

DISEÑO DE TÚNELES PARA TRENES DE ALTA VELOCIDAD. ROZAMIENTO TREN-AIRE-TÚNEL Y ONDAS DE PRESIÓN

MANUEL J. MELIS. Dr. Ingeniero de Caminos, M.Sc, MBA

Catedrático Ingeniería del Terreno. ETS Caminos Coruña

ILDEFONSO DE MATÍAS. Ingeniero Aeronáutico

Director de Ingeniería y Proyectos, Metro de Madrid

JOSÉ MANUEL ALONSO. Ingeniero Aeronáutico.

JOSÉ LUIS NAVARRO. Ingeniero Aeronáutico.

JOSÉ LUIS TASIS. Ingeniero Aeronáutico.

RESUMEN: Las secciones de los túneles recientemente diseñados en los FFCC de Alta Velocidad parecen haber sido fijadas exclusivamente por medio de criterios de variaciones de presión, para el estudio del confort del pasajero. Pero la aplicación de estos mismos criterios en los túneles largos conduce a diámetros de túnel excesivamente pequeños desde otro aspecto que hasta ahora, aparentemente, no ha sido tenido en cuenta: La resistencia aerodinámica que se opone al avance del tren y que podría impedir su circulación a la velocidad de diseño.

En el presente artículo se describe someramente la fenomenología aerodinámica característica asociada con el paso de los trenes por el interior de los túneles y se discuten los criterios de diseño clásicos, proponiéndose un criterio adicional que parece técnicamente imprescindible: el de la tracción requerida para mantener la velocidad del tren en el interior del túnel. En los túneles largos, este criterio es más restrictivo que el de las presiones, por lo que aparece como único aplicable. Se propone su aplicación en el diseño de los túneles de este tipo de inmediata construcción en España.

Así mismo, se presentan los códigos numéricos de cálculo ACTUA-TUN y TEA-TUN, desarrollados con el objeto de predecir las fuerzas que actúan sobre el tren durante el trayecto interior. El primero es un programa de Análisis Operacional, predictor de las actuaciones de los trenes de alta velocidad en la circulación por el interior de los túneles largos, y de las sensibilidades de las mismas ante variaciones paramétricas, tanto del diseño del túnel como de la configuración y tipo de tren. El segundo programa estudia los saltos temporales de los niveles de las presiones, que aparecen en los túneles largos, en el exterior de los diferentes coches del tren y en posiciones características del fluido.

Por último se muestran algunos de los resultados de estos programas, aplicados a un túnel de 25 Km de longitud. Estos resultados indican que, para que los trenes de Alta Velocidad de la futura red española pudieran circular a velocidad cercana a la de diseño, el diámetro interior de los túneles largos debería pasar de los 8.5 metros fijados actualmente, a 10.75 metros de diámetro interior libre.

PALABRAS CLAVE: ALTA VELOCIDAD, TÚNEL, FRICCIÓN, FERROCARRIL

ABSTRACT: Tunnel sections for the new high-speed railway lines such as Madrid-Barcelona (350 km/h) seem to have been estimated according only to criteria related to the pressure waves created by the train entering or exiting the tunnel. As a result of this criteria it has been obtained the surprising result that the longer the tunnel, the smaller the diameter needed, and more than 25 tunnels have been constructed with this criteria, besides 16 older tunnels in the Madrid-Sevilla high speed line (220 km/h in the tunnels). Taking into account the friction air-train-tunnel, however, much different results are obtained, and instead of a 8.5 m internal diameter per track such as the one proposed for the new Guadarrama Base tunnel near Madrid, an internal diameter of about 11 meters is obtained in order that the train does not lose much traction on wheels due to the train-air-tunnel friction.

In this paper a method of calculation of the friction is presented, as well as two computer programs for its estimation. The program solves the stationary aerodynamics around the train, coupled with the internal field of turbulent limit layers. Euler compressible equations are solved over slowly variable sections, by means of previously obtained 3-dimensional Euler solutions on geometrical shapes of the train front. Turbulent limit layers are calculated using von-Kármán, Faulkner and Drobrenkov theories.

KEYWORDS: HIGH-SPEED, TUNNEL, FRICTION, RAILWAY

1. INTRODUCCIÓN

Desde el proyecto y la construcción de los 16 túneles del AVE a Sevilla se ha tratado en España el problema del paso de un tren de alta velocidad por un túnel. Sin embargo, las secciones construidas hasta el momento parecen haberse fijado teniendo en cuenta exclusivamente el problema de las ondas de presión generadas por la entrada del tren en el túnel, sin que parezca haberse estudiado adecuadamente la otra parte del problema, la fricción creada en el interior del túnel por el tren en marcha.

Al realizar los autores el proyecto del FFCC de Alta Velocidad Madrid-Valencia en 1998, en la variante que llegaba a Cuenca partiendo de Torrejón había que cruzar los valles del Tajuña y Tajo y las sierras de Altomira, Degollados, San Sebastián y otras cercanas por medio de largos túneles. Al estudiar las secciones de los túneles del AVE Madrid-Tarragona-Barcelona se observó la sorprendente situación a la que se había llegado en el diseño de los túneles de Alta Velocidad en España: a mayor longitud del túnel, la sección necesaria del túnel es menor. Esta curiosa conclusión llamó poderosamente la atención a los autores, y al analizarla se vio que no se había tenido en cuenta el importante fenómeno de la fricción tren-aire-túnel en ninguno de estos túneles. Efectivamente, si sólo se tiene en cuenta el fenómeno de las ondas de presión, la sección puede hacerse más pequeña al aumentar la longitud del túnel, pero para longitudes grandes (de 5 ó 10 km en adelante) la fricción tren-aire-túnel absorbe gran parte de la potencia del tren (que para el AVE de 1 piso es del orden de 8.8 MW) y la velocidad disminuye enormemente si el diámetro del túnel es pequeño. El fenómeno es aún mayor para los AVE de 2 pisos, como los actuales Paris-Lyon, que dadas las características de España –todos nos moveremos por tren– serán en pocos años los más utilizados en nuestra futura red. Por otra parte estas pequeñas secciones de túnel pueden crear graves problemas en el desalojo del pasaje en caso de algún incidente, y pueden incluso impedir la circulación de los AVE de 2 pisos por falta de gálibo.

Los resultados obtenidos para esa variante, finalmente no seleccionada (se seleccionó otra similar saliendo del Madrid-Sevilla, pasando también por Cuenca), del AVE Madrid-Levante son de aplicación también para el resto de los túneles largos, y por su posible utilidad para los lectores se resumen en este artículo. El primer túnel de base español, el túnel de Guadarrama, es de fundamental importancia para toda España. Es la conexión ferroviaria clave de las Comunidades del sur, suroeste, sureste, este y centro de España con las Comunidades Autónomas de Castilla-León, Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Rioja y además es la conexión al TGV Atlántico francés por la vía de Dax y Burdeos, desde donde enlazará en un futuro en París con los ejes Eurostar a In-

ABREVIATURAS

L_0	Longitud del tren (AVE de 8 coches aprox. 200m)
A_0	Area de la sección transversal del tren (AVE: coche 8 m ² ; 2 pisos: 13 m ²)
U_0	Velocidad del tren (350 Km/h = 97m/s)
C_0	Velocidad del sonido (340 m/s)
M_0	Número de Mach
Re	Número de Reynolds
L_T	Longitud del túnel
A_T	Area de la sección del túnel
U_T	Velocidad media inducida en el túnel aguas arriba del tren
$\varepsilon = L_0 / \sqrt{A_0}$	Esbitez
$B_0 = A_0 / A_T$	Relación de bloqueo geométrico
B	Relación de bloqueo efectivo
Δ_1	Sección de desplazamiento
Δ_2	Sección de cantidad de movimiento
CD	Coefficiente de resistencia aerodinámica
$TF = C_{Dtúnel} / C_{Dexterior}$	Factor de túnel

Al estudiar las secciones de los túneles del AVE Madrid-Tarragona-Barcelona se observó la sorprendente situación a la que se había llegado en el diseño de los túneles de Alta Velocidad en España: a mayor longitud del túnel, la sección necesaria del túnel es menor

glatterra, Thalys al Benelux y los países nórdicos y por el Este a Alemania y Europa del Este. Por ello al comenzar el proyecto del AVE Madrid-Valencia se decidió el estudio adecuado del problema de la fricción en el túnel, que no se ha terminado hasta fin del 2000. En efecto, un diámetro demasiado pequeño de los tubos de los túneles largos como el de Guadarrama podría impedir, por la fricción en el interior, que los trenes de pasajeros circularan dentro del túnel a su velocidad de diseño, 350 km/h en la actualidad y sin duda más en el futuro, y también que los trenes de mercancías que conectarán Madrid con la Europa del Norte y con los puertos Atlánticos y Cantábricos (Vigo, Coruña, Ferrol, Gijón, Avilés, Santander, etc.) pudieran circular con los camiones de contenedores u otras cargas montados en plataformas. La conexión de la Europa del norte y los puertos Atlánticos y Cantábricos españoles con el Puerto Seco de Madrid podrá hacerse en muy pocas horas con la nueva infraestructura ferroviaria de alta velocidad y el nuevo material móvil de mercancías, que los explotadores deberán necesariamente comprar (naturalmente, el actual material de mercancías de RENFE no podrá circular por esta red, debido a su ancho, a su electrificación y señalización y a las elevadas cargas por eje que transmite), y a su vez estos puertos quedarán conectados rápida y eficazmente con los puertos del Mediterráneo (Valencia, Alicante) y del sur (Algeciras, etc.).

Los requisitos de diseño establecidos en la especificación, además de considerar el confort de los pasajeros, deben establecer condiciones para la velocidad, el gálibo necesario para las mercancías, y los efectos de fatiga. Lamentablemente, nuestro deseo de que cupieran en el túnel dos contenedores apilados – como en los trenes diesel de USA, para

abaratar el transporte de las mercancías - parece excesivo, por los problemas de la altura del hilo de contacto y de los pantógrafos que impedirían satisfacer la especificación, salvo que se planteara la construcción de túneles de mayor diámetro en toda la red. Por otro lado deben tenerse en cuenta las repercusiones económicas de los requisitos: si el diámetro es demasiado grande, se irá a un coste innecesario.

Como se ha dicho, hasta la fecha el criterio de dimensionado de los túneles procede de la sensibilidad de los pasajeros a las variaciones de presión en el interior de los vagones, relacionadas con la propagación de ondas por el interior del túnel, y con el efecto "venturi" producido por la propia presencia del tren. Esta sensibilidad se mide en términos de variación de presión en un tiempo determinado, pero estos criterios, obtenidos a partir de la realización de cuestionarios por los viajeros, tienen un carácter subjetivo y dan resultados muy dispersos. Al depender el resultado de la estanqueidad real de los coches y de su rigidez, se carece de precisión.

La tecnología actual de compartimentos estancos, junto a la posibilidad de considerar si es necesario boquillas adaptadoras/disipadoras en los portales de los túneles, sugiere la idea de que los criterios de diseño de los túneles largos tienen que dirigirse hacia la reducción de la resistencia, con el objeto de mantener en lo posible la velocidad, lo que además permitirá el paso de cargas de mayor gálibo.

2. PRINCIPALES FENÓMENOS QUE OCURREN AL PASAR UN TREN POR UN TÚNEL

2.1. Entrada en el túnel: Ondas compresivas y expansivas

En el proceso de la entrada del tren en el túnel se genera una onda compleja compresiva-expansiva-compresiva que se transmite a la velocidad del sonido a lo largo del túnel y se refleja cambiando de carácter en el portal del túnel opuesto al de entrada. (Fig. 1). La máxima presión alcanzada depende de la relación de bloqueo (es decir, de la relación entre la sección transversal del tren y la del túnel), de la longitud del tren y de la velocidad del tren, influyendo levemente la forma de la cabeza de la locomotora. La mínima presión alcanzada en la fase expansiva depende de la brusquedad de la fase de introducción en el túnel de la locomotora de cola del tren. Entre otros factores, el espesor real de la capa límite al final del tren, influye en gran medida en la presión mínima alcanzada en esta fase. La sobrepresión residual por delante del tren, alcanzada una vez que se han homogeneizado las condiciones en el portal de entrada, y se ha realizado la mezcla turbulenta de la estela del tren, depende de la propia resistencia aerodinámica del tren en el interior del túnel.

La simulación a escala reducida de estos fenómenos es incierta. La realización del ensayo con la maqueta a la veloci-

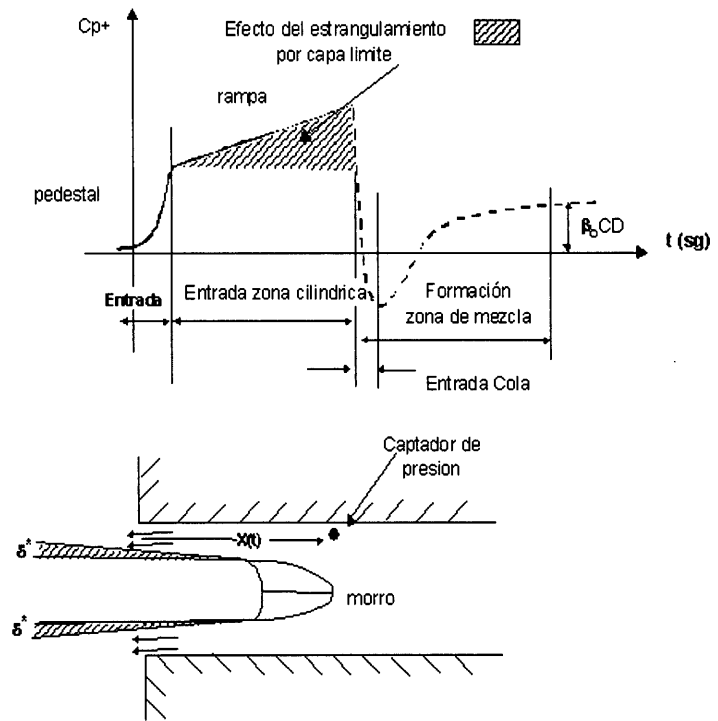


Figura 1. Registro de presión a la altura del morro de la locomotora de cabeza. (Sobrepresión respecto presión atmosférica). Generación de la onda compresiva-expansiva-compresiva.

dad real, ajustaría el número de Mach (U_0/C), mientras que los números de Reynolds, ($(U_0 l / \nu)$ del ensayo y real estarían en la razón de las longitudes de la maqueta y del tren, resultando falseados los bloqueos efectivos del área de paso de la corriente debido al crecimiento de la sección de desplazamiento de la capa límite sobre la piel del tren. Por ejemplo, el número de Reynolds de un tren real en un túnel podría fácilmente alcanzar 1.5×10^9 , mientras que en un modelo a escala "muy" reducida, como son los modelos "lanzables" a alta velocidad, probablemente no se superan los 5×10^7 . En la misma relación van a encontrarse los tiempos característicos de los transitorios producidos por la introducción en el túnel de la locomotora trasera, resultando posiblemente errónea la analogía fenomenológica. Sí parece posible, en cambio, el análisis del pedestal producido por la introducción de la locomotora de cabeza del tren.

2.2. Presión en los laterales del tren en el túnel

La presión en el exterior del lateral del tren disminuye al introducirse el tren en el túnel, debido al efecto venturi que conlleva el incremento de velocidad de paso de la corriente por la sección anular entre tren y túnel, y al que obliga la ecuación de continuidad, debido a la disminución del área de paso libre. La presión exterior va disminuyendo desde el primer vagón hacia el último vagón. Esta variación se debe al crecimiento, a lo largo del tren, de las capas límite sobre el tren y el túnel y a la consecuente disminución del área de pa-

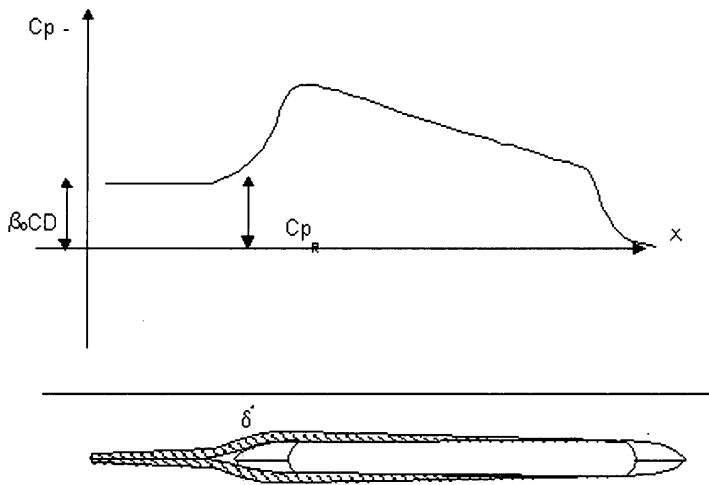


Figura 2. Presiones a lo largo del tren en el interior del túnel en el mismo instante de tiempo. (Depresión respecto de la presión existente sobre la pared del túnel a la altura del morro de la locomotora de cabeza) Depresión producida por el efecto venturi.

so efectivo. (Fig.2). Debido a la gran esbelteza que presentan los trenes, la configuración del flujo es muy aproximadamente unidimensional, sin gradientes transversales importantes de las variables fluidas, excepto en la zona de la locomotora de cabeza, (Fig.11).

La combinación de este efecto con el de la propagación de las ondas de presión, generadas con la entrada del tren en el túnel determina la evolución con el tiempo de la presión en el exterior del tren, durante todo su recorrido interior. En general, en el interior de un túnel largo, en los laterales del tren va a haber menos presión que en el mismo punto en superficie. En el exterior de un coche (vagón) cualquiera, la presión inicialmente asciende, hasta que el coche es adelantado por la onda expansiva producida con la introducción de la locomotora de cola de tren. A partir de ese momento, y hasta otros cruces con ondas reflejadas, la presión en el exterior del coche es la resultante del efecto venturi, (respecto la presión en el túnel a la altura del morro de la locomotora de cabeza), junto con la sobrepresión existente en dicho punto respecto la presión atmosférica exterior, (sobrepresión que está relacionada con la propia resistencia aerodinámica del movimiento interior).

Por lo tanto, para poder predecir la evolución que experimenta la presión en el exterior del lateral del tren, se necesita conocer tanto la resistencia aerodinámica interior como el crecimiento del factor de bloqueo efectivo a largo del tren, (lo que implica el análisis del crecimiento de las capas límite sobre el tren y el túnel).

Por otra parte, con el objeto de diluir en un tiempo mayor el salto de las presiones en el exterior del lateral del tren, (entre las existentes en las circulaciones en superficie y en el interior del túnel), así como, con el objeto de reducir, en la medida de lo posible, la intensidad del pico de sobrepresión de la onda que se lanza hacia el interior del túnel, en el proceso de la entrada, probablemente sería importante el diseño e instala-

ción de dispositivos amortiguadores en la entrada y salida del túnel, tanto más importante cuanto mayor fuese la velocidad de circulación. Los dispositivos, adaptadores-disipadores en la entrada tendrían la forma de boquillas atrompetadas, y deberían ser grandes, largas y generosas en tamaño. Los disipadores en la salida para evitar el boom sónico serían similares al silenciador de un arma de fuego, y ambos serán objeto de otro artículo.

Los autores llaman la atención del lector sobre el hecho de que este último párrafo, en lo que se refiere a los túneles largos no es totalmente cierto. Las boquillas disminuyen la intensidad de las ondas, las cuales determinan el diámetro mínimo en el caso exclusivo de los túneles cortos. En un túnel largo de 25 Km, en los estudios de las ondas realizados en su día (AEA, Lozano.), llegaron a 8,5m de diámetro, sin boquillas. Si por razones de fricción, se justifican 10.75 m, los criterios de variaciones de presión estarían más que satisfechos.

2.3. Circulación del tren por el túnel: resistencia aerodinámica

Durante la circulación por el interior del túnel se produce un incremento de la resistencia aerodinámica que se opone al movimiento, respecto de la existente a la misma velocidad del tren en su movimiento fuera del túnel. En la resistencia aerodinámica del tren influye la velocidad inducida por el propio tren al aire circundante a lo largo del túnel en el sentido del movimiento. Esta velocidad de soplado está relacionada con el valor de la sobrepresión por delante del tren, por lo que existe un acoplamiento de los valores alcanzados de sobrepresión y de la resistencia aerodinámica que se opone al avance del tren.

La resistencia aerodinámica durante la circulación interior es máxima entre la fase de entrada y el encuentro con la onda rebotada en extremo opuesto del túnel.

3. EFECTO DE LA LONGITUD DEL TÚNEL

3.1. Túneles muy cortos

$$\frac{L_T}{L_0} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0}{U_0} \approx \text{unos cientos de metros}$$

En los túneles tan cortos, el incremento de resistencia interior no tiene ninguna importancia, dado que los trenes disponen de una gran reserva energética en su masa inercial. Sin embargo, el sistema de ondas generado por las reflexiones en las bocas de entrada y salida del túnel, de la onda percusiva producida en la entrada, puede provocar rápidas variaciones de la presión en el interior de los coches no estancos, que podrían superar los límites normativos que atienden al confort de los pasajeros. Esta es la razón de que las variaciones de pre-

sión alcanzadas durante el tránsito, acoten la sección mínima de túnel para cumplir la normativa correspondiente.

Para el estudio de éstos túneles es necesario el seguimiento espacio-temporal de la forma de las ondas producidas, y su interacción con el efecto *venturi* en el lateral exterior del tren, para poder determinar la evolución con el tiempo de la presión en el interior de los coches no estancos, (con el correspondiente factor de estanqueidad de los mismos). Por otra parte, no se va a llegar a realizar la mezcla turbulenta de la estela del tren, de manera que no parece tener sentido hablar de una evolución de la presión por niveles definidos, ni de acoplamiento entre las presiones (relacionadas con las velocidades de soplado) y la resistencia aerodinámica del tren.

En este tipo de túneles cortos, (menos de 1 km), podría producirse el fenómeno de la superposición temporal de la expansión generada por la introducción de la cabeza de la locomotora de cola del tren, con la llegada de la onda expansiva producida por el rebote, en la boca de salida del túnel, de la onda compresiva inicial (al menos de la parte producida durante la entrada de la locomotora de cabeza de tren -pedestal de entrada-). La suma de las dos ondas expansivas coincidentes, podría alcanzar una presión muy baja. Desde el punto de vista de las variaciones temporales de la presión, estas longitudes de túnel son críticas. A 100 Km/h la coincidencia aparece para longitudes de túnel aproximadamente 6 veces la longitud del tren. A 200 Km/h la longitud del túnel crítica es de 3 veces la longitud del tren y a 300 Km/h 2 veces su longitud.

Desde el punto de vista de la infraestructura civil unos túneles de estas longitudes tan cortas parecen resultado de un proyecto deficiente, y debería intentarse modificar el trazado en planta o en alzado para conseguir su eliminación.

3.2. Túneles largos

$$\frac{L_T}{L_0} > \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0}{U_0}$$

En los túneles de longitudes hasta digamos 5 Km, tienen que tenerse en consideración tanto los fenómenos asociados con la transmisión de las ondas como los debidos al incremento de resistencia del tren por la fricción.

3.3. Túneles muy largos

$$\frac{L_T}{L_0} \gg \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0}{U_0}$$

En el extremo opuesto de longitudes nos encontramos con túneles muy largos (10,15, 20 o más Km). En esta si-

Desde el punto de vista de la infraestructura civil, unos túneles de estas longitudes tan cortas parecen resultado de un proyecto deficiente, y debería intentarse modificar el trazado en planta o en alzado para conseguir su eliminación

tuación, el tiempo de tránsito es suficientemente alto como para que la reserva inercial del tren no sea suficiente para el mantenimiento de su velocidad exterior, por lo que el incremento de la resistencia aerodinámica pasa a ser el fenómeno fundamental.

El seguimiento de la forma de la onda de presión generada durante el proceso de la entrada deja de ser importante: Por un lado, entre los encuentros con las ondas transcurre mucho tiempo (minutos), en los que la presión se mantiene sin variaciones importantes, lo que quiere decir que se dispone de mucho tiempo para la disipación de la onda compleja. Por otra parte, la onda compleja se va amortiguando de manera más rápida que lo que suelen predecir los programas numéricos en los que la disipación proviene de modelos teóricos de disipación de ondas simples unidimensionales, lo que lleva a la dificultad del correcto seguimiento numérico de la forma de la onda. (La propia definición de túnel muy largo debería estar relacionada con la fracción del amortiguamiento de las ondas complejas en su recorrido).

El resultado es que la evolución con el tiempo de la presión se realiza *por saltos de nivel*, dependiendo, en cada instante, de la posición de la onda relativa al tren, y del carácter de la misma. La carga específica que el tren ejerce sobre el fluido, (su resistencia aerodinámica), afecta al valor de los niveles de presión y velocidad del fluido, resultando un problema acoplado.

4. CRITERIOS DE DISEÑO PARA LA SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DEL TÚNEL

La selección del diámetro de un túnel en fase de diseño determina los volúmenes de la excavación y del revestimiento, es decir, el coste del túnel, por lo que su elección va a verse afectada, por un lado (acotación máxima) por consideraciones económicas y de factibilidad técnica, y por otro lado (acotación mínima) por su efecto sobre los fenómenos físicos indeseables que aparecen asociados con el tránsito del tren por el interior del túnel.

Junto con las consideraciones pertinentes sobre coste de la obra y la posibilidad técnica de su realización, debe también tenerse en cuenta, naturalmente, la vida útil de la misma y la previsible evolución del material rodante en dicho periodo. En la actual red española de FFCC, los túneles han durado del orden de los 120 años y, parece ser que en la nueva red no debería considerarse en ningún caso una vida útil inferior a 50 años.

En cuanto a los fenómenos fluidodinámicos se refiere, la mínima sección libre de túnel resultará determinada a partir de las dos siguientes consideraciones:

4.1. Evolución de las presiones en el interior del tren

El criterio del confort de los pasajeros determina una cota mínima para la sección del túnel, que es una función de la sección y velocidad del tren, y de la longitud del propio túnel, así como del grado de estanqueidad de los coches. En el caso de coches completamente estancos, las limitaciones podrían provenir desde un punto de vista estructural del propio tren: Presiones en las ventanillas o, por ejemplo, fenómenos de fatiga de los materiales.

La medida del confort se establece sobre la percepción fisiológica y subjetiva del desagrado provocado por la presencia de los cambios de presión y su duración. La expresión al uso, resultado de estudios estadísticos es de la forma siguiente:

$$displacer = a + b \cdot P + c \cdot G + d \cdot T + e \cdot S$$

- P es el cambio de la presión
- G el gradiente temporal de la presión
- T la duración del cambio.
- S el signo de la variación de presión

Los cambios de presión en el exterior del tren, asociados a las ondas, se transmiten al interior de los coches a través de las fugas, y en particular del sistema de acondicionamiento. Siguiendo la presión interior a la exterior de la forma:

$$p_{int} = p_{ext} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

El Criterio de Confort se establece fijando el par de valores (P, T).

Una velocidad de paso especificada determinaría el diámetro del túnel.

Debe señalarse tanto la subjetividad del procedimiento, como la incertidumbre sobre la estanqueidad de un vehículo determinado. Es evidente por tanto, que estos criterios deben aplicarse de un modo conservador.

4.2. Incremento de la resistencia que se opone al avance del tren

La razón de las resistencias en el interior del túnel y a cielo abierto se llama *factor del túnel* y, para el mismo acabado superficial, depende principalmente de la relación de las áreas de las secciones transversales del tren y del túnel, parámetro que suele denominarse *relación de bloqueo*. Asimismo depende de la longitud del tren y de la velocidad del mismo, y secundariamente de otra serie de factores concretos como la forma de las locomotoras del tren.

La resistencia al avance en el exterior del túnel viene generalmente expresada por la fórmula de Gawthorpe:

$$R = A + B \cdot V + C \cdot V^2$$

Donde el coeficiente C se corresponde con el coeficiente de resistencia aerodinámica C_D de la siguiente forma:

$$C = 0.5 \cdot \rho \cdot C_D (\text{Re}, B_0, \epsilon, M_0, \text{rugosidad, y otros parámetros de forma}) \cdot A_0$$

El vehículo a su paso deja su huella en la estela en forma de déficit de cantidad de movimiento, de manera que a cielo abierto

$$C_D = 2 \frac{\Delta_2}{A_0}$$

En esta expresión general aparece la sección de cantidad de movimiento D_2 calculada o medida en la estela próxima (von Kármán).

Dentro del túnel, la estela confinada juega un papel importante. La correspondiente expresión para el coeficiente de resistencia es:

$$C_D = \left[2 \frac{\Delta_2}{A_0} + B_0 \left(\frac{\Delta_1}{A_0} \right)^2 \right] \left(\frac{1 - \frac{U_r}{U_0}}{1 - B_0 \frac{\Delta_1}{A_0}} \right)^2$$

con los espesores D_1 y D_2 calculados o medidos en la estela próxima dentro del túnel.

El factor de túnel aerodinámico queda determinado como el cociente de ambas expresiones.

Si se quiere mantener la velocidad del tren, se necesitaría disponer de tracción suficiente en la llanta para el equilibrio de las resistencias al avance, incluyendo concretamente la componente del peso debido a la pendiente de la vía.

Dada una tracción disponible, el valor de la relación de bloqueo límite acota la sección libre mínima del túnel.

5. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DISPONIBLES PARA LA CONCRECIÓN DEL DISEÑO

5.1. Introducción

Hacia 1976 la UIC encargó al Profesor Vardy la realización y puesta a punto de un programa de seguimiento de las ondas asociadas al tránsito de trenes por el interior de redes de túneles. Este programa se llama AEROTUN y su codificación, basada en el método de las características, se encuentra a disposición de todos los miembros de la UIC. El pro-

grama es de ondas unidimensionales, contemplándose los aspectos 3D por medio de coeficientes de pérdidas en cabezas, colas y bocas de entrada y salida, que han sido ajustados empíricamente, consiguiendo una extraordinaria correlación experimental, hasta longitudes de túneles de 5 Km.

El programa AEROTUN suministra la evolución temporal de la presión en cualquier punto fijo del túnel, así como la evolución de la presión en lo que en los gráficos aparece como "exterior del tren".

5.2. Códigos desarrollados

Durante el diseño de los túneles del AVE Madrid-Valencia, la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Obras Públicas de la Comunidad de Madrid encargó a un equipo de especialistas en Aerodinámica teórica y aplicada y en Aeroacústica, el estudio de los problemas de la fricción y de las ondas en el interior de los túneles largos. Como resultado del análisis de los fenómenos involucrados se han desarrollado los siguientes códigos numéricos a partir de los correspondientes modelos predictivos, que han sido validados con los datos disponibles obtenidos de la bibliografía.

Código ACTUA-TUN:

Un programa de Análisis Operacional, denominado ACTUA-TUN, predictor de las actuaciones de trenes de alta velocidad en la circulación por el interior de túneles largos y de las sensibilidades de las mismas ante variaciones paramétricas.

Para cada condición de estudio, el programa resuelve numéricamente la aerodinámica estacionaria alrededor del tren, resolviendo el acoplamiento entre un campo exterior de capas, no viscoso, y un campo interno de capas límites turbulentas. Las ecuaciones no viscosas que se resuelven son las ecuaciones de EULER, compresibles, sobre secciones lentamente variables, utilizándose resultados de cálculos de EULER tridimensionales realizados previamente sobre las formas geométricas de las cabezas de las locomotoras, con diferentes niveles de confinamiento y velocidad. Las capas límites turbulentas se calculan en tiempo real, utilizándose las teorías de von-Kármán, Faulkner y Droblenkov.

Asimismo se resuelve iterativamente el acoplamiento con la velocidad de soplado inducida por la propia resistencia aerodinámica, que reduce la velocidad de paso de la corriente por el anillo de sección entre las capas del tren y del túnel.

La resolución de ambos acoplamientos exige decenas de integraciones completas de los campos interior y exterior. La realización de estudios multiparamétricos en el que se vari-

Durante el diseño de los túneles del AVE Madrid-Valencia, la Dirección General de Infraestructuras de la Consejería de Obras Públicas de la Comunidad de Madrid encargó a un equipo de especialistas en Aerodinámica teórica y aplicada y en Aeroacústica, el estudio de los problemas de la fricción y de las ondas en el interior de los túneles largos

an, tanto parámetros geométricos (formas y dimensiones de tren y túnel), como operativos (velocidad del tren), conducen a centenares o miles de procesos como el anteriormente descrito.

Código TEA-TUN:

Un programa denominado TEA-TUN, que atiende a los saltos temporales de los niveles de las presiones y es adecuado para el análisis de los túneles largos y muy largos. Este programa hace uso de los datos de las secciones de desplazamiento de las capas límite alrededor de los trenes, y del coeficiente de resistencia aerodinámica obtenidos por medio del programa ACTUA-TUN. Consiste en un modelo cuasi-unidimensional, incompresible con ondas y rozamiento, que no sigue la forma de la onda compleja inicial, sino exclusivamente su valor residual (nivel de base), alimentado por el bombeo que supone el avance del tren por el interior del túnel.

Estos dos programas, desarrollados para poder analizar la problemática de la circulación de los trenes de alta velocidad por los túneles largos, complementan a los diferentes programas existentes (AEROTUN, THERMOTUN, SEALTUN ...), que parecen estar enfocados a la problemática de los túneles cortos o muy cortos (en el entorno de 1 Km de longitud), en los que el correcto seguimiento de la forma de las ondas de presión es fundamental, y donde no existe ningún problema desde el punto de vista de potencia disponible para el mantenimiento de la velocidad de paso del tren.

La aplicación de los códigos de ondas (AEROTUN, THERMOTUN y SEALTUN) a los túneles largos, necesitaría del dato de la resistencia aerodinámica interior.

No conocemos de ningún programa previo al programa ACTUA-TUN que prediga la resistencia aerodinámica de un tren de alta velocidad en el interior de un túnel, a pesar de que en los túneles largos se configura como el factor fundamental que puede impedir el cumplimiento de las especificaciones de velocidad de paso de diseño. Sí aparecen en la bibliografía disponible los resultados de estudios teóricos de resistencia realizados o reflejados por diferentes autores, -Yamamoto (1974), Pellis (1977) y Gawthorpe et al (1979) etc.-, donde en general se predice una influencia muy grande de la longitud del túnel en la resistencia al avance (muy creciente).

En nuestra opinión, en la fase previa al encuentro con la primera onda expansiva rebotada en el extremo opuesto del túnel, la resistencia aerodinámica es *la misma* en todos los túneles de más de unos pocos Km de longitud, de idéntica sección recta. Esa situación previa al encuentro con la onda, durará, desde unos pocos segundos, hasta un tiempo ilimitado en el caso de un túnel infinitamente largo.

6. PREVISIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL MATERIAL RODANTE Y DE LOS TRAZADOS

Muy previsiblemente los trenes del futuro van a

Aumentar su velocidad

Las mejoras técnicas de los trenes en cuanto a potencia, aerodinámica y estabilidad junto con las nuevas técnicas de las vías en placa, fijaciones, catenarias y pantógrafos van a posibilitar sin duda un sustancial incremento de la velocidad operativa de los trenes del futuro a corto, medio y largo plazo. Desde 1940 hasta 1990 la velocidad de los trenes de ruedas de acero ha pasado de menos de 200 km/h hasta 515 km/h. Los criterios de competencia con otros medios de transporte pueden provocar mejoras aún más drásticas en los trenes, como viene ocurriendo desde la introducción de los Shinkansen y el TGV. La levitación magnética está en ciernes, etc.....

Aumentar su sección transversal

La mayor parte del recorrido de los trenes transcurre en superficie. Una demanda creciente de utilización, además del aumento de la frecuencia de paso, va a obligar a configuraciones de mayor capacidad de pasajeros, lo que inevitablemente va a implicar incrementos del volumen de los trenes para darles cabida. Los trenes de dos pisos del París-Lyon son buena prueba de esto. El incremento de volumen puede realizarse con incrementos de la longitud del tren, lo que lleva a graves problemas en las estaciones, o con incrementos de la sección transversal que permiten pasar de configuraciones (2+pasillo+1ó2) (AVE) hasta configuraciones tan compactas

como 2x(3+pasillo+3) (Shinkansen E 4 max con capacidad para 1600 personas). El incremento de volumen del tren se traduce en un incremento del peso y de las resistencias mecánicas asociadas (rodadura+transmisión).

Incluso, si la resistencia mecánica fuera insensible respecto del modo en que se realiza el aumento del volumen (longitud o sección), la resistencia aerodinámica, que en alta velocidad es la mayor parte del total si no hay resistencia geopotencial, certifica de una manera clara, que *el incremento de volumen va a venir por el crecimiento de la sección de los trenes más que por el incremento de su longitud*. Y ello sin tener en cuenta el grave problema de las estaciones para los trenes muy largos (más de dos ramas, por ejemplo).

Las mejoras técnicas de los trenes en cuanto a potencia, aerodinámica y estabilidad junto con las nuevas técnicas de las vías en placa, fijaciones, catenarias y pantógrafos van a posibilitar sin duda un sustancial incremento de la velocidad operativa de los trenes del futuro a corto, medio y largo plazo

Una indicación de que esto es así la tenemos, en los nuevos TGV de dos cubiertas, que tienen una resistencia declarada únicamente un 4% superior que los normales. Este éxito, al menos en parte, está asociado con una mayor eficiencia aerodinámica de la forma geométrica, y una explicación muy simple puede ser la siguiente: La resistencia aerodinámica se compone de fricción y presión, siendo la fricción 5 veces superior a la resistencia de presión para un AVE de 200m de longitud y es aproximadamente proporcional a la superficie exterior del tren (superficie mojada). La maximización del diferencial del volumen respecto del diferencial de resistencia aerodinámica implica la minimización del cociente entre la superficie mojada y el volumen. El alargamiento del tren por la introducción de nuevos coches deja inalterado el cociente, mientras que el aumento de la sección transversal, disminuye el cociente y es óptimo. En otras palabras: Interesa aumentar el volumen por unidad de superficie exterior.

A estos efectos es interesante comparar las secciones de los trenes del tipo Shinkansen actuales, que con el ancho de vía internacional, se encuentran entre 12.5 y 13.5 m² en las series de una cubierta (series 500 y 700) y cerca de 15 m² los de doble cubierta (series E1 max y E4 max), con la sección de un coche del AVE de aproximadamente 8 m² de sección.

El límite del crecimiento de la sección de los trenes lo limitarán, en primer lugar, la estabilidad y, a continuación y precisamente, *el paso por los túneles del recorrido*.

Es evidente por tanto que en lo que a los trazados respecta, deben utilizarse los mayores radios posibles (del orden de los 7000 a 9000 metros), peraltes pequeños y rampas y pendientes pequeñas (1%) que permitan la minimización de la resistencia proveniente de la componente del peso en el sentido de la marcha, permitiendo acercar las tracciones de los regímenes de máxima continua y máxima de máximas.

El lector español ya conoce los resultados que a menudo acarrea un ahorro en el diseño de las infraestructuras. Baste mirar el tramo Manzanal-Becerreá de la carretera nacional N-VI en el que, por haber ido ahorrando en las sucesivas infraestructuras, existen ahora 3 carreteras y autovías paralelas, y ello en un país como España en el que aún nos quedan muchísimas infraestructuras por construir.

7. ANÁLISIS OPERACIONAL DE UN AVE EN UN TÚNEL LARGO

Durante los últimos meses se han llevado a cabo una serie de estudios teóricos desde el punto de vista aerodinámico de los fenómenos que ocurren durante el tránsito por el interior del túnel, y se ha caracterizado el flujo alrededor del tren de manera que ha podido desarrollarse y codificarse un programa de Análisis Operacional para la determinación de las actuaciones de un tren en el interior de un túnel. Como

se ha dicho anteriormente, el programa se llama ACTUA-TUN.

La validación de los resultados obtenidos es de extrema dificultad, dada la práctica ausencia de casos de chequeo publicados acerca de los incrementos de resistencia de trenes en el interior de túneles. Los únicos datos disponibles y utilizables son datos experimentales del tren ICE del año 1987 durante la fase de ensayos que culminaron en el récord del mundo de velocidad media durante 25 Km en un trazado que comprendía el paso por varios túneles.

Los autores del informe publicado de esa fase de ensayos, con una metodología propia para el proceso de los datos experimentales, aproximaron la resistencia en el interior de los túneles mediante el ajuste de una función cuadrática con la velocidad del tren.

Sin embargo, parece que en el interior del túnel la resistencia aerodinámica de los trenes no es una función cuadrática de la velocidad, en la medida en que el factor de túnel depende ligeramente de la propia velocidad y en la medida en que la resistencia aerodinámica en el exterior de los túneles, tampoco lo es. La realidad del esfuerzo de fricción de una placa plana hidrodinámicamente lisa (con rugosidad superficial con altura de grano inferior al espesor de la subcapa viscosa) no es cuadrática con la velocidad, sino que el coeficiente es una función del número de Reynolds, en cuya definición aparece la propia velocidad. Según se amplía el diagrama de actuación de los trenes modernos, y se mejora el acabado superficial, más difícil va a resultar el ajuste cuadrático de la resistencia.

Los datos del factor de túnel puramente aerodinámico publicados para el ICE en las configuraciones siguientes dieron los factores de túnel que se reflejan en el cuadro 1.

El programa ACTUA-TUN, con las distribuciones geométricas y los datos de resistencia exterior de un AVE, (no de

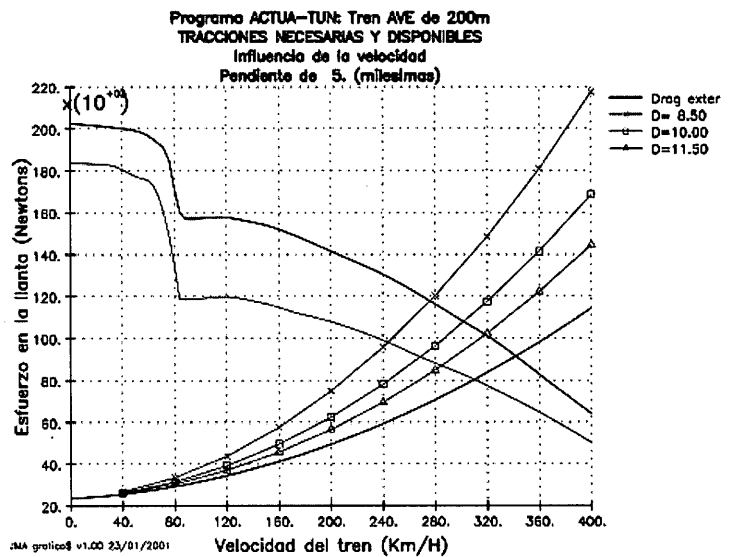


Figura 3. Tracciones necesarias y disponibles. Tren AVE de 200m de longitud. Diferentes velocidades y diámetros de túnel. Las curvas descendentes son las correspondientes a las tracciones máximas, continuas y absolutas del tren. Datos de Alstom.

un ICE), en un túnel de 10.7 m de diámetro, (para que el bloqueo sea de 0.1), con una velocidad de 280 Km/h produce, para las longitudes de la tabla, los factores de túnel aerodinámico que se indican en el cuadro 2.

La tendencia obtenida es la misma, y los valores muy aproximados, perfectamente dentro de la tolerancia experimental. Obviamente el AVE no es un ICE, y las formas de las cabezas son diferentes, aunque ambas del tipo parabólico, resistente con un coeficiente de resistencia de la cabeza en el exterior, en ambos trenes positivo y probablemente similar.

8. RESULTADOS

Se muestran a continuación algunos resultados que produce el programa en su modalidad de predicción de las actuaciones de un AVE de características reales, y de otro tren, geoméricamente semejante, pero de sección ampliada hasta los 12.6 m² -característica de los trenes japoneses actualmente en servicio, en tres túneles de 8.5m, 10m y 11.5m de diámetro interior libre, con el plano de rodadura en la cota 1.2 m respecto de la generatriz inferior. El perfil considerado en alzado ha sido de 5 milésimas, probablemente significativo de la primera mitad del recorrido interior. La situación del tren en el interior del túnel donde son válidos estos resultados, es cualquier posición, una vez completada la fase de la entrada, y hasta el cruce con la primera onda expansiva rebotada en la boca de salida, lo que en un túnel de 25 Km va a ocurrir un par de minutos después (Fig. 9). A partir de ese momento la resistencia aerodinámica va a descender ligeramente. En los gráficos de resistencia aparecen las líneas correspondientes a las tracciones máxima continua y máxima absoluta de la planta tractora del tren AVE, así como la resistencia al aire libre.

CUADRO 1

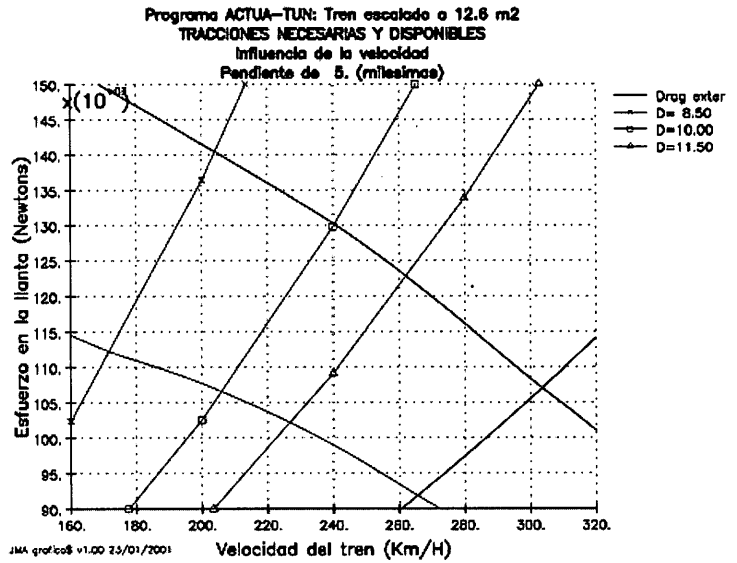
- Relación de bloqueo alrededor de 0.1 (túnel de 85m² de sección).
- Rango de velocidades entre 250 y 320 Km/h.
- (L+1R+L) de 66m de longitud: El factor de túnel experimental fue de 1.49
- (L+2R+L) de 90 m de longitud: El factor de túnel fue de 1.38
- (L+3R+L) de 114 m de longitud: El factor de túnel fue de 1.35
- El margen de error se estimó en un 6 %.

CUADRO 2

Longitud tren, m	Factor Túnel ICE Experimental	Factor Túnel Programa ACTUA-TUN
66	1.49	1.507
90	1.38	1.358
114	1.35	1.349

De los resultados que se muestran en las (Fig.3 y Fig.4), se extrae que los regímenes de máxima potencia continua y absoluta (curvas de potencia dadas por los fabricantes), se traducen en las velocidades de paso reflejadas en el cuadro 3.

Se ha estudiado un aumento de la sección transversal hasta los 12.6 m², por ser ésta la sección representativa de los más modernos trenes Shinkansen de simple cubierta. Se observa que para la potencia máxima que el tren puede dar de forma continua la velocidad en el túnel no superará los 240 km/h si se construyen los túneles de base españoles con 8.5 m de diámetro interno. Los AVE de 2 pisos no superarán los 170 km/h para un 0.5% de pendiente, y si esta aumenta hasta el 1% la velocidad baja hasta 137 km/h. En algunos trazados se está pretendiendo incluso llegar a pendientes del 1.5%, con lo que el AVE de 2 pisos circulará a 84 km/h. Realmente parece sorprendente que se haya deci-



CUADRO 3

Velocidad del tren en el túnel km/h . Pendiente 0.5%

Diámetro del túnel	8.5 m	10 m	11.5 m	Infinito (aire libre)
AVE de 1 piso				
Potencia maxima continua	243	268	285	310
Potencia máxima absoluta	276	302	318	342
AVE de 2 pisos				
Potencia maxima continua	171	206	226	265
Potencia máxima absoluta	204	240	262	304

Velocidad del tren en el túnel km/h . Pendiente 1.0%

Diámetro del túnel	8.5 m	10 m	11.5 m	Infinito (aire libre)
AVE de 1 piso				
Potencia maxima continua	217	240	253	274
Potencia máxima absoluta	255	279	293	315
AVE de 2 pisos				
Potencia maxima continua	137	165	180	213
Potencia máxima absoluta	177	208	228	264

Velocidad del tren en el túnel km/h . Pendiente 1.5%

Diámetro del túnel	8.5 m	10 m	11.5 m	Infinito (aire libre)
AVE de 1 piso				
Potencia maxima continua	186	206	217	236
Potencia máxima absoluta	232	254	266	286
AVE de 2 pisos				
Potencia maxima continua	84	105	122	143
Potencia máxima absoluta	145	172	188	217

Figura 4. Tracciones necesarias y disponibles. Tren tipo AVE de 200m de longitud, de sección escalada hasta 12.6m² Diferentes velocidades (región de interés) y diámetros de túnel.

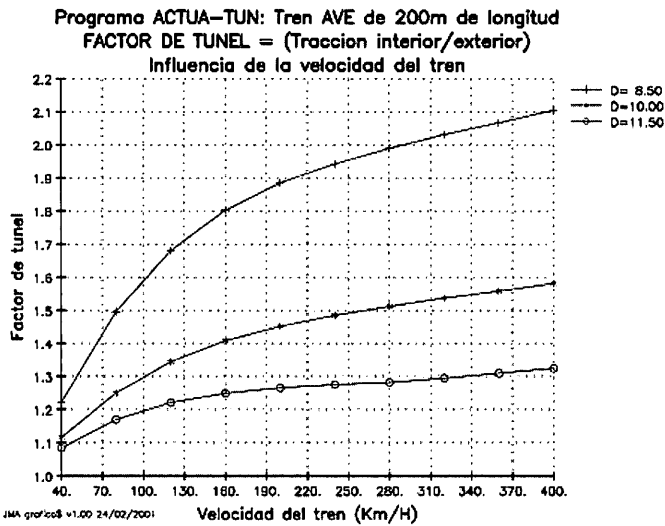


Figura 5. Relación entre las tracciones (y potencias) requeridas, en el interior de los túneles y en superficie. Tren AVE de 200m de longitud. Diferentes velocidades y diámetros de túnel.

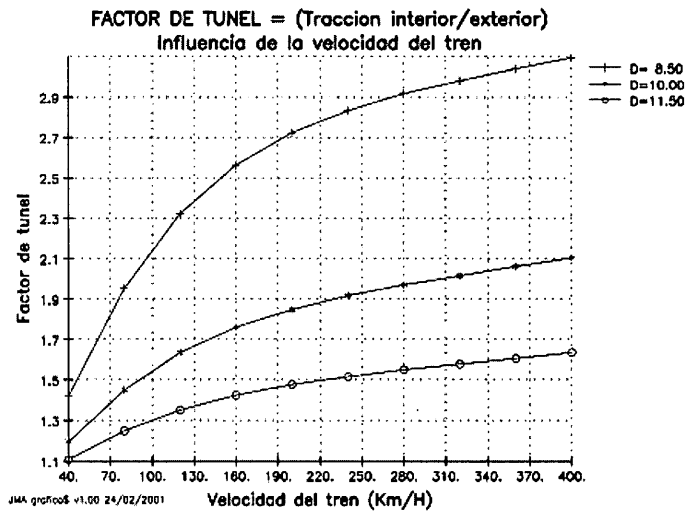


Figura 6. Relación entre las tracciones (y potencias) requeridas, en el interior de los túneles y en superficie. Tren tipo AVE de 200m de longitud, de sección escalada hasta 12.6m². Diferentes velocidades y diámetros de túnel

dido un diámetro de 8.5 m para el túnel de Guadarrama sin haber estudiado a fondo este problema.

Asimismo se obtiene el cuadro 4 de tracciones requeridas y disponibles a 300 Km/h de un tren AVE en su configuración típica de 8 coches.

Debe tenerse en cuenta, también en el diseño del túnel que posiblemente la temperatura ambiente, en el interior de un túnel tan largo y profundo, va a ser más elevada que la debida a razones geotérmicas, debido a la disipación de potencia aerodinámica proveniente del tránsito de los propios trenes. Estas condiciones comprometerían el rendimiento de la planta tractora en túneles de sección muy estricta, o de alta frecuencia de paso.

En las (Fig.5 y Fig.6) se aprecia la influencia de la velocidad en el factor de túnel total, comprobándose que en un túnel de 8.5m de diámetro, la tracción y potencia requeridas en el interior, dobla las requeridas en el exterior para el tren AVE A 360 Km/h, y casi triplicaría las requeridas de un tren de sección ampliada hasta la sección actual de los más modernos trenes Shinkansen.

La (Fig.7) muestra los resultados de las velocidades de soplado inducido en el túnel en el sentido del movimiento.

En la (Fig.8) realizadas con el programa TEA-TUN, se muestra la evolución de las presiones en el exterior del tren a la altura del primer y último coche, así como a la altura del morro de la locomotora de cabeza, en un túnel de 25 Km de longitud y 8.5m de diámetro, con un AVE lanzado a 360 Km/h. Puede observarse que la presión sobre las ventanillas del último coche alcanza -500 Kg/m² respecto de la presión en el exterior del túnel (Fig. 8 y Fig. 10). Asimismo puede observarse que en los cruces con las ondas reflejadas en los extremos del túnel, se producen variaciones rápidas

CUADRO 4

Tracción máxima disponible indefinidamente	83,000 Newtons
Tracción máxima disponible durante tiempo limitado	108,000 Newtons
Tracción requerida para 300 Km/h en túnel de 8.5 m	134,000 Newtons
Tracción requerida para 300 Km/h en túnel de 10.75 m	100,000 Newtons

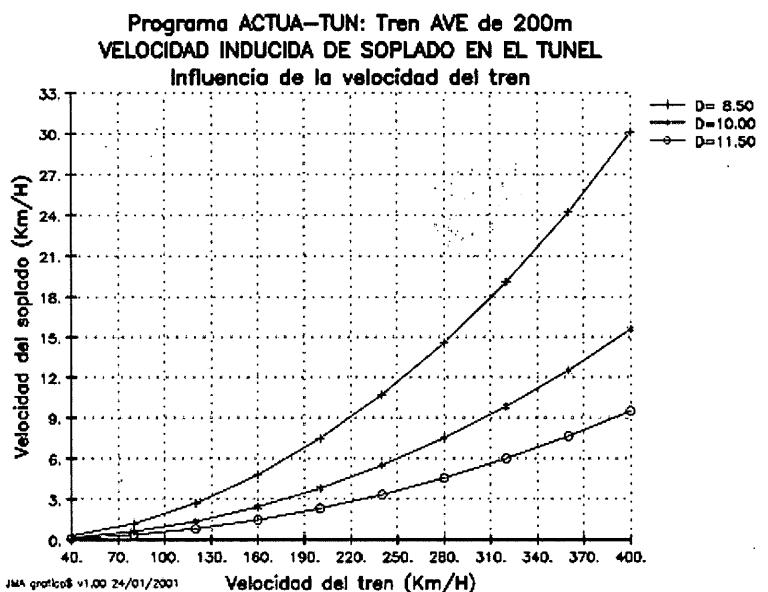


Figura 7. Velocidad de la corriente de aire a lo largo del túnel. Tren AVE de 200m de longitud. Diferentes velocidades de paso y diámetros de túnel.

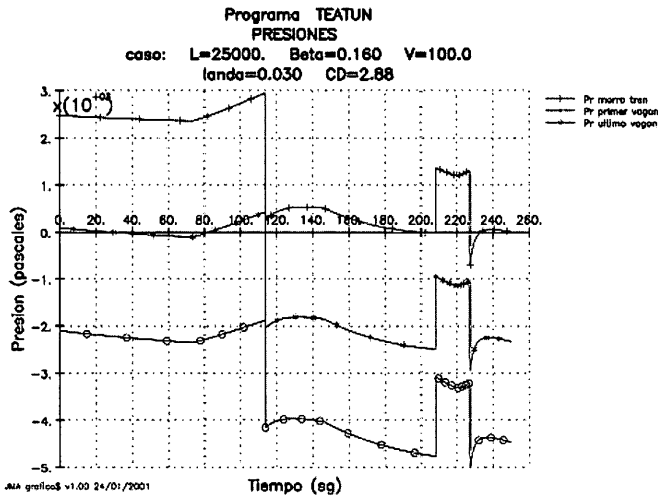


Figura 8. Evolución con el tiempo de las presiones, sobre el túnel y a la altura del morro de la locomotora de cabeza, del primer vagón y del último. AVE de 200m de longitud a 360 Km/h en un túnel de 25 Km y 8.5 m de diámetro.

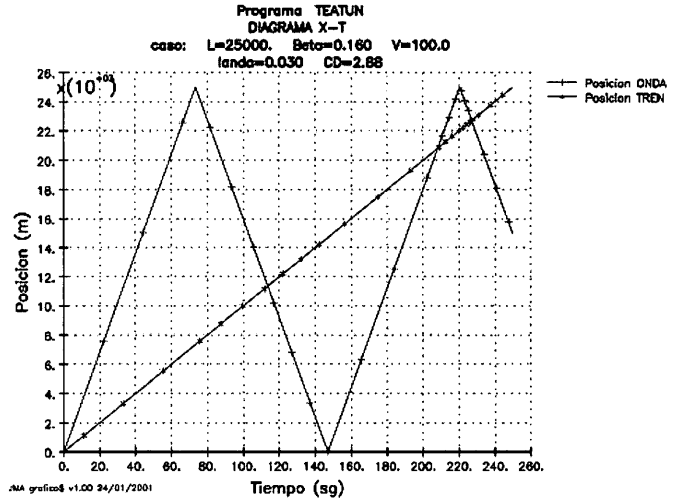


Figura 9. Diagrama del mismo caso que la figura anterior. Se muestran a lo largo del tiempo, las posiciones del tren y de la onda. El tren se encuentra por primera vez con la onda expansiva rebotada en el extremo de salida, 113 sg después de la entrada en el túnel, a 11,3 Km del portal de entrada.

de presión (en 2 segundos) en cualquier punto del tren con una magnitud máxima de salto de 2 Kpa.

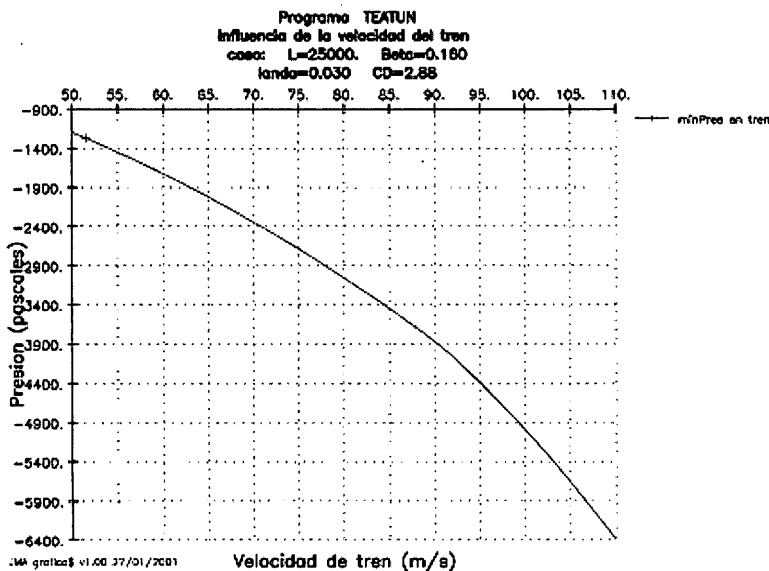
9. RESULTADO FUNDAMENTAL DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

El resultado fundamental de los análisis realizados por los autores, sobre la aerodinámica de los túneles largos, se concreta en la necesidad de un diámetro interior libre de 10.75m (con el plano de las vías situado 1.2m sobre la generatriz inferior y 0.5% de pendiente), para la circu-

Figura 10. Resultado de un barrido de velocidades de paso. Para cada velocidad se ha calculado la presión mínima de todo el recorrido, en el exterior del último de los vagones. Tren AVE de 200m en un túnel de 25 Km de longitud y 8.5 m de diámetro.

lación de un tren AVE a 300 Km/h, disponiéndose en esta situación de un pequeño margen de reserva (800 Kg de empuje), en el régimen de tracción máxima absoluta (sostenible por tiempo limitado). Mientras que un diámetro de 8.5m, para la potencia máxima continua del tren y un 1.5% de pendiente, reduciría la velocidad máxima a 186 Km/h. En estas condiciones la velocidad del AVE de 2 pisos como los actuales de Paris-Lyon-Marsella no llegará a 84 km/h.

Debido a la resistencia aerodinámica, el AVE nunca podrá circular por el interior de un túnel largo, de pendiente no negativa, a la velocidad de 350 Km/h. En un túnel horizontal, en el régimen de tracción máxima absoluta (equivalente a 366 Km/h en el exterior), se requeriría un diámetro interior libre superior a los 14m.



10. CONCLUSIONES

- 1. La variación de sección del túnel con su longitud, actualmente frecuente en España, se debe a haber tenido en cuenta únicamente el problema de las ondas de presión y el criterio del confort del viajero. *Debe tenerse también en cuenta el problema de la fricción.*
- 2. El diámetro de los túneles largos no debe ser muy estricto debido a la reducción de velocidad que se ha visto en las tablas anteriores y a la dificultad del desalojo en caso de incendio o accidente en el túnel.
- 3. En un túnel de 8.5m de diámetro, el factor de túnel se dobla para un AVE actual y se triplica si la sección transversal del tren se amplía en un 50% como en el AVE de 2 pisos.

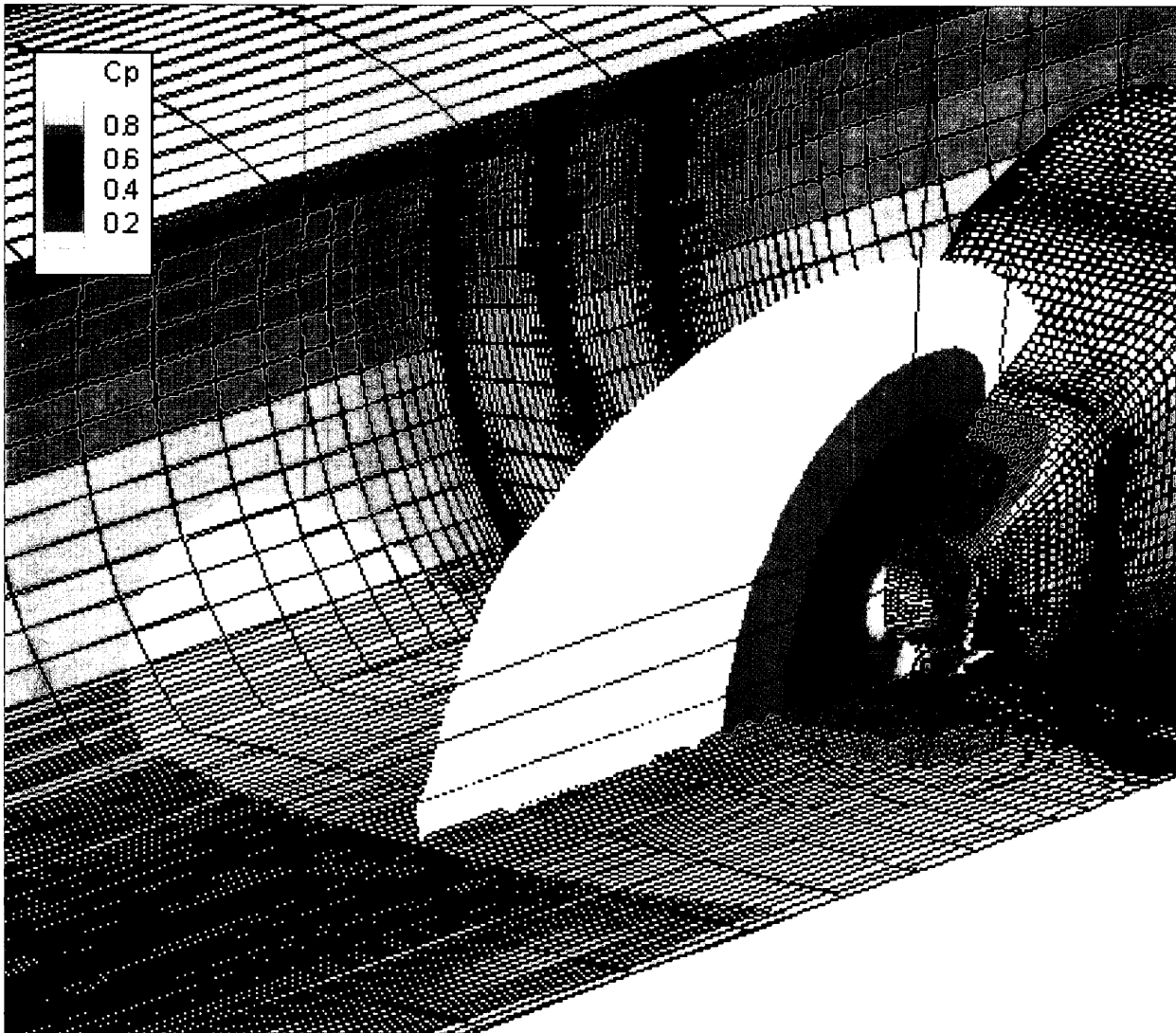


Figura 11. Zona compresiva anclada en el morro de tren. $V=360$ Km/h $D=8.5$ m. Por efectos tridimensionales, delante del tren aparece una región de mayor presión. El tamaño de esta pelota compresiva, fuera del túnel es mucho mayor. El confinamiento de las paredes del túnel la reduce. Si la reducción fuera progresiva, no se generaría una onda de presión en la entrada, (efecto que intentan conseguir las boquillas adaptadoras).

- 4. En un país tan montañoso como España, donde el tren es crítico para las comunicaciones, los criterios de diseño de la Alta Velocidad en FFCC deben aumentar las secciones de los túneles, para permitir el paso más rápido de trenes de mayor sección.
- 5. La tecnología actual de compartimentos estancos, junto a la posibilidad de considerar boquillas amortiguadoras en los portales de los túneles muy largos, sugiere la idea de que los criterios de diseño tienen que dirigirse hacia la reducción de la resistencia con el objeto de mantener la velocidad de los trenes de pasajeros y permitir volúmenes de mercancías de mayor gálibo.
- 6. Si los diseños actuales de túneles no contemplan las tendencias futuras de aumento de la sección transversal y velocidad de los trenes, se quedarán pequeños mucho antes de la vida útil de la obra.

11. PROGRAMAS DE CÁLCULO DE LA FRICCIÓN TREN-AIRE-TÚNEL

A principios de Abril del 2001 tuvo lugar la 4ª Conferencia Internacional "Safety in Road and Rail Tunnels" en Madrid. Con ese motivo los autores tuvieron la oportunidad de estudiar los resultados obtenidos de los modelos numéricos aquí presentados conjuntamente con el Prof. Alan Vardy, autor de los programas de cálculo de las sobrepresiones generadas por las ondas de entrada utilizados para el dimensionamiento de nuestros túneles de AVE y conocida autoridad mundial en la materia. El Prof. Vardy confirmó a los autores que su programa AE-ROTUN puede calcular también la fricción creada en el túnel, con una metodología similar a la desarrollada por los autores, y llega a resultados similares, si bien los autores tienen algunas ligeras discrepancias sobre el proceso de análisis y evaluación de la fricción, discrepancias que se están analizando en el momento de escribir el presente artículo. ■

REFERENCIAS

LIBROS:

–Lipmann, V. And Roshko, A.: "Elements of Gasdynamics". John Wiley & Sons, New York 1957
 –Hoerner, S.F.: "Résistance a L'Avancement dans les Fluides" (Fluid Dynamic Drag).. Gauthier-Villars 1965, Paris
 –L.G. Loitsyanskii, "Mechanics of Liquids and Gases", R.T. Jones and W.P. Jones, Pergamon Press, 1966.
 –Hess, J. L., and Smith, A.M.O., "Calculation of Potencial Flow About Arbitrary Bodies", Progress in Aeronautical Sciences, Vol 8, D. Kucheman, (ed.) Pergamon Press, New York, 1967.
 –Schlichting, H.: "Boundary Layer Theory". McGraw-Hill, New York, 1968
 –Whiye, F.M., Lessman, R. C., and Christoph, G. H., "Simplified Approach to the Analysis of Tubulent Boundary Layers in Two and Three Dimensions," AFFDL-TR-136, Nov. 1972.
 –Whitman, G.B.: "Linear and Nonlinear Waves". Wiley-Interscience, New York, 1974
 –Landau, L.D, Lifshitz, E.M.: "Fluid Mechanics". Pergamon Press, 1975
 –Wylie, E.B., Streeter, V.L.: "Fluid Transients". MacGraw-Hill IBC New York... 1978
 –Torenbeek, E.: "Synthesis of Subsonic Airplane Design". Kluwer Academic Publishers 1982. Dordrecht / Boston / London.
 –White, F. M.: "Mecánica de Fluidos". McGraw-Hill, Madrid ...New York..., 1983

ARTÍCULOS e INFORMES:

–Gawthorpe R.G. (1983): "Train Drag Reduction from Simple Design Changes". Int. J. of Vehicle Design, Special Publication SP3, 1983, pp.: 342, 353
 –Steinheuer, J.: "Calculation of Unsteady Pressures During Passing and Tunnel Entrance of Trains". DFVLR, pp.:177-191
 –Gawthorpe, R.G.: "High Speed Aerodynamic Effects on Existing Railways". British Rail Research pp.:787-795.
 –Gawthorpe, R.G., Johnson, T. Figura, G.I.: "The Aerodynamic Sizing of Tunnel Cross-Sections for Train Operation" British Rail Research pp.: 1-11.
 –Maeda, T., Kinoshita, M., Kajiyama, H., Tanemoto, K. (1986): "Estimation of Aerodynamic Drag of Shinkansen Trains from Pressure Rise in Tunnel" 6th Int. Symp. On the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels Durham, UK: 27-29 Sept. 1986. Paper A4.
 –Melis, M. (2000) "El túnel, clave de las infraestructuras. 149 túneles españoles y extranjeros. Métodos y velocidades de construcción". ROP nº3403. Nov.2000. Pag.17-40.
 –Melis, M. (1999) "Los túneles y los Ingenieros de Caminos". Revista de Obras Públicas. Número especial del Bicentenario, Junio 1999. Pags.187-202.
 –Schultz, M., Sockel, H. (1986): "The Influence of Unsteady Friction on the Propagation of Pressure Waves in Tunnels" 6th Int. Symp. On the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Durham, UK: 27-29 Sept. 1986. Paper B3.

–Gawthorpe, R.G (1978):. "Aerodynamics in Railway Engineering" Part I: "Aerodynamics of Trains in Open Air." pp. 7-12 Part III: " Aerodynamics of Trains in Tunnels." pp. 38-40 ImechE Railway Engineer Int., vol. 3, nº. 3. 1978.
 –Gawthorpe R.G , Pope, C.W., Green, R.H.(1979): "Analysis of train Drag in Various Configurations of Long Tunnels." Proc. 3th Int. Symp. On the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels BHRA Fluid Engineering, Cranfield, UK. 1979, Paper G1, pp. 257-280.
 –Yamamoto, A. (1974): " Pressure Variations, Aerodynamic Drag of Train, and Natural Ventilation in Shin-Kansen Type Tunnel". JNR RTRI Quarterly Report, 1974, vol. 15, nº. 4.
 –Pellis, P. (1977): "Air resistance to the passage of trains through tunnels", Ingegneria Ferroviaria, 32 (ii) , pp 867-75.
 –Fox, J.A., Henson, D.A. (1971): "The Prediction of the Magnitude of Pressure Transients Generated by a Train Entering a Single Tunnel." Proc. Inst. Civ. Engrs. 49, May 1971, pp 53-69.
 –Vardy, A. E. (1976): "On the use of the Method of Characteristics for the Solution of Unsteady Flows in Networks." Proc. 2nd Int. Conf. on Pressure Surges, Cranfield, UK, BHRA Fluid Engineering, 1976, Paper H2, pp 15-30.
 –Vardy, A. E. (1999): "Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation." Proc. Instn Mech Engrs. Vol 213, part F, pag 71-87.
 –Woods, W.A., Pope, C.W. (1979): " On the Range of Validity of Simplified One Dimensional Theories for Calculating Unsteady Flows in Railway Tunnels." Proc. 3th Int. Symp. On the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels BHRA Fluid Engineering, Cranfield, UK, 1979, Paper D2, pp 115-150.
 –Harwarth, F., Sockel, H. (1979): "Unsteady Flow due to Trains Passing a Tunnel." Proc. 3th Int. Symp on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Cranfield, UK, BHRA Fluid Engineering, Cranfield. 1979, Paper D3, pp 151-160.
 –Mirels, H.: "Attenuation in a Shock Tube due to Unsteady Boundary Layer Action" NACA Rep. 1333, Washington 1957.
 –Trimpi, R.L., Cohen, N.B.: "A non-linear Theory for Predicting the Effects of Unsteady, Laminar, Turbulent or Transitional Boundary Layers on the Attenuation of Shock waves in Shock Tube with Experimental comparison". NACA Tech. Note 4347, Washington 1959.
 –Spence, D.A., Woods, B. A.: "A Review of Theoretical Treatments of Shock-Tube Attenuation". Journal of Fluids Mechanics, vol. 19, Part 2, June 1964, pp 161-174.
 –Peters, J.L.: "Mesure de la Traînée Aérodynamique de l'ICE". Revue Générale des Chemins de Fer, Janvier 1990, pp 25-31.
 Lozano del Moral, A. "El dimensionamiento de túneles ferroviarios en líneas de alta velocidad". Revista de Obras Públicas, Nº 3381, Nov 1998, pp 41-50.
 –Lozano del Moral A. Informe sobre el Nuevo Acceso ferroviario al Norte y Noroeste de España. Anejo Nº 7. Diseño Funcional y Análisis de Riesgos. Julio 1999
 –Lozano del Moral, A. "El dimensionamiento de túneles ferroviarios en líneas de alta velocidad [2ª Parte.- Métodos alternativos]". Revista de Obras Públicas, Nº 3402, Oct 2000, pp 19-31. ■