

# Propuesta de optimización del diseño de barreras para-viento como medidas de mitigación de los efectos perjudiciales del viento lateral en la circulación de trenes de alta velocidad

Brunel Vázquez, Juan Andrés; Sanz Bobi, Juan de Dios; Cano Noguerras, Javier.

España, Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias (CITEF).

Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

[citef.jabrunel@industriales.upm.es](mailto:citef.jabrunel@industriales.upm.es); [juandedios.sanz@upm.es](mailto:juandedios.sanz@upm.es); [citef.jcano@etsii.upm.es](mailto:citef.jcano@etsii.upm.es)

## RESUMEN

Este trabajo de investigación es parte de un completo estudio de la influencia del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad, y en este artículo se recogen los resultados del análisis con dinámica de fluidos computacional que han permitido ofrecer soluciones a modo de barreras o parapetos para-viento de formas innovadoras que mitigan estos efectos.

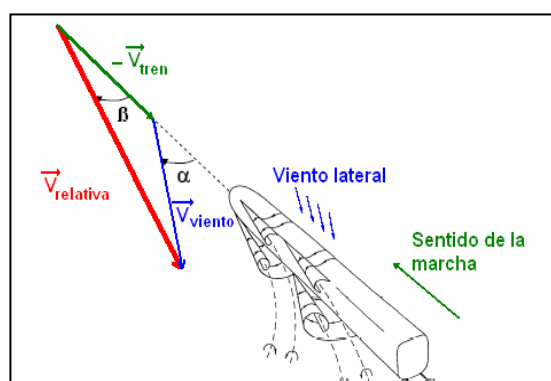
## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio se encuadra dentro del área de dinámica y medidas de seguridad ferroviaria, en concreto en el estudio de medidas de mitigación de los efectos perjudiciales del viento lateral, en forma de barreras para-viento. Este trabajo surge con el objetivo de aportar, estudiar y evaluar soluciones innovadoras que mitiguen estos efectos perjudiciales.

El trabajo ha sido desarrollado en el Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias (CITEF), centro ligado a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, y a dado lugar a otras publicaciones con resultados previos que constituyen una evaluación del fenómeno del viento lateral, empleada como base para el posterior desarrollo de las investigaciones recogidas en el presente artículo.

### 1.1. Antecedentes

Con el aumento de la velocidad de circulación en los ferrocarriles y su aligeramiento en cuanto al peso por eje, es cada vez más importante el efecto de las cargas aerodinámicas producidas por los vientos laterales sobre los trenes. Estos vientos causan inestabilidades en el equilibrio lateral del vehículo que pueden perturbar el normal funcionamiento del tren, causar daños en las instalaciones, o incluso accidentes por vuelco o descarrilamiento.



**Ilustración 1: Diagrama de velocidades absolutas y relativas sobre el tren.**

Como se aprecia en la Ilustración 1, la velocidad relativa del viento con respecto del tren (vector rojo) depende directamente de la velocidad del tren y de la velocidad del viento. El desarrollo tecnológico del tren y sus infraestructuras en los últimos años no ha hecho más que acrecentar el problema, ya que las velocidades de marcha han aumentado de manera considerable, y las infraestructuras cada día cuentan con más tramos en viaducto y sobre altos terraplenes que acrecientan los efectos perjudiciales del viento lateral [1] [2].

La disposición de barreras en los laterales de las vías es una de las contramedidas más eficaces y estudiadas [3] [4], si bien su diseño es muy complejo, ya que pueden perturbar la corriente de viento provocando efectos perjudiciales. Además es una medida cara, y es por ello que su empleo aún no es muy común salvo en grandes viaductos.

El estudio previo desarrollado como primera aproximación a este desarrollo de optimización [5], plantea un proceso de evaluación del fenómeno del viento lateral con el objetivo de definir los parámetros geométricos más relevantes, y de realizar un análisis de la afectación frente a vientos laterales en diferentes infraestructuras. En el trabajo documentado en este artículo se han considerado los mismos trenes e infraestructuras, tanto de vía en viaducto como en terraplén sobre terreno firme.

## **1.2. Objetivos del presente estudio.**

Este estudio pretende diseñar, estudiar y evaluar diseños innovadores de barreras para-viento. Para ello se parte del conocimiento existente y del estudio previo del fenómeno en el que se han evaluado las características del viento lateral en el entorno de diversos tipos de plataforma ferroviaria [5], de trenes y de escenarios, y a partir de estos resultados, se trata de resolver los problemas que tienen las barreras sencillas en base a optimizar su forma.

Además se estudiará la viabilidad de estas nuevas propuestas en diferentes marcos para realizar una estimación de la viabilidad de las mismas en base a las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad europeas [6].

## **2. ACERCAMIENTO AL MODELO.**

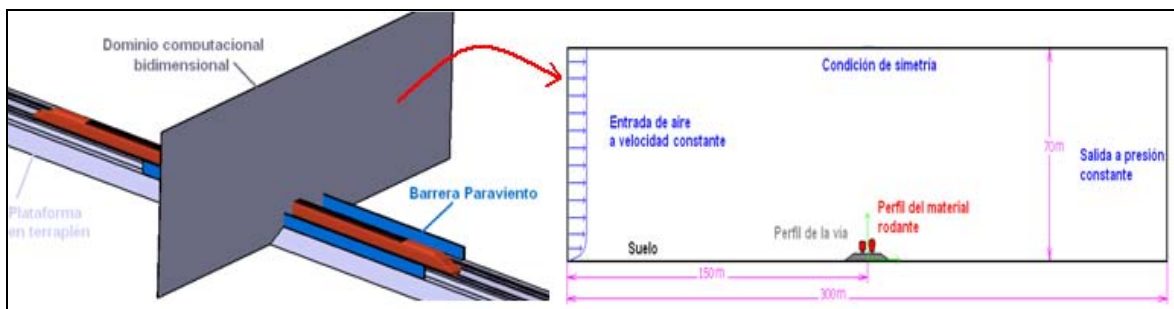
### **2.1. Descripción del entorno.**

Se ha centrado el estudio en la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona. Algunos tramos de esta línea tienen limitada su velocidad un número importante de días al año porque discurren por zonas donde los fuertes vientos son muy comunes [7] [8]. Se han estudiado los dos trenes de Alta Velocidad de segunda generación que prestan servicios en esta línea, uno es el tren TALGO 350 y el otro el SIEMENS Velaro E. Ambos son trenes que alcanzan velocidades superiores a los 300km/h en explotación comercial y de morfología muy diferente, uno de formas cuadradas y otro de formas más redondeadas y más alto. Esto enriquece el estudio y amplía las posibilidades de comparación.

Se han simulado las distintas alternativas posibles dentro de las infraestructuras de esta línea de alta velocidad, vías sobre viaducto y vías sobre terreno firme. También se han tenido en cuenta los dos emplazamientos posibles en vías de dos sentidos (vía de barlovento, de donde sopla el viento, y vía de sotavento, el contrario).

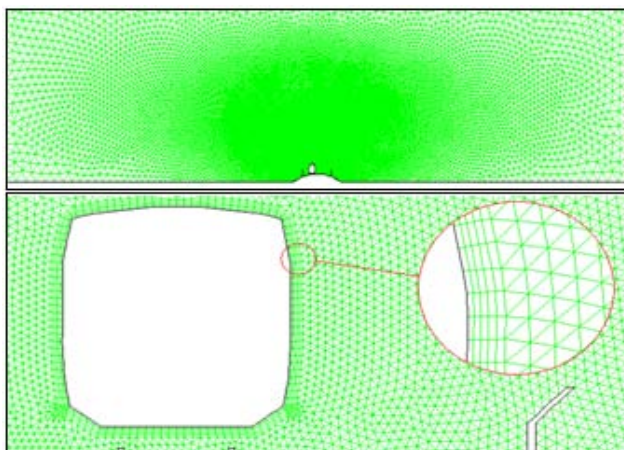
## 2.2. Planteamiento general de los ensayos.

Para el desarrollo de los objetivos del proyecto se ha planteado un estudio en base a simulaciones con un programa de CFD (Computer Fluid Dynamics). Se ha realizado un planteamiento del problema como un análisis bidimensional, que se fundamenta en el hecho de que lo que se pretende es una comparación de diferentes medidas de mitigación de los efectos del viento lateral, y no un acercamiento a la dinámica del tren frente a estos vientos.



**Ilustración 2: Vista esquemática del dominio computacional seleccionado para el estudio.**

El dominio en el que se establecerán los análisis es un cuadrilátero de 300m de ancho y 70m de alto que representa el corte transversal de la vía y sus alrededores. La ilustración 4 muestra el dominio computacional así como las principales condiciones de contorno que lo definen. Se fijan unas condiciones de contorno tipo para este tipo de simulaciones en base a las normas que rigen [9]. Se define una entrada de aire de velocidad constante, una salida a presión atmosférica y el resto de condiciones de pared con sus respectivas rugosidades acorde con la normativa citada.



**Ilustración 3: Detalle del mallado alrededor del tren.**

Con el fin de obtener unos resultados más precisos, el mallado empleado no es regular; en las zonas donde el interés es mayor (zona cercana al tren y la infraestructura) se ha realizado un mallado más fino. Las celdas del mallado son triangulares, a excepción de la zona alrededor de la superficie del tren donde se optó por un mallado rectangular que es más preciso y regular. Además el programa permite una mejora del mallado en función de las zonas donde los

gradientes (de presión, de velocidad, etc.) son mayores, herramienta que fue empleada para realizar un mallado que dio resultados más exactos en las zonas más comprometidas (esquinas del perfil que representa el tren principalmente).

### 2.3. Acercamiento teórico.

Se planteó un cálculo de las fuerzas aerodinámicas provocadas por el viento lateral sobre el tren, que se representan según la ecuación 1, donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área frontal sobre la que incide el viento y  $U$  su velocidad en m/s.  $C_a$  es el coeficiente de resistencia aerodinámica del objeto sobre el que se calcula la fuerza.

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_a \cdot A \cdot U^2 \quad (1)$$

En base a esta fórmula se obtienen las fuerzas sobre el tren. En este estudio se han tenido en cuenta tanto fuerzas laterales ( $S$ ), como de sustentación ( $L$ ) y de momento respecto del centro del bogie ( $M_{ov}$ ) y de la rueda más alejada de donde sopla el viento ( $M_{rv}$ ) [11].

Para comparar entre las diferentes situaciones estudiadas (dos tipos de trenes diferentes y dos tipos de infraestructura, viaducto y terraplén) se ha optado por emplear los coeficientes adimensionales, que permiten comparar diferentes situaciones entre si. Estos coeficientes vienen definidos por las ecuaciones 2.

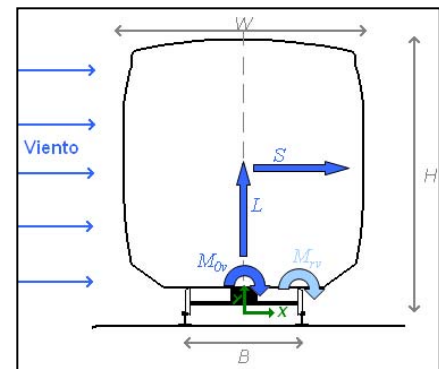
$$C_s = C_x = \frac{s}{1/2 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot H} \quad C_l = C_y = \frac{l}{1/2 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot W} \quad C_{mov} = \frac{m_{ov}}{1/2 \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot H \cdot W} \quad (2)$$

El más importante de cara a este estudio es el de afectación lateral ( $C_x$ ), ya que se busca un estudio de los esfuerzos laterales sobre el tren frente a vientos cruzados. Además también se estudiaron los mapas de presiones y de vectores de velocidad que permiten observar los puntos donde se crean mayores presiones y observar las estelas.

### 2.4. Resultados previos de partida.

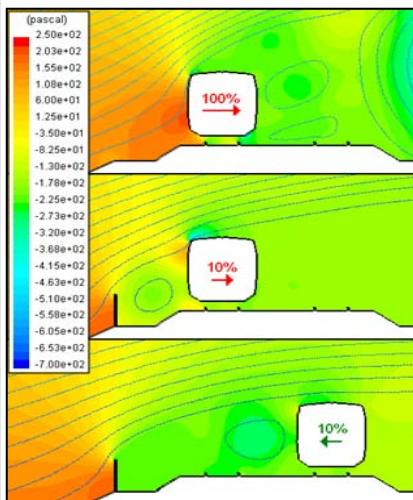
En [5] se realiza un estudio del fenómeno donde se definen los parámetros geométricos más relevantes de la afectación sobre los trenes a causa de los fuertes vientos cruzados. Las conclusiones más importantes de este trabajo, que se ha usado como base para el desarrollo de esta parte de la investigación, son:

- Existen valores de afectación muy dispares en función del tren e infraestructuras consideradas, concluyendo que no se puede tratar de igual manera el caso de vía sobre terraplén y sobre viaducto, siendo en este último donde, obviamente, se dan las solicitaciones más comprometidas.



**Ilustración 4: Esquema de fuerzas sobre el tren.**

- Los trenes situados en la vía de sotavento se ven más beneficiados con la instalación de barreras protectoras, ya que su  $C_x$  y  $C_y$  disminuye más que para los trenes a barlovento y alcanzan óptimos con alturas de barreras inferiores.
- Las condiciones de altura de barrera que son óptimas para un determinado tren situado en barlovento, no lo son para el mismo tren situado a sotavento ni para un tren diferente. Esto se debe a que barreras óptimas para un tren en vía de barlovento crean depresiones, que provocan que el tren en vía de sotavento se vea forzado a contraviento. Por tanto si se diseña una barrera de altura suficiente como para proteger al tren de la vía de barlovento, se conseguirá un efecto contrario al deseado sobre el tren situado en la vía de sotavento, que se verá considerablemente forzado a contraviento.



**Ilustración 5: Representación del efecto de depresión que fuerza al tren de la vía de sotavento a contraviento.**

En el ejemplo de la ilustración 7, realizado con valores aproximados, en la primera imagen el tren se enfrenta al viento lateral sin barrera, y se considera la fuerza lateral que sufre como el 100% que puede afectarle en ese modelo. Al colocar una barrera de cierta altura esta afectación disminuye notablemente, haciendo que el tren se encuentre más protegido frente al viento. Ahora bien, si se mantiene la barrera y se lleva al tren a la vía de sotavento, la afectación ha cambiado de sentido.

Se ha comprobado que este efecto puede llegar a ser relevante, y por ello se centró la investigación en desarrollar barreras que consigan mitigarlo buscando un equilibrio entre la protección de ambos trenes situados en las dos vías.

### 3. ENSAYOS Y ANÁLISIS.

Para afrontar de forma más clara los objetivos, se ha dividido el estudio en una primera parte centrada en el diseño de una barrera óptima en todas las situaciones estudiadas, y una segunda en la que se evalúa la viabilidad de las mejores soluciones obtenidas.

#### 3.1. Ensayos de optimización de la forma de la barrera para-viento.

Se busca el diseño de una barrera que sea lo más eficaz posible de cara a la protección de los trenes en ambas situaciones de viaducto y terraplén. Lo más importante es buscar un equilibrio entre la protección para el tren situado en la vía de barlovento y en la vía de sotavento, y ha de tenerse en cuenta que las barreras deben ser eficaces para los dos tipos de tren estudiados. Para tener en consideración todos estos aspectos se ha trabajado con el concepto de eficacia (ec.3):

$$Eficacia(\%) = \frac{C_0 - |C_h|}{C_0} \times 100 \quad (3)$$



Donde  $C_o$  es el valor de  $C_x$  o  $C_y$  cuando la altura de barrera es cero y  $C_h$  es el valor de  $C_x$  o  $C_y$  cuando el tren se encuentra protegido por la barrera que se quiere comparar. Este coeficiente permite evaluar la mejora que implica la barrera en cuanto a afectación lateral con respecto a una situación sin barrera, y al considerar el valor absoluto se puede evaluar tanto la afectación a favor del viento, como la causada por las depresiones entre tren y barrera que fuerzan al tren a contraviento.

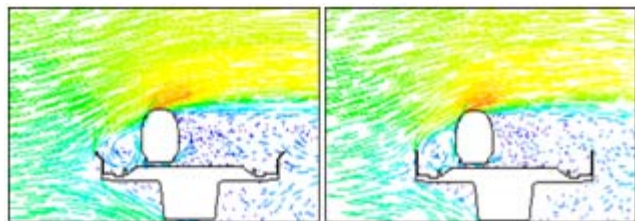
Se han simulado situaciones con diferentes tipos de barreras y soluciones aerodinámicas, como por ejemplo aleros orientados en diferentes ángulos, barreras con huecos inferiores de diferentes alturas y combinaciones de ambas. Dentro de las soluciones aerodinámicas que se han estudiado hay dos que destacan por sus buenos resultados:

El uso de aleros orientados hacia el exterior de la vía, permite desplazar la estela muy por encima del tren situado en la vía de barlovento, consiguiendo eficacias semejantes a las obtenidas con barreras de mayor altura. Esto quiere decir que el uso de aleros consigue que la altura de la barrera parezca mayor de lo que es.

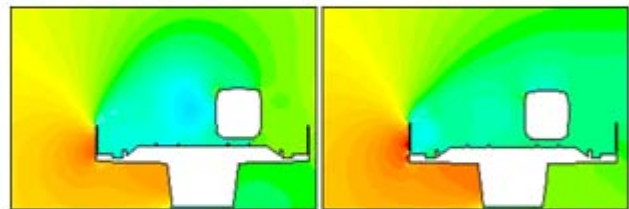
La otra solución con la que se obtienen altas eficacias son los huecos inferiores. Reducen la eficacia de protección de la barrera sobre el tren de barlovento, pero reducen más drásticamente el efecto vacío que fuerza al tren situado en la vía de sotavento a contraviento, por lo que su uso, asociado a una altura de barrera mayor da mejores resultados a nivel global.

La combinación de ambas soluciones es una alternativa de diseño de barrera que da excelentes resultados globales.

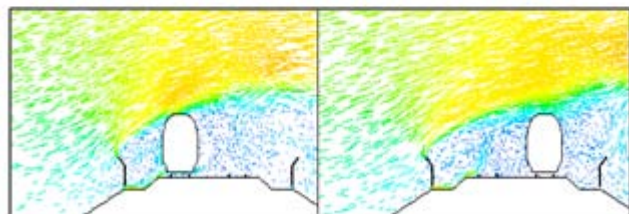
En el estudio centrado para viaducto se consigue una barrera que tiene una eficacia global del 96% (es decir, la media de las eficacias de los cuatro casos posibles, combinaciones de los dos trenes en las dos situaciones de vía posibles, barlovento y sotavento). Está barrera se corresponde con la de la ilustración 11 a la izquierda.



**Ilustración 8: Mapa de velocidades. A la izquierda barrera de 1,5m de altura total y con alero. A la derecha barrera simple de 1,75m de altura.**



**Ilustración 9: Mapa de presiones. A la izquierda barrera simple de 1,75m. A la derecha barrera de 2m con hueco inferior**



**Ilustración 10: Mapa de vectores de velocidad en una de las simulaciones realizadas con trenes SIEMENS en terraplén con las barreras óptimas.**

Para el caso de terraplén se obtuvieron tres barreras que consiguen valores de eficacia global elevados, pero ninguno con el nivel de eficacia del caso de viaducto, es decir, la situación en viaducto es más restrictiva, pero la protección con barreras resulta más eficaz.



**Ilustración 6: Izquierda: Barrera óptima para la protección de los trenes estudiados en viaducto. Derecha: Barreras y su eficacia en terraplén.**

El análisis de las simulaciones concluyó que la última de la derecha es la óptima, porque logra un equilibrio entre la afectación del tren situado a barlovento y el de sotavento, como se puede observar en el ejemplo representado mediante el mapa de vectores velocidad (Ilustración 10).

### 3.2. Estudio de viabilidad

Para comprobar los resultados obtenidos se realizó un estudio de viabilidad, que consiste en la simulación de los escenarios, con las barreras óptimas calculadas, y con una velocidad extrema de ráfaga de 40m/s. Así se calculó, en función de la fuerza sobre el tren protegido por la barrera, la velocidad del viento equivalente a esta fuerza.

La protección con las barreras óptimas conseguía que el viento fuese equivalente a 11m/s en viaducto y a 14m/s en terraplén en el peor de los cuatro casos posibles para ambos escenarios, valores que no limitan la velocidad del tren según la Especificación Técnica de Interoperabilidad Europea [9].

Es decir, la instalación de las barreras diseñadas consigue reducir la afectación lateral a causa del viento de costado hasta valores que no exigirían, ni siquiera para condiciones de viento extremo, limitaciones en la velocidad de circulación.

## 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo de investigación se parte de un completo estudio sobre la afectación del fenómeno del viento lateral sobre los trenes de alta velocidad, y se ha conseguido un análisis de medidas de mitigación en forma de barreras para-viento de elevada eficacia.

Se ha efectuado para este estudio una aproximación muy completa del fenómeno del viento cruzado, en base a simulaciones con CFD, realizándose un efectivo estudio en el que se han diseñado y simulado modelos con diferentes tipos de barreras para-viento que consiguen

mitigar los efectos en cada una de las situaciones planteadas. Las barreras se han diseñado de forma que son capaces de proteger con la mayor efectividad posible a las composiciones que circulan por la línea estudiada en ambos sentidos, obteniéndose valores de efectividad globales superiores al 90% tanto en vías sobre viaducto como sobre terraplén.

El estudio se ha realizado en una situación real, centrándose en las características técnicas y operativas de una Línea de Alta Velocidad que actualmente se ve afectada por vientos fuertes que en ocasiones no permiten la circulación de los trenes a su velocidad máxima. De ahí la importancia del trabajo de investigación, que tiene a día de hoy, una posible aplicación práctica de carácter inmediata para esta u otras líneas de Alta Velocidad similares.

## 5. REFERENCIAS.

[1] Baker, C.J. and Sterling, M., 2003, "Current and Recent International Work on Railway Aerodynamics". School of Engineering University of Birmingham. Rail Safety and Standards Board. Issue number 4, August 11th 2003.

[2] Barcala Montejano, M.A., 2005, "Tesis sobre el uso de parapetos para reducir las cargas del viento lateral en trenes de alta velocidad". UPM. E. T. S. I. AERONÁUTICOS.

[3] Yun, S.H., Ku, Y.C., Rho, J.H., Ko, T.H., Kwon, H.B. and Lee, D.H., "Numerical Study on the Interactions between Rail Vehicle and Wind Fence under Strong Cross Wind -For the Effective Wind Fence Design." Seoul National University, Seoul, Korea; Korea Railway Research Institute, Uiwang, Korea.

[4] Bettle, J., Holloway, A.G.L. and Venart, J.E.S, 2003, "A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle o a bridge on a cross-wind", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91, 573–592.

[5] J.D. Sanz, B. Suárez, J. Garzón, J.A. Brunel (2009). "Protection High Speed Trains against lateral wind effects". IMECE 2009-10353. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Lake Buena Vista, Florida, USA.

[6] UNE- EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions

[7] Barrado, J. and Lozano, F.J., 2000, "Incidencia de los fenómenos meteorológicos sobre la explotación de líneas ferroviarias de alta velocidad. Aplicación al tramo Guadalajara-Zaragoza de la nueva línea Madrid- Barcelona- frontera francesa". Programa de Becas de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Memoria final, pp. 10-11.

[8] Martínez, J.C., Iglesias Díaz, J. Osma Ruiz, S., Rodríguez Fernández, M. and Álvarez Legazpi, P., 2008, "Nuevo sistema de medición y control del viento lateral en la línea de alta velocidad Madrid- Barcelona- Figueras (tramo Madrid- Lérida)". VIII Congreso de Ingeniería de transporte, de A Coruña.

[9] Directive 2004/50/CE. Technical Specification of Interoperability (TSI) on the interoperability of the trans-European high-speed rail system

[10] Kwon, H.; Park, Y.; Lee, D. and Kim, M, 2001, "Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89, pp. 1179–1195.

[11] Iwnicki, S., 2006, "Handbook of railway vehicle dynamics." CRC Press, ISBN: 9780849333217.