M₁ y M₂; no ocurre lo mismo con las ordenadas, que nos miden la presión del aire en el túnel a la altura del vagón considerado (y en el mismo vagón, si el tren no es hermético). Y es que estas presiones, además de las velocidades y longitudes señaladas, dependen fuertemente de la relación entre las secciones del tren

y del túnel, que son bien diferentes en nuestro caso: $10/20 = 0,50$, para una de las curvas, y $10/70 = 0,14$, para la otra.

A continuación enumeraremos y comentaremos los fenómenos de tipo aerodinámico, asociados a la interacción tren/aire/túnel, que tienen mayor repercusión en el diseño de los túneles ferroviarios.

2.1. Resistencia al avance de un tren en un túnel

Los motores de los elementos tractores de un tren han de provocar, a través del contacto de los carriles con las ruedas, unas fuerzas en sus llantas, Z , que han de vencer las diversas fuerzas que se oponen al movimiento del tren. Estas fuerzas propulsoras pueden expresarse de la siguiente manera:

$$Z = (i + a + bv + cv^2) G \quad (3)$$

Siendo:

- i = pendiente de la vía;
- v = velocidad, que suponemos constante, del tren;
- G = peso del tren;
- (a , b , c) = constantes que dependen, principalmente, de las características del tren y del trazado en planta de la vía.

En la fórmula (3) el término cuadrático en v representa la componente de resistencia al avance originada por el aire. Pues bien, el valor de c , que caracteriza a esta componente para un mismo tren, es mayor en el caso de circulación en túnel que cuando la circulación es al aire libre. A veces mucho mayor. Esto explica el que, si se quiere mantener la misma velocidad en túnel que al aire libre, será necesario disminuir las pendientes de los tramos en túnel, como se deduce de la fórmula (3). Por ejemplo⁽²⁾, por este motivo, los ferrocarriles italianos rebajan en 3‰ las pendientes de los tramos en túnel, en sus líneas nuevas.

Este problema de la mayor resistencia al avance en los túneles, especialmente si éstos tienen una sección muy reducida (como, por ejemplo, el Metro de Londres), o son muy largos (como el túnel bajo el Canal de la Manga⁽³⁾), es conocido desde antiguo. Por ejemplo, hay intentos de estimar la resistencia al avance⁽⁴⁾ de los trenes en el túnel del Simplón desde el mismo año de su inauguración (1906, 19,8 km). Por eso, aunque el problema tiene gran importancia económica, especialmente a medida que, como ocurre con los trenes modernos, aumentan las velocidades en cuyo caso el término cuadrático en (3) predomina sobre los demás, no insistiremos en este fenómeno aerodinámico, por ser bien conocido, bastante estudiado, y fácil de evaluar (coeficiente c) a partir de las características geométricas del tren y del túnel,

así como de las propiedades del aire (densidad, rozamientos aire/tren y aire/túnel).

2.2. La velocidad del aire en un túnel

El diagrama que nos da la variación de la velocidad del aire en un punto del túnel, a lo largo del tiempo, no es tan complicado como el de la Fig. 1, que nos daba el diagrama de presiones. Suele ser creciente hasta llegar el tren al punto considerado, bajando bruscamente hasta hacerse, incluso, nula o negativa durante el tránsito del tren, y creciendo de nuevo bruscamente, permaneciendo sensiblemente constante hasta que el tren sale del túnel⁽⁵⁾.

Cuando la velocidad del tren es elevada, la velocidad del aire (que crece como la velocidad del tren) puede ser superior a la compatible con el equilibrio de las personas que circulen por el túnel. Esta velocidad límite, según los ferrocarriles japoneses, es de 17 m/s = 61,2 km/h, que coincide con el grado 7 de la escala de Beaufort⁽⁶⁾. El mismo límite aprecian los ferrocarriles británicos, rebajándolo a 11 m/s = 39,6 km/h⁽⁷⁾ cuando este viento tiene carácter esporádico e inesperado. Alguna red, como la suiza⁽⁷⁾, limita la velocidad del aire en el caso de personas que realizan trabajos penosos a 6 m/s = 21,6 km/h, para evitar el efecto de los resfriados, que reducen el rendimiento de las personas cuando las corrientes de aire alcanzan niveles tan modestos como los de 1 m/s = 3,6 km/h.

Es de destacar que, según el Comité de expertos ORE C. 179, este aspecto de los fenómenos aerodinámicos en los túneles, especialmente cuando va ligado a turbulencias del aire, constituye el principal peligro para el personal que trabaja en los mismos. Lo cual explica el que se limite la velocidad de los trenes en estas ocasiones.

Señalaremos que los dos fenómenos, que hemos comentado (aumento de la resistencia al avance en los túneles, velocidad del aire en los mismos), pueden atenuarse disminuyendo la velocidad de los trenes, lo cual va en contra de lo que exige la competencia con los demás modos de transporte. Por ello es lógico buscar otras alternativas. Una de ellas consiste en diseñar los túneles con una amplia sección transversal. Esta medida también es favorable a los efectos de las variaciones de presión, como se comenta ampliamente a continuación.

2.3. Las variaciones de presión del aire, en el túnel y en el tren

Ya se ha comentado este fenómeno, derivado del estado transitorio que se establece en el flujo del aire del túnel, como consecuencia de la brusca entrada del tren.

Estas variaciones de presión, como puede apreciarse en la Fig. 1, son modestas, incluso en casos de velocidades elevadas y túneles de muy reducida sección. Las máximas variaciones, en el caso de $V = 200$ km/h y sección del túnel $A = 20$ m², sobre la presión atmosférica no llegan a 6 kPa y -4kPa (la presión atmosférica vale, aproximadamente, 100 kPa). La máxima oscilación vale 9,1 kPa, es decir, no llega al 10% de la presión atmosférica, mucho menor que las variaciones de presión que experimenta el aire de un avión durante el despegue o el aterrizaje. Sin embargo tienen una particularidad notable, y es que estas oscilaciones tienen lugar en un tiempo muy reducido, y hay varias, de intensidad distinta pero apreciable, a lo largo del tiempo de tránsito por el túnel. De lo cual se derivan efectos que pueden ser nocivos para los revestimientos/sostenimientos de los túneles, y molestos para los viajeros, si los trenes no tienen adecuado nivel de hermeticidad.

2.3.1. Efectos sobre los revestimientos/sostenimientos del túnel

Antes de nada diremos que no es éste un problema muy preocupante, pero que no se puede ignorar, y que es necesario tener en cuenta a la hora de diseñar el revestimiento de los túneles.

Ya se han visto las oscilaciones de presión que se producen, de un valor máximo del orden de 10 kPa (valores mayores podrían causar al personal, eventualmente en el túnel, molestias auditivas insoportables, como posteriormente se verá). Pues bien, esa oscilación de presiones (equivalente aproximadamente a $0,1$ kp/cm² = 1 t/m²) podría inducir a un efecto de succión sobre los paramentos del túnel de 1 t/m². Esta succión, actuando por ejemplo en un fragmento de gunita fisurada, de $0,5$ m², produciría una atracción de 5.000 N. Más que suficiente para provocar su desprendimiento si el fragmento no está muy bien ligado a la malla de acero que suele acompañar al hormigón proyectado, especialmente si las oscilaciones posteriores, aunque de menor entidad, se suceden con una frecuencia desfavorable.

Esto seguramente explica el que los túneles de todas las líneas nuevas de alta velocidad, que conocemos, sean revestidos con un espesor importante de hormigón una vez conseguida su estabilización. Aunque, desde el punto de vista resistente, bastaría una capa de hormigón proyectado de muy pocos centímetros. Los efectos de un desprendimiento como el mencionado, en un tren circulando a gran velocidad, podrían ser francamente peligrosos.

Una alternativa, al menos en túneles normales, en los que la rugosidad no juega un papel importante, podría ser la de un revestimiento de hormigón armado con fibras, de espesor más reducido que el de hormigón encofrado, pero con una mayor tenacidad y menos vulnerable a los efectos de tipo local mencionados. Aunque su mayor coste es probable que, mayoritariamente, incline la solución hacia la que hemos comentado.

2.3.2. Efecto sobre el confort de los viajeros, y sobre el personal en los túneles

Es éste, seguramente, el aspecto más novedoso de las consecuencias de la alta velocidad sobre los túneles ferroviarios, y a su estudio han dedicado (y aún dedican) numerosos recursos y tiempo las Redes que integran la Unión Internacional de los Ferrocarriles (UIC). El carácter multidisciplinario de estos estudios hace que su integración sea difícil. En el presente año la Subcomisión de Túneles de la UIC ha iniciado los trabajos de integración, con la intención de redactar un documento de fácil utilización por los ingenieros responsables del diseño de los túneles, teniendo en cuenta, cuando sea pertinente, los efectos de las variaciones de presión en el confort (inconfort) de viajeros y personal de servicio en los túneles.

A continuación hacemos algunos comentarios sobre los aspectos más sobresalientes ligados a esta cuestión⁽⁸⁾:

- Respecto al origen del problema diremos que, el oído humano, cuando la diferencia de presiones entre ambos lados de la membrana del tímpano alcanza ciertos niveles, procura equilibrarlas mediante los mecanismos reflejos o conscientes de que disponemos los humanos: bostezo, deglución, comunicación de la cara interior de la membrana con la atmósfera a través de la trompa de Eustaquio,... Pero, si las variaciones de presión se producen en un corto espacio de tiempo, de unos pocos segundos, entonces no da tiempo a provocar dicho equilibrio, produciéndose sensacio-

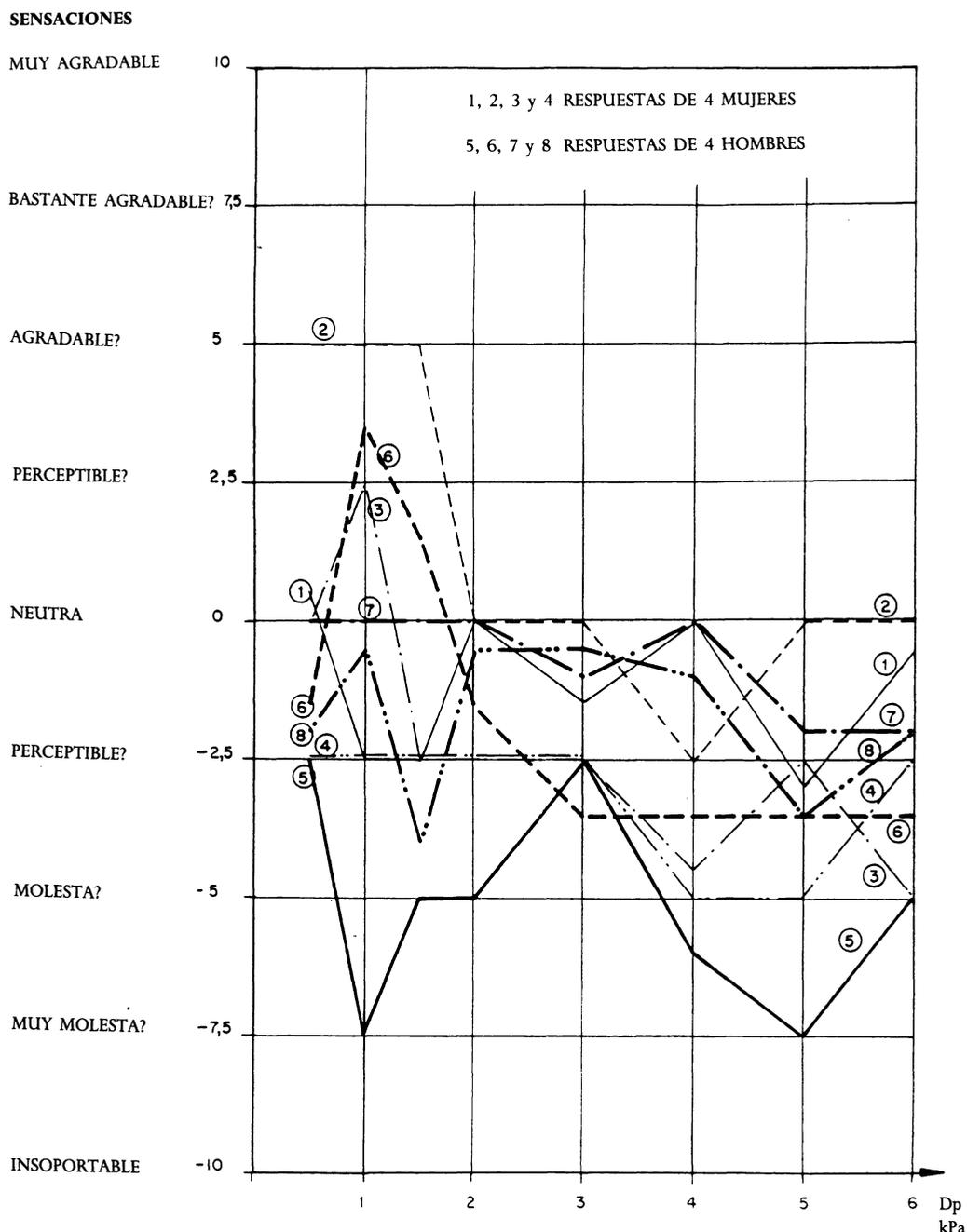


Fig. 2. Calificaciones de las sensaciones percibidas por 8 personas al experimentar variaciones de presión entre 0,5 y 6 kPa en la cámara de presión del CEV de Bretigny (1984).

nes que, en un porcentaje elevado, son de desagradable. Aunque para ciertas personas, pueden ser sensaciones neutras e, incluso, placenteras.

- Ya hemos visto que, en el caso de los trenes circulando por los túneles, se producen este tipo de variaciones de presión. En los ejemplos de tren y túneles que se viene comentando, las máximas valen 9,1 kPa (túnel de 20 m²) y 1,6 kPa (túnel de 70 m²). Y se producen en un intervalo inferior a 3 segundos.

- Algunos ferrocarriles, en particular los británicos, que no han construido líneas nuevas de alta velocidad, pero que circulan a 200 km/h en varias de sus líneas antiguas, tuvieron que reducir la velocidad al paso por varios de sus túneles de sección reducida (en el entorno de los 25 m² para los de vía única y de 45 m² para los de vía doble), para atenuar las molestias auditivas experimentadas por algunos viajeros.

- Los ferrocarriles italianos, en su búsqueda de una

SENSACIONES

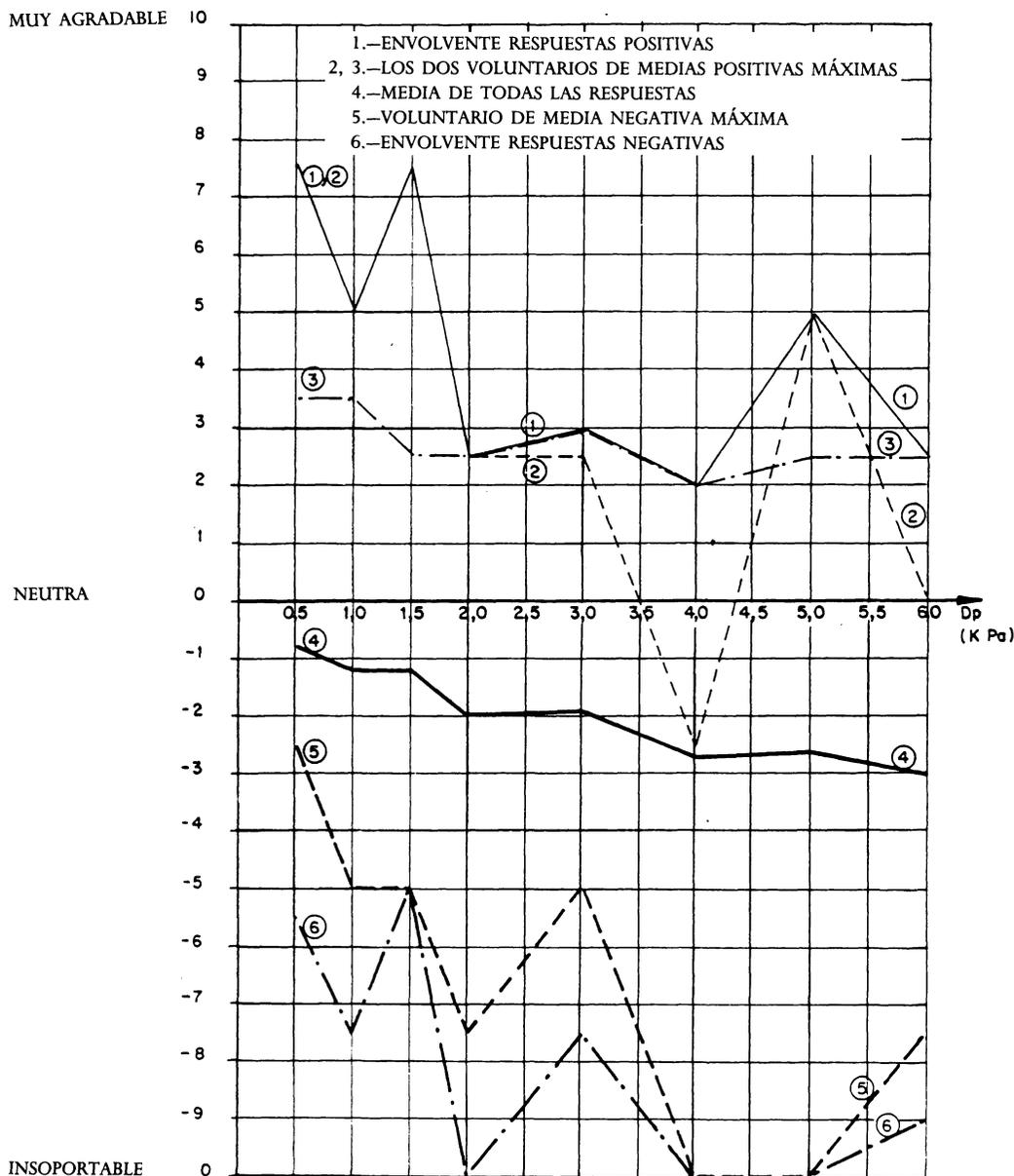


Fig. 3. Evaluaciones medias (diagrama 4) y extremas, positivas y negativas, de las 768 variaciones de presión experimentadas por 96 voluntarios en las pruebas realizadas en 1984 por la UIC, en la cámara de presión del CEV de Bretigny.

solución correcta para atenuar los efectos aerodinámicos en los túneles de sus líneas nuevas de alta velocidad, van por su cuarto tanteo (53,7 m²; 60,6 m²; 65,6 m²; 76,0 m²). Y es que, de los dos factores de los cuales depende una solución correcta (cálculo preciso de los diagramas de presión que se van a producir al circular un tren por un determinado túnel; criterio de confort/inconfort deducible a partir de dichos diagramas), el primero de ellos está bien sustanciado. Pues las presiones del aire se pueden calcular

con precisión suficiente con los programas elaborados a partir de los estudios de la UIC, tanto para el caso de un único tren en un túnel (túneles de vía única o doble) como el de dos trenes que se cruzan en un túnel de vía doble. Pero no ocurre lo mismo con el criterio de confort, sobre el cual se han realizado numerosas pruebas para tratar de definirlo, sometiendo a voluntarios a variaciones de presión de diversas intensidades y duraciones, tanto en cámaras de presión como en viajes con trenes y por túneles reales.

De dichas pruebas se va perfilando un criterio de confort, pero no con la rotundidad que pudiera esperarse de un fenómeno evaluable objetivamente con precisión (variaciones de presión, en un cierto intervalo de tiempo). Y es que, la evaluación (subjetiva) por cada viajero de los efectos asociados a dicho fenómeno objetivo, como en tantos otros casos en los que interviene la apreciación sensorial de una situación transitoria, resulta muy variable según las personas. Y, para cada persona, según su estado físico o psíquico, tal como puede comprobarse en la Fig. 2. En el eje de abscisas figuran las variaciones de presión del aire en tres segundos, $Dp(3)$, en una cámara de presión, en la que se encontraban 8 voluntarios. Estas variaciones oscilaron entre 0,5 y 6 kPa. En ordenadas figuran las calificaciones de las sensaciones percibidas por los voluntarios (4 mujeres y 4 hombres), según una escala (entre -10 y $+10$) de la cual se indicaba que:

+10 significa una sensación muy agradable;

0 significa una sensación neutra;

-10 significa una sensación intolerable.

En la Fig. 2 cada diagrama representa las calificaciones dadas por cada una de las 8 personas a las variaciones de presión, en 3 segundos, de valor 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3; 4; 5; 6 kPa.

Se aprecia, en dicha figura, una tendencia general a empeorar la calificación a medida que aumentan las variaciones de presión, pero con notables diferencias de apreciación entre las distintas personas, y también para cada persona, según los diversos $Dp(3)$.

- En la Fig. 3 se hace un resumen gráfico de las 768 respuestas (calificaciones) obtenidas de los 96 voluntarios, en las pruebas de las que en la Fig. 2 se da una muestra de 8 personas elegidas al azar.

El diagrama 4 de la Fig. 3 representa, para cada $Dp(3)$, la media de las calificaciones de los 96 voluntarios. Se observa una clara evolución negativa de las mismas, a medida que aumentan $Dp(3)$ hasta 6 kPa. Siendo digno de destacar que la media más negativa, correspondiente a $Dp(3) = 6$ kPa, apenas refleja una sensación calificable de perceptible a ligeramente molesta. También, que hay alguna persona (la 3, por

ejemplo) que, para toda $Dp(3)$ entre 0,5 y 6 kPa, experimenta sensaciones ligeramente agradables. Y que hay alguna (la 5, por ejemplo) que sólo aprecia sensaciones claramente molestas.

- De la anterior constatación (disminución de las sensaciones de confort con valores crecientes de las variaciones de presión en un cierto intervalo de tiempo), confirmada en otras pruebas en la cámara de presión de Derby, y en trenes y túneles reales, se va perfilando un criterio de confort del tipo:

$$Dp(n) < PM \quad (4)$$

Es decir, para cada nivel de confort, es necesario que las máximas variaciones de presión Dp , en n segundos, no rebasen un cierto valor, PM .

Concretamente, la propuesta más reciente de uno de los especialistas que mejor conocen esta cuestión⁽⁹⁾ de los ff.cc. británicos, para el caso de trenes no herméticos y líneas con pocos túneles (del orden del 10% de su longitud total), es la siguiente:

- criterio normal: $Dp(4) \leq 2,5$ kPa,
- criterio límite: $Dp(4) \leq 4,0$ kPa.

Y, para el caso de líneas con muchos túneles ($> 25\%$ de su trazado):

- criterio normal: $Dp(4) \leq 2,0$ kPa,
- criterio límite: $Dp(4) \leq 3,0$ kPa.

Respecto al personal que trabaja en los túneles, los ferrocarriles británicos utilizan el siguiente criterio, el más audaz de cuantos conocemos⁽¹⁰⁾:

- criterio límite: $Dp(4) \leq 7,0$ kPa.

- Algunas redes ferroviarias, como la japonesa de alta velocidad, con una media de trazado en túnel próxima al 30% de su longitud total y cercana a los 2.000 km, tienen unos túneles de sección relativamente modesta (unos 60 m²). Y es que, por estas líneas, solamente circulan trenes de viajeros con velocidades entre 210 y 270 km/h, pero con un elevado nivel de hermeticidad. Con lo cual los bruscos cambios de presión del aire en el túnel llegan a los viajeros muy atenuados, de forma que apenas son perceptibles.
- En la Fig. 1 se puede apreciar cómo disminuyen las

variaciones de presión cuando crece la sección de un túnel. Esta ley es general. También, para un determinado túnel, estas variaciones disminuyen con secciones reducidas de los trenes. Y, por supuesto, disminuyendo la velocidad de circulación. Otros parámetros (rozamientos aire/tren y aire/túnel, longitudes de trenes y túneles, formas de la cabeza y de la cola del tren) tienen importancia en las evoluciones de las presiones del aire en cualquier punto del túnel (y del tren, si no es estanco), de forma que el conocimiento de todos estos parámetros, junto con el criterio de confort, permitirán al proyectista definir la correcta sección transversal de un túnel determinado. En el caso de dos trenes en un túnel, además de los parámetros ya mencionados, tiene gran importancia el desfase entre los instantes de entrada de ambos trenes en el túnel, oscilando las máximas variaciones de presión respecto al caso de un solo tren, entre un mínimo prácticamente igual al de este caso y un máximo superior al triple. De este resultado pudiera deducirse que los túneles de vía doble se encuentran en desventaja respecto a los de vía única en las líneas de alta velocidad. Pero esto es relativo por un doble motivo: porque, por otras consideraciones, los túneles de vía doble son de mayor sección que los de vía única, y además porque la probabilidad de que dos trenes, en una línea normal, se crucen en un túnel y que lo hagan con un desfase pésimo, es muy reducida. Por lo cual, puede tolerarse una variación máxima de presión superior a la admisible en uno de vía única, con lo que el incremento de sección, por este motivo, no tiene por qué resultar desmesurado.

- Sobre si es más económico, para luchar contra los efectos negativos de elevadas variaciones de presión del aire en los túneles, el hacer los trenes estancos o hacer más grandes los túneles (mayor sección transversal) es cuestión que depende de varias circunstancias.

Por ejemplo, si por una línea concreta van a circular muchos trenes y hay pocos túneles (y, como suele ocurrir, no se quiere rebajar la velocidad en los mismos), entonces puede ser buena solución hacer túneles de gran sección (más caros), pero trenes no herméticos (más baratos). En cambio, si hay muchos

túneles y pocos trenes, lo más económico será hacer éstos estancos, y túneles de reducida sección, etc.

A continuación se comenta la solución adoptada para los túneles de la primera línea ferroviaria de Alta Velocidad Española, Madrid-Sevilla.

3. LOS TÚNELES DE LA NUEVA LÍNEA MADRID-SEVILLA

Cuando en los primeros años de la pasada década se proyectó una variante entre Brazatortas (estación próxima a Puertollano) y Córdoba, para resolver el tramo congestionado (de vía única) de Despeñaperros, tanto el trazado como los túneles se diseñaron en el contexto de un plan ferroviario que apuntaba a los 160 km/h, no a la alta velocidad. No obstante, al ser una variante importante (de unos 100 km de longitud), ambas cosas se diseñaron para un entorno de velocidades de unos 200 km/h. Concretamente los túneles previstos tenían una sección de 62,1 m².

Cuando en el año 1987, el Gobierno Español aprueba el Plan de Transporte Ferroviario, se señalan como velocidades de los nuevos accesos a Andalucía, los 200-250 km/h. Estas velocidades ya se consideraban en un Avance del mencionado plan, cuando el 11 de octubre de 1986 el Gobierno anunció que se construirían dichos accesos con un diseño que permitiría velocidades de 200 km/h.

Dado que el tramo Brazatortas-Córdoba estaba incluido en el nuevo acceso, fue necesario reconsiderar la sección de los 14 túneles de este recorrido, además de otros aspectos del proyecto de principios de los años 80. Y hubo que hacerlo con gran presteza, ya que ese tramo, por la presencia de los túneles, estaba en el camino crítico de la operación global.

Por otro lado no se conocía el tipo de trenes a utilizar (ni por lo tanto algunos parámetros importantes que intervienen en el cálculo de las presiones al paso por los túneles). Porque la adquisición de los mismos resultaría de un concurso internacional muy abierto (es decir, de-

jando indefinidos muchos parámetros) para que pudieran recibirse la mayor cantidad de ofertas posible, por lo que hubo que hacer un conjunto de conjeturas sobre los principales parámetros no bien definidos.

Sobre uno de los de mayor influencia, la velocidad, sabíamos que, por exigencias del trazado en esta zona montañosa, podría oscilar entre 225 y 250 km/h como máximo. Por la naturaleza del concurso mencionado (muy abierto) había que suponer que los trenes a adquirir podrían ser no herméticos. Y, por la distribución de los túneles en su recorrido, así como por la cadencia de circulación previsible, sólo era posible en cada viaje un solo cruce de dos trenes en este tramo. Es decir, cada viajero, en cada viaje, circularía por los 14 túneles del recorrido. Pudiendo, ocasionalmente, cruzarse su tren en un túnel con otro circulando en sentido contrario.

Con todos estos datos y conjeturas (los trenes se contrataron el 16-03-1989), y tras un análisis minucioso de la experiencia de los ferrocarriles japoneses, británicos, italianos y alemanes, así como de los trabajos de la UIC, principalmente del Comité C. 149, y de algunos expertos japoneses y europeos, se hizo una recomendación (en diciembre de 1986)⁽¹⁾ que se refleja en los esquemas de la Fig. 4.

Vamos a estimar la respuesta de estos túneles frente a las circulaciones de los trenes de alta velocidad que circulan por ellos. En particular se verá las velocidades del viento inducidas en los diversos túneles, según sus longitudes, así como las resistencias al avance. Y, para los de longitud más desfavorable, las máximas variaciones de presión esperadas, para el caso de un solo tren y para cuando dos trenes se cruzan en la configuración más desfavorable.

3.1. Velocidades del aire

Se han estimado estas velocidades, así como las resistencias al avance, suponiendo que se ha establecido en el túnel un régimen de flujo estacionario (lo cual es hipótesis tanto menos rigurosa cuanto menor es la longitud del túnel). El mayor de éstos tiene una longitud de

unos 2.500 m, por lo que la precisión esperada no es muy grande, aunque permite apreciar las órdenes de magnitud. Utilizamos la metodología japonesa de cálculo, y los siguientes parámetros:

— Longitud del tren	200 m
— Sección	10 m ²
— Rozamiento aire/tren	0,004
— Coeficiente de forma	0,12
— Velocidad del tren	225 km/h
— Sección de los túneles	75 m ²
— Rozamiento aire/túnel	0,005
— Coeficiente de contracción de flujos entrantes	1,5
— Densidad del aire	1,23 kg/m ³

Para los túneles de reducida longitud (en torno a los 300 m) las velocidades resultantes son del orden de 50 km/h = 14 m/s (en la zona no ocupada por el tren) y de unos 30 km/h \cong 9 m/s en la zona anular entre el tren y el túnel. Y, para los de mayor longitud (2.500 m), resultan velocidades de unos 30 km/h (9 m/s) y 10 km/h (3 m/s). En todos los casos resultan velocidades de igual sentido que el del movimiento del tren.

Vemos que son velocidades inferiores a las que ya se han mencionado como consideradas máximas compatibles con la estabilidad de marcha de una persona por los japoneses (17 m/s). Aunque, en el caso de los túneles más cortos, resultan bastante elevadas.

3.2. Componente aerodinámica de la resistencia al avance

Con los mismos parámetros y metodología, y para el caso más desfavorable (es decir, suponiendo un túnel de 2.500 m de largo), resulta una resistencia aerodinámica de 29 kN, un 20% superior a la resistencia al aire libre.

Para hacerse una idea, en relación con un túnel tradicional de vía doble (unos 45 m²), esta resistencia sería de 36 kN (un 50% superior que el aire libre).

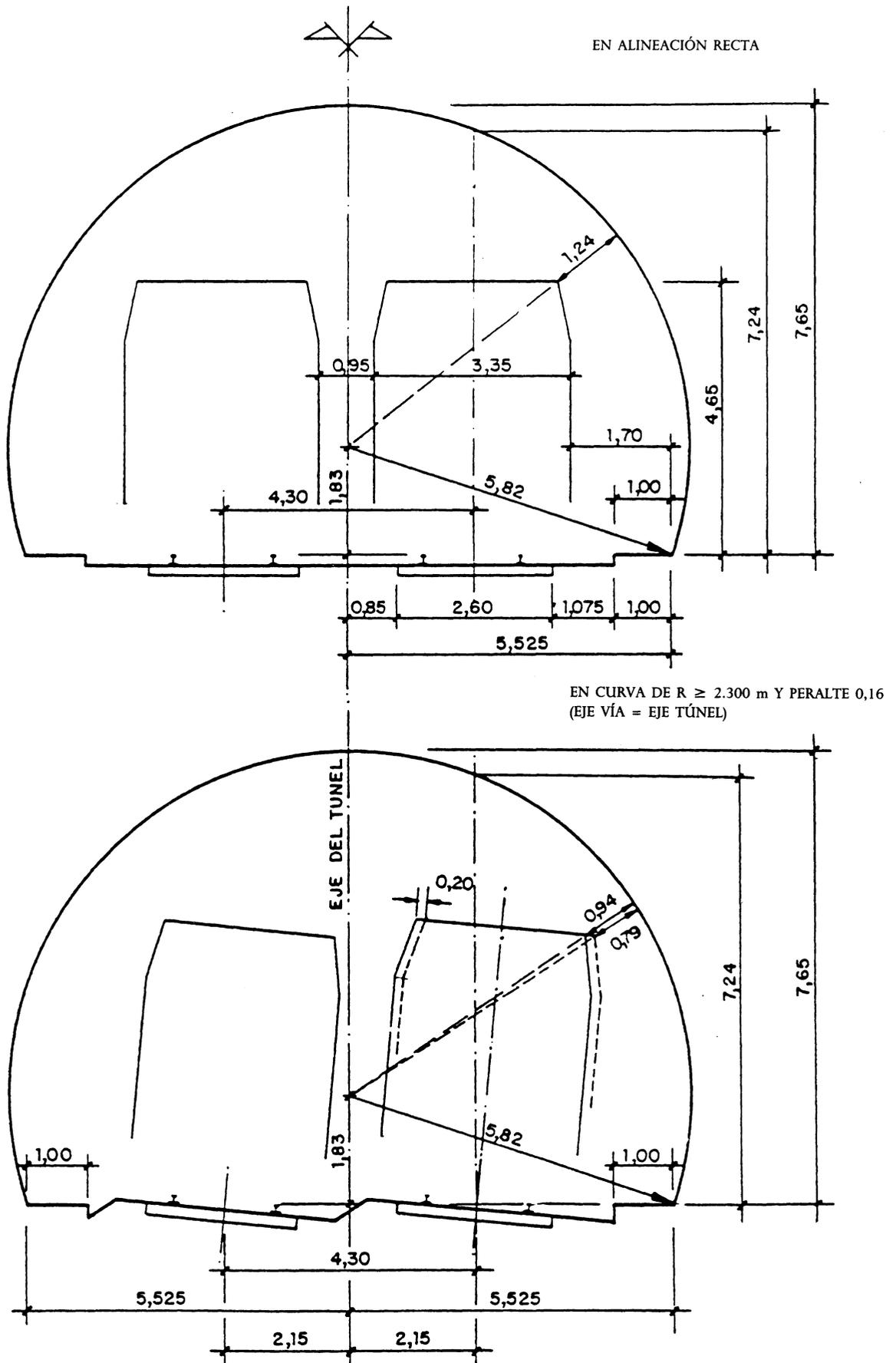


Fig. 4. Perfil transversal de los túneles del tramo Brazatortas-Córdoba de la línea de Alta Velocidad Madrid-Sevilla. Según las recomendaciones de diciembre de 1986.

3.3. Máximas variaciones de presión del aire en el tren

Los trenes finalmente adquiridos para esta línea tienen un nivel de hermeticidad que, normalmente, hacen que el discurrir por los túneles apenas sea percibido por los viajeros. Pero, incluso si no funcionase el sistema de presurización, vamos a ver que las sensaciones que se pueden percibir están dentro de los límites que se van configurando como admisibles para un buen nivel de confort.

De un amplio estudio paramétrico realizado por la RENFE, de cara al correcto diseño de la sección transversal de sus túneles, teniendo en cuenta la influencia de los efectos aerodinámicos en el confort (que, con elevadas velocidades, suele ser el factor limitante), se deduce lo siguiente:

- Máximas variaciones de presión en el túnel de longitud más desfavorable (entorno de los 1.000 m), en un intervalo de 4 segundos, cuando circula un solo tren a 225 km/h 1,9 kPa
- Máximas variaciones de presión, en el túnel de longitud más desfavorable (750 m), en un intervalo de 4 segundos, cuando dos trenes se cruzan en este túnel a 225 km/h, con el desfase de sus instantes de acceso al túnel más desfavorable 4,8 kPa

Por lo tanto, incluso con el sistema de presurización desconectado, en un viaje normal, es decir sin cruces de trenes en los túneles, D_p (4), será inferior a los 2 kPa en el peor de los casos. Es decir, la mayoría de los viajeros notarán una ligera obturación en los oídos.

Y, en el caso de que se produzca un cruce en alguno de los túneles, algunos viajeros percibirán pulsaciones de entre 2 y 3 kPa, que, en algunos túneles, y en algunas ocasiones (según los desfases de las entradas de los trenes) pueden llegar a 4 kPa. Y, excepcionalmente, el máximo mencionado de 4,8 kPa.

Resumiendo diremos que, la sección adoptada de 75 m², permitirá una circulación confortable por los túneles de Brazatortas-Córdoba, incluso si no funcionase correctamente el sistema de presurización de sus trenes.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) FUKUCHI, G. Quart. Rep. Railw. Res. Inst., Vol. 16 No 2, 1979.
- (2) PUJIA, V. Int. Railw. J., 3/1991.
- (3) O Mancha, como se suele designar en castellano.
- (4) STIX, O. Schw. Bauz., Bnd XLVIII, Nr. 4, 1906.
- (5) Ver, por ejemplo, Informe N.º 1 del Comité de Expertos ORE C. 149, 9/1980.
- (6) HARA et al. Symp. Grand. Vitesser, Viena 1968.
- (7) Informe N.º 3 del Comité ORE C. 179, oct. 1990.
- (8) Mayores detalles pueden obtenerse en la monografía, redactada por INECO y difundida por la As. Esp. Tún. y Obr. Subt. (AETOS): GARCÍA GONZÁLEZ, E. La gran velocidad ferroviaria y algunos efectos aerodinámicos en los túneles ferroviarios. INECO/AETOS, 1989.
- (9) GAWTHORPE, R.G. Pressure confort criteria for rail tunnel operations. Symp. Aer. and Vent. Veh. Tun., BHRA, 1991.
- (10) Rapp. 3 del Comité ORE C. 179, oct. 1990.
- (11) Nota sobre los efectos aerodinámicos y los túneles del nuevo trazado Brazatortas-Córdoba. (Velocidades de hasta 250 km/h). Dic. 1986.

* * *