

SEGURIDAD EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE TÚNELES LARGOS DE LAS REDES FERROVIARIAS DE ALTA VELOCIDAD

DESIGN AND OPERATIONAL SAFETY OF LONG TUNNELS ON HIGH-SPEED RAIL NETWORKS

LUIS FORT LÓPEZ-TELLO. Dr. Ingeniero de Caminos. Dr. Ingeniero Agrónomo
Profesor de la E.T.S.I.C.C.P. de la U.P.M. lfort@ciccp.es

RESUMEN: Se dan los criterios de diseño con aplicación a un caso concreto para la propuesta de una alternativa de proyecto para túneles largos ferroviarios de las líneas de alta velocidad, consistente en la sustitución del túnel bitubo de vía sencilla por dos ó más túneles mono ó bitubo con uno de los tubos para circulación en vía doble y el otro, caso de ser necesario, de menor sección, para acompañamiento y eventualmente auxilio y rescate.

PALABRAS CLAVE: TÚNELES, ALTA VELOCIDAD, SEGURIDAD, AERODINÁMICA

ABSTRACT: The purpose of this document is to provide the design criteria to be applied to specific cases and to propose a design alternative for long railway tunnels on high speed railway lines, consisting of the replacement of the single-track, dual-tube tunnel with two or more single or dual-tube tunnels and using one of the tube for dual-track circulation and the other, of a smaller cross section, for accompaniment and, eventually, for assistance and rescue purposes, should it be necessary.

KEYWORDS: TUNNELS, HIGH-SPEED, SAFETY, AERODYNAMICS

INTRODUCCIÓN

En algunos trayectos ferroviarios de alta velocidad, con circulación en doble vía, en los que hay que atravesar un conjunto de cadenas montañosas, puede plantearse por aspectos de seguridad operacional, una alternativa de solución a la que viene siendo adoptada convencionalmente, consistente ésta en un solo túnel de base de gran longitud, bitubo de vía única, con sección transversal que puede resultar inferior a la estricta por condicionamientos aerodinámicos (rozamiento y variación de presiones), y con pendiente(s) moderada(s), con accesos al túnel mediante infraestructuras de baja cota roja, aparentemente justificadas por consideraciones ecológicas, al menos discutibles.

OBJETIVO

Los criterios de diseño, que darían forma a la posible alternativa, estarían basados en las siguientes ideas:

1. Adopción de sección monotubo para doble vía, con mayor área libre, minimizando, consecuentemente, la resistencia por rozamiento al avance de los trenes, y restringiendo las variaciones de presión importantes, solamente al caso de cruce de trenes y no a todas las circulaciones, como ocurre en el caso de vía única y sección estricta.

El segundo tubo, de menor sección, se reserva, en el caso de ser necesario por condiciones de evacuación y rescate, para la circulación de un tren de auxilio.

2. Modificación de la rasante de la vía en el trayecto, con aumento de las pendientes longitudinales de la vía en los tramos en que resulte necesario, hasta aquéllas que originen una reducción máxima media de un 20% de la velocidad de diseño del trayecto.

3. Aumento de la cota roja de los tramos de acceso al túnel hasta máximos del orden de 150 m., consecuencia de la materialización de la idea anterior, que llevará consigo la elevación de la rasante de vía en los portales de entrada al túnel.

El objetivo de la solución alternativa es el incremento de la seguridad de operación del túnel, sin aumento de la inversión, sustituyendo el túnel bitubo de vía sencilla y longitud excepcional, por otro u otros de menor longitud, también bitubo, con uno de los tubos para doble vía de alta velocidad y el otro, de carácter auxiliar, dedicado exclusivamente a incrementar la seguridad del trayecto, tanto en operación como en estrategias de escape.

PLANTEAMIENTO

Se pasa a continuación a desarrollar con un poco más de amplitud las ideas anteriores, particularizándolas al tramo de la red española de Alta Velocidad León-Asturias, en su paso del macizo de Pajares, actualmente en fase de licitación.

1. Determinación de la sección con área libre suficiente para minimizar la resistencia por rozamiento al avance de los trenes y garantizar el cumplimiento de las condiciones aerodinámicas de variación de presión.

En los túneles largos el criterio de la tracción requerida para mantener la velocidad del tren en el interior del túnel, puede ser más restrictivo que el de las presiones. Los resultados de la aplicación de los programas AC-TUA-TUN y TEA-TUN a un túnel de 25 Km de longitud, indican que para que los trenes de Alta Velocidad de la red española en construcción, puedan circular a velocidad cercana a la tipo de diseño (350 Km/h), el diámetro interior de los túneles largos debe ser de 10,75 m, en lugar de los 8,50 m fijados actualmente (1).

La aplicación del programa desarrollado por Henson (4) al tránsito de un tren AVE de 200 m de longitud y 9 m² de sección transversal, por un túnel de 30 Km a 350 Km/h, muestra que, para satisfacer el límite de $\Delta P = 2,5$ KPa en 4 s, resulta necesaria una sección transversal de 82 m² de área libre, es decir un diámetro interior de 10,63 m.

De las simulaciones realizadas en el programa OURA-NOS (2) y del dimensionamiento de las secciones de túnel, consecuente con ellas (3), se deduce que para el cumplimiento estricto de la condición de confort (variación de presión en cuatro segundos $\Delta P \leq 2,5$ KPa), se requiere un diámetro interior de 11,03 m con una sección libre de 88,45 m² y una relación de bloqueo $\beta = 0,0904$, para una sección transversal de tren de 8 m².

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se propone solución bitubo con una sección libre de 88 m², correspondiente a un diámetro interior de 1,1 m, para cada uno de los dos túneles de vía única, cuando su longitud sea superior a 20 Km.

Para aquellos túneles cuya longitud sea igual o inferior a 10 Km, se utilizará, siguiendo las prescripciones del GfI (5), solución monotubo con túnel para vía doble con sección libre de 101 m² (para que en el caso de cruce de trenes la variación máxima de presión $\Delta P \leq 10$ KPa)(2), que, en sección circular corresponde a un diámetro de 11,75 m.

En túneles cortos ($L < 1$ Km.) el incremento de la resistencia aerodinámica que se opone al movimiento del tren en el interior del túnel, respecto de la existente a la misma velocidad en su movimiento fuera del túnel no es importante, por la gran reserva energética que supone la masa inercial del tren, siendo más exigentes, a efectos de sección, los límites normativos de variaciones de presión mencionados anteriormente.

En túneles de más de 10 Km. de longitud, el tiempo de tránsito por su interior es lo bastante grande como para que la reserva inercial del tren no sea suficiente para el mantenimiento de su velocidad exterior, por lo que en estos túneles el incremento de la resistencia aerodinámica pasa a ser el fenómeno fundamental.

Una estimación de los velocidades de paso de un tren AVE de 200 m de longitud y 8 m² de sección a través de un túnel largo, con régimen de máxima potencia mantenida (1), en función de la pendiente longitudinal de la vía, se refleja en los valores indicados en la Tabla 1.

2. Determinación de la máxima pendiente longitudinal de la vía, compatible con una reducción máxima media del 20% sobre la velocidad de diseño del trayecto, en tramos de 20 Km de longitud (5).

Realizando una simulación de marchas en el trayecto(3) (definido por la situación de los PAET de ambos extremos) la velocidad de diseño en éste, VD, partiendo de la tipo $V = 350$ Km/h, será:

$$V = \text{Velocidad específica de la línea.}$$

Túnel de 20 Km de longitud, con una sección libre de 88 m ² y una relación de bloqueo $\beta = 0,0904$				
Velocidad de paso (Km/h) en función de la pendiente longitudinal (‰)				
Pendiente (‰)	Velocidad de paso (Km/h)	Velocidad de paso (Km/h)	Velocidad de paso (Km/h)	Velocidad de paso (Km/h)
0	350	288	309	330
1	329	259	286	306
2	309	239	269	281
3	289	219	249	256
4	269	199	229	231
5	249	179	209	206
6	229	159	189	181
7	209	139	169	156
8	189	119	149	131
9	169	99	129	106
10	149	79	109	81

Corresponde a la tipo de los trenes AVE que la van a explotar.

En las actuaciones en curso o en proyecto de la red española:

$$V = 350 \text{ Km/h} = 97,22 \text{ m/s}$$

$$V_D = \text{Velocidad de diseño del trayecto.}$$

Trayecta caracterizado por el desnivel entre extremos:

H

$$V_D = \sqrt{V^2 - gH}$$

En el trayecto La Robla-Campomanes, el desnivel entre los PAET (Puesto de Adelantamiento y Estacionamiento de Trenes) que limitan este trayecto es:

$$H = 955 - 416 = 539 \text{ m.}$$

$$V_D = 64,53 \text{ m/s} = 232 \text{ Km/h.}$$

"El perfil longitudinal de la línea se ajustará de forma que la velocidad tipo de los trenes de alta velocidad o la velocidad de diseño del tramo, si es inferior, no se reduzca más del 20% como valor excepcional" (Recomendaciones de los parámetros de diseño de las Bases Técnicas para redacción del proyecto del GIF).

Según ello:

$$V_D \geq 0,8 \quad V_D = 186 \text{ Km/h} = 51,62 \text{ m/s}$$

En el trayecto La Robla (León) - Campomanes (Asturias), el trazado contemplado en el Proyecto Básico de los túneles de Pajares, lo forman las alineaciones en alzado reflejadas en la Tabla 2.

$$V_D = \sqrt{V^2 - g \sum_2^4 H_i} = 59,55 \text{ m/s} = 214 \text{ Km/h} \geq 186 \text{ hm/h}$$



La pendiente máxima en tramos de 20 Km. compatible con las recomendaciones de trazado del GIF, sería:

$$I_{MG} \leq \frac{V^2 - 0,64V_D^2}{20000g} = 34,6\%$$

y, lo que correspondería a la equivalente, por reducción de velocidad, a la del trazado del Proyecto Básico:

TABLA 2. SENTIDO LA ROBILA - CAMPOMANES.

Cota inicial	Alineaciones	Cota final	Desnivel
955	3,14 Km. subiendo con el 20‰	1018	H ₁ = + 63 m.
1018	2,36 Km. bajando con el 3‰	1011	H ₂ = - 7 m.
1011	24,56 Km. bajando con el 16,8‰	598	H ₃ = - 413 m.
598	9,11 Km. bajando con el 20‰	416	H ₄ = - 182 m.

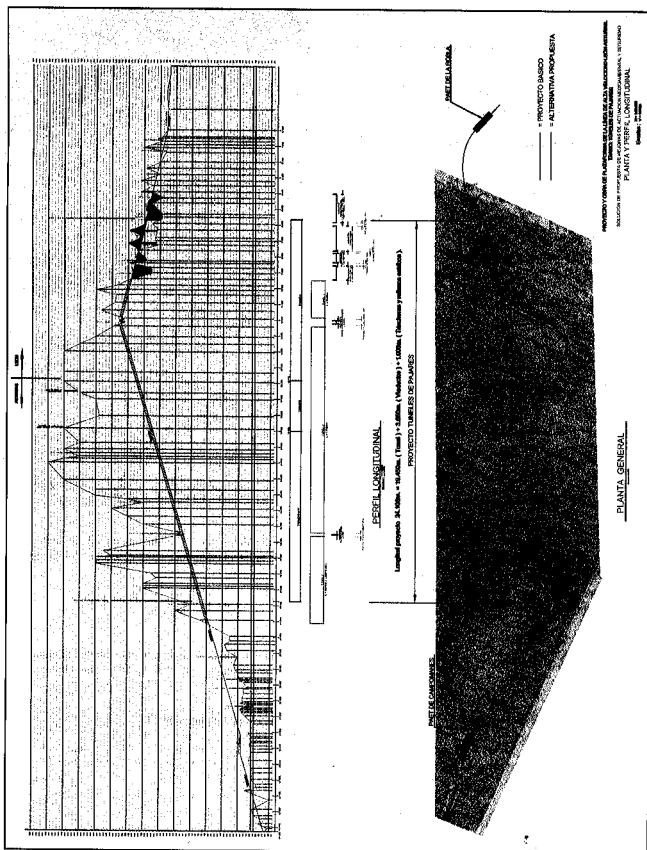


TABLA 3.

$C_0 = 955 \text{ m}$	$L_1 = 12.189 \text{ m}$	$I_1 = 23,8 \text{ ‰}$ subiendo sentido La Robla-Campomanes
$C_1 = 1225 \text{ m}$	$L_2 = 18.800 \text{ m}$	$I_2 = 29,7 \text{ ‰}$ bajando sentido La Robla-Campomanes
$C_2 = 840 \text{ m}$	$L_3 = 12.700 \text{ m}$	$I_3 = 28,9 \text{ ‰}$ bajando sentido La Robla-Campomanes
$C_3 = 483 \text{ m} (= 416 + 67)$		

$$I_{MB} \leq \frac{V^2 - (V_D')^2}{2000g} - 30\text{‰}$$

PROPUESTA DE ALTERNATIVA

Las consideraciones anteriores suponen un trazado al exterior, en su totalidad.

En el Proyecto Básico de los túneles de Pajares, una velocidad al exterior de 214 Km/h, en un tramo de 36 Km., con pendiente media del 16,9 ‰, equivaldría según la tabla anterior, con potencia mantenida para un tramo de 25 Km. a una pendiente aproximada del 24‰. Por tanto, con sección en túnel de 8,5 m. de diámetro, supondría una velocidad de paso del tren de 147 Km/h. < 186 Km/h.

Resultado necesario para alcanzar la velocidad $V_D' = 186 \text{ Km/h}$, un diámetro interior de los túneles $D = 11 \text{ m}$.

Para la solución alternativa de dividir el túnel único en dos ó más tramos, la topografía del terreno en el corredor del cruce de la cadena montañosa, deberá ofrecer uno ó más valles transversales con cotas $C_1, C_2, \dots, C_n$ que, teniendo en cuenta las cotas extremas del trayecto C_0 y C_{n+1} , permita establecer $n + 1$ tramos de longitudes $L_1, L_2, \dots, L_{n+1}$ menores de 20 Km y con pendientes $\leq I_{MG}$, tales que la

velocidad resultante V_D' , teniendo en cuenta las longitudes de los nuevos túneles, sea $V_D' \approx 0,8 V_D$.

En el cruce de Pajares, la alternativa al Proyecto Básico representada en la figura adjunta, parte de los datos deducidos de la topografía del corredor reflejados en la Tabla 3.

El trazado de esta alternativa tiene una longitud máxima de subida (sentido Campomanes-La Robla) $L = 26 \text{ Km}$. con una pendiente media del 29,3‰, distribuido en 18,49 Km. de túnel de 11,75 m. de diámetro interior y 7,51 Km. al exterior.

$$V_D' = \left(\sqrt{V^2 - g \cdot 7,51 \times 29,3} \right) \frac{7,51}{26} + \frac{18,49}{26} = 151 = 196 \text{ Km/h} > 186 \text{ Km/h}$$

Por tanto la alternativa propuesta en este caso, es la de sustituir el túnel de Pajares del Proyecto Básico, formado por dos tubos de 8,5 m. de diámetro interior y 24,5 Km. de longitud, por tres túneles de 2,3 Km., 13 Km. y 5,5 Km. de túnel formado por un tubo de 11,75 m. de diámetro interior para circulación en vía doble de los trenes de alta velocidad, y otro tubo de 6,35 m. de diámetro interior para circulación de un tren auxiliar que seguirá a las circulaciones principales, para que puedan ser efectivos los trabajos de rescate y evacuación en caso de accidente. ■

REFERENCIAS

- 1. Melis, Manuel J. et al. "Diseño de Túneles para Trenes de Alta Velocidad. Rozamiento tren-aire-túnel y ondas de presión". Revista de Obras Públicas. Noviembre 2001.
- 2. Fort, Luis y Gil, Frédéric. "Cálculos aerodinámicos en túneles de ferrocarril. Simula-

ciones con el programa Ouranos". Revista de Obras Públicas. Marzo 2001.

- 3. Fort, Luis. "Estudios específicos de túneles". Anexo del Proyecto de Nuevo Acceso Ferroviario Norte y Noroeste. Tramo Madrid-Segovia. Alternativa Paraíso. Diciembre 1999.
- 4. Henson, DA et al. "Alleviation of pressure transients for high speed train transits through

very long tunnels". First International Conference Long Road and Rail Tunnels. Basel, Switzerland. 29 November -1 December 1999.

- 5. GIF "Nuevo acceso ferroviario N-N0: Madrid-Segovia-Valladolid/Medina del Campo. Tramo: Soto del Real-Segovia Bases Técnicas" 1998.