

EL DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES FERROVIARIOS EN LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

Antonio Lozano del Moral.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director Técnico U.N. Mantenimiento de Infraestructura. RENFE

*Director de los Proyectos sobre Túneles de la Unión Internacional
de Ferrocarriles (UIC).*

RESUMEN

El artículo hace un sucinto repaso a los trabajos realizados por la U.I.C. en el ámbito de la aerodinámica aplicada a los túneles en Líneas de Alta Velocidad, centrándose en las aplicaciones prácticas desarrolladas en los últimos años para el diseño de los mismos, tanto para líneas operadas con trenes estancos como no estancos. Aplicaciones que han sido dirigidas por el autor del presente artículo.

ABSTRACT

The article mentions some of the work carried out by U.I.C. in the sphere of aerodynamics applied to high-speed train tunnels, referring to practical applications developed in recent years under the direction of the author for their design, for lines for air-tight trains and others.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de velocidad llevado a cabo en el proceso de modernización de ciertos corredores ferroviarios europeos con existencia de túneles de sección reducida con el objetivo de reducir tiempos de viaje, y por tanto hacer más competitivo al modo de transporte ferroviario, puso de manifiesto un problema hasta ese momento (primeros años 70) inexistente en el mundo ferroviario, al constatare que algunos viajeros experimentaban en sus oídos sensaciones desagradables llegando incluso al dolor al paso por los túneles, lo que obligó a reducir la velocidad al paso por los mismos.

Eran las primeras constataciones de la necesidad de profundizar en un campo de la Física y su aplicación al ferrocarril: la aerodinámica.

Esta situación, así como la ya existente planificación de futuras líneas de alta velocidad con

existencia de túneles llevó a la Unión Internacional de los Ferrocarriles a aprobar la realización de los pertinentes estudios para, en una primera fase, comprender el fenómeno y validar sistemas de predicción, dejando para una segunda fase el desarrollo de aplicaciones prácticas que facilitasen el diseño de los futuros túneles.

Se tomó la iniciativa de crear el Comité C149 en el seno de la Oficina de Investigación y Ensayos (ORE) con la misión de:

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

*Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
enero de 1999.*

**Recibido en ROP:
septiembre de 1998**

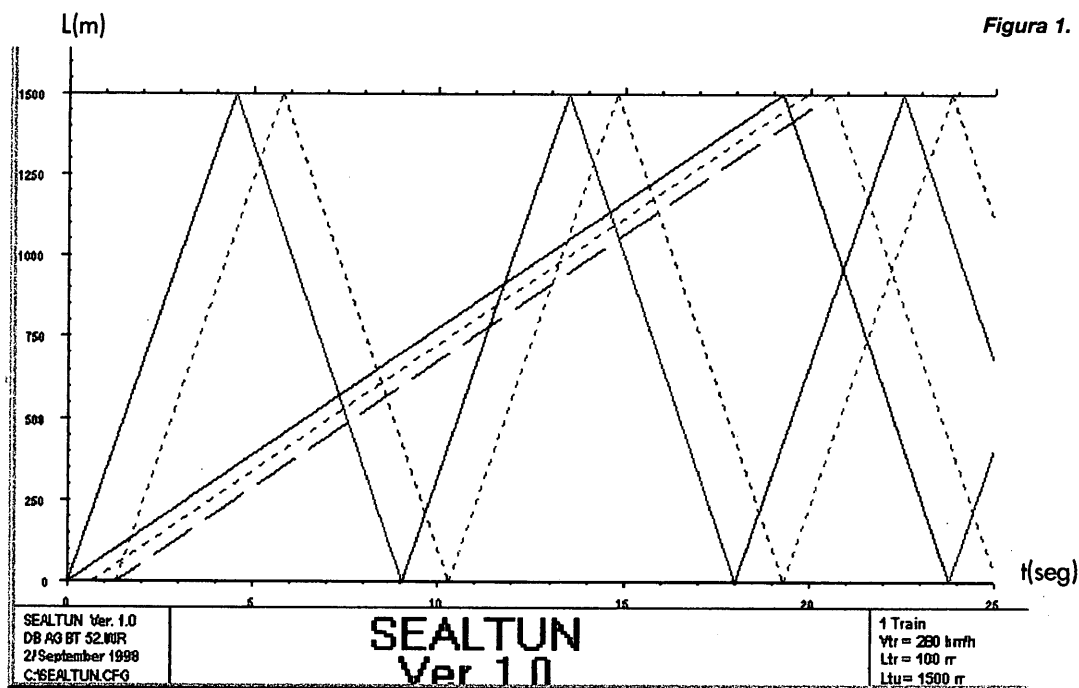


Figura 1.

Subcomisión de Túneles, recogiendo el testigo de mi antecesor en el cargo D. Elías García González que había sido el proponente del primer estudio de aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en la primera fase.

1.1. EFECTOS AERODINÁMICOS EN LOS TÚNELES. CONSIDERACIONES BÁSICAS

Cuando la cabeza de un tren entra en un túnel, el aire que se encuentra a la entrada se comprime creando una onda de presión que se propaga a lo largo del mismo a la velocidad del sonido, esta onda

al llegar a la boca de salida del túnel se refleja¹ como onda de depresión en dirección a la boca de entrada. Por otra parte, cuando la cola del tren entra en el túnel, se produce una caída de presión (onda de depresión) que también se propaga hacia la cabeza del tren a la velocidad del sonido, cuando alcanza la

boca de salida se refleja como onda de presión. Este fenómeno se repite hasta que las ondas son amortiguadas totalmente. (ver figura nº1).

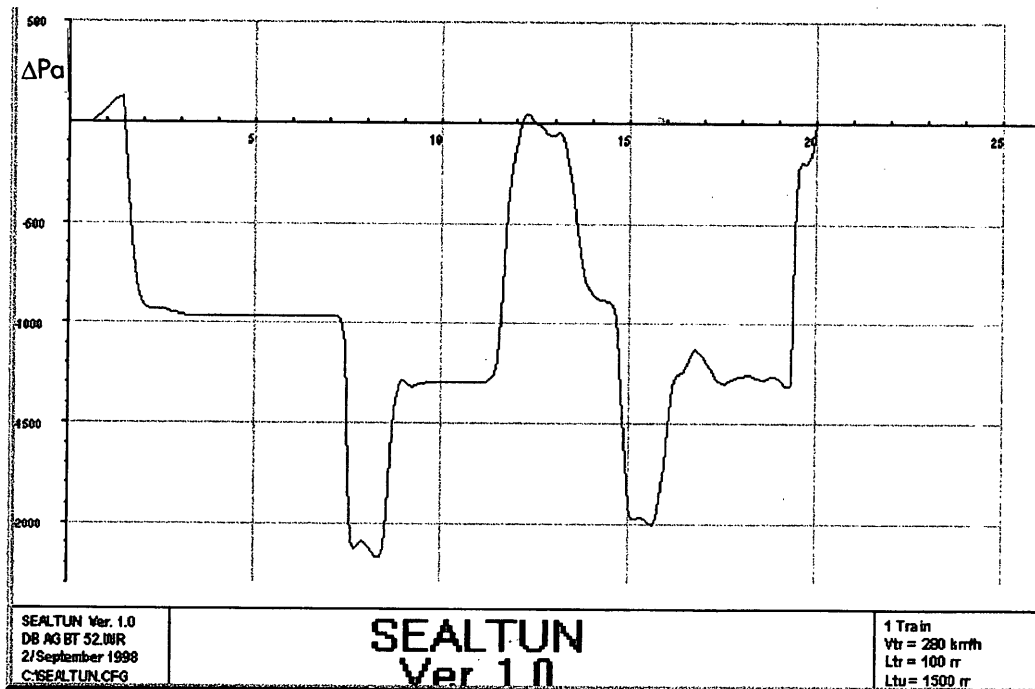
Este conjunto de ondas de distinto signo chocan contra el tren mientras dura su tránsito por el túnel produciéndose unas bruscas variaciones de presión en el exterior del mismo (ver figura nº2, las variaciones de presión corresponden al centro del tren). Estas variaciones de presión afectarán a los pasajeros del tren en mayor o menor medida según las características tanto del tren como del túnel.

En caso de un túnel de doble vía la complejidad

Este Comité terminó sus trabajos en el año 1985 aunque sus trabajos fueron complementados posteriormente por otros Comités fundamentalmente el C 167.

La segunda fase es la que me tocó proponer, desarrollar y dirigir como Presidente de la recientemente desaparecida

Figura 2.



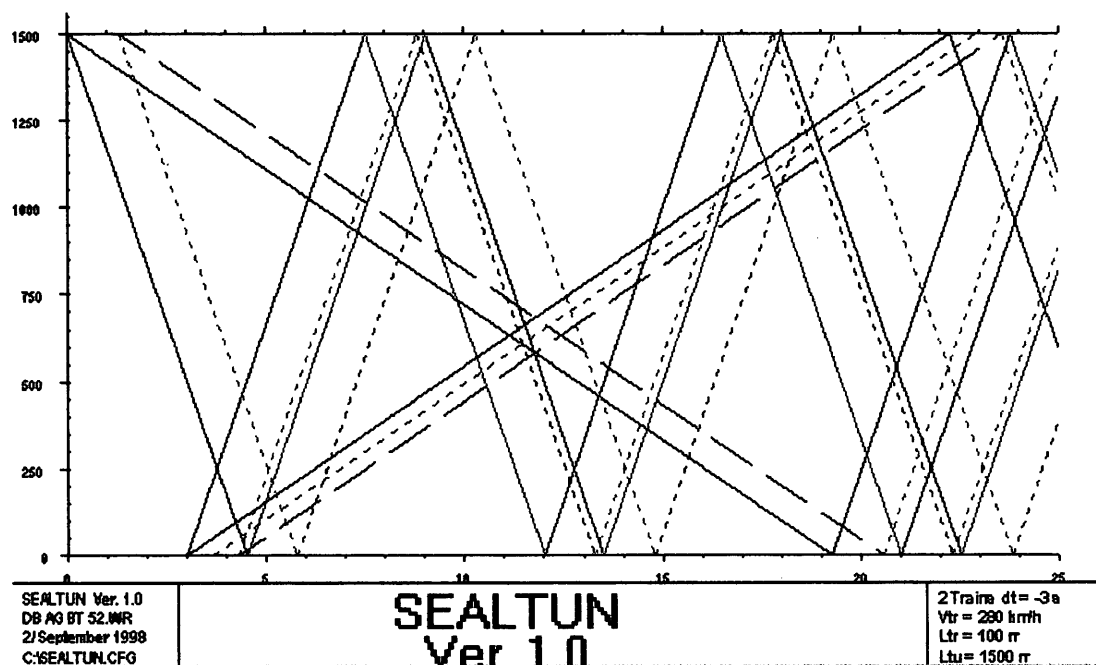
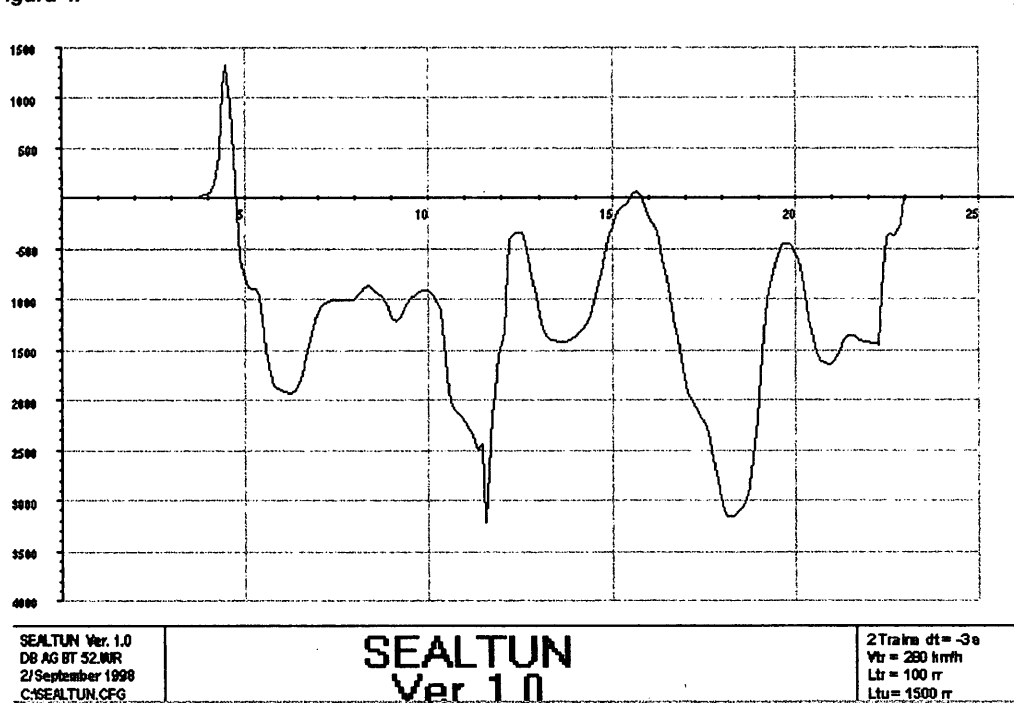


Figura 3.

de las historias de presión se puede incrementar por la existencia de un segundo tren en sentido contrario. (ver figuras nº 3 y 4. Los ejemplos se han calculado con el desfase a la entrada de los dos trenes que producen las máximas variaciones de presión).

Figura 4.



1.2. APROXIMACIÓN TEÓRICA AL FENÓMENO

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

- ▼ velocidad del tren
- ▼ sección transversal del tren
- ▼ longitud del tren
- ▼ forma de la cabeza y cola del tren
- ▼ forma y rugosidad de la superficie exterior del tren
- ▼ sección del túnel
- ▼ longitud del túnel
- ▼ rugosidad del revestimiento del túnel

A estos parámetros, y en el caso de un túnel de vía doble hay que añadir las características del segundo tren y el tiempo de desfase de su entrada respecto al primero.

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

- ▼ a. Flujo no isentrópico
- ▼ b. Flujo isentrópico con rozamiento
- ▼ c. Flujo isentrópico
- ▼ d. Flujo con densidad del aire y velocidad del sonido constantes
- ▼ e. Flujo incompresible (velocidad del sonido infinita y densidad del aire constante)

En el modelo (a), la propagación de las ondas y los efectos térmicos se representan de acuerdo con las ecuaciones de continuidad, de cantidad de movimiento y energía y

a la primera y segunda ley de la termodinámica, siendo el más riguroso de todos y fue el desarrollado por el profesor Sockel de la Universidad de Viena. Los otros modelos representan el comportamiento de los flujos de una manera simplificada, aunque solo los modelos (b) y (d) lo hacen de una manera suficientemente realista. En concreto el modelo (b) fue el desarrollado por el profesor Vardy de la Universidad de Dundee.

El Comité C 149 consideró que el método del profesor Vardy tenía la ventaja de un proceso de cálculo relativamente sencillo y suficiente aproximación con las siguientes condiciones:

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

El profesor Sockel desarrolló una metodología para el tratamiento de los túneles cortos reemplazando la sección transversal del tren por una distribución ficticia consiguiendo una mejor aproximación de las predicciones a las mediciones de los ensayos².

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

En el punto 3º, esta cuestión será ampliada.

2. EL DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES

2.1. EL DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES PARA TRENES NO ESTANCOS. FICHA U.I.C. 779/11

La segunda fase de los estudios sobre aerodinámica en túneles de interés para los Ingenieros Civiles desarrollada en el seno de la U.I.C., tuvo su comienzo con la aprobación de la propuesta presupuestaria presentada por D. Elías García González para la confección de una ficha que facilitase el diseño de túneles para trenes no estancos.

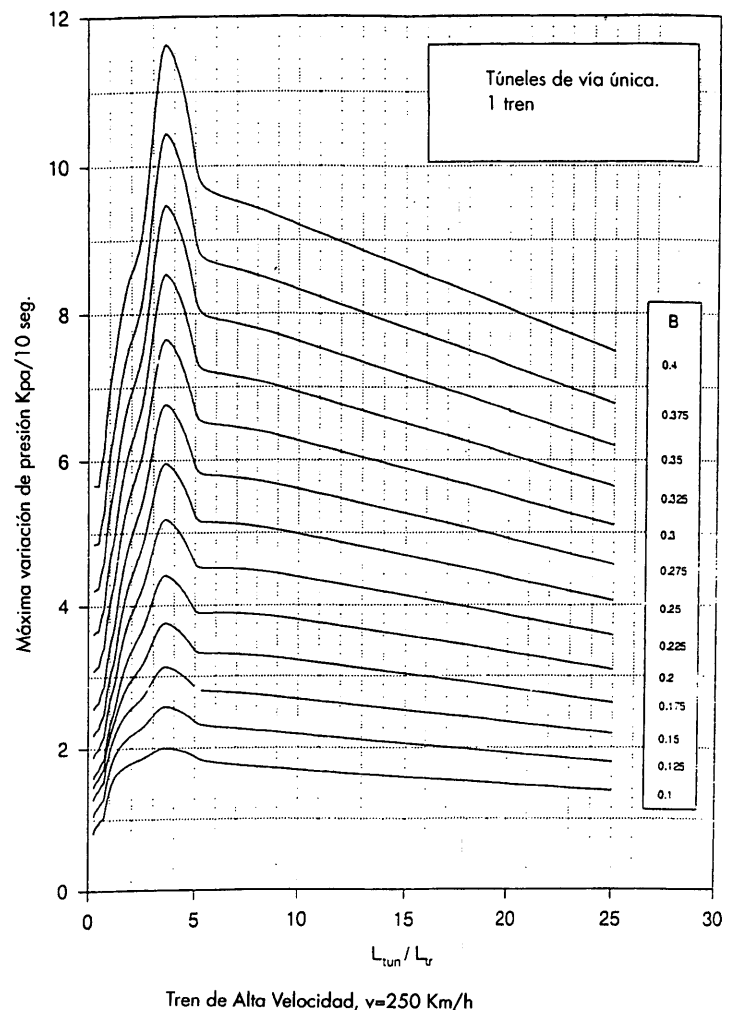


Figura 5.

El trabajo fue adjudicado a BR Research, empresa adjudicataria del concurso internacional que fue convocado. Previo a la adjudicación, en la redacción del correspondiente Pliego de Bases hubo que definir en el Grupo de Trabajo que ya yo dirigía (7k11) las exigencias funcionales requeridas (velocidades a considerar, tipo de explotaciones previstas etc).

El resultado esperado debería ser el desarrollo de una metodología de fácil uso que contemplase los siguientes casos:

- ▼ Trenes de velocidad alta (remolcados): 180 a 220km/h
- ▼ Ramas de alta velocidad: 200 a 350 km/h

Los tipos de operación considerados fueron:

- ▼ Ramas de alta velocidad en vía única o doble (con cruces a la misma velocidad)
- ▼ Cruces de trenes de velocidad alta con ramas de alta velocidad³.

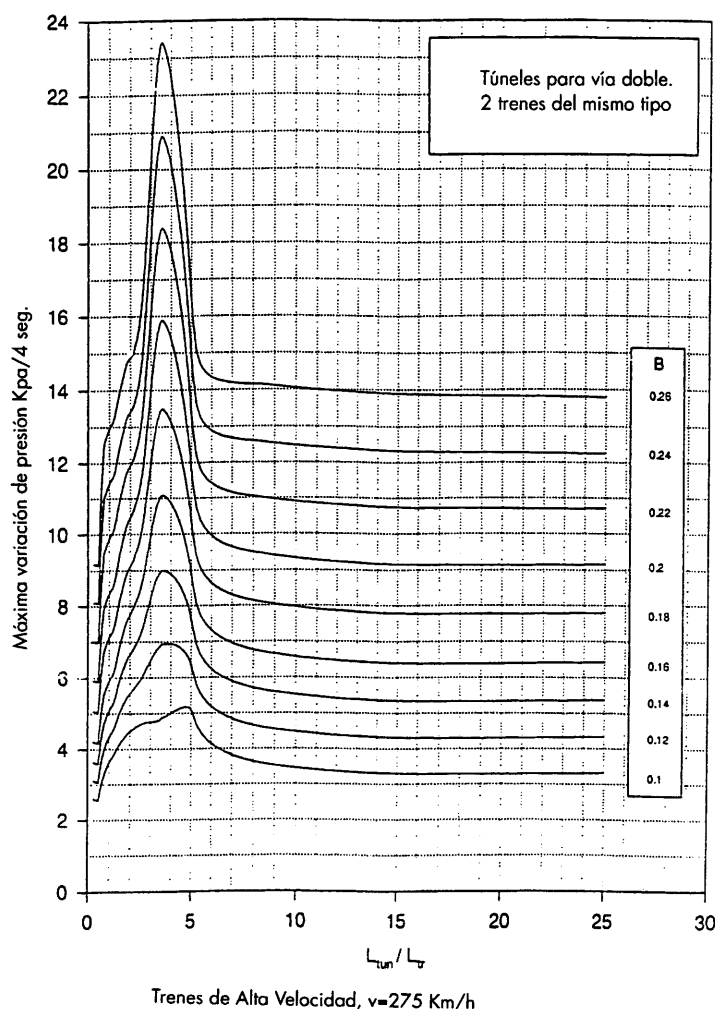


Figura 6.

2.1.1. Diseño de la Ficha

La dificultad principal para obtener el objetivo de sencillez en un tema tan complejo y que en principio parecía que solo se podría resolver con miles de casos analizados se pudo resolver primero combinando los parámetros más definitorios para formar grupos no-dimensionales y segundo con una elección muy cuidadosa de los mismos para formar matrices parcialmente rellenas pero que cubriesen los casos necesarios en la práctica tanto para vía única como doble:

- ▼ la longitud de los túneles y la longitud de los trenes se combinaron y fueron representados por su cociente.
- ▼ la sección transversal de los trenes y de los túneles se combinaron y fueron representadas por su cociente o coeficiente de bloqueo (B).
- ▼ las gráficas fueron realizadas con un número limitado de casos analizados (10 L_{tun}/L_{tr} y 7 coeficientes de bloqueo para vía doble y 5 para vía única) lo que exigió

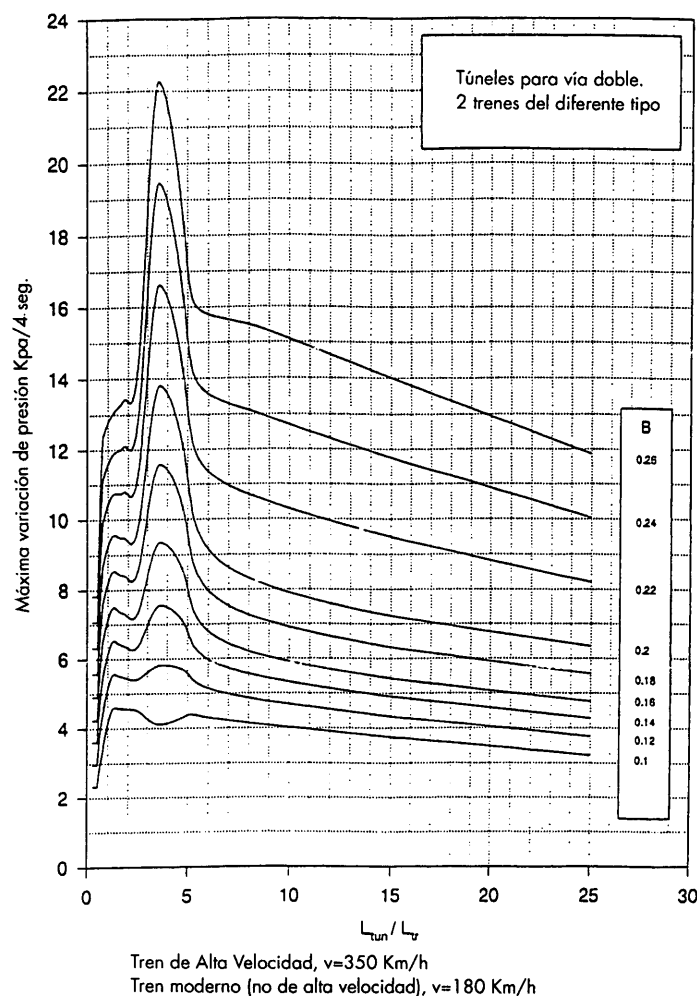


Figura 7.

una muy cuidadosa selección de los casos cubriendo los más significativos, para conseguir que las peores variaciones de presión fuesen obtenidas, lo que era especialmente imprescindible en el caso de doble vía en la elección del tiempo de desfase en la entrada en el túnel del segundo tren.

Las máximas variaciones de presión fueron predichas usando el programa Thermotun/4 del Profesor Vardy, colaborador de BR Research en este proyecto. Para cada combinación del tipo de túnel (vía única o doble), el tipo de tren y su velocidad, los resultados de la máxima variación de presión fueron dibujados como ordenadas para cada ratio de longitudes en abscisas y para un conjunto de coeficientes de bloqueo. Esto fue realizado para diversos plazos temporales 1,4, y 10 segundos (1 y 10 solo para vía única) para tener en cuenta los distintos criterios de diseño existentes en diversas Administraciones Ferroviarias. (ver figuras 5, 6 y 7)

2.1.2. Utilización de la Ficha

Para la determinación de la sección de un túnel, es esencial tener definido el criterio de confortabilidad auditiva, las características de los trenes que lo utilizarán y sus posibles combinaciones y las velocidades máximas de los mismos.

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

2.2. DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES PARA TRENES ESTANCOS

Un simple análisis de la Ficha 779/11 lleva a la conclusión de que a partir de ciertas velocidades para obtener unas variaciones de presión razonables y admisibles para los criterios de confort recomendables y que serán expuestos en el punto siguiente, serían necesarias secciones muy grandes y por tanto tremendamente costosas. lo que podría dificultar la aprobación, en zonas de difícil orografía y por tanto con muchos túneles, de nuevas líneas de alta velocidad.

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

Por tanto, para alta o muy alta velocidad el dimensionamiento de los túneles debe tener en cuenta la realidad de la explotación que no puede ser otra que la realizada con trenes estancos como ya ocurre en todo el mundo ferroviario que ha accedido a la alta velocidad en líneas con túneles.

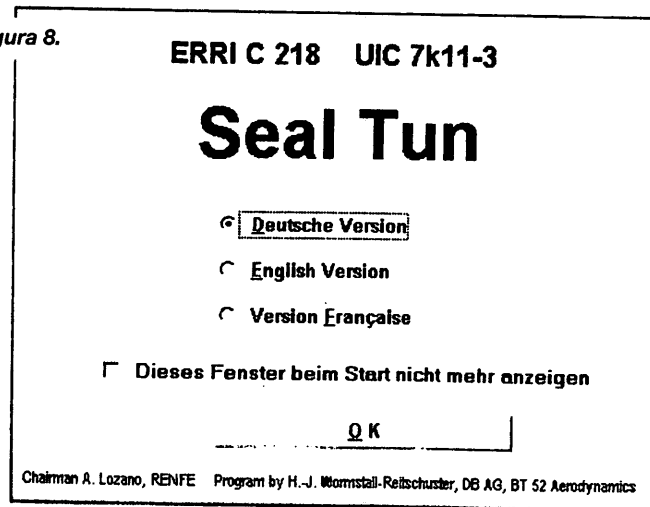
Esta realidad añade un elemento nuevo de complejidad al diseño de los túneles, ya que el termino estanco no es concepto absoluto: un tren no es o es estanco, sino que en el segundo caso tiene un cierto grado de estanqueidad que hay que conocer. Los coeficientes de estanqueidad serán tratados posteriormente.

Para resolver la nueva problemática y facilitar el diseño de las nuevas líneas de alta velocidad un grupo de 14 ferrocarriles europeos en el seno de la U.I.C. estuvieron dispuestos a participar en la financiación de mi propuesta de desarrollar un nuevo proyecto que completase los conocimientos adquiridos, y que resolviese las dudas y carencias existentes hasta ese momento. Este proyecto tuvo carácter voluntario dada la falta de interés de ciertos ferrocarriles por la problemática de la alta velocidad en túneles.

Este proyecto tenía tres partes claramente diferenciadas o subproyectos:

- ▼ Desarrollo de un procedimiento informático para el diseño de túneles para trenes estancos.

Figura 8.



- ▼ Determinación del umbral límite de salud y de los niveles mínimos de confort aconsejables.

- ▼ Análisis cuantificado de eficacia de sistemas alternativos para conseguir la reducción de las variaciones de presión sin incrementar la sección transversal de los túneles⁴.

Para el desarrollo de este multiproyecto se creó en el ERRI (Instituto Europeo de Investigación Ferroviaria, antiguo ORE) un comité específico, el C 218 bajo mi dirección como "project leader", actuando como "project manager" una de las figuras más respetadas a nivel internacional en campo de la aerodinámica en el ámbito ferroviario Roger Gawthorpe antiguo responsable de esta actividad en BR Research.

A continuación se comentan los aspectos más relevantes de los dos primeros subproyectos.

2.2.1. Programa SEALTUN

Después de un concurso internacional se adjudicó la realización del programa informático a la UTE AEA Technology (antigua BRR) y DB AG.

El producto final del proyecto se ha concretado en el desarrollo del programa SEALTUN. Este programa de ordenador cubre las siguientes tipos de operaciones:

- ▼ Túneles de vía única o doble
- ▼ Trenes con velocidades de 200 a 400km/h
- ▼ Trenes del tipo: ICE, Shin-Kansen, TGV, ETR o AVE
- ▼ Trenes de 100 a 400m de longitud
- ▼ Trenes con cualquier grado de estanqueidad

El programa es utilizable en cualquiera de los tres idiomas oficiales de la UIC como se puede ver en la primera pantalla de inicio del mismo (figura nº8)

El programa da las presiones tanto internas como externas en las tres partes más significativas del tren: cabeza, cola y

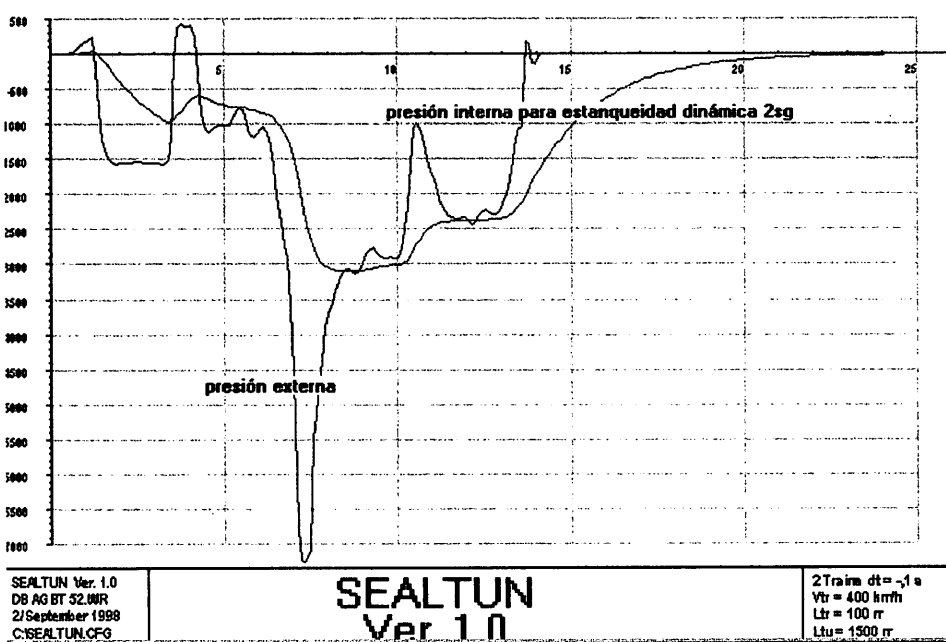


Figura 9.

centro, con lo que se cubre toda la gama de variaciones de presión a lo largo del mismo. Asimismo, estas variaciones de presión se pueden calcular en cualquier periodo temporal que se determine, cubriendo de esta manera cualquier criterio de confort que se decida.⁵

En los ejemplos de la figura nº 9 y 10 se pueden ver tanto las presiones externas como internas experimentadas por dos trenes de 100m. de longitud que se cruzan en el interior de un

criterio de diseño de solo 1Kpa, en el primer caso implicaría una reducción de excavación del 20%.

Obviamente, el programa también permite calcular la velocidad adecuada para un túnel y tren específico definiendo el grado de confort que se desea.

Es evidente la importancia económica de diseñar los túneles en las líneas de alta velocidad con criterios muy claros respecto al confort mínimo a ofrecer a los futuros viajeros lo que

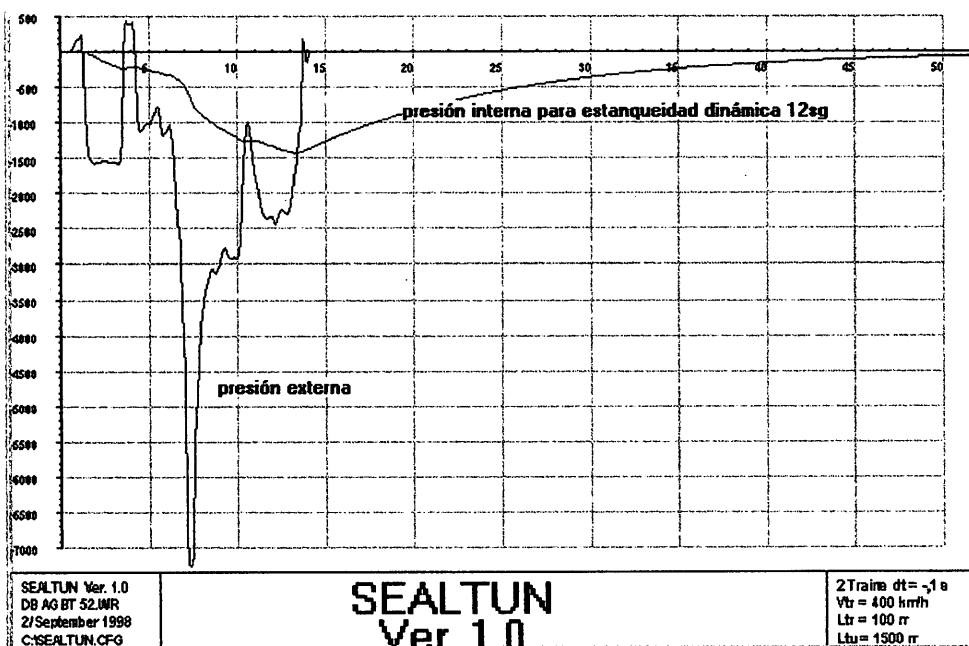
implica la definición de la velocidad máxima de explotación y el tren o trenes tipo que los utilizarán.

2.2.2. Coeficientes de estanqueidad τ

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

- ▼ 1.- El coche se deforma por la presión exterior. Como consecuencia del cambio de volumen, la presión interna puede llegar a variar en un porcentaje apreciable de la presión externa.
- ▼ 2.- La diferencia de presión conduce el aire a través de

Figura 10.



ciertas zonas de fugas de forma que la presión interna tiende a seguir a las fluctuaciones de presiones externas, con un cierto desfase de tiempo.

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

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

2.2.2.1. Coeficiente de estanqueidad estático, τ_{est}

El nivel de estanqueidad de un coche aislado se suele definir en forma de una constante de tiempo asociada con el tiempo de descenso de la presión del coche (inicialmente sometido a una sobrepresión) después de que los sistemas de presurización han sido eliminados, según la siguiente ley:

$$P_i = P_1(1 - e^{-t/\tau})$$

siendo P_i = la presión interna

P_1 = la presión interna inicial

t = tiempo en segundos para $P_i = P_1$

τ = constante de tiempo en segundos

2.2.2.2.- Coeficiente de estanqueidad dinámico, τ_{din}

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

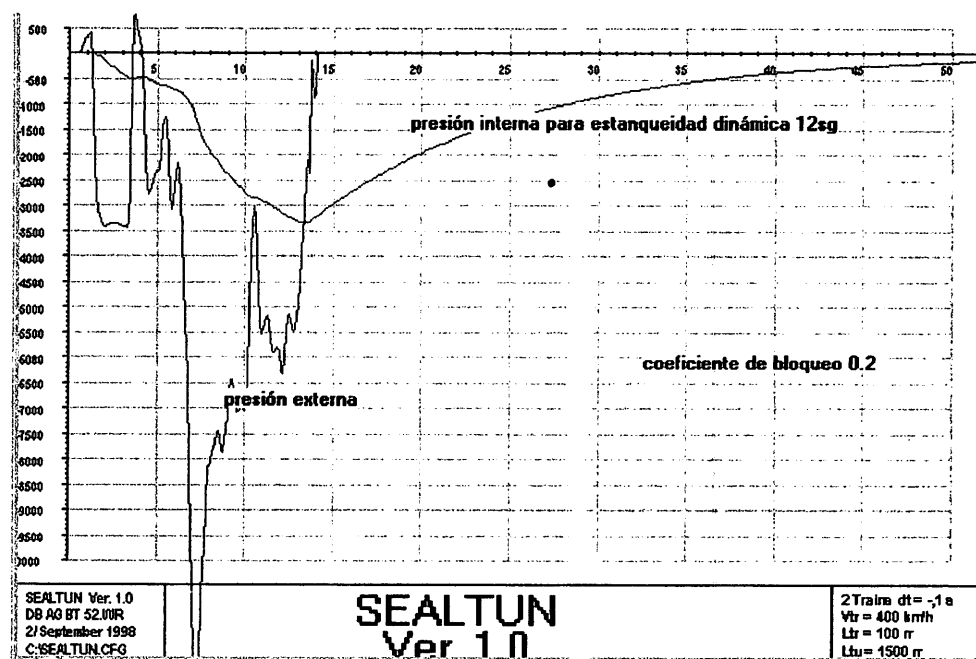


Figura 11.

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

en la cual,

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

P_e = presión exterior al tren, varía con el tiempo

P_i = presión interior del tren, varía con el tiempo

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

Una complejidad adicional viene del hecho de que para cada tren existen dos tipos distintos de estanqueidad dinámica según sea la presión exterior mayor o menor que la interior.

La medida de la estanqueidad dinámica requiere una combinación de experimentos y análisis teóricos. La prueba dinámica conlleva primeramente la medida de las presiones externas dinámicamente variable en el mismo sitio y al mismo tiempo que las variaciones de presión internas. Un análisis teórico posterior con los datos registrados y aplicando el programa Sealtun permite la obtención de la τ_{din} .

Al ser la estanqueidad un parámetro de tiempo los trenes estancos pierden parte de su eficacia en los túneles de gran longitud.

La medida de la estanqueidad dinámica de un tren se puede definir también a través de la sección de fuga equivalente, aunque existen formulaciones teóricas que correlacionan ambos parámetros en la práctica no son utilizables para pasar de

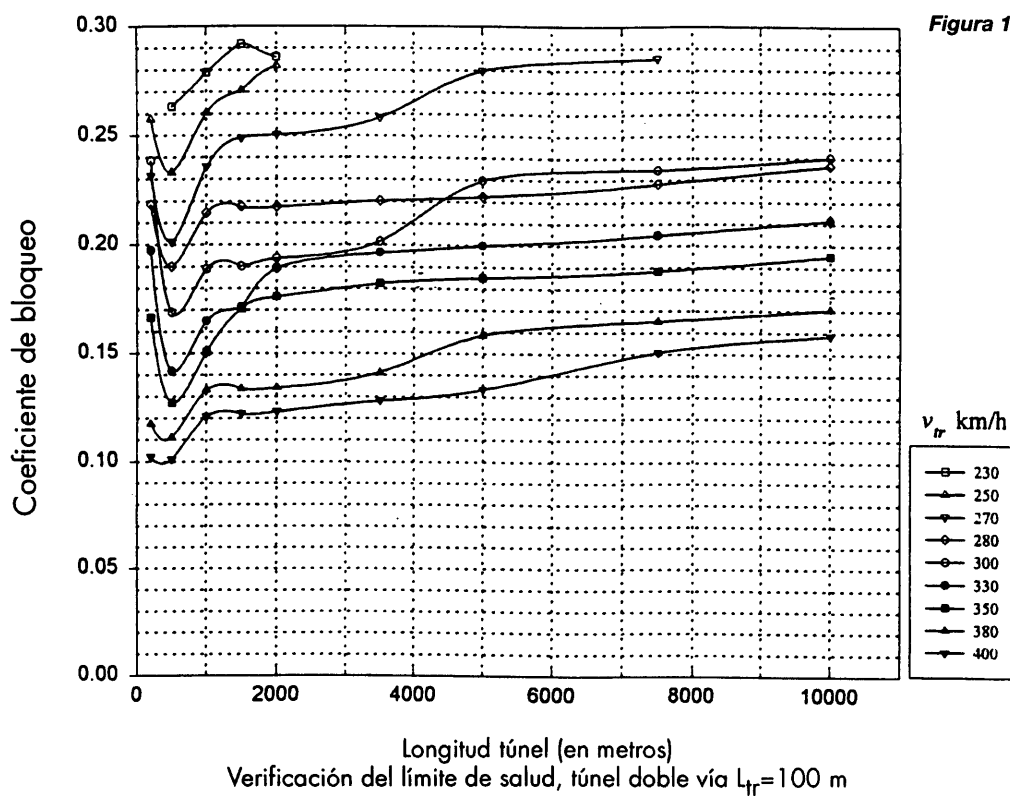


Figura 12.

Hasta la posible aparición de los nuevos trenes de alta velocidad (en ciertos casos aún en desarrollo por los fabricantes) con unos sistemas de estanqueidad altos ($\tau_{din} > 6$ segundos) los efectos que sobre la salud de los viajeros pudiesen tener las variaciones de presión habían sido razonablemente desdeñados dado el amplio margen existente entre los niveles de confort existentes, el umbral de percepción del dolor y el daño irreversible (umbral de salud).

Sin embargo, con los nuevos trenes se podría dar la situación de unas variaciones de presión muy altas en el exterior que siendo adecuadamente filtradas en el interior por los sistemas de estanqueidad garantizaran un óptimo grado de confort pero que en caso de no funcionamiento de la misma comprometiese la salud de los

un parametro al otro ya que la formula establecida es función de la diferencia de presión inicial y por tanto no es constante independientemente de la situación del tren en cuestión.

3. CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE TÚNELES

3.1. CRITERIO DE SALUD

A lo largo de las páginas anteriores para el dimensionamiento de túneles solo he mencionado el grado de confortabilidad, sin embargo, al tratar de trenes estancos un nuevo y fundamental criterio tiene que intervenir: la salud.

La Directiva Comunitaria 96/48CE relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de alta velocidad, considera a la salud como una exigencia esencial y que debe ser garantizada en cualquier circunstancia. Por tanto, en líneas de alta velocidad con túneles y explotadas con trenes estancos, el primer criterio de diseño es asegurar que a las velocidades máximas y en las peores condiciones de explotación posibles, la variación de presión externa máxima no sobrepase el límite de salud ya que al no ser (de momento) los sistemas de estanqueidad "fail-safe" el conductor del tren no sabe al entrar en el túnel si esta va o no a funcionar, lo que implicaría que un tren estanco puede dejar de serlo sin conocimiento previo.

pasajeros. Esta situación se puede ver en la figura nº 11 citada anteriormente.

Por tanto era necesario fijar el umbral de salud, que tiene que ser un límite irrevasable en cualquier circunstancia y de obligado cumplimiento una vez que se aprueben la Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad que desarrollan las exigencias de la Directiva Comunitaria 96/48 citada anteriormente.

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

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

Para facilitar la aplicación de este criterio al futuro Organismo Notificador, que deberá aprobar la puesta en explotación de las nuevas líneas de alta velocidad según la Directiva comunitaria, se han confeccionado unas gráficas que en función de las características de longitud del túnel, tipo de túnel (vía única o doble) y de la velocidad del tren da el coeficiente de bloqueo máximo admisible para salvaguardar el límite de salud

anteriormente fijado. La figura nº 12 reproduce uno de estos gráficos.

3.2. CRITERIOS DE CONFORT MINIMOS

Durante la confección de la ficha 779/11 ya se pusieron de manifiesto las dificultades o mejor, la imposibilidad de llegar a un consenso en los criterios de confort, no solamente en cuanto a la cuantía de las variaciones de presión si no también en los periodos temporales de medición. Por esta razón, en el presente proyecto lo que hemos definido son unas recomendaciones sobre los niveles de confort mínimos que aconsejamos no deben sobrepasarse. Estos límites son los siguientes:

▼ trenes no estancos:

a.- túneles en vía única:

Máx. variación de presión 3KPa en 4sg.

b.- túneles en vía doble

Máx. variación de presión 4KPa en 4sg.

▼ Trenes estancos: La presiones experimentadas por los viajeros a bordo de un tren no deberían exceder los siguientes límites:

1.0 Kpa en un periodo de 1sg.

1.6 Kpa en un periodo de 3sg.

2.0 Kpa en un periodo de 10sg.

3.0 Kpa durante todo el tránsito del tren en el túnel.

Este criterio es aplicable tanto a los túneles de vía única como a la peor situación posible en los túneles de vía doble (cruce con el peor desfase a la entrada del segundo tren).

3.3. CRITERIOS DE CONFORT RECOMENDADOS

Dados los distintos criterios de confort aplicados por algunos ferrocarriles, no quisiera terminar este artículo sin definir mi postura personal y por tanto mi recomendación sobre los criterios de confort que a mi juicio deberían aplicarse en el cálculo de la sección transversal de los túneles en las líneas de alta velocidad en nuestro país.

▼ Trenes no estancos:

a.- vía única

Máx. variación de presión 2 Kpa en 4sg.

b.- vía doble

Máx. variación de presión 3 Kpa en 4sg.

▼ Trenes estancos: Las presiones experimentadas por los viajeros a bordo de un tren no deberían exceder los siguientes límites:

a.- vía única

0.7 Kpa en un periodo de 1sg.

1.0 Kpa en un periodo de 3sg

1.4 Kpa en un periodo de 10sg

2.0 Kpa durante todo el tránsito del tren en el túnel.

b.-vía doble⁶

0.5 Kpa en un periodo de 1sg.

0.8 Kpa en un periodo de 3sg.

1 Kpa en un periodo de 10sg.

1.5 Kpa durante todo el tránsito del tren en el túnel.

En este segundo caso aún siendo el túnel para vía doble el cálculo se debe hacer como vía única sin considerar la posibilidad de cruces.

4. CONCLUSIONES

Con los estudios, ensayos y desarrollos efectuados por la UIC durante los últimos 20 años, concretados en procedimientos y aplicaciones prácticas realizados en los últimos 5 años, se puede asegurar que RENFE a través de la Dirección Técnica de la UN de Mantenimiento de Infraestructura, como participante y principal propulsora de los desarrollos de aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en el ámbito de la aerodinámica aplicada al diseño de túneles en las líneas de alta velocidad y velocidad alta, se enorgullece de poder contar ya con los procedimientos y sistemas adecuados para la optimización del diseño de los mismos. ●

1) Debido a que la reflexión es un proceso tridimensional, parte de la onda se propaga hacia el exterior en forma de una onda de tipo de impulso. A este fenómeno se le denomina "sonic-boom" y bajo ciertas condiciones del tren (velocidad y forma) y del armamento de la vía puede llegar a ser bastante perturbador para el medio ambiente en las proximidades de la boca de salida del túnel.

2) Artículo presentado en el 7º Congreso Internacional de Aerodinámica y Ventilación en Túneles.

3) De esta manera se analizaba el caso español de cruces de trenes Talgo con ramas AVE

4) No incluido en el presente artículo

5) En el punto 3 se analizarán los criterios de diseño (confort y salud)

6) Coincidente con el criterio actual de la DB AG