

SOBRE EL USO DE PARAPETOS SÓLIDOS PARA ATENUAR LOS EFECTOS DEL VIENTO TRANSVERSAL EN LA CIRCULACIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS

ON THE USE OF SOLID PARAPETS TO ATTENUATE THE EFFECTS OF CROSS-WINDS ON TRAINS

José Meseguer Ruiz - j.meseguer@upm.es
Sergio Ávila Sánchez - s.avila@upm.es
Oscar López García - oscar.lopez.garcia@upm.es

IDR/UPM. E.T.S.I. aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid

Carlos Díez Arroyo - cdiez@adif.es
Agustín Fernández Sanz - afernandez@adif.es
José Conrado Martínez Acevedo - jcmartinez@adif.es

ADIF, España

Resumen: Cuando un tren de alta velocidad se desplaza por zonas expuestas a vientos laterales, como es el caso de los viaductos, los incrementos de las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo por causa de la acción del viento, pueden ser determinantes para fijar los límites de operación del mismo, lo que puede aconsejar en algunos casos equipar la infraestructura ferroviaria con barreras cortavientos que disminuyan la acción del viento sobre los trenes. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en IDR/UPM (Instituto Universitario de Investigación “Ignacio Da Riva”, E.T.S.I. aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid), mediante ensayos con modelos a escala en un túnel aerodinámico, sobre el efecto de sistemas de protección frente a vientos laterales en las cargas aerodinámicas sobre un modelo bidimensional de coche de tren de alta velocidad; los sistemas de protección ensayados han sido parapetos sólidos verticales equipados con aleros en lo alto de los mismos.

Palabras clave: Alta velocidad, barreras cortavientos, cargas de viento, ensayos en túnel aerodinámico.

Abstract: When high-speed trains are subjected to high speed winds at exposed locations such as bridges, aerodynamic forces and moments acting on the vehicles become important, because lateral aerodynamic loads can cause the overturning of the vehicles, thence cross-wind effects must be taken into account to determine the limits of operation for high speed

trains. A way to decrease the lateral wind loads acting on a vehicle under cross-winds is to reduce the wind effects by using windbreaks. In this paper experimental results of the effects of windbreaks on the wind loads on a train coach are presented. Results have been obtained at IDR/UPM (Instituto Universitario de Investigación “Ignacio Da Riva”, E.T.S.I. aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid) by wind tunnel testing of two-dimensional models. Tested windbreaks have been vertical parapets equipped with eaves at the top.

Keywords: High speed trains, windbreaks, wind loads, wind tunnel tests.

Introducción

Los resultados que se presentan en esta comunicación se enmarcan en el proyecto de referencia PT-2007-024-17CCPM, “Efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios. Determinación de valores límite”, financiado por el Ministerio de Fomento a través de Centro de Estudios y Experimentación para Obras Publicas (CEDEX), cuya finalidad, tal como se enuncia en su título, es evaluar los efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios para la determinación de valores límite de operación de los trenes de alta velocidad.

Para la ejecución de este proyecto ha sido formado un amplio equipo integrado por varios grupos pertenecientes a instituciones españolas. Dentro de este equipo, de acuerdo con el esquema de la figura 1, es tarea de Adif, Talgo y SENER la definición de requisitos relacionados con la infraestructura ferroviaria y con el material rodante, en la Universidad Politécnica de Madrid (Instituto Universitario de Investigación “Ignacio Da Riva”, IDR/UPM) recae la responsabilidad de coordinación del proyecto, así como la ejecución de los ensayos en túneles aerodinámicos relativos tanto a infraestructuras como a material rodante, y también las medidas en campo; es tarea del grupo de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la misma Universidad el análisis de los fenómenos aeroelásticos en las infraestructuras; el Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Guipuzcoa (CEIT) es responsable del estudio de la dinámica del vehículo y su estabilidad; y la Fundación Caminos de Hierro (FCH) del análisis de combinaciones de cargas y calidad de marcha.

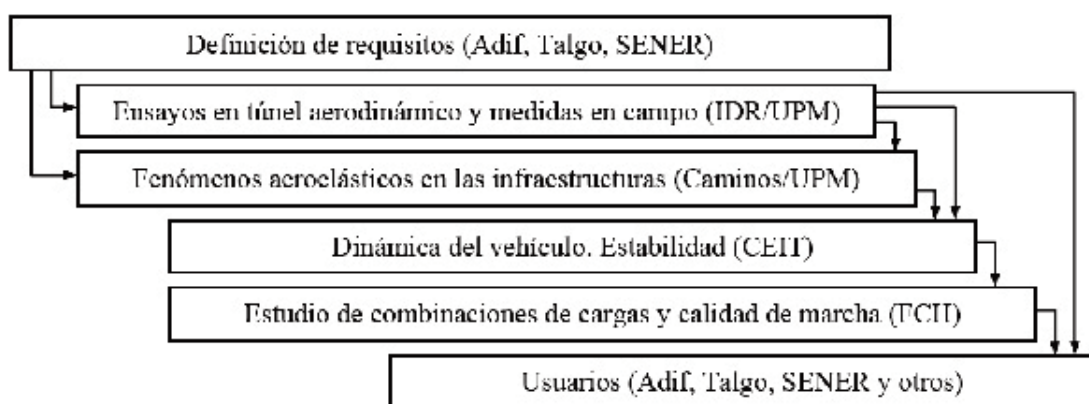


Fig. 1. Organigrama del proyecto PT-2007-024-17CCPM, “Efectos del viento transversal sobre la circulación de vehículos ferroviarios. Determinación de valores límite”

El objetivo trazado en este proyecto generar información sobre sistemas de protección pasiva para trenes de alta velocidad sometidos a vientos cruzados, evaluar el impacto de tales sistemas en la catenaria ante vientos laterales, profundizar en el análisis de las inestabilidades aeroelásticas que afectan a las infraestructuras (principalmente cargas de bataneo en viaductos), evaluar el efecto del viento lateral sobre la dinámica del tren, y de la combinación de la acción del viento con otras acciones ferroviarias mejorar el análisis de la seguridad y de la calidad de marcha.

En lo que sigue se presentan algunos de los resultados obtenidos hasta la fecha en IDR/UPM mediante ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos dentro de este proyecto; de acuerdo con este horizonte, la presentación de resultados queda limitada a aquellos relativos a las cargas de viento sobre modelos de unidades de tren de alta velocidad sobre viaductos equipados con diversos tipos de barreras cortavientos.

En el apartado siguiente se presenta una revisión, necesariamente breve, del estado del conocimiento sobre el tema, los resultados experimentales han sido obtenidos en el túnel A4C de IDR/UPM, cuyas características más sobresalientes se describen en el apartado tercero, al igual que las de los diferentes modelos empleados en los ensayos. Y por último en el apartado cuarto se muestran los resultados medidos, en primer lugar se recogen las medidas de las distribuciones de presión sobre un modelo de coche de tren situado sobre un viaducto, sin y con barreras cortavientos, y después las cargas globales de viento sobre el modelo de coche de viaducto bajo las diversas condiciones de protección frente a viento lateral consideradas.

Antecedentes

Sabido es que el viento cruzado sobre cualquier vehículo produce una fuerza lateral y un momento de balanceo que tienden a desplazar al vehículo lateralmente y a provocar su vuelco. En el caso de un tren la fuerza lateral puede dar lugar incluso al desplazamiento de las vías (ripado), y respecto al par de vuelco, este término se ha ido convirtiendo con el tiempo en un factor potencialmente más peligroso conforme ha ido disminuyendo el peso de los trenes. Obviamente la posibilidad de vuelco es mayor cuanto menor es el ancho de vía, siendo un tema que ha preocupado a las autoridades ferroviarias, incluidas las españolas. El tema también es de gran interés para los fabricantes de material ferroviario rodante, algunos de los cuales incluyen de forma sistemática campañas de ensayos en túneles aerodinámicos a fin de determinar experimentalmente las fuerzas aerodinámicas sobre cabezas tractoras y otras unidades de tren.

Así pues, cada vez resulta más necesario tener en cuenta la aerodinámica en el diseño y consecuentemente en el cálculo de las fuerzas que actúan sobre el tren (Johnson 1996, Matschke & Schulte-Werning 1997, Schetz 2001; Imai y otros 2002; Raghunathan y otros 2002; Gautier 2003; Mancini 2003; Andersson y otros 2004).

Cuando un tren de alta velocidad se desplaza por zonas expuestas a vientos, como puentes en terreno accidentado o terraplenes en campo abierto, los incrementos de las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo por causa de la acción del viento,

pueden ser importantes respecto a las fuerzas y momentos aerodinámicos que tienen lugar sobre un terreno llano. Este problema ha despertado el interés de la comunidad científico-tecnológica, existiendo al respecto un número razonable de trabajos publicados donde se aborda la determinación de las cargas aerodinámicas en trenes expuestos a vientos laterales mediante ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos (Baker 1986; Baker & Humphreys 1996; Willemsen 1997; Kwon y otros 2001; Hyeok-Bin y otros 2003; Suzuki y otros 2003; Sanquer y otros 2004; Barcala & Meseguer 2007), con medidas en trenes reales (Matschke y otros 2002; Matschke & Heine 2002; Ding y otros 2005) o con métodos numéricos (Khier y otros 2000; Bettle y otros 2003; Myung-Kwan y otros 2003; Diedrichs, 2003, 2008).

Conviene aclarar que, hoy por hoy, la mayoría de la información disponible proviene de ensayos hechos con modelos a escala de trenes e infraestructuras en túneles aerodinámicos, generalmente realizados con aproximaciones estáticas donde la interacción entre el aire y el tren se reproduce por medio de modelos estáticos expuestos a la acción del flujo de aire del túnel. Obviamente este método no tiene en consideración el movimiento relativo del tren respecto al terreno. Aunque ha habido algunos intentos de mover el modelo a través del túnel aerodinámico (Baker 1986; Baker & Humphreys 1996; Baker y otros 2001) o desplazar una banda simulando el movimiento del terreno respecto al tren (Kwon y otros 2001), el método utilizado mayoritariamente consiste en fijar el modelo de tren en la cámara de ensayos, sin considerar el movimiento relativo con el suelo.

Paralelamente al trabajo experimental, y potenciado sin duda por la cada vez mayor capacidad de cálculo de los ordenadores, se aprecia un crecimiento constante del esfuerzo dedicado al tratamiento numérico de la aerodinámica de trenes, donde además del viento lateral se han analizado diversos aspectos de la circulación de trenes en túneles, con especial énfasis en la influencia de la cabeza del tren en la aerodinámica (Takanobu & Kozo 1997; Baron y otros 2001; Chang-Hoon & Warn-Gyu 2003). Hay que mencionar que también se han realizado estudios instrumentando secciones de un túnel real para medir la temperatura, velocidad y presión del aire durante la operación rutinaria de una línea (Vardy & Reinke 1999), y de igual forma medidas en trenes instrumentados con tomas de presión (William-Louis & Tournier 2005; Martínez y otros 2008).

Hay que decir, sin embargo, que un problema todavía no resuelto numéricamente con precisión (ni con los métodos más avanzados actualmente disponibles para problemas con escalas similares es el de desprendimiento laminar de la capa límite y su posterior readherencia turbulenta. El desprendimiento prematuro de la capa límite tiene lugar cuando ésta se encuentra, cerca del punto de remanso donde inicia su desarrollo, con regiones donde la geometría del cuerpo cambia bruscamente, como ocurre cerca del borde de ataque de perfiles delgados o cerca de las aristas de barlovento de los cuerpos no fuselados (en este segundo caso el desprendimiento ocurre incluso aunque corriente arriba la capa límite sea turbulenta). El problema es de gran importancia en la industria aeronáutica, lo que motiva que se estén dedicando considerables recursos, sin que por el momento se vislumbre una solución plenamente satisfactoria. El mismo problema aparece en las estelas de cuerpos no fuselados cualquiera que sea su naturaleza, no existiendo en la actualidad método numérico alguno capaz de proporcionar valores fiables de la llamada presión de base (figura 2).

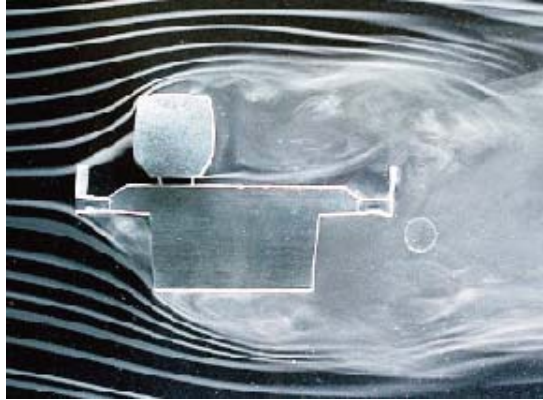


Fig. 2. Fotografía obtenida en túnel de humos de un modelo bidimensional de vagón de tren sobre un viaducto. La visualización con humo, aunque únicamente de valor cualitativo (pues las técnicas de visualización normalmente exigen que el número de Reynolds sea pequeño), permite apreciar en toda su magnitud la gran complejidad del flujo debido a la existencia de una amplia estela turbulenta (de Barcala & Meseguer 2008).

También se han realizado estudios en túnel aerodinámico del movimiento del aire producido por los trenes de alta velocidad en estaciones (Gerhardt & Krüger 1998), así como ciertos trabajos teóricos donde se determinan, con modelos analíticos de relativa sencillez pero de asombrosa exactitud, las cargas aerodinámicas sobre objetos de geometría simple ocasionadas por el paso de un vehículo (Sanz-Andrés & Santiago-Prowald 2000; Sanz-Andrés y otros 2003; Sanz-Andrés y otros 2004).

Las cargas aerodinámicas sobre las unidades del tren se ven indudablemente reducidas con la colocación de parapetos que producen una modificación del campo de presiones sobre el tren, lo que afecta tanto a la fuerza lateral como al momento de vuelco. El uso de parapetos para protección de las acciones del viento es un tema bien conocido en IDR/UPM, donde se tiene una contrastada experiencia que se inicia en los años setenta (Da Riva y otros 1970, 1971) con barreras para aplicaciones en agricultura, que posteriormente ha derivado hacia otras aplicaciones específicas, relativas a entornos de puertos y minas (Sanz-Andrés y otros, 2002; Santiago y otros, 2007), la protección de trenes (Barcala & Meseguer 2007), y la protección de cubiertas y tejados en edificaciones (Pindado & Meseguer, 2003; Pindado y otros, 2004; Franchini y otros, 2005).

Definición de la instalación y de los modelos de ensayos

Los ensayos aerodinámicos que se describen en este artículo han sido llevados a cabo en el túnel A4C de IDR/UPM. Este túnel es de corriente aspirada, cámara de ensayos cerrada y circuito abierto. El túnel ha sido diseñado para cumplir los requisitos de ensayos de cuerpos bidimensionales.

Según se puede apreciar en la figura 3-A, en el sentido de la corriente los elementos del túnel A4C son: contracción (1), cámara de ensayos (2), difusor (3) y ventiladores (4). El túnel A4C está impulsado por cuatro ventiladores centrífugos, cuya potencia total es de 30 kW,

dispuestos en dos torres con dos ventiladores cada una (véase también la figura 3-B). Los ventiladores descargan en el recinto donde se encuentra el túnel (5), que actúa como conducto de retorno (para ello el contorno exterior del túnel está convenientemente carenado).

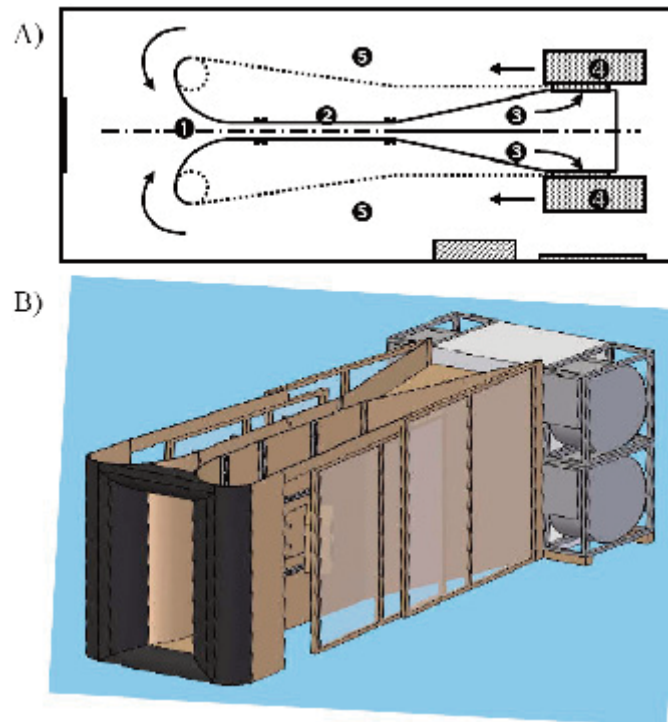


Fig. 3. A) esquema de la planta del túnel A4C (para la identificación de las diferentes partes véase el texto), y B) vista esquemática del túnel.

La contracción es bidimensional, con un único plano de contracción (el techo y el suelo de la contracción y de la cámara de ensayos son paralelos entre sí). La cámara de ensayos es de sección rectangular, de 0.2 m de ancho y 1.8 m de alto, con una longitud de 1.8 m. El difusor de adaptación a los ventiladores está dividido internamente en dos conductos, pues de otra forma su longitud tendría que ser mucho mayor para no superar la limitación del ángulo de apertura del conducto, evitando así el desprendimiento de las capas límite en las paredes verticales del difusor.

Para definir los modelos de ensayos se han tomado como referencia la información suministrada por Adif y por los fabricantes de material rodante. Todos los modelos de ensayos han sido construidos a escala 1/50, y en lo que sigue, cuando se proporcionan dimensiones geométricas éstas se refieren a los modelos de ensayos, en el entendimiento de que con la escala elegida el paso a las magnitudes reales es sencillo e inmediato. Los modelos son bidimensionales, con una longitud en la dirección perpendicular a la de la corriente incidente próxima al ancho de la cámara de ensayos del túnel (0.20 m).

Para definir los modelos de viaducto se han considerado las secciones de diferentes viaductos proporcionadas por Adif (los de los ríos Lamas, Podos, Ulla, Deza y Barbantiño).

A partir de éstas secciones se han definido los modelos de tablero que se muestran en la figura 4, siendo la única diferencia entre ambos la altura del cajón inferior: 6 cm en un modelo (P) y 8 cm en otro (M). Al canto del cajón hay que añadir el espesor del tablero, 0.5 cm, de modo que el canto de los viaductos P y M, sin balasto, es $b_P = 6.5$ cm y $b_M = 8.5$ cm respectivamente (correspondiente en la realidad a 3.25 m y 4.25 m). En todos los casos la anchura o cuerda del tablero, sin barreras, es $c = 28$ cm (14 m en la realidad). Sobre cada tablero se dispone el modelo de balasto (el mismo para los dos modelos de tablero) y sobre éste el modelo de coche (véase la figura 8).

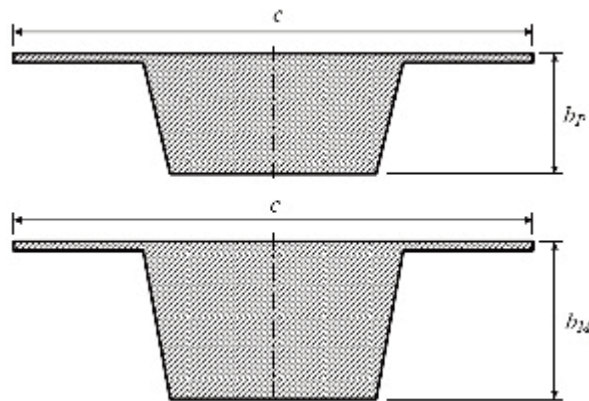


Fig. 4. Secciones de los modelos de viaducto empleados en los ensayos ($c = 28$ cm, $b_P = 6.5$ cm y $b_M = 8.5$ cm).

Respecto a las barreras de protección contra el viento, en la figura 5 se muestra esquemáticamente una de ellas; cada barrera está formada por un andén (1), que sirve de elemento de unión con el tablero del puente (2), que soporta el deflector inferior (3) y el paramento vertical de la barrera (4), sobre el que sobresale el alero (5). De acuerdo con este esquema las barreras quedan caracterizadas por la altura h y el ancho del alero, a .

Se han construido dos modelos de coche de tren, uno con tomas de presión y otro sin tomas. El modelo de coche con tomas está provisto de cuarenta y ocho tomas de presión distribuidas de modo uniforme en la periferia, en secciones próximas a la media (figura 6). A partir de las distribuciones, integrando las cargas a lo largo del contorno del coche se determinan los coeficientes de fuerzas (sustentación y resistencia) y el coeficiente de par de vuelco.

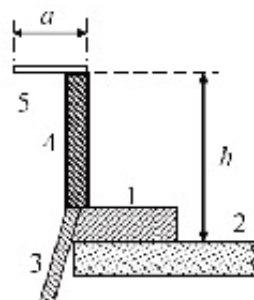


Fig. 5. Elementos y parámetros que definen la geometría de las barreras cortavientos.

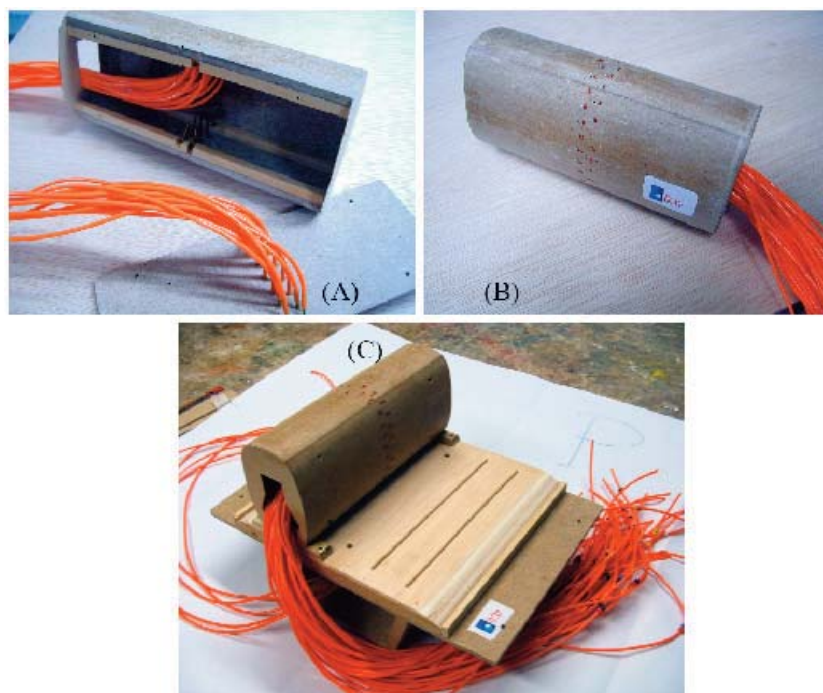


Fig. 6. Vista del modelo bidimensional de medida de presiones donde se pueden apreciar las tomas de presión y los conductos para transmisión de las señales neumáticas (A), vista del modelo listo para las medidas (B) y conjunto de viaducto (sin barreras cortavientos), balasto y coche con tomas de presión (C).

Resultados de los ensayos de medida de presiones

En los ensayos de medida de presiones el conjunto formado por viaducto, balasto y coche de tren (figura 6) se monta sobre la plataforma giratoria existente en una de las paredes laterales de la cámara de ensayos del túnel A4C. La plataforma giratoria está unida a un sistema de giro Newport controlable mediante un ordenador, y través de la misma salen de la cámara de ensayos los tubos neumáticos que conducen las señales de presión al instrumento de medida de presiones, un lector multicanal controlado por el mismo ordenador personal que el sistema de giro (figura 7).



Fig. 7. Instrumentación para la medida de presiones sobre el modelo de coche de tren.

El lector de presiones, de Scanivalve Corp., tiene 126 entradas más una toma de referencia, lo que permite leer simultáneamente 63 entradas en un primer paso y otras 63 inmediatamente después, en un segundo paso (aunque en estos ensayos tan sólo se han leído cuarenta y ocho tomas de presión, que son las instaladas en el modelo de coche). La instalación de ensayos se completa con un tubo Pitot, Airflow modelo 3.3.311, situado cerca del techo de la cámara de ensayos, donde se miden la presión de remanso en la cámara de ensayos del túnel, p_0 , y la presión estática de referencia, p_∞ , lo que permite, por diferencia de ambas, conocer el valor de la presión dinámica empleada para adimensionalizar los resultados:

$$(1) \quad p_0 - p_\infty = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2$$

donde ρ es la densidad del aire y U_∞ su velocidad. Si es p_i la presión medida en una cierta toma i , el coeficiente de presión se define como

$$(2) \quad c_{p,i} = \frac{p_i - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

La instrumentación queda dentro de una caja que hace de puerta de la cámara de ensayos, de modo que en una de las paredes de la caja (la que coincide con la cámara de ensayos) se tiene a un lado el modelo de ensayos y al otro el sistema de medida. De este modo, en una secuencia de ensayo típica se abre la cámara de ensayos, lo que permite acceder al modelo e instalar la barrera cortavientos a ensayar, después se cierra la cámara y se inicia la sesión de medida, totalmente controlada por el ordenador de control que fija el primer valor del ángulo de ataque del conjunto y da la orden de lectura de presiones y de almacenamiento de los datos medidos, a continuación se fija el segundo valor del ángulo de ataque y la medida y almacenamiento correspondientes y así sucesivamente.

Han sido ensayados dieciséis modelos de barreras cortavientos, correspondientes a cuatro valores de la altura del paramento vertical, $h = 25$ mm, 35 mm, 45 mm y 55 mm, y cuatro valores de la longitud del alero, $a = 0$ mm, 5 mm, 10 mm y 15 mm, más el caso de referencia de viaducto sin barrera cortavientos alguna. En estos ensayos tan sólo ha sido considerado el modelo de puente de canto pequeño, $b_p = 65$ mm, aunque sí se han considerado las dos posibles posiciones del coche de tren, según esté en la vía de barlovento o en la de sotavento. En cada configuración de ensayo se han tomado medidas para cinco valores del ángulo de ataque, α , de -6° a 6° en saltos de 3° , correspondiendo el caso $\alpha = 0^\circ$ a la situación en la que la corriente incide paralelamente al plano del tablero; un ángulo de ataque positivo indica que con relación al viento incidente el extremo de barlovento del tablero está levantado respecto al extremo de sotavento (figura 8).

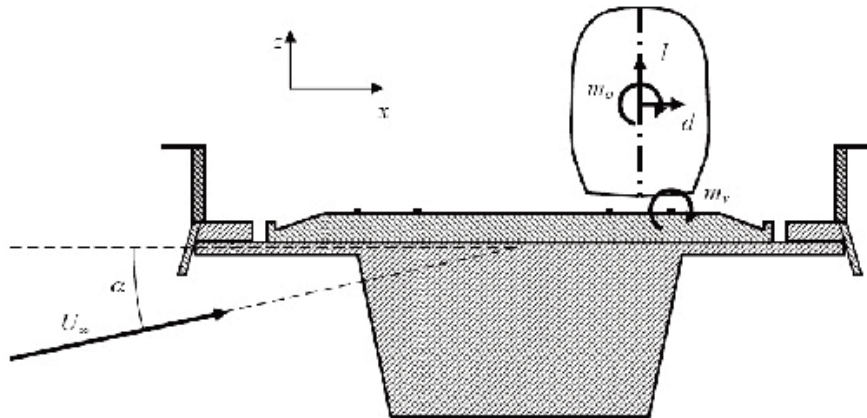


Fig. 8. Definición de ángulo de ataque y sistema de cargas aerodinámicas sobre el coche de tren: sustentación, l , resistencia aerodinámica, d , momento de cabeceo del coche, m_o , y momento de vuelco, m_v .

Conocidas las distribuciones de coeficiente de presión correspondientes a cada ángulo de ataque, las cargas por unidad de longitud de coche se obtienen integrando las presiones a lo largo del contorno, es decir

$$(3) \quad d = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \oint c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{i} ds = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \oint c_p(x, z) dz,$$

$$(4) \quad l = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \oint c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} ds = -\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \oint c_p(x, z) dx,$$

$$m_o = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \left(-\oint z c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{i} ds + \oint x c_p(x, z) \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} ds \right) =$$

$$(5) \quad = \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \left(-\oint z c_p(x, z) dz + \oint x c_p(x, z) dx \right),$$

$$(6) \quad m_v = m_o + dh_o + \frac{1}{2} lt,$$

donde d es la resistencia aerodinámica, l la fuerza de sustentación, m_o el momento de cabeceo (medido respecto al punto medio del coche) y m_v y momento de vuelco, todos ellos por unidad de longitud; \mathbf{n} representa la normal al contorno del vehículo, \mathbf{i} y \mathbf{k} son los versores según los ejes del sistema de coordenadas empleado, ds es el diferencial de longitud sobre el contorno, h_o la distancia vertical desde el punto medio del coche a la superficie superior de la vía y t el ancho de vía. Si son h_c y c_c la altura y el ancho del coche, los coeficientes de fuerzas y de momentos están definidos como

$$(7) \quad c_d = \frac{d}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h_c},$$

$$(8) \quad c_l = \frac{l}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h_c},$$

$$(9) \quad c_{mv} = \frac{m_v}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h_c c_c}.$$

Las distribuciones de presión medidas en cada ensayo quedan identificadas por una clave de letras y números, de modo que una primera letra que indica el tipo de tablero (en los resultados que se presentan en este artículo es siempre “P”, de tablero de canto pequeño, por lo que esta letra se ha omitido en las etiquetas de los resultados), un número de dos cifras precedido de la letra “h” indica la altura de la barrera en milímetros, otro grupo formado también por un número de dos cifras precedido de la letra “a” indica la anchura del alero en milímetros, y finalmente una letra mayúscula proporciona la información sobre la posición del coche, bien sobre la vía de barlovento (“B”) o sobre la de sotavento (“S”).

En las figuras 9, 10, 11 y 12 se muestran las distribuciones de presión correspondientes a algunos casos típicos. De la integración de las distribuciones de presión se obtienen los coeficientes de fuerzas y de momento que se muestran en forma gráfica en las figuras 13, 14 y 15, donde se han representado, en función del ángulo de ataque α , los coeficientes reducidos δ_j , o cocientes entre el coeficiente de carga aerodinámica correspondiente a la barrera de altura h y el coeficiente de la configuración de referencia, que es la de viaducto sin barreras ($h = 0$), es decir

$$\delta_d(h) = c_d(h)/c_d(0), \quad \delta_l(h) = c_l(h)/c_l(0), \quad \text{y} \quad \delta_{mv}(h) = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$$

Como se puede apreciar en los gráficos, salvo en el caso de la fuerza de sustentación los coeficientes reducidos disminuyen al aumentar el ángulo de ataque, como era de esperar, pues al aumentar el ángulo de ataque la barrera cortavientos protege cada vez más al modelo de coche; esto es así en el caso de la fuerza de resistencia y en el del momento de vuelco (donde el efecto de la resistencia aerodinámica es dominante).

En el caso de la sustentación, si el coche está en la vía de barlovento los coeficientes aumentan con el ángulo de ataque, salvo si la altura de la barrera es muy elevada. La razón de este comportamiento es que la corriente que incide sobre el tren está muy acelerada por la presencia de la barrera, lo que origina la aparición de un pico de succión muy intenso en la parte del techo del coche (véanse también las figuras 9 a 12). Finalmente, en las figuras 16, 17 y 18 se presenta la variación con la altura h de los coeficientes de carga reducidos

$$\delta_d(h) = c_d(h)/c_d(0), \quad \delta_l(h) = c_l(h)/c_l(0), \quad \text{y} \quad \delta_{mv}(h) = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$$

correspondientes al caso $\alpha = 0^\circ$. Nótese que en cuanto al coeficiente de resistencia aerodinámica y al de momento de vuelco se refiere la colocación de barreras significa una mejora muy destacable, siendo la influencia de la anchura del alero menos significativa.

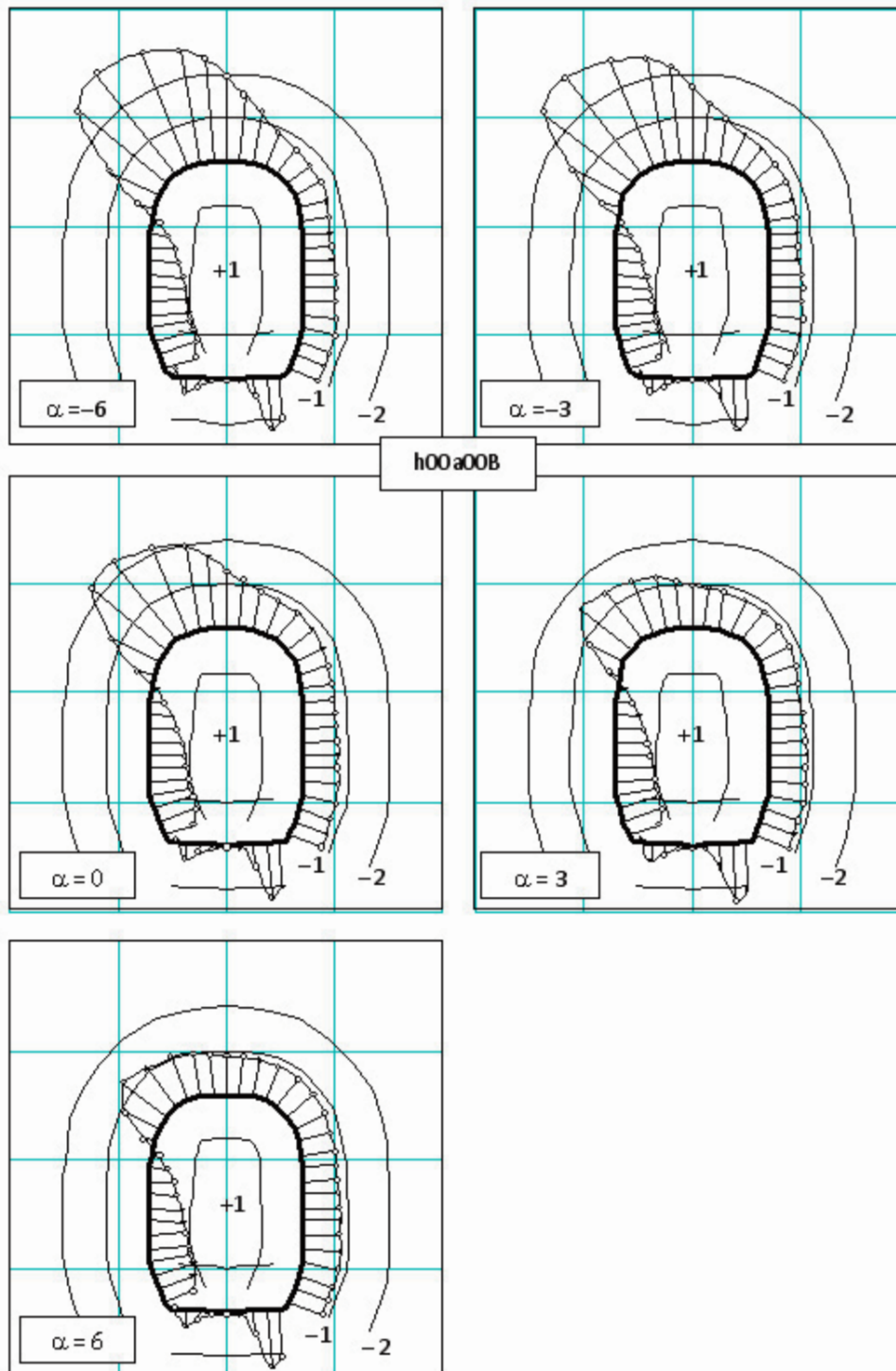


Fig. 9. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a barlovento, sin barreras cortavientos sobre el tablero del viaducto (configuración h00a00B)

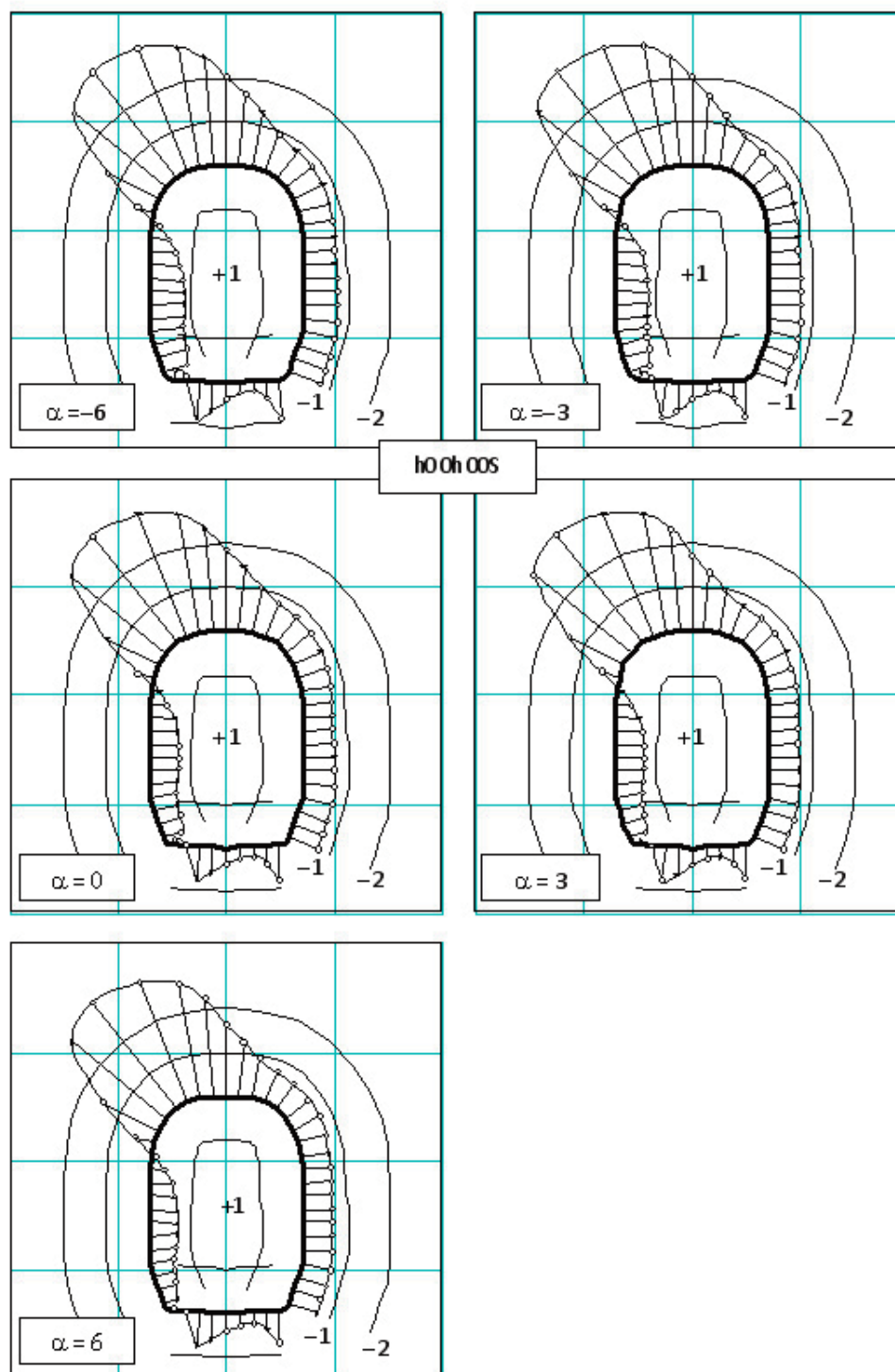


Fig. 10. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a sotavento, sin barreras cortavientos sobre el tablero del viaducto (configuración h00a00S)

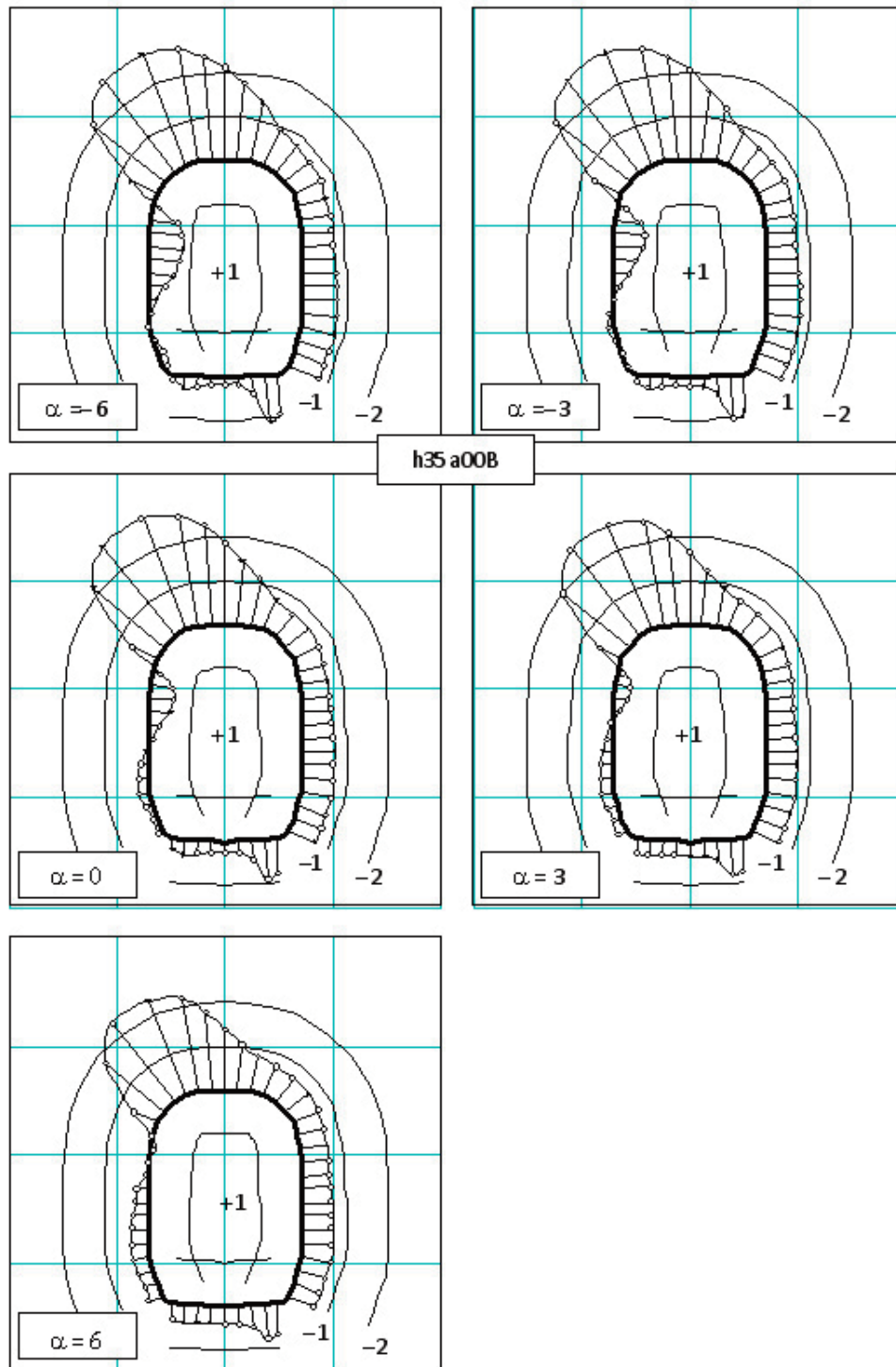


Fig. 11. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a barlovento, con una barrera cortaviento de altura $h = 35$ mm, sin alero, $a = 0$ (configuración h35a00B)

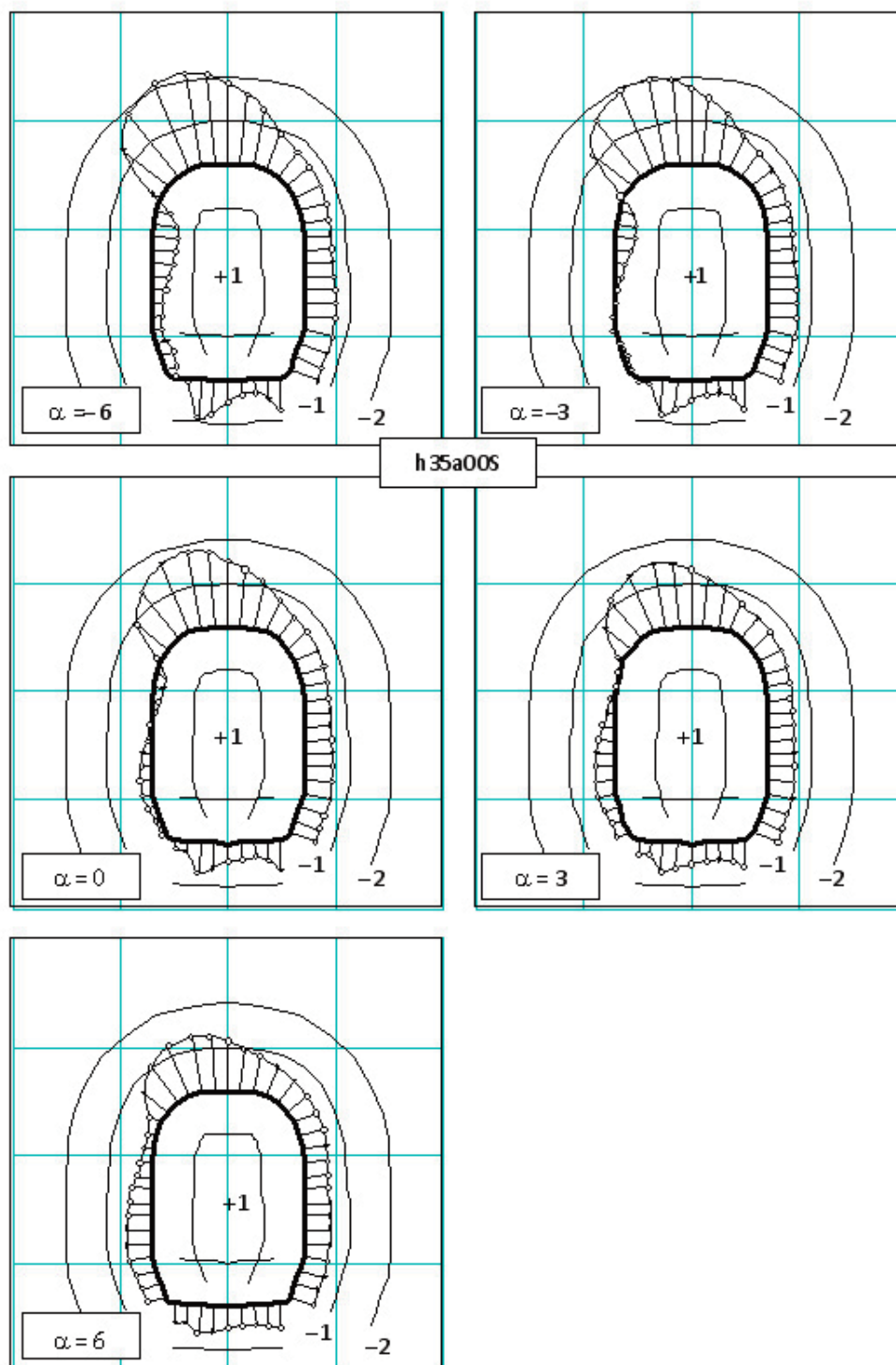


Fig. 12. Distribuciones de presión para distintos ángulos de ataque medidas en el caso de coche a sotavento, con una barrera cortaviento de altura $h = 35$ mm, sin alero, $a = 0$ (configuración h35a00S)

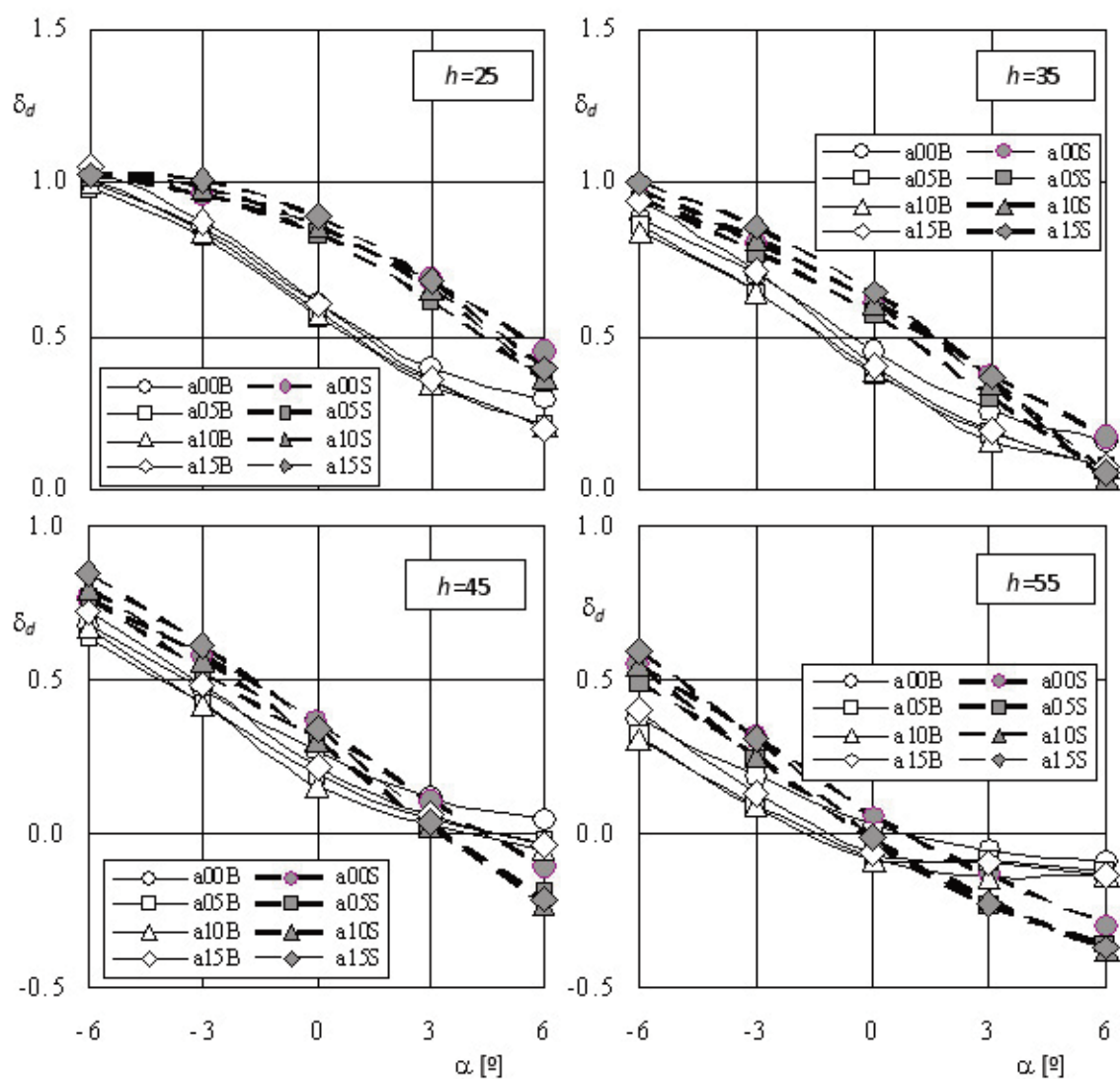


Fig. 13. Variación con el ángulo de ataque α , del cociente $\delta_d = c_d(h)/c_d(0)$, donde $c_d(h)$ es el coeficiente de resistencia aerodinámica correspondiente a la barrera de altura h y $c_d(0)$ el coeficiente de referencia correspondiente al viaducto sin barreras (h ero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en las figuras. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento. Al comparar los resultados para diferentes alturas de barrera, nótese que las escalas verticales no son las mismas en todas gráficas.

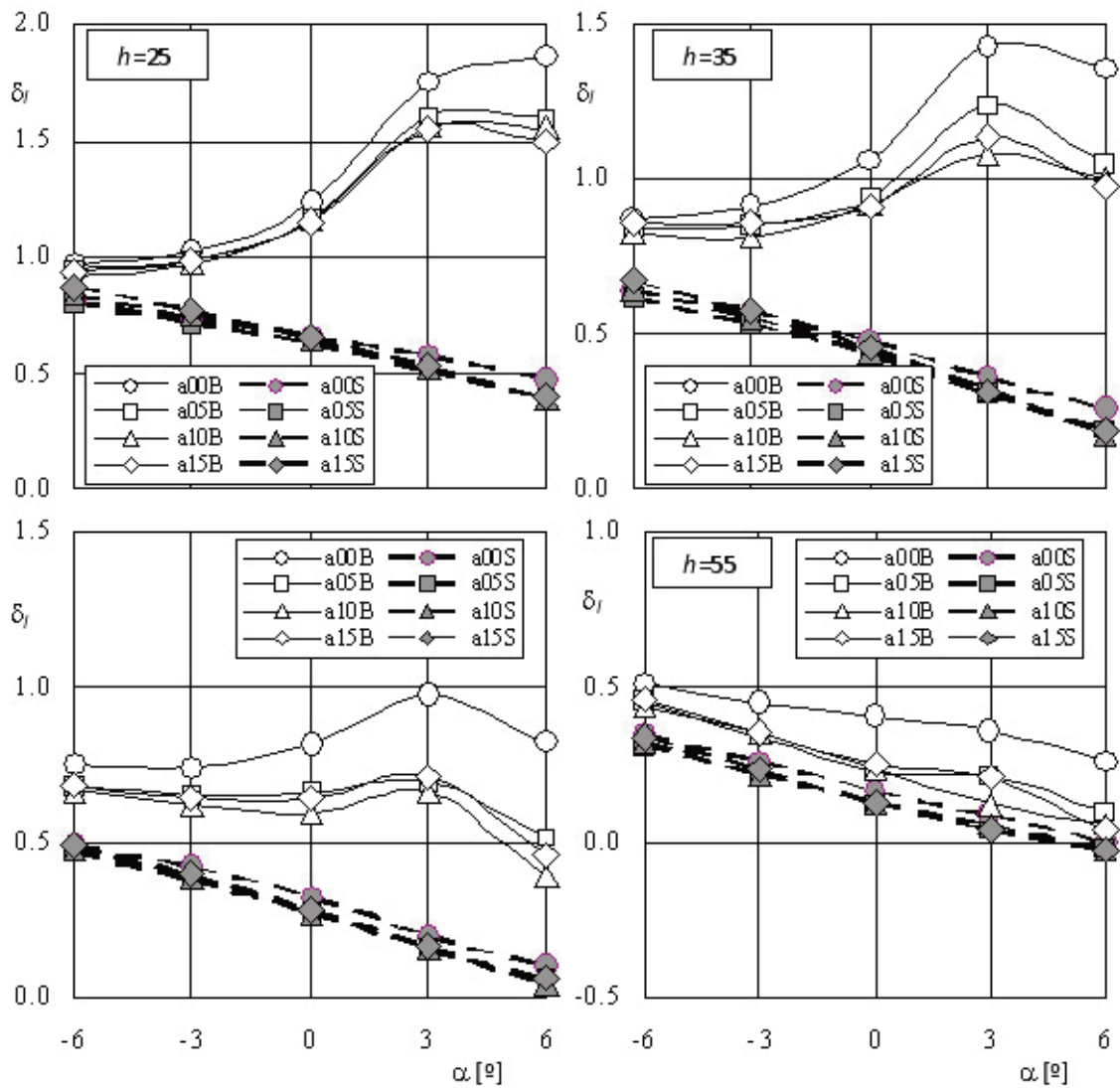


Fig. 14. Variación con el ángulo de ataque α , del cociente $\delta_I = c_I(h)/c_I(0)$, donde $c_I(h)$ es el coeficiente de sustentación correspondiente a la barrera de altura h y $c_I(0)$ el coeficiente de referencia correspondiente al viaducto sin barreras (h de acuerdo con la leyenda incluida en las figuras. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento. Al comparar los resultados para diferentes alturas de barrera, nótese que las escalas verticales no son las mismas en todas gráficas.

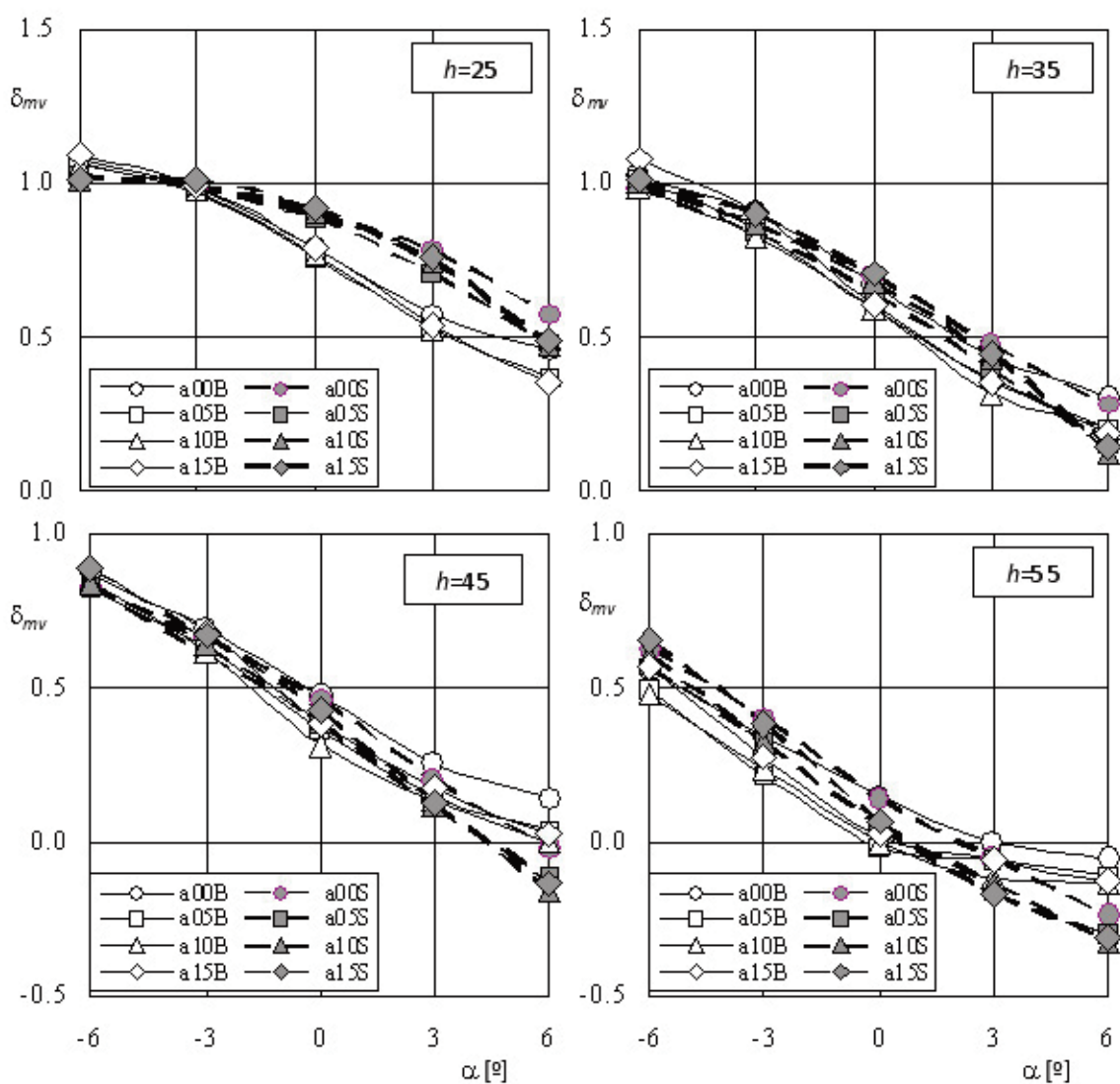


Fig. 15. Variación con el ángulo de ataque α , del cociente $\delta_{mv} = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$, donde $c_{mv}(h)$ es el coeficiente de momento de vuelco correspondiente a la barrera de altura h y $c_{mv}(0)$ el coeficiente de referencia correspondiente al viaducto sin barreras (h a barrera de acuerdo con la leyenda incluida en las figuras. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento. Al comparar los resultados para diferentes alturas de barrera, nótese que las escalas verticales no son las mismas en todas gráficas.

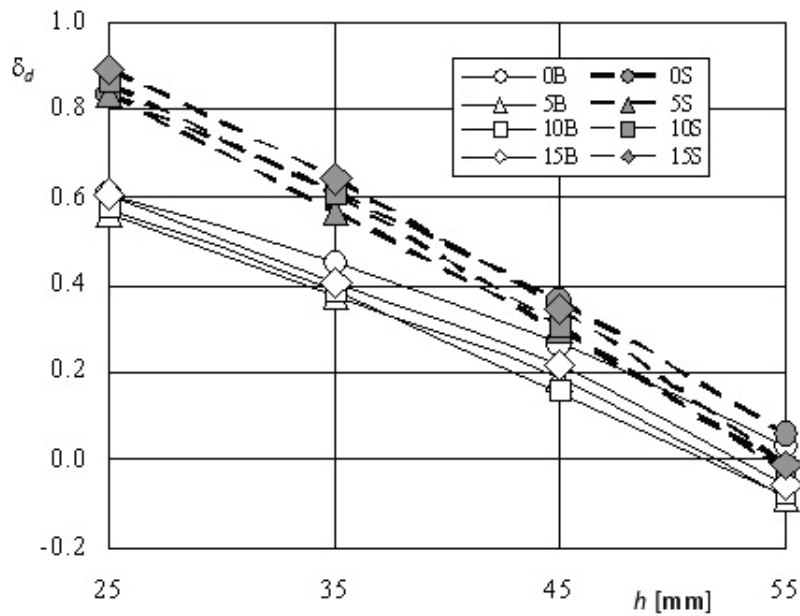


Fig. 16. Variación con la altura de la barrera, h , del cociente $\delta_d = c_d(h)/c_d(0)$ en el caso de ángulo de ataque nulo. Los símbolos identifican el alero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en la figura. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento.

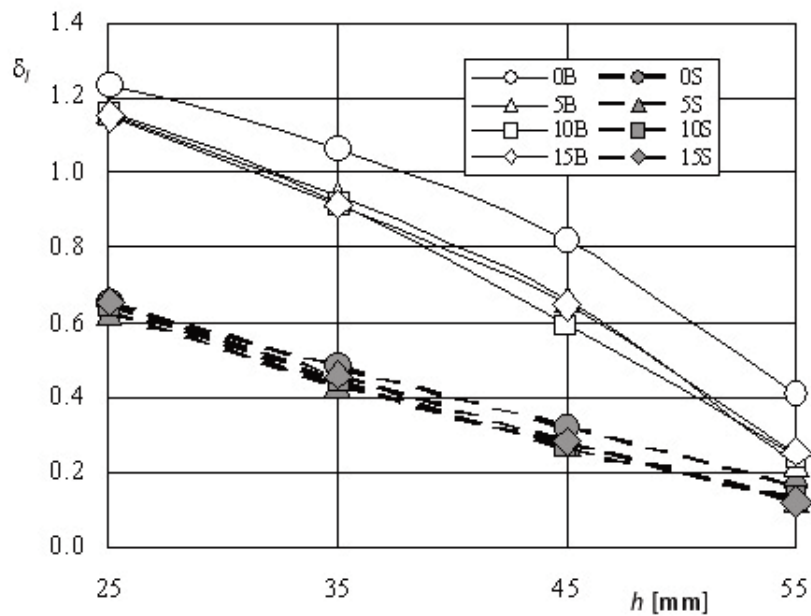


Fig. 17. Variación con la altura de la barrera, h , del cociente $\delta_l = c_l(h)/c_l(0)$ en el caso de ángulo de ataque nulo. Los símbolos identifican el alero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en la figura. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento.

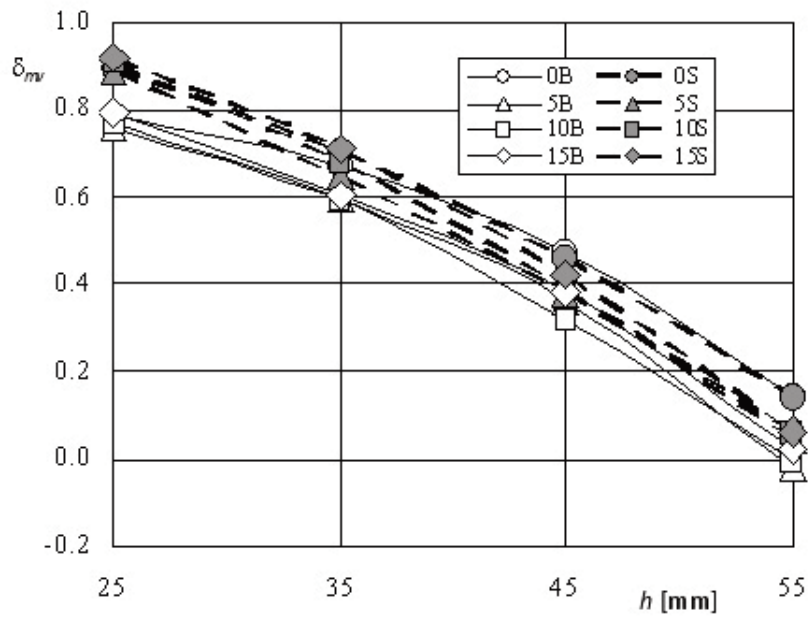


Fig. 18. Variación con la altura de la barrera, h , del cociente $\delta_{mv} = c_{mv}(h)/c_{mv}(0)$ en el caso de ángulo de ataque nulo. Los símbolos identifican el alero de la barrera de acuerdo con la leyenda incluida en la figura. B indica coche en la vía de barlovento y S en la de sotavento.

Bibliografía

Andersson, E., Häggström, J., Sima, M., & Stichel, S., Assessment of train-overturning risk due to strong cross-winds, Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit, 218, 213-223 (2004).

Baker, C.J. & Humphreys, N.D., Assessment on the adequacy of various wind tunnel techniques to obtain aerodynamic data for ground vehicles in cross winds, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 60, 49-68 (1996).

Baker, C.J., Dalley, S.J., Johnson, T., Quinn, A. & Wright, N.G., The slipstream and wake of a high-speed train, Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit, 215, 83-99 (2001).

Baker, C.J., Train aerodynamic forces and moments from moving model experiments, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 24, 227-251 (1986).

Barcala, M.A. & Meseguer J. An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of train vehicle on a bridge, Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit, 221, 487-494 (2007).

Barcala, M.A. & Meseguer, J. Visualization study of the influence of parapets on the flow around a train vehicle under cross wind, Proceedings of Comrail 2008, Eleventh International Conference on Computer System Design and Operations in the Railway and Other Transit Systems, WIT Press, Wessex (2008).

Baron, A., Mossi, M. & Sibilla, S., The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 89, 3657-401 (2001).

Bettle, J. Holloway, A.G.L. & Venart, J.E.S. A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge on a cross-wind, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 91, 573-592 (2003).

Chang-Hoon, S. & Warn-Gyu, P., Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel, Mech. Res. Communications. 30, 287-296 (2003)

Da Riva, I., Manzano, D. R., Bernal, L. P., Magermans, M., Resco, G., Rodríguez Pérez, A., de la Rosa, B., Sánchez Súcar, A. & Viviente, A., Comportamiento aerodinámico de barreras cortavientos. Capítulo 1 y Capítulo 2, Ing. Aeron. Astron., 116, 1-15 (1970).

Da Riva, I., Manzano, D. R., Bernal, L. P., Magermans, M., Resco, G., Rodríguez Pérez, A., de la Rosa, B., Sánchez Súcar, A. & Viviente, A., Comportamiento aerodinámico de barreras cortavientos. Capítulo 3 y Capítulo 4, Ing. Aeron. Astron., 117, 17-53 (1971).

Diedrichs, B., Aerodynamic calculations of crosswind stability of a high-speed train using control volumes of arbitrary polyhedral shape. Proceedings of BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, July, 20-24 (2008).

Diedrichs, B., On computational fluid dynamics modelling crosswind effects for high-speed rolling stocks, Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit, 217, 203-226 (2003).

Ding, Y., Sterling, M. & Baker, C.J., Unsteady crosswind forces on trains and corresponding aerodynamics parameters, Proc. 4th European & African Conf. Wind Eng. (EACWE-4), 11-15 July, Prague (2005).

Franchini, S., Pindado, S., Meseguer, J. & Sanz-Andrés, A., A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 93, 639-650 (2005).

Gautier, P.E., Tielkes, T., Sourget, F., Allain, E., Grab, M. & Heine, C., Strong wind risks in railways : the DEUFRAKO crosswind program, Proc. of WCRR 2003, 463-475 (2003).

Gerhardt, H.J. & Krüger, O., Wind and train driven air movements in train stations, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 74-763, 589-5970 (1998).

Hyeok-Bin K., Young-Whe P., Dong-Ho L. & Moon-Sang K., Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89, 1179-1195 (2001).

Imai, T., Fujii, T., Tanemoto, K., Shimamura, T., Maeda, T., Ishida, H. & Hibino, Y., New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, 1601-1610 (2002).

Johnson, T. Strong wind effects on railway operations - 16th October 1987, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 60, 251-266 (1996)

Khier, W. Breuer, M. & Durst, F., Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study, *Comp. Fluids*, 29, 179-195 (2000).

Kwon, H., Park, Y., Lee, D. & Kim, M., Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 89, 1179-1195 (2001).

Mancini, G., Cross-wind aerodynamic forces on rail vehicles - Wind tunnel experimental tests and numerical dynamic analysis, *WCRR 2003*, 513-522. (2003).

Martínez, A., Vega, E., Gaité J. & Meseguer, J., Pressure measurements on real high-speed trains travelling through tunnels, *Proceedings of BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, Milano, Italy, July, 20-24 (2008).

Matschke, G. & Heine, C. Full scale tests on side wind effects on trains. Evaluation of aerodynamic coefficients and efficiency of wind breaking devices, in *TRANSAERO. A European Initiative of Transient Aerodynamics for Railway System Optimisation*, B. Schulte-Werning, R. Gregoire, A. Malfati and G. Matschke (eds.), Springer, Berlin 27-38 (2002).

Matschke, G. Schulte-Werning, B., Measures and strategies to minimise the effect of strong cross-winds on high-speed trains, *Proc. of WCRR 1997*, 569-575 (1997).

Matschke, G., Heine, C. & Schulte-Werning, B., Full scale tests on side wind effects on train. Evaluation of aerodynamic coefficients and efficiency of wind breaking device. *Notes Num. Fluid Mech. Multidisciplinary Design*, 79, 27-38 (2002).

Myung-Kwan S., Hyuk-Chun N. & Chang-Koon C., A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions, *Eng. Struc.*, 25, 1611-1626 (2003).

Pindado, S. & Meseguer, J., Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 1133-1139 (2003).

Pindado, S., Meseguer, J., Martínez, A. & Franchini, S., Wind tunnel analysis on the influence of cantilever parapets on the wind loads of curved roofs, en "Advances in Fluid Mechanics V", V.A. Mendes, M. Rahman & C.A. Brebbia Eds., WIT Press, Wessex, 405-413 (2004).

Raghunathan, R.S., Kim, H.-D. & Setoguchi, T., Aerodynamics of high-speed railway trains, *Prog. Aerospace Sci.*, 38, 469-514 (2002).

Sanquer, S., Barré, C., Dufresne de Virel, M. & Cléon, L., Effect of cross winds on high-speed trains: development of a new experimental methodology, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 92, 535-545 (2004).

Santiago, J.L., Martín, F., Cuerva, A., Bezdenejnykh, N.A. & Sanz-Andrés, A., Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks, *Atmos. Environment*, 41, 6406-6420 (2007).

Sanz-Andrés, A. & Santiago-Prowald, J., Train-induced pressure on pedestrians, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, 10075-1015 (2000).

Sanz-Andrés, A., Guerra Sierra, A., Bezdenejnykh, N.A. & Cuerva, A., Barreras cortavientos y otras medidas atenuadoras de las emisiones de polvo en los puertos, *Organismo Público Puertos del Estado (Ed.)*, Madrid (2002).

Sanz-Andrés, A., Laverón, A., Baker, C.J. & Quinn, A., Vehicle induced loads on pedestrian barriers, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 92, 413-426 (2004).

Sanz-Andrés, A., Santiago-Prowald, J., Baker, C.J. & Quinn, A., Vehicle-induced loads on traffic sign panels, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 925-942 (2003).

Schetz, J., Aerodynamics of high-speed trains, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 33, 371-414 (2001).

Suzuki, M., Tanemoto, K. & Maeda, T., Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 91, 209-218 (2003).

Takanobu, O. & Kozo, F., Numerical investigation of the three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel, *Comp. Fluids*, 26, 209-218 (1997).

Vardy, A.E. & Reinke, P., Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation, *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, J. Rail Rapid Transit*, 213, 71-87 (1999).

Willemsen, E., High Reynolds number wind tunnel experiments on trains, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 69-71, 437-447 (1997).

William-Louis, M. & Tournier, C., A wave signature based method for the prediction of pressure transients in railway tunnels, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93, 521-531 (2005).