

Análisis del cruce entre trenes de alta velocidad y de mercancías en líneas con tráfico mixto desde el punto de vista aerodinámico

Study of Aerodynamics problem resulted when high speed trains pass freight trains on mixed traffic lines

Marta Jiménez Cobo

Ingeniero de Proyecto, Siemens Rail Automation, Chippenham, SN151JD, UK

Resumen

En la actualidad, el cruce de trenes de viajeros de Alta Velocidad y de mercancías convencionales en líneas con tráfico mixto carece de regulación. El presente artículo analiza esta problemática desde el punto de vista aerodinámico, estudiando las fuerzas y momentos que se generan tanto a cielo abierto como en túnel. A través de este análisis se pretende aportar conocimiento, no sólo a partir del análisis teórico, sino también a partir de los resultados experimentales obtenidos durante ensayos en vía. Como consecuencia de la investigación se proponen distintas medidas que contribuyan a asegurar una circulación segura de ambos tipos de trenes en coexistencia.

Palabras clave: alta velocidad, tren de mercancías, tráfico mixto, aerodinámica, cruce.

Abstract

Nowadays, there is no regulation for a high speed passenger train passing a freight train on a mixed traffic line. This article analyses this problem from an aerodynamic point of view, studying the loads and moments generated from both tunnel and open air situations. This analysis is intended to provide knowledge from a theoretical perspective and also from an experimental perspective where results were obtained from tests implemented on the track. As a result of the research, several contributions have been suggested in order to ensure a safe circulation with both types of trains in coexistence.

Keywords: High speed, freight train, mixed traffic, aerodynamic, crossing event.

1. Introducción

A diferencia de la habitual segregación de tráficos, las expectativas generadas alrededor del desarrollo del transporte ferroviario de mercancías han llevado a las distintas administraciones ferroviarias a plantearse un aprovechamiento “mixto” de estas líneas en los últimos años.

Sin embargo, el debate sobre la conveniencia o no de implantar líneas con tráficos mixtos ha generado distintas controversias: ¿Es siempre posible la combinación de actividades de transportes de distinta naturaleza? ¿Es razonable? ¿Supone siempre una forma de mejorar el uso de la red? ¿Bajo qué condiciones?

Con carácter previo a cualquier otra consideración, conviene precisar este concepto, con el fin de evitar confusiones en torno a este tipo de tráfico. En el presente artículo se tratará como línea de Alta Velocidad (en adelante, LAV) mixta aquella preparada para tráfico mixto de trenes de viajeros (de 250 a 350 km/h) a la par que trenes de mercancías convencionales, es decir, con carga por eje hasta 22,5 o 25 toneladas y velocidades generalmente hasta 100 o 120 km/h. No será aplicable, por tanto, al transporte de mercancías ligeras en trenes más rápidos, con menor carga por eje y que por tanto pueden circular por LAV exclusivas para viajeros. De igual forma se han excluido aquellos casos de transporte de mercancías peligrosas.

2. Conveniencia y viabilidad de la explotación mixta en líneas de alta velocidad

2.1. Oportunidad y necesidad del tráfico mixto

Esencialmente, la operación mixta en este tipo de infraestructuras ha sido justificada desde el punto de vista de optimización de la capacidad, ya que es sabido que ésta se maximiza cuando todos los trenes circulan por el tramo de línea en cuestión a la misma velocidad, es decir, en surcos horarios paralelos (a igualdad de los demás factores). No obstante, la coexistencia de trenes de mercancías y viajeros sobre la misma infraestructura ofrece una alternativa a la explotación de estas líneas.

Se han realizado múltiples estudios relacionados con la justificación de este tipo de explotación de los cuales han resultado casos concretos en los que parece conveniente la operación mixta.

En el caso concreto de España, el principal beneficio aparece ligado al aumento de competitividad del transporte de mercancías, dando respuesta a la baja interoperabilidad existente de las infraestructuras españolas con respecto a las infraestructuras ferroviarias del resto de Europa. El uso del ancho de vía ibérico (1668 mm) ha obstaculizado siempre el transporte de mercancías internacionales, derivado de su disparidad respecto al ancho estándar (1435mm) empleado tanto en las líneas francesas como en la mayoría de los países europeos e incluso nuevas líneas de Alta Velocidad españolas.

Asimismo, en ciertos casos la circulación de trenes de mercancías y viajeros por una misma línea permite prescindir de otra línea de trazado paralelo, lo que a priori se traduce en una disminución de los costes asociados al mantenimiento que necesitarían ambas en coexistencia, como se recoge en varias de las publicaciones de López Pita.

2.2. Inconvenientes técnicos y económicos derivados del tráfico mixto

Desde que se viene valorando la posibilidad de explotar en condiciones mixtas las LAV, se han ido estudiando los distintos retos técnicos que conlleva el uso de estas líneas por composiciones de velocidades y cargas tan dispares.

La mayoría de las administraciones de los distintos países han publicado ya diversos análisis que abordan temas como la repercusión de la capacidad de la línea, los aspectos referidos a la vía y su trazado o los riesgos ligados a posibles invasiones de galibo. Sin embargo, existen muy pocos estudios referidos a los efectos aerodinámicos producidos durante el cruce de trenes de estas características. A elevadas velocidades relativas

y/o del tren más rápido pueden producirse acciones aerodinámicas entre los trenes cuya magnitud y efectos no están suficientemente estudiados. Evidentemente, el estudio de los efectos de las fuerzas aerodinámicas en túneles carecerá de sentido desde el punto de vista del cruce en infraestructuras bitubo así como en aquellos casos de vía única puesto que no existirán efectos directos sobre el tren paralelo.

3. Problemática del cruce de trenes de viajeros con trenes de mercancías convencionales

En la actualidad no existen procedimientos técnicos ni funcionales que permitan regular el cruce de trenes de Alta Velocidad y de mercancías. La complejidad de los fenómenos aerodinámicos que se manifiestan tanto en plena vía como en túnel dificulta la normalización del cruce. Por el momento, se han establecido ciertas soluciones muy conservadoras, tales como la prohibición del cruce de trenes de mercancías y trenes de Alta Velocidad así como la reducción de velocidad de los trenes de viajeros al aproximarse al cruce con el tren de mercancías. Sin embargo, la adopción de ambas medidas ha resultado en una disminución de la capacidad y por tanto una pérdida en las ventajas derivadas de este tipo de explotación.

3.1. Introducción a la aerodinámica de trenes

Los fenómenos relacionados con la aerodinámica son consecuencia del movimiento relativo del aire y el tren y se presentan especialmente en presencia de altas velocidades, ya que dependen principalmente de la velocidad del tren. A medida que ésta se incrementa, los efectos derivados de las fuerzas aerodinámicas en su alrededor también crecen. Estas fuerzas pueden tener un efecto negativo sobre un tren que pudiera adelantar o cruzarse en sentido contrario, teniendo claros efectos sobre la seguridad en la circulación.

En las velocidades operativas del tren, el aire se considera incompresible (se desprecian los cambios de densidad) de manera que se comporta de manera similar al agua y es clasificado como un fluido. Cuando un tren se introduce en un fluido, experimenta fuerzas y momentos procedentes del movimiento relativo del tren y el aire conocidas como fuerzas aerodinámicas. De manera general, estas fuerzas aerodinámicas dependen de la velocidad de circulación del tren, la velocidad local del viento y sentido del mismo, la geometría y sección lateral del vehículo y la situación espacial.

No obstante, a la hora de analizar las cargas aerodinámicas en los trenes de Alta Velocidad, conviene distinguir entre aquellas que actúan directamente sobre el vehículo generadas por su desplazamiento y por vientos transversales, y cargas aerodinámicas que el propio tren genera sobre su entorno

Fuerzas que actúan sobre el vehículo: Resistencia al avance

Entre las cargas que actúan sobre el propio vehículo, la fuerza que sufre el tren contra el aire en ese eje se denomina resistencia aerodinámica al avance, conocida como la fuerza longitudinal que se opone al movimiento del tren como consecuencia de la interacción entre el tren y el aire circundante con el que choca y que lo envuelve.

La resistencia al avance se expresa, de forma simplificada para circulaciones en cielo abierto, como:

$$R_A = -(A + B \cdot V + C \cdot V^2) \quad (1)$$

Dónde:

- R_A es la resistencia al avance en recta, que se expresa normalmente en daN.
- V es la velocidad del tren, expresada normalmente en kilómetros por hora (km/h).
- A , B y C son coeficientes que dependen de las características del material rodante que se miden, respectivamente, en daN, daN/(km/h) y daN/(km/h)².

En el caso que nos ocupa, el último término es el que tiene una mayor contribución ya que se refiere a la resistencia aerodinámica de presión y fricción, independiente de la masa del tren y relacionado con la densidad del aire.

Por un lado, la resistencia **aerodinámica de presión** es la proyección en la dirección del movimiento de la resultante de las fuerzas de presión que actúan sobre la superficie del cuerpo. Depende fundamentalmente de la sección transversal y de la forma de la cabeza y cola del tren. También depende de los aparatos situados en el techo del vehículo y de los bogies

Por otro, la resistencia **aerodinámica de fricción** es debida a la viscosidad del aire, y depende fundamentalmente de la superficie mojada del cuerpo (entendiendo por tal la superficie con la que fricciona el aire y de su continuidad y rugosidad superficial).

Fuerzas que actúan en el entorno del vehículo

Como consecuencia del flujo de aire que rodea al tren, se producen fuertes presiones aerodinámicas sobre su entorno, cuya magnitud dependerá de la región en la que nos encontremos siendo posible diferenciar entre aquellas presiones que se generan alrededor de la cabeza del tren, las producidas a lo largo del mismo y las correspondientes a la parte trasera.

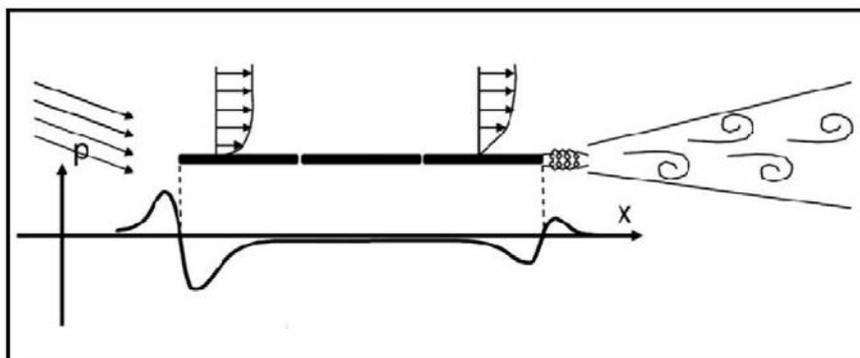


Fig. 1. Distribución de presiones en las regiones de flujo inducido

Fuente - Weise, Schober, & Orellano, 2006

Se observa que las zonas con mayores presiones son aquellas cercanas a la cabeza del tren, mientras que el resto son dominadas por el "efecto estela".

Entre los principales parámetros que afectan a la magnitud de las ondas de presión, se encuentran:

Velocidad del tren más rápido, siendo la duración del pulso de presión inversamente proporcional a las velocidades relativas entre ambos trenes. En concreto, (Gawthorpe, 1978) demuestra uno de los aspectos más importantes a considerar en el cruce de trenes: *“La amplitud de la onda de presión que induce el tren más rápido sobre el tren más lento depende únicamente de la velocidad del tren que adelanta, la geometría de la cabeza y la distancia entre ambos trenes, pero no de la velocidad del tren que está siendo adelantado”*. De esta forma se confirman las consideraciones realizadas en el reciente proyecto de investigación de Adif, en el cual se ha estimado que la magnitud de las cargas aerodinámicas es relativamente poco dependiente de la velocidad del tren más lento.

Geometría, cuya influencia fue estudiada por (Railway Technical Research Institute, 1996), observando cómo para diseños más largos de la cabeza se reducía el gradiente de presiones. Las

cabezas con formas más afiladas pueden llegar a producir presiones cuya magnitud podría ser hasta el 50% menor que en aquellos trenes con una cabeza más tosca. Asimismo, uno de los parámetros más sensibles de la geometría del tren respecto a las fuerzas aerodinámicas laterales es el radio techo-lateral.

Sección transversal del tren, del tren, la cual no sólo tiene una influencia directa sobre los coeficientes de resistencia al avance anteriormente mencionados sino que la onda de presión inducida en el cruce de dos trenes es, en ciertos rangos, proporcional al área transversal de los vehículos que intervienen.

Viento cruzado, cuyos efectos dependen principalmente del ángulo de incidencia y el sentido de movimiento del tren. La componente resultante del aire produce una fuerza lateral y un momento de balanceo y guiñada que crean una distribución de presiones no simétrica.

Distancia entre el vehículo y la vía, debido al flujo turbulento que se produce en los bajos del tren así como la interferencia con los salientes del tren que inducen también en el aire una corriente.

Distancia entre los trenes que cruzan, siendo recomendable incrementar el entreeje a valores mayores que los comunes utilizados en infraestructuras dedicadas exclusivamente a viajeros.

En ocasiones los trenes de mercancías presentan cargas, puertas o toldos fuera de galibo, pudiendo producirse desprendimientos de la carga o descarrilamientos. En estos, casos, cuanto mayor sea la distancia entre los ejes de las dos vías que forman la vía doble, menor será la probabilidad de colisión o de impacto físico o aerodinámico.

3.2. Influencia del entorno

El entorno tiene una importancia considerable en la evaluación del cruce, ya que los problemas aerodinámicos que ocurren durante los cruces en túneles tienen una mayor complejidad que aquellos que surgen a cielo abierto.

Hay dos aspectos fundamentales que diferencian la circulación al aire libre de la de en túnel. El primer aspecto tiene que ver con la resistencia al avance ya que durante la circulación por el interior del túnel se alcanzan valores significativamente mayores en túneles, obedeciendo a la expresión:

$$R_A = -(A + B \times V + T \times C \times V^2) \quad (2)$$

siendo T el factor de incremento de resistencia aerodinámica, el cual depende de la longitud del tren y de la longitud del túnel, siendo casi independiente de la velocidad del tren.

El segundo aspecto viene relacionado con la presión en cada punto de la superficie. Mientras que para un tren que circula al aire libre se puede pensar a grandes rasgos en un régimen estacionario, la situación en túnel es muy diferente. 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 refleja 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, reflejándose como onda de presión cuando alcanza la salida.

Por consiguiente, teniendo en cuenta que la presión en cada punto de la superficie del tren no es constante durante la circulación en túnel, se ha considerado que se trata de un problema transitorio.

Para poder cuantificar las variaciones de presión en un túnel de sección uniforme, los principales parámetros a considerar son las características del tren y las del túnel. Sin embargo, para el caso de un túnel de doble vía, la complejidad de las presiones se puede incrementar por la existencia de un segundo tren en sentido contrario.

Por tanto, a estos parámetros, hay que añadir las características del segundo tren y el tiempo de desfase de su entrada respecto al primero.

A continuación se observan las diferencias entre las distribuciones de presión para los casos de circulación en cielo abierto y túnel (Comisión Europea, Proyecto EU Transaero,2002):

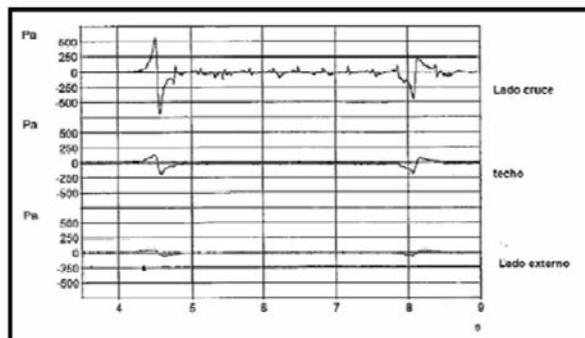


Fig 2. Cruce de un Etr 500 parado al aire libre con un segundo Etr 500 a 280km/h

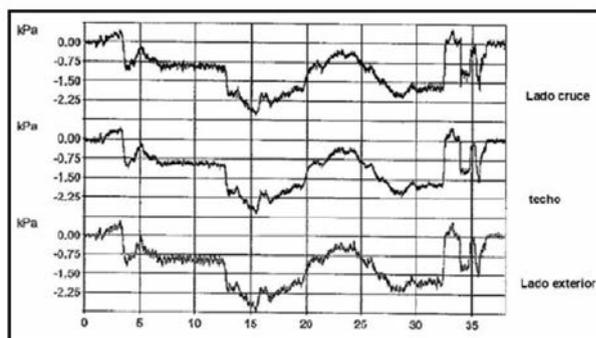


Fig 3. Cruce de un Etr 500 con otro Etr 500 a 280km/h en túnel

De las figuras previas se observa como para circulaciones a cielo abierto, aparece un efecto importante en el lado activo del cruce, siendo prácticamente nulo en el otro extremo. En cambio, en el caso de circulación en túnel las variaciones de presión son similares en ambos laterales del tren.

3.3. Descripción del fenómeno de cruce de trenes

El problema que se atribuye a los trenes que se cruzan se hace más complejo por la necesidad de simular el movimiento relativo de los dos trenes y la amplia variedad de parámetros que afecta a las cargas del contenedor y su respuesta. Este hecho requiere un gran análisis matricial para definir la relación entre las condiciones de operación y la carga así como los efectos dinámicos de estas. Una aproximación sensata para el estudio de estas cargas es usar un análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) que permita analizar varios escenarios.

Una vez que se analizan los escenarios posibles a través de herramientas CFD es importante justificar la validez del modelo de simulación, lo que requiere comparar los resultados con experimentos realizados a escala real en campo incurriendo en un coste económico considerable.

A la hora de analizar el cruce se han adoptado las siguientes consideraciones generales:

- En vista de que el estudio sólo pretende abordar consideraciones aerodinámicas, se ha aceptado que los resultados expuestos no se ven afectados a priori por la respuesta dinámica, asumiendo que los pequeños movimientos de respuesta del tren de mercancías no afectarán el valor de las cargas aerodinámicas.
- En consonancia con la hipótesis anterior, los estudios aerodinámicos no consideran la influencia de la infraestructura (por ejemplo, irregularidades de vía), siendo necesaria su posterior evaluación desde la perspectiva dinámica para completar el estudio.
- En principio, la velocidad del tren de mercancías no tiene una repercusión significativa en la magnitud de las cargas aerodinámicas. En efecto, ciertos ensayos realizados en Italia al respecto demostraban que los esfuerzos a los que están sometidos los vagones son poco dependientes de la velocidad del tren de mercancías, dependiendo esencialmente de la velocidad del tren de Alta Velocidad (Lozano, 2010).

- A lo largo de la evaluación de las presiones generadas, las cargas longitudinales y verticales en el vagón de mercancías permanecen pequeñas y podrían no considerarse durante el movimiento completo del vagón.

Desde un punto de vista teórico, se han analizado las cargas según se recoge en la ficha de la UIC779-1. En general, con el paso de un tren se crea una onda de presión – depresión del aire que se desplaza con el tren. Este campo de presiones que se ejerce sobre cualquier superficie paralela dependerá de múltiples parámetros como se recoge en el apartado 3.1 del presente artículo.

Las presiones que se producen (q_{1k}) sobre un elemento vertical paralelo a la vía, son función de la distancia (ag), el coeficiente de forma del tren (k) y la velocidad del tren a través de la fórmula:

$$q_{1k} = k \cdot c_p (V/3.6)^2 \times (1/1600) \text{ siendo } c_p = 25 / (ag + 0.25)^2 + 0.02 \quad (3)$$

Durante el análisis de varias simulaciones CFD se ha observado que el valor de las fuerzas aerodinámicas alcanza su valor máximo cuando la parte delantera del tren de Alta Velocidad alcanza el tren de mercancías cayendo bruscamente al paso de los laterales del tren resultando una **fuerza lateral de atracción y repulsión**. Seguidamente, el tren de mercancías se cruza con la cola del tren de Alta Velocidad y vuelve a aparecer una interacción aerodinámica entre ambos, siendo en este caso un pulso de presión inverso y magnitudes ligeramente inferiores.

Es por ello que **será el pulso de presiones producido por la cabeza el que determinará las condiciones del cruce ya que las presiones más altas se encuentran alrededor de la parte frontal del tren, mientras que en sus laterales se desarrolla una región de bajas presiones**. Además, a partir de la Fig4 se puede observar la aparición de pequeños picos de presión negativa relacionados con la geometría del tren de Alta Velocidad, en concreto con el espacio entre coches.

Por último conviene resaltar que entre los parámetros que influyen en las fuerzas aerodinámicas se han encontrado simulaciones en las que existe una clara influencia de la dirección del movimiento relativo de ambos trenes, a diferencia de las primeras consideraciones en las que se pensaba que la velocidad del tren de mercancías no tenía ninguna repercusión y por tanto se podía evaluar parado.

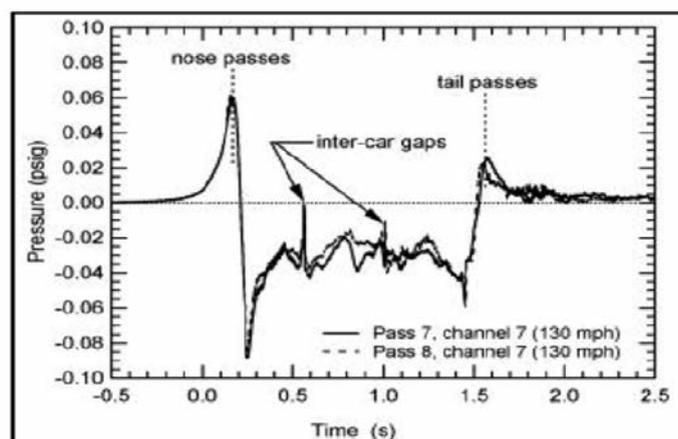


Fig 4. Presiones generadas por el tren de alta velocidad al cruzarse con el tren de mercancías.

Fuente - MacNeill, Holmes, & Lee, 2002

De la figura previa se puede observar la aparición de pequeños picos de presión negativa relacionados con la geometría del tren de alta velocidad, en concreto con el espacio entre coches.

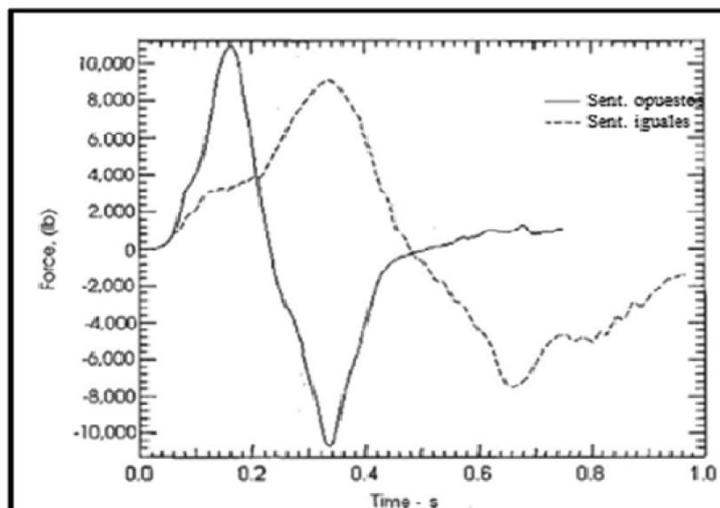


Fig 5. Presiones generadas por la cabeza del tren alta velocidad al cruzarse con el tren de mercancías según el sentido de cruce. Fuente - (FRA, 2002)

Cuando ambos trenes circulan en el mismo sentido, las fuerzas de interacción entre ambos se prolongan en el tiempo y el impulso se incrementa a pesar de que los valores más altos de carga puedan descender ligeramente. Aunque los resultados de las fuerzas son similares en ambos casos (trenes moviéndose en el mismo sentido o sentidos contrarios), la duración de las cargas se incrementa en proporción al tiempo de interacción. Por tanto, **la duración de la carga y del esfuerzo** no dependen exclusivamente de la velocidad de los trenes sino que se encuentran estrechamente relacionados con los sentidos relativos de circulación de ambos trenes.

En aquellos casos en los que los trenes de mercancías y los trenes de Alta Velocidad se mueven en el mismo sentido, la duración de la carga y el esfuerzo lateral se incrementa. Aunque el valor del pico de carga es ligeramente inferior a los casos en los que los trenes circulan en direcciones opuestas, el tiempo de contacto efectivo se extiende significativamente. Este intervalo de tiempo podría asociarse a una frecuencia y un modo de vibración inestable que deberá ser considerado en el análisis dinámico necesario para completar los resultados que se deriven del análisis aerodinámico.

4. Análisis del caso particular de la línea Barcelona- Figueres

4.1. Descripción del escenario

En Enero de 2013 entró en servicio el último tramo que faltaba para completar la línea de Alta Velocidad que conecta Madrid Barcelona y Figueres convirtiéndose en la primera línea de toda la historia de España en superar los principales obstáculos ibéricos: los seis pies castellanos en los Pirineos y la construcción de líneas exclusivas para viajeros en rutas que estaban muy lejos de alcanzar su techo de capacidad.

A la hora de analizar la línea, se han considerado los tramos a partir de Mollet, punto desde el cual la infraestructura ha sido diseñada con una rampa característica mucho más suave (18 milésimas), y es apta para soportar trenes con una carga máxima por eje de 22,5 toneladas. La razón de esta consideración en el diseño es obvia, ya que es en ese punto donde la línea recibe y expide los trenes de mercancías que usan la línea de ancho dual Puerto de Barcelona/Morrot-Can Tunis-Castellbisbal-Mollet.

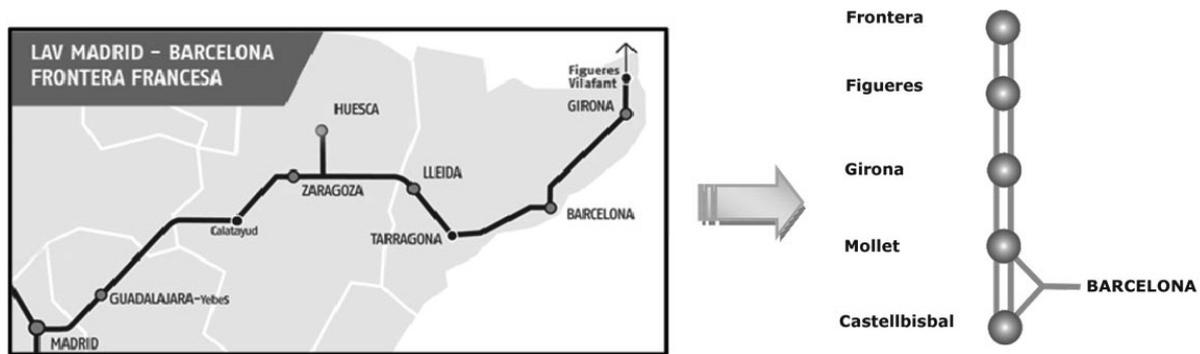


Fig 6. Esquema de la Línea Madrid-Barcelona-Frontera Francesa.

Fuente: Adif

Para este caso concreto, se han analizado teóricamente las presiones generadas durante el cruce a través de la fórmula mencionada anteriormente para el cálculo de presiones que en superficies verticales paralelas (3)

Así, comparando los valores para el corredor mediterráneo y la línea Barcelona-Figueras:

$$c_{pC.Mediterráneo} \cdot \left(\frac{V_{C.Mediterráneo}}{3.6} \right)^2 = c_{pLAVMAD-BCN-FF} \cdot \left(\frac{V_{LAVMAD-BCN-FF}}{3.6} \right)^2 \quad (4)$$

Así, suponiendo que la onda de presión incide sobre la pared de un contenedor estándar de ancho 2.5 m aproximadamente, y comparando los valores para el corredor Mediterráneo:

$$V_{LAVMAD-BCN-FF} = V_{C.Mediterráneo} \cdot \sqrt{\frac{c_{pC.Mediterráneo}}{c_{pLAVMAD-BCN-FF}}} = 200 \cdot \sqrt{\frac{0,29777778}{0,20261505}} = 200 \cdot 1,21230053 = 242,46 \text{ km/h}$$

Por tanto, un tren circulando a 242 km/h en la línea Madrid-Barcelona-Figueras donde la distancia entre ejes de las vías es de 4,70 m, produce una onda de presión equivalente a la de un tren que circula a una velocidad máxima de 200 km/h por una línea donde la distancia entre ejes de las vías es de 4 m, como el Corredor del Mediterráneo, donde la actual explotación de tráfico mixto se acepta como segura en base a la experiencia de 17 años de explotación sin incidencias relevantes.

Siguiendo este razonamiento se evalúan los valores de entreeje necesarios para distintas velocidades:

Tabla 1. Relación entreeje-velocidad máxima equivalente
Fuente - Elaboración propia

Entreeje (m)	Velocidad (km/h)
4,7	242,46
4,8	248,34
4,9	254,18
5	259,96
5,1	265,7
5,2	271,38
5,3	277,02
5,4	282,61
5,5	288,15
5,6	293,63
5,7	300

En ocasiones los trenes de mercancías presentan cargas, puertas o toldos fuera de gálibo, pudiendo producirse desprendimientos de la carga o descarrilamientos. En estos, casos, cuanto mayor sea la distancia entre los ejes menor será la probabilidad de colisión o de impacto físico o aerodinámico.

(García Álvarez, 2010) estudió la posibilidad de invasión de gálibo en aquellos casos que se produce descarrilo. En el supuesto de que se produjese hacia el interior de la vía doble, sería muy probable la colisión lateral del tren descarrilado con un tren que circulase en sentido contrario por la vía adyacente. Considerando las graves consecuencias que podrían derivarse de una situación de este tipo, resulta especialmente importante obtener un valor del entreje que, cuando un vehículo descarrilado hacia el lado interior de la vía doble se mueva con las ruedas guiadas por el interior del carril contrario, la caja del vehículo no llegue a invadir el gálibo de la vía adyacente. Así, (García Álvarez, 2010) demostró que este objetivo podría lograrse con valores de entreje de al menos 5,20 o 5,30 metros.

Teniendo en cuenta que la velocidad actual de los trenes de viajeros entre Mollet y Figueres oscila entre 225 km/h y 270 km/h, se deduce que un entreje de 5,2 m sería necesario para mantener el nivel de presiones actual del Corredor Mediterráneo, el cual se ha aceptado como seguro.

Para el caso de cruce de un tren de Alta Velocidad y un tren de mercancías dentro de un túnel, una consideración adicional y de extraordinaria importancia es la seguridad estructural de los vagones del tren de mercancías y/o la integridad del cargamento, lo que aún no se logrado regular normativamente. Generalmente, y ante la ausencia de soporte normativo homogéneo, cada fabricante tiene sus propios criterios de diseño en relación con las máximas sollicitaciones de presión para las que se debe garantizar la resistencia estructural de los vehículos.

4.2. Plan de ensayos

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos tras las simulaciones CFD, se han realizado ensayos experimentales en vía, para validar los modelos tanto a cielo abierto como en túnel.

La localización de los ensayos fue elegida por motivos logísticos. Así, los ensayos en cielo abierto se realizaron entre el PB de Llinars (PK 662,5) hasta el apartadero de Vilobí (PK 703,5), donde es posible alcanzar la velocidad máxima a ensayar. Para los ensayos en túnel se eligió el túnel de Sant Celoni (PK 669,7, con una longitud de 800 m y una sección libre de 108 m²), situando el tren de mercancías en la parte central del mismo.

La composición de los trenes de pruebas fue la siguiente:

- Una locomotora S/319, remolcando un vagón plataforma de la serie MMC, cargado con uno o más contenedores de distintas configuraciones (20 o 40 pies).
- Un automotor de la serie S/103.

Respecto a la instalación de los sensores, se optó por instrumentar tanto el tren de mercancías como la infraestructura con el fin de obtener resultados representativos. Así, tanto el campo de presiones inducido durante el cruce como la evolución temporal del mismo se registraron mediante sondas de presión instaladas en el exterior y en el interior del tren de mercancías mientras que el sistema de vía registraba los valores de posición y velocidad con el objeto de establecer un sincronismo con los valores obtenidos en el vagón.

Habiendo analizado previamente la baja dependencia de las presiones respecto a la velocidad del tren más lento y con objeto simplificar la ejecución de las pruebas y poder garantizar la repetitividad de las mismas, los ensayos se realizaron con el tren de mercancías parado. De esta forma, las mediciones se realizaron a partir de un número determinado de pasadas con el tren S103, para las cuales se establecieron los siguientes límites de velocidad:

¹ Los resultados recogidos en esta sección corresponden a las pruebas realizadas en túnel durante la noche del 12 mayo de 2013 en las cuales participó la autora del presente artículo acompañada de personal de Renfe y de Adif.

Tabla 2. Velocidades alcanzadas en los ensayos aerodinámicos.
Fuente - Elaboración propia

	11-12 de Mayo	18-19 de Mayo
Cielo abierto	180 km/h y 220 km/h	180 km/h y 220 km/h
Túnel	180 km/h y 200 km/h (2)	180 km/h y 200 km/h

Los ensayos confirmaron que las presiones registradas correspondían a los valores obtenidos durante la simulación pudiendo aumentarse aún más la velocidad sobre el amparo de la correspondiente consigna de pruebas, puesto que en este caso las velocidades máximas permitidas no superaban los 200 km/h en túnel y 220 km/h a cielo abierto.

5. Conclusiones

El presente artículo analiza aquellos factores que de una u otra manera inciden en la posibilidad de cruzar trenes de mercancías y trenes de Alta Velocidad en líneas con tráfico mixto.

Del análisis realizado, se puede concluir que el valor de las cargas que afectan en el cruce de trenes no viene determinado únicamente por la velocidad del tren más rápido, sino que la duración de la carga y del esfuerzo se encuentran estrechamente relacionados con los sentidos relativos de circulación de ambos trenes, siendo necesario evaluar el tren de mercancías en movimiento. Los ensayos realizados hasta el momento con el tren de mercancías parado serán de utilidad para validar las simulaciones CFD, sin embargo, **para poder sugerir una velocidad segura de cruce será necesario completar el estudio aerodinámico** con un análisis dinámico. Además, con el fin de establecer estos límites de la manera más precisa posible, **se recomienda la realización de ensayos en vía a velocidades superiores a las ensayadas que permitan obtener las condiciones óptimas de cruce**. La velocidad óptima de cruce será aquella que optimice el tráfico de viajeros y que sea compatible con la integridad del tren de mercancías, principalmente relacionada con las características de los vagones que conforman dicho tren. Por ello, **resulta imprescindible identificar los vagones previstos a circular en la línea y conocer su resistencia estructural**.

En cuanto al caso concreto de la línea Barcelona-Figueras teniendo en cuenta que la velocidad actual de los trenes de viajeros entre Mollet y Figueras oscila entre 225 km/h y 270 km/h, se ha deducido que un entreje de 5,2 m sería necesario para mantener el nivel de presiones actual del Corredor Mediterráneo, el cual se ha aceptado como seguro a raíz de la experiencia. Sin embargo, considerando que la infraestructura ya está construida, y que por tanto las características constructivas de la línea son difícilmente modificables, parece razonable aceptar cruces con velocidades de hasta 200 km/h para trenes de viajeros en túneles o 220 km/h a cielo abierto. Para velocidades mayores a las indicadas, no existen ensayos experimentales publicados, por lo que su realización será ineludible para conocer la velocidad máxima permitida en términos de seguridad.

6. Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a Alberto García, Pilar Martínez y Ramón Morales por iniciarme en el mundo de la investigación y brindarme la oportunidad de aprender de los mejores. A mis padres, por apoyarme en todas mis decisiones y a Andres, por haber hecho todo el trabajo más fácil.

7. Referencias

- [1] Andersen, S. (1995). Zur Problematik des Mischbetriebes von Personen- und Güterzügen bei hohen Geschwindigkeitsunterschieden. [Problemática de la explotación mixta de trenes de viajeros y de mercancías en caso de grandes diferencias de velocidad] *Eisenbahntechnische Rundschau*, 44(5)
- [2] Federal Railroad Administration department of transportation research and special programs administration. (2002). Aerodynamic effects of High-Speed Passenger Trains on Other Trains.
- [3] Federal Railroad Administration department of transportation research and special programs administration. (1999). Assessment of potential aerodynamic effects on personnel and equipment in proximity to high-speed train operations.
- [4] García Álvarez, A., Barreiro Martínez, A. (2010). La electrificación ferroviaria cada vez más necesaria y eficiente. Análisis previo de la conveniencia y viabilidad de ubicación de los postes de electrificación en el centro de las vías dobles ferroviarias. *Revista Anales de mecánica y electricidad*, julio - agosto 2010.
- [5] López Pita, A. (2001). La explotación de líneas de alta velocidad en tráfico mixto: Experiencias disponibles y tendencias.
- [6] Macneill, R. A. (2002). Measurement of the aerodynamic pressures produced by passing trains. *Proceedings of the IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, 57-64.
- [7] Weise, M., Schober, M., & Orellano, A. (2006). Slipstream velocities induced by trains. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, 1(6), 759-76