



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**Escuela Técnica Superior de**  
**Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**



## **TESIS DOCTORAL**

**Análisis del comportamiento aerodinámico de un vehículo  
de carretera en condiciones de viento lateral en torno a  
distintas infraestructuras, y propuesta de mejora de la  
seguridad del tráfico**

### **Autor**

Alejandro Alonso Estébanez

### **Directores**

Pablo Pascual Muñoz

Felipe Pedro Álvarez Rabanal

Santander, 2014





**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**  
**Escuela Técnica Superior de**  
**Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos**



## **TESIS DOCTORAL**

**Análisis del comportamiento aerodinámico de un vehículo  
de carretera en condiciones de viento lateral en torno a  
distintas infraestructuras, y propuesta de mejora de la  
seguridad del tráfico**

(Analysis of the aerodynamic performance of a road vehicle in crosswind conditions around different infrastructures, and proposal to improve traffic safety)

### **Autor**

Alejandro Alonso Estébanez

### **Directores**

Pablo Pascual Muñoz

Felipe Pedro Álvarez Rabanal

Santander, 2014



## **Agradecimientos**

El desarrollo de esta Tesis Doctoral no hubiera sido posible sin la colaboración y financiación aportada por las siguientes entidades y grupos empresariales:

- ✓ OHL Concesiones, Iridium, Abertis, Indra, SICE, OHL, Dragados, Geocisa, GMV, Asfaltos Augusta, Hidrofersa, Siegrist y Moreno, PyG, CPS, Asociación Española de la Carretera, Torre de Comares.
- ✓ Swanson Analysis Inc. (ANSYS Workbench).

Un muy sincero agradecimiento a mis Directores, Pablo y Felipe por su paciencia, apoyo y dedicación, especialmente en los momentos difíciles donde las fuerzas para seguir decaían. También me gustaría dar las gracias a los grupos de investigación GITECO (Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción de la Universidad de Cantabria) y GICONSIME (Grupo de Investigación de la Construcción Sostenible, Simulación y Ensayo de la Universidad de Oviedo) por su gestión y por proporcionarme los medios e instalaciones necesarios para llevar a cabo este trabajo.

No puedo olvidarme de mis compañeros con los que he compartido tantas conversaciones y momentos divertidos y que también han puesto su granito de arena en este trabajo.

No puedo olvidarme de dar las gracias a Mar por su colaboración durante la campaña de ensayos experimentales y su paciencia.

Todo esto no hubiera sido posible sin el apoyo anímico de mi familia y mi pareja, ¡que paciencia habéis tenido conmigo!. Por último, quiero dar las gracias a todas aquellas personas que se me han podido olvidar y me han ayudado durante el desarrollo de este trabajo.



## **Resumen**

La acción del viento lateral sobre los vehículos circulando por una carretera puede afectar negativamente a su estabilidad y, como consecuencia, comprometer la seguridad de los usuarios de las vías de transporte. En base a lo expuesto se ha planteado el desarrollo de este trabajo, con la finalidad de reducir el riesgo de accidente potenciado por la acción del viento lateral. Para alcanzar dicha meta, se han establecido una serie de objetivos que se pueden englobar en dos líneas de actuación: por un lado aportar información que pueda ser utilizada por las autoridades responsables a la hora de tomar acciones correctoras frente a condiciones adversas de viento lateral, y por otro lado, proponer medidas de mejora de la seguridad del tráfico para las condiciones eólicas ya mencionadas en base a resultados que las avalen.

El trabajo realizado en esta tesis doctoral parte del desarrollo de los fundamentos teóricos (capa límite terrestre, aerodinámica de un vehículo, ensayos en túnel aerodinámico y dinámica de fluidos computacional), cuya comprensión permite acometer las siguientes tareas aplicando tanto técnicas experimentales como numéricas. Los datos obtenidos en la campaña de ensayos experimentales desarrollada en el túnel aerodinámico cumplen dos funciones: por un lado aportan información que permite alcanzar los objetivos marcados y por otro actúan a modo de referencia durante la validación de los modelos numéricos. El proceso de validación de los modelos numéricos permite determinar valores a especificar y opciones a seleccionar, durante la etapa de construcción de la malla del dominio fluido y en la configuración asociada al modelo de turbulencia.

Aplicando estas dos técnicas (experimentales y numéricas) se obtienen las relaciones entre los coeficientes aerodinámicos del vehículo causantes de un posible accidente de vuelco y la dirección de viento en torno a distintos tipos de perfiles del terreno. Además, se estudia la influencia del tablero de un viaducto sobre los coeficientes aerodinámicos para una dirección relativa de viento perpendicular al sentido de circulación de los vehículos. A continuación, se analiza la eficacia de varios modelos de barreras cortaviento instaladas en distintas infraestructuras con el fin de reducir la afección del viento lateral sobre un vehículo. Además, se estudia la influencia de distintos

parámetros relativos a la geometría y disposición de las barreras sobre los coeficientes aerodinámicos.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos y simulaciones mencionados en el párrafo anterior, se lleva a cabo un estudio adicional, el cual consiste en analizar el efecto de los parámetros geométricos de las infraestructuras sobre la aerodinámica del vehículo aplicando las técnicas estadísticas del diseño de experimentos (DOE, en inglés Design Of Experiments). A continuación, y como parte del estudio, se optimiza la geometría de dos tipos de infraestructuras, terraplén y tablero de viaducto con cajón, empleando los modelos numéricos validados y definiendo como función objetivo a minimizar el coeficiente de momento de vuelco. Los resultados obtenidos en dicho estudio permiten desarrollar modelos matemáticos de sencilla aplicación que relacionan los coeficientes aerodinámicos que actúan sobre el vehículo con parámetros representativos de la geometría de las infraestructuras.

A partir de los resultados obtenidos queda demostrado que la seguridad y el confort del tráfico en las vías de transporte bajo la acción del viento lateral pueden ser mejorados desde el dimensionamiento y configuración de las distintas infraestructuras analizadas. Además, en base a la buena concordancia exhibida entre los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales y el modelado numérico, se puede afirmar que utilizar códigos CFD en combinación con ensayos experimentales en estudios aerodinámicos permite reducir parte de los costes derivados del desarrollo de ensayos en túneles de viento. Como futuras líneas de investigación, se proponen el estudio de nuevos escenarios críticos para la estabilidad de los vehículos y el desarrollo de nuevos sistemas de protección, así como la realización de ensayos de campo en torno a las infraestructuras analizadas que fortalezcan en mayor medida la metodología aplicada en este estudio.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>I</b>
<b>NOMENCLATURA EN LATÍN .....</b>	<b>V</b>
<b>NOMENCLATURA EN GRIEGO .....</b>	<b>VII</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	4
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1. CIRCULACIÓN DEL AIRE EN LA ATMÓSFERA .....	9
2.1.1. <i>Capa límite planetaria.....</i>	9
2.1.2. <i>Distribución vertical de viento.....</i>	12
2.1.3. <i>Turbulencia atmosférica .....</i>	15
2.2. AERODINÁMICA DEL VEHÍCULO .....	17
2.2.1. <i>Fuerzas y momentos .....</i>	17
2.2.2. <i>Principales técnicas de estudio .....</i>	21
2.2.3. <i>Condiciones eólicas .....</i>	22
2.2.4. <i>Afección del viento lateral a la estabilidad de los vehículos .....</i>	24
2.3. ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE EL VEHÍCULO EN TORNO A DISTINTAS INFRAESTRUCTURAS .....	26
2.4. MÉTODOS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN FRENTE AL VIENTO .....	37
2.4.1. <i>Protocolos de actuación.....</i>	37
2.4.2. <i>Barreras cortaviento .....</i>	42
2.4.2.1. <i>Generalidades .....</i>	43
2.4.2.2. <i>Tipología de barreras.....</i>	44
2.4.2.3. <i>Parámetros constructivos.....</i>	52
2.4.2.4. <i>Capacidad de protección de las barreras cortaviento en las vías de transporte .....</i>	54
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS DE ESTUDIO .....</b>	<b>59</b>
3.1. TÚNEL AERODINÁMICO: FUNDAMENTOS.....	61
3.1.1. <i>Generalidades .....</i>	61
3.1.2. <i>Tipología de túneles aerodinámicos .....</i>	62
3.1.3. <i>Consideraciones previas al desarrollo de los ensayos experimentales .....</i>	66
3.2. FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	69

---

3.2.1. Generalidades .....	69
3.2.2. Propiedades características del flujo y del fluido .....	71
3.2.3. Ecuaciones gobernantes del movimiento de los fluidos.....	72
3.2.4. Tratamiento numérico de la turbulencia .....	72
3.2.4.1. Simulación numérica directa (DNS) .....	73
3.2.4.2. Simulación de grandes Eddys (LES) .....	74
3.2.4.3. Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en base a la descomposición de Reynolds (RANS).....	74
3.2.5. Tratamiento de la región del fluido próxima a superficies solidas.....	88
3.2.6. Métodos de resolución del problema numérico.....	89
3.2.6.1. Método de volúmenes finitos .....	91
<b>CAPÍTULO 4. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA .....</b>	<b>93</b>
4.1. ENSAYOS EN EL TÚNEL AERODINÁMICO .....	95
4.1.1. Instrumentación.....	95
4.1.2. Diseño y fabricación de las maquetas.....	98
4.1.2.1. Elección de escala.....	98
4.1.2.2. Propuesta de maquetas .....	100
4.1.3. Disposición experimental y procedimientos de medida.....	106
4.1.4. Validación de los ensayos .....	109
4.1.4.1. Perfil de velocidades en la cámara de ensayos .....	109
4.1.4.2. Semejanzas entre el modelo y el prototipo.....	113
4.2. MODELADO NUMÉRICO.....	117
4.2.1. Planificación de los casos analizados.....	117
4.2.2. Geometría de los modelos y condiciones de contorno.....	118
4.2.3. Construcción de la malla .....	123
4.2.4. Elección del modelo de turbulencia y del tamaño de malla.....	124
4.2.5. Configuración del diseño de experimentos .....	130
4.2.5.1. Terraplén .....	131
4.2.5.2. Tablero tipo cajón .....	133
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>135</b>
5.1. ACCIÓN DEL VIENTO LATERAL SOBRE UN VEHÍCULO CIRCULANDO POR DISTINTAS INFRAESTRUCTURAS.....	137
5.1.1. Perfiles del terreno.....	137
5.1.1.1. Coeficientes aerodinámicos del vehículo y características del flujo de aire.....	137
5.1.1.2. Optimización y análisis de sensibilidad del perfil de terreno tipo terraplén .....	141
5.1.1.3. Modelos de regresión obtenidos mediante ANSYS y SPSS.....	144
5.1.2. Tableros de viaductos .....	148

---

---

5.1.2.1. Coeficientes aerodinámicos del vehículo y características del flujo del aire .....	148
5.1.2.2. Optimización y análisis de sensibilidad del cajón de un tablero.....	150
5.1.2.3. Modelos de regresión obtenidos mediante ANSYS y SPSS .....	152
<b>5.2. BARRERAS CORTAVIENTO COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN FRENTE AL VIENTO LATERAL .....</b>	<b>155</b>
5.2.1. Capacidad de protección de distintos modelos de barreras cortaviento .....	155
5.2.2. Efecto de la permeabilidad .....	158
5.2.3. Optimización de un modelo de barrera.....	159
5.2.4. Modelos de regresión obtenidos mediante ANSYS y SPSS .....	163
5.2.5. Efecto del ángulo de inclinación de una barrera instalada en el tablero tipo cajón .....	167
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO.....</b>	<b>169</b>
6.1. CONCLUSIONES.....	171
6.2. FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO .....	173
<b>THESIS SUMMARY .....</b>	<b>175</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>185</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>197</b>
<b>A) PLANOS.....</b>	<b>199</b>
<b>A.I. PERFILES DE TERRENO.....</b>	<b>199</b>
<b>A.II. TABLEROS DE VIADUCTOS.....</b>	<b>203</b>
<b>A.III. BARRERAS CORTAVIENTO .....</b>	<b>209</b>



---

## Nomenclatura en Latín

$a$	Aceleración ( $m/s^2$ ).
$A$	Superficie de referencia del vehículo modelo ( $m^2$ ).
$A_L$	Área de la superficie lateral del vehículo ( $m^2$ ).
$A_S$	Área de la superficie superior del vehículo ( $m^2$ ).
$A_i^{x_j}$	Áreas de las superficies del volumen de control proyectadas en la dirección $x_j$ ( $m^2$ ).
$C_{f.Lateral}$	Coefficiente aerodinámico de la fuerza lateral.
$C_{f.Vertical}$	Coefficiente aerodinámico de la fuerza vertical.
$C_{m.Vuelco}$	Coefficiente aerodinámico del momento de vuelco.
$d$	Distancia horizontal entre el vehículo y el talud situado en su barlovento (m).
$f$	Factor fraccional, adimensional.
$F$	Fuerza (N).
$F_L$	Fuerza aerodinámica lateral (N).
$F_V$	Fuerza aerodinámica vertical (N).
$H$	Altura del vehículo estudiado (m).
$h_C$	Altura cajón de tablero (m).
$H_{Ref}$	Altura de referencia sobre el suelo (m).
$I_u$	Intensidad de turbulencia media en la dirección del flujo de aire (%).
$k$	Energía cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ ).
$k_k$	Constante de Von Kármán (0.4).
$l_u$	Escala de longitud turbulenta (m).
$L$	Longitud de referencia del modelo de vehículo (m).
$m$	Masa (kg).
$M_a$	Número de Mach.
$M_V$	Momento de vuelco (N m).
$n$	Número de variables de entrada estudiadas.
$N$	Número de superficies del volumen de control.

---

$p$	Presión (Pa).
$Re$	Número de Reynolds.
$Re_t$	Número de Reynolds turbulento.
$R_T$	Ratio de viscosidad.
$R_y$	Número de Reynolds turbulento basado en la distancia a la pared.
$S$	Velocidad de deformación ( $s^{-1}$ ).
$S_{ij}$	Tensor de velocidad de deformación ( $s^{-1}$ ).
$t_\tau$	Espesor de las tablas de la barrera (m).
$u(z)$	Perfil de velocidades del flujo de aire longitudinal (m/s).
$\bar{u}$	Componente media de la velocidad del flujo de aire (m/s).
$u'$	Componente fluctuante de la velocidad del flujo de aire (m/s).
$u_i$	Componentes del vector velocidad (m/s).
$u^*$	Velocidad de fricción del flujo de aire (m/s).
$U$	Velocidad media del flujo de aire (m/s)
$V$	Volumen del elemento de control ( $m^3$ ).
$W$	Anchura del vehículo (m).
$w_C$	Anchura del cajón (m).
$w_\tau$	Anchura de las tablas de la barrera (m).
$r_i$	Variables de entrada codificadas.
$\vec{R}$	Matriz extendida de diseño para las variables de entrada incluyendo los niveles codificados.
$\vec{Y}$	Vector columna de valores para las variables respuesta calculados en cada caso definido en el DOE.
$\hat{Y}$	Variable respuesta estimada.
$y^+$	Distancia adimensional a la pared.
$z_0$	Longitud de rugosidad aerodinámica (m).
$z_{ref}$	Altura de referencia (m).

---

---

## Nomenclatura en Griego

$\alpha$	Exponente de la ley de Hellman, adimensional.
$\beta_T$	Ángulo de inclinación taludes del perfil del terreno tipo terraplén (°).
$\gamma_V$	Dirección relativa de viento (°).
$\vec{\xi}_{OLS}$	Vector coeficientes de regresión.
$\delta_{ij}$	Delta de Kronecker ( $\delta_{ij}=1$ si $i=j$ y $\delta_{ij}=0$ si $i \neq j$ ).
$\varepsilon$	Disipación de energía cinética turbulenta ( $m^2/s^3$ ).
$\theta_C$	Ángulo del cajón del tablero (°).
$\theta_P$	Ángulo de inclinación de la pantalla situada en el tablero tipo cajón (°).
$\lambda_\theta$	Parámetro del gradiente de presión.
$\rho$	Densidad de un fluido ( $kg/m^3$ ).
$\mu$	Viscosidad dinámica de un fluido (Pa s).
$\mu_t$	Viscosidad dinámica turbulenta (Pa s).
$\nu$	Viscosidad cinemática de un fluido ( $m^2/s$ ).
$\nu_t$	Viscosidad cinemática turbulenta ( $m^2/s$ ).
$\tau_0$	Tensión de cizalla superficial (Pa).
$\phi(x_i, t)$	Variable turbulenta.
$\bar{\phi}(x_i)$	Componente media de la variable turbulenta.
$\phi'(x_i, t)$	Componente fluctuante de la variable turbulenta.
$\phi_i$	Valores de las variables en las superficies del volumen de control.
$\omega$	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta específica ( $s^{-1}$ ).
$\Omega_{ij}$	Tensor de vorticidad ( $s^{-1}$ ).



## 1.1. PROBLEMÁTICA

La seguridad del tráfico en torno a las vías de transporte se puede ver seriamente comprometida en condiciones de fuertes vientos laterales al sentido de circulación de los vehículos (Figura 1). Esto ha quedado patente en distintas investigaciones en las que se describen accidentes reales en distintas ubicaciones alrededor del mundo (Baker y Reynolds, 1992; Imai et al., 2002; Chen y Chen, 2011; Shao et al., 2011). El problema planteado afecta especialmente a vehículos que presentan una mayor superficie lateral sobre la que incide el viento, como pueden ser: camiones, caravanas, remolques y ferrocarriles. Este hecho ha motivado el interés de la comunidad investigadora por el estudio del efecto del viento lateral sobre este tipo de vehículos (Coleman y Baker, 1990; Bettle et al., 2003; Bocciolone et al., 2008).



**Figura 1. Accidentes de vehículos inducidos por el efecto del viento lateral en el ámbito del transporte ferroviario y de carretera (Rolén et al., 2004; Shao et al., 2011).**

Por otra parte, una mayor consciencia del problema a nivel gubernamental ha motivado el desarrollo en los últimos años de normativas, especificaciones técnicas y directrices, tanto a nivel nacional como de la comunidad Europea (DIRECTIVE 2008/57/EC; COMISION DECISION 2012/464/EU; UNE EN 14067-6, 2010). Dichos documentos establecen, entre otros aspectos, los procedimientos de evaluación de la estabilidad de un vehículo ferroviario bajo la acción del viento lateral. Esta regulación en torno al sector ferroviario se debe principalmente a su propio desarrollo tecnológico ya que el peso de los vehículos ferroviarios ha disminuido y la velocidad de circulación ha aumentado. Sin embargo, no se ha desarrollado una normativa similar aplicada al transporte por carretera.

En general, algunas de las medidas adoptadas frecuentemente para reducir el riesgo de accidente en condiciones adversas de viento lateral, son: limitar temporalmente la

velocidad de circulación, cerrar temporalmente una vía de transporte, desarrollar un sistema de alarma o instalar un sistema de protección (Baker, 1987; Cheli et al., 2010). No obstante, durante este estudio se ha encontrado una carencia de normativa que especifique los criterios técnicos bajo los cuales se adoptan estas medidas, y que den respuesta a preguntas como: ¿Sobre qué infraestructuras se deben adoptar medidas?; ¿Cuál es la medida óptima para cada caso?; ¿Cuáles son las condiciones de viento lateral que determinan la activación de un protocolo de actuación?;etc.

Las consecuencias de la actuación de viento lateral en las vías de transporte pueden tener influencia no solo en la seguridad, sino también en el confort de los usuarios y en las posibles pérdidas económicas derivadas del cierre de una vía de transporte. A la vista de las posibles consecuencias que puede ocasionar sobre el tráfico la acción del viento lateral, se propone el desarrollo de esta Tesis Doctoral titulada “*Análisis del comportamiento aerodinámico de un vehículo de carretera en condiciones de viento lateral en torno a distintas infraestructuras, y propuesta de mejora de la seguridad del tráfico*”. En este estudio no solo se ha mejorado el conocimiento en torno a la problemática expuesta, sino que además se ha propuesto una medida de mejora de la seguridad del tráfico en condiciones de viento lateral desde un enfoque distinto al utilizado en la práctica.

El marco de desarrollo de esta Tesis Doctoral fue el proyecto OASIS (Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles), cuyas actividades comienzan en el año 2008 y finalizan en el 2012. Este es el primer proyecto español para el diseño de la autopista del futuro, y fue promovido e impulsado por diferentes grupos empresariales (OHL Concesiones, Iridium, Abertis, Indra, SICE, OHL, Dragados, Geocisa, GMV, Asfaltos Augusta, Hidrofersa, Siegrist y Moreno, PyG, CPS, Asociación Española de la Carretera, Torre de Comares), siendo seleccionado por el CDTI en su programa CENIT (Consortios Estratégicos Nacionales en Investigación Técnica) para mejorar los niveles de seguridad, movilidad y sostenibilidad en las autopistas.

## **1.2. OBJETIVOS**

El desarrollo de esta Tesis tiene como meta aportar información técnica que ayude a mejorar la seguridad de los usuarios de las vías de transporte en condiciones adversas de viento lateral. En base a esta meta se han establecido los siguientes objetivos:

- ✓ Estudiar las distintas investigaciones desarrolladas hasta la fecha, con la finalidad de diseñar un estudio que aporte nueva información al estado de la cuestión.
- ✓ Analizar el efecto de diferentes infraestructuras sobre los coeficientes aerodinámicos de un vehículo implicados en un posible accidente de vuelco causado por la acción lateral del viento.
- ✓ Analizar la influencia de los distintos tipos de barreras cortaviento propuestas sobre las propiedades aerodinámicas del vehículo para posteriormente optimizar su configuración estructural.
- ✓ Plantear una propuesta orientada a reducir el riesgo de accidentes en vehículos que circulen en condiciones adversas de viento lateral, avalada por datos obtenidos mediante el uso de técnicas numéricas y experimentales.
- ✓ Desarrollar modelos estadísticos que permitan predecir ciertas propiedades aerodinámicas del vehículo analizado, en función de parámetros representativos de la geometría asociada a elementos estructurales que conforman las vías de transporte.

### 1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

En este apartado se describen de forma resumida las tareas que han sido necesarias realizar para la consecución de los objetivos establecidos en el apartado anterior. Dichas tareas quedan enmarcadas en los distintos capítulos, que proporcionan al documento la siguiente estructura:

**Capítulo 1 "Introducción":** En el presente capítulo se expone en primer lugar la problemática generada como consecuencia de las condiciones adversas de viento lateral, que ha dado lugar al desarrollo de esta Tesis. En segundo lugar se establecen unos objetivos que permiten paliar dichas consecuencias.

**Capítulo 2 "Estado del Arte":** En este capítulo, se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Repasar los fundamentos teóricos necesarios para poder abordar las investigaciones desarrolladas en torno al efecto adverso del viento lateral con una mayor capacidad de comprensión.
- Exponer y analizar los estudios realizados sobre la afección del viento lateral en el transporte ferroviario y de carretera en torno a distintas infraestructuras.
- Detallar las principales propuestas y medidas correctoras adoptadas desde distintos estudios para reducir el riesgo de accidente bajo condiciones adversas de viento lateral.

**Capítulo 3 "Materiales y métodos de estudio":** En este capítulo se establecen las bases teóricas, a nivel conceptual y de formulación, en las que se sustentan las técnicas tanto experimentales como numéricas empleadas en el desarrollo de esta Tesis Doctoral que permiten alcanzar los objetivos marcados.

**Capítulo 4 "Configuración experimental y numérica":** Este capítulo se desglosa en dos bloques. En el primero de ellos se detallan los aspectos considerados y las medidas adoptadas que han permitido llevar a cabo la campaña de ensayos experimentales en el túnel aerodinámico; y en el segundo se describe el

procedimiento seguido para el desarrollo de los modelos numéricos mediante el software de simulación numérica FLUENT-ANSYS.

**Capítulo 5 "Resultados y discusión":** En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante técnicas experimentales y numéricas. Concretamente, se muestra la influencia que sobre propiedades aerodinámicas del vehículo pueden ejercer tanto diferentes estructuras que pueden formar parte de las carreteras, como las posibles condiciones eólicas a las que puedan verse sometidas.

**Capítulo 6 "Conclusiones y futuras líneas de estudio":** En este capítulo se recogen las conclusiones más relevantes que se han extraído tras el análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, y se proponen posibles líneas de investigación a desarrollar en un futuro que sirvan para complementar y ampliar el trabajo realizado en esta Tesis.







## **2.1. CIRCULACIÓN DEL AIRE EN LA ATMÓSFERA**

Las corrientes de aire en la atmosfera a escala global en forma de vientos atmosféricos se deben principalmente al calentamiento no uniforme de la superficie terrestre y de la atmosfera por parte del sol, como consecuencia de la rotación del planeta. En relación a los vientos originados a ciertas alturas por encima de 1000 m de altitud, donde los efectos de fricción con la superficie son despreciables, las principales fuerzas que los activan tienen su origen en el efecto de Coriolis y los gradientes de presión (Meseguer et al., 2001). Los vientos locales generados en la región próxima a la superficie terrestre se encuentran muy condicionados por factores como, por ejemplo, la no homogénea distribución de zonas acuáticas y de tierras, que causan fuertes gradientes de temperatura en esta región de aire, y las propias particularidades topográficas del terreno. Para estudios dentro del campo de la aerodinámica civil tiene especial interés el conocimiento de la región atmosférica en las proximidades de la superficie terrestre.

### **2.1.1. Capa límite planetaria**

La capa límite planetaria define la zona de transición entre el viento geostrófico y la superficie terrestre, y su espesor se sitúa en torno a un 1 km (Meseguer et al., 2001). Stull (1988) define esta región como la parte de la troposfera, que es directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre y responde a las perturbaciones causadas por la superficie con una escala de tiempos de una hora o menos. Los sucesivos enfriamientos y calentamientos de la superficie terrestre causados por la radiación solar y una absorptividad del suelo en torno al 90%, activan procesos de transporte de ciertas propiedades del aire por medio de mecanismos como la turbulencia.

En general, la capa límite terrestre es de menor espesor en las regiones de altas presiones características de los anticiclones que en las regiones de bajas presiones representativas de las borrascas. En regiones de altas presiones sobre la superficie terrestre la capa límite manifiesta una clara evolución de su estructura a lo largo del periodo diurno y nocturno, la cual marcará su comportamiento en las distintas regiones (Figura 2). La denominación de las regiones más relevantes de la capa límite planetaria,

atendiendo al comportamiento del flujo de aire, es la siguiente: capa de mezcla, capa residual y capa estable (Stull, 1988).

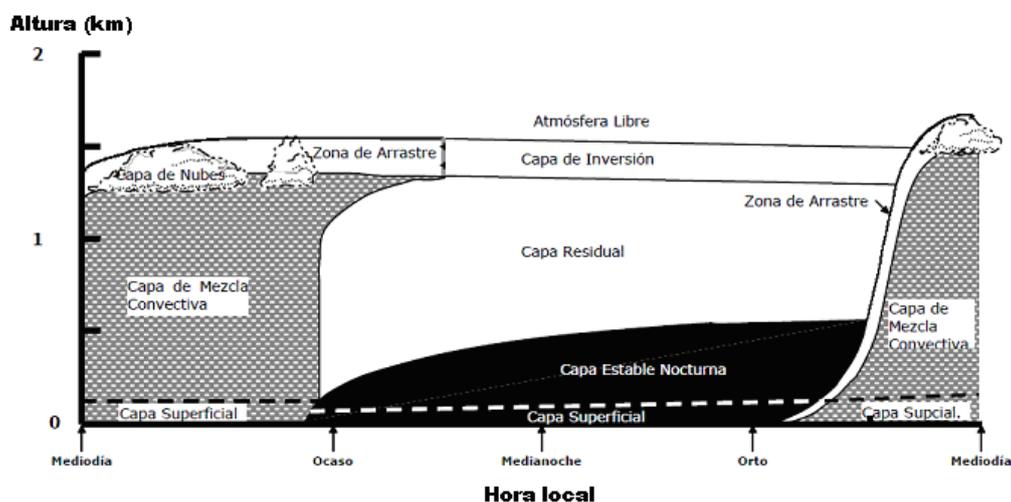


Figura 2. Estructura de la capa límite planetaria en regiones de altas presiones (Stull, 2000).

La capa superficial, ubicada en la porción de la capa límite planetaria más próxima al suelo con un espesor en torno al 10% del de la capa límite planetaria, (Oke, 1987) se encuentra formando parte tanto de la capa estable como de la capa de mezcla. Dentro de la capa superficial, en los primeros centímetros de aire desde el suelo se presenta una capa fina conocida como capa interfacial o microcapa, donde el transporte molecular predomina sobre el turbulento.

La turbulencia generada en la capa de mezcla suele deberse a fenómenos convectivos como consecuencia de la irradiación solar. No obstante, la cizalla del viento presente habitualmente en la parte superior de la capa de mezcla actúa también como fuente de turbulencia. La capa de mezcla en los días despejados comienza a crecer desde media hora después de la salida del sol, alcanzando su máxima profundidad a última hora de la tarde. Debido a los flujos turbulentos característicos de la capa de mezcla, esta no presenta elevados gradientes de momento, calor y humedad.

En torno a media hora antes de la puesta de sol las corrientes convectivas cesan su actividad y la turbulencia disminuye, dando paso a una capa de aire denominada residual (Stull, 1988). El estado inicial de las variables atmosféricas responde a la herencia dejada por la capa de mezcla previa. La capa residual se estratifica neutralmente, resultando en una intensidad de turbulencia igual en todas las direcciones.

El ritmo de crecimiento de la capa de mezcla experimenta un aumento al alcanzar la parte superior de la misma la base de la capa residual.

A medida que la noche progresa, la región inferior de la capa residual experimenta cambios debido al contacto con la superficie terrestre, dando lugar a la designada en la Figura 2 como capa estable. En esta región de la atmosfera el aire resulta estadísticamente bastante estable, lo que se traduce en una intensidad de turbulencia baja. Por otro lado la velocidad del viento será más baja que en otras regiones, ya que la velocidad media del viento durante la noche suele ser más baja que durante el día, aunque en ocasiones se generan vientos que alcanzan velocidades geostróficas conocidos como chorro de nivel-bajo o chorro nocturno (Stull, 1988). Este chorro nocturno tiende a estimular la generación de turbulencia durante cortos periodos de tiempo, generándose mezcla de propiedades escalares. La capa estable se puede formar durante el día si la superficie del terreno se encuentra más fría que el aire que hay sobre ella, como por ejemplo cuando las masas de aire caliente son advectadas. Aparte de la estructura de la capa límite descrita, existen otras subdivisiones independientes de la variable tiempo como la mostrada en la Figura 3. Concretamente, el tráfico rodado por carretera se encuentra inmerso generalmente en la capa superficial, cuya profundidad alcanza los 100 m (Figura 3). Por lo tanto las características principales de dicha capa se deberán considerar de cara al desarrollo del estudio que posteriormente se expondrá.

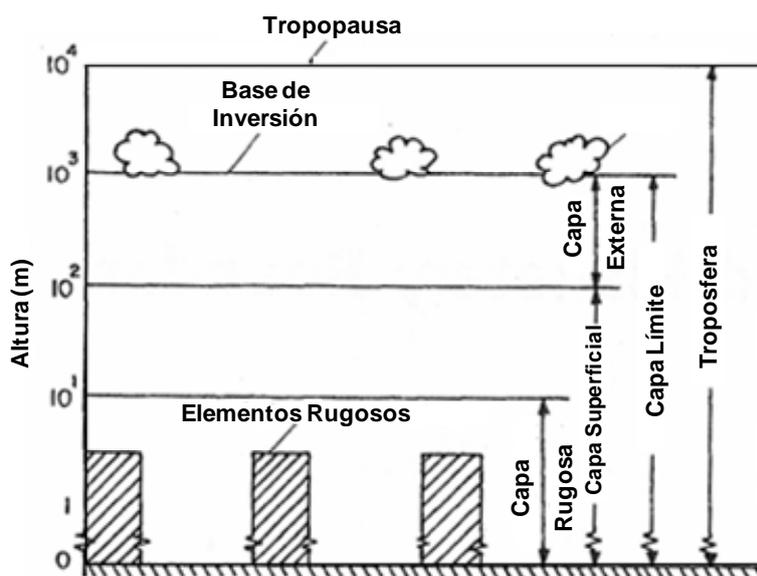


Figura 3. Extensión y localización de las capas de la atmosfera que constituyen la troposfera (Arya, 1998).

### 2.1.2. Distribución vertical de viento

En la capa límite planetaria, la distribución vertical del viento sobre una superficie homogénea depende principalmente de los siguientes factores: gradientes horizontales de presión y temperatura, fricción superficial, características de la superficie terrestre, rotación terrestre y estratificación térmica (Arya, 1998). En presencia de un determinado flujo geostrófico, debido a la viscosidad del aire y a la presencia de una superficie, bien de agua o de tierra, la velocidad del flujo de aire se vuelve nula en contacto con dicha superficie (Figura 4). Esta velocidad aumenta con la altura a medida que las fuerzas o tensiones de fricción se debilitan, hasta una altura en la que la velocidad prácticamente se estabiliza.

Concretamente, se le denomina nivel geostrófico a la altura donde las fuerzas originadas por la aceleración de Coriolis y el gradiente de presión están en equilibrio, designado como  $Z_{geo}$  en la Figura 4. La altura de gradiente  $Z_g$  delimita la región conocida como capa límite atmosférica (Atmospheric boundary layer, ABL) y se suele definir como el nivel en el que los efectos de la tensión de cizalla superficial se pueden despreciar y la velocidad alcanza su máxima magnitud o permanece constante (designado en la Figura 4 como  $U_g$ ). En la capa superficial atmosférica (Atmospheric superficial layer, ASL) las variaciones de los flujos turbulentos son muy pequeñas, motivo por el que se la suele denominar capa de flujo constante. En esta capa el perfil de velocidad media viene expresado según la bien conocida distribución logarítmica (Cermak y Isyumov, 1998):

$$u(z) = \left( u^* / k_k \right) \ln(z / z_0) \quad (1)$$

en la que la velocidad de fricción  $u^*$  se puede determinar a partir de la expresión  $(\tau_0 / \rho)^{1/2}$ .

Otra expresión empírica utilizada habitualmente para describir la variación de la velocidad con la altura en un determinado lugar es la ley potencial propuesta por Hellman (1916), que se presenta a continuación:

$$\frac{u(z)}{u(z_r)} = \left( \frac{z}{z_r} \right)^{1/\alpha} \quad (2)$$

El valor del exponente  $1/\alpha$  depende principalmente de la rugosidad de la superficie límite, en este caso la superficie terrestre.

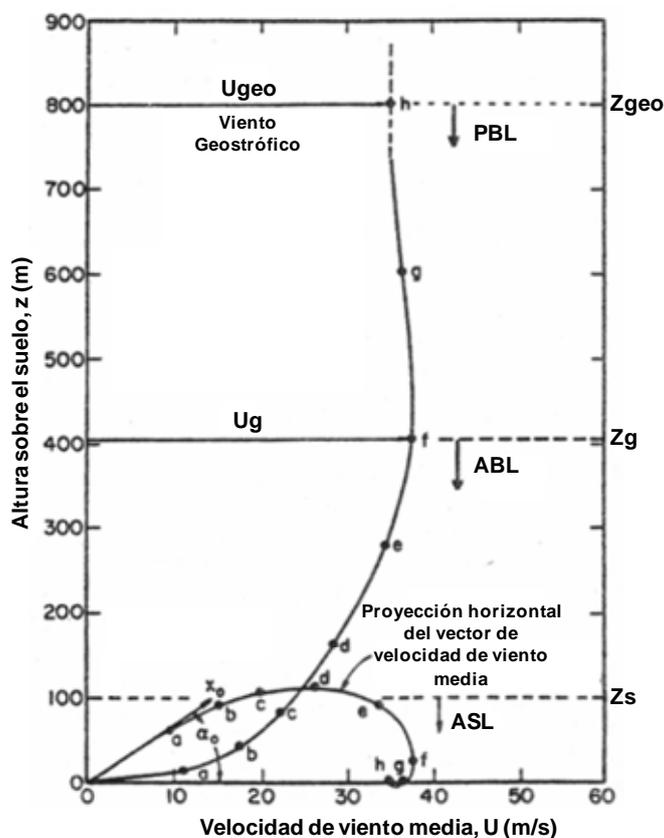


Figura 4. Ejemplo de capa límite planetaria sin corrientes térmicas ascendentes, según el modelo de Lettau (1962).

El movimiento de una partícula de fluido en el interior de la capa límite planetaria depende de fuerzas de distinta índole: fuerzas de Coriolis, fuerzas de Presión, fuerzas centrífugas y fuerzas de fricción. La fuerza de Coriolis tiende a incrementarse con la altura mientras que la fuerza de fricción tiende a disminuir (Meseguer et al., 2001). Estas variaciones en el módulo de algunas fuerzas obligan al viento a cambiar de dirección con la altura hasta establecer un nuevo equilibrio en el balance de fuerzas actuando sobre las partículas de fluido.

La velocidad del viento en la atmosfera se puede dividir en tres categorías (Stull, 1988): **viento medio**, **ondas de viento** y **turbulencia** (Figura 5). Tanto las ondas de viento como la turbulencia suelen presentarse superpuestas al viento medio. El viento medio suele ser el medio transporte en la dirección horizontal de parámetros tales como humedad, calor, momento y contaminantes. Sin embargo en la dirección vertical el mecanismo de

transporte suele ser la turbulencia. Velocidades de viento horizontal del orden de 2 a 10 m/s son muy comunes en la capa límite, mientras que las velocidades del viento vertical normalmente son mucho más pequeñas, del orden de milímetros a centímetros por segundo (Stull, 1988).

Las ondas de viento suelen presentarse durante la noche, siendo un medio de transporte eficaz para cantidades de momento pero no así para humedad, calor y contaminantes. Las tensiones en el viento medio o el flujo medio circulando sobre obstáculos pueden originar ondas de viento (Stull, 1988). En flujos turbulentos, suele ser habitual expresar las variables como la suma de una parte media y una parte fluctuante según la siguiente expresión (Arya, 2001):

$$u = u' + \bar{u} \quad (3)$$

Tanto el viento medio como turbulento incidirán sobre el tráfico en cualquier situación mientras que las ondas de viento comprometerán la estabilidad de los vehículos bajo ciertas condiciones climáticas. La componente turbulenta o las ondas de viento influirán sobre los valores transitorios y promedios de los coeficientes aerodinámicos de los vehículos (Cheli et al., 2011b; Bocciolone et al., 2008).

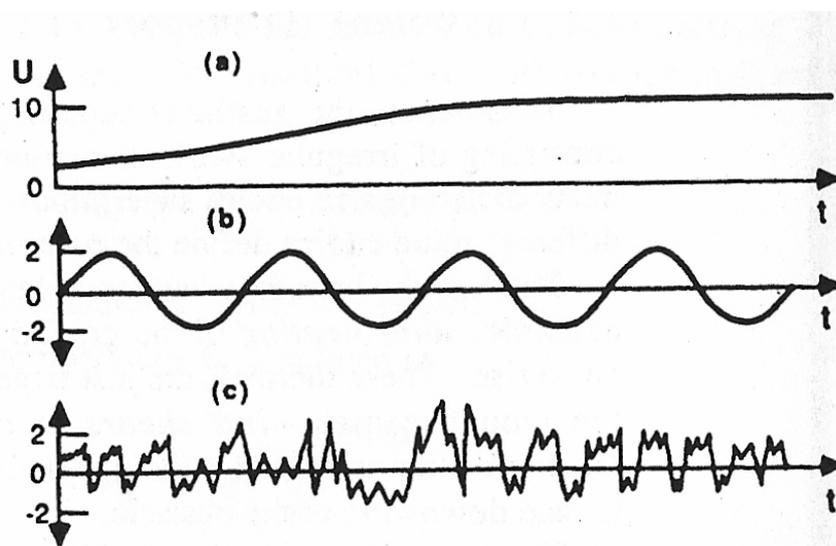


Figura 5. Componente de la velocidad de viento  $U$  en la dirección  $x$ : (a) viento medio, (b) ondas de viento y (c) turbulencia (Stull, 1988).

### 2.1.3. Turbulencia atmosférica

La turbulencia superpuesta al viento medio puede visualizarse en forma de remolinos de movimiento irregular conocidos como Eddies o vórtices. La superposición de muchos vórtices de distintas escalas da forma a la turbulencia presente en el flujo medio. En el espectro de turbulencia se puede apreciar la energía relativa de las distintas escalas de los vórtices que componen la turbulencia atmosférica. Gran parte de la turbulencia atmosférica presente en la capa límite puede tener un origen mecánico, debido por ejemplo a la fricción entre la superficie del suelo y las capas de aire próximas al mismo, o un origen térmico, como ocurre en las corrientes térmicas ascendentes desde la superficie del suelo.

Las mayores escalas de vórtices en la capa límite planetaria pueden alcanzar diámetros desde los 100 m a los 3000 m (Stull, 1988). Los vórtices de menor tamaño se mantienen gracias a la energía extraída de los más grandes, dando lugar al proceso denominado como *cascada de energía*. Mediante este proceso se produce una transferencia de energía desde las escalas mayores a las menores, las cuales pierden su energía en forma de calor por medio de la viscosidad molecular. El espectro de turbulencia consiste pues en una representación de la energía asociada a las distintas escalas de vórtices superpuestos, que vienen definidas como periodos de tiempo o frecuencias asociados a una variación específica de la velocidad de viento. La Figura 6 muestra un ejemplo de un espectro de medidas de velocidad de viento cerca de la superficie terrestre registrado por Van der Hoven (1957).

Las máximas medidas en el eje de ordenadas registradas en el espectro indican cuáles son los vórtices que contribuyen en mayor medida a la energía cinética turbulenta atmosférica. Los máximos situados a la izquierda del gráfico (grandes escalas) corresponden a cambios en la velocidad del viento asociados a la llegada de un sistema climático. Los picos localizados a las 24 h representan los ciclos día-noche, ya que la velocidad de viento aumenta durante el día y disminuye en la noche. La región ubicada a la derecha del gráfico (pequeñas escalas) corresponde a los vórtices que componen la turbulencia atmosférica cuyos periodos de retorno se encuentran comprendidos entre 10 s y 10 min (Stull, 1988).

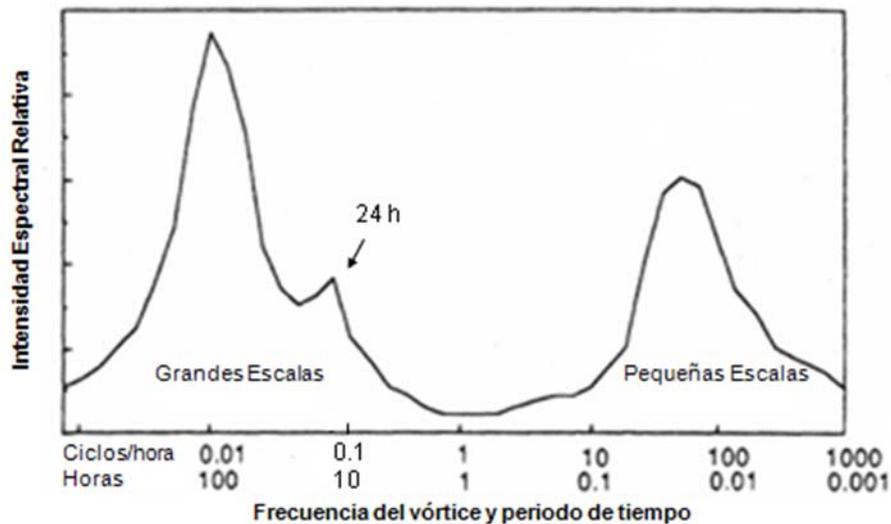


Figura 6. Representación espectral de medidas de velocidad de viento tomadas cerca de la superficie terrestre (Van der Hoven, 1957).

Aunque ninguna definición de turbulencia haya podido ser ofrecida hasta la actualidad, existen amplios acuerdos respecto a sus principales atributos. En Lumley y Panofsky (1964), se han establecido las siguientes características representativas de la turbulencia:

- La turbulencia es estocástica por naturaleza.
- La turbulencia es tridimensional. No obstante, es posible tratar algunos vórtices como bidimensionales, tales como los ciclones y anticiclones.
- Dos partículas cualesquiera que están libres en un ambiente turbulento tienden a distanciarse a medida que transcurre el tiempo.
- La turbulencia es por naturaleza rotacional. La vorticidad es un atributo esencial.
- La turbulencia se disipa. La energía de la turbulencia tiende a pasar desde los grandes vórtices bien organizados a los pequeños vórtices e incluso al movimiento molecular.
- La turbulencia es un fenómeno de número de Reynolds ( $Re$ ) elevados.

Retornando al comportamiento aerodinámico de un vehículo, las cargas aerodinámicas que experimenta bajo la acción de un flujo de aire a velocidad constante no son independientes del nivel de turbulencia incidente, como así atestigua el estudio de Cheli et al. (2011b) y se expone en Bearman (2009). Esto se debe principalmente a que los

procesos de desprendimiento de capa límite desde la superficie del vehículo dependen entre otros factores de la intensidad de la turbulencia y, por lo tanto, la distribución de presiones así como las cargas aerodinámicas variarían con la misma.

## 2.2. AERODINÁMICA DEL VEHÍCULO

### 2.2.1. Fuerzas y momentos

Los patrones del flujo en torno al vehículo (simétrico o asimétrico) guardan una relación con las cargas aerodinámicas actuando sobre el mismo. De hecho, en Gohlke et al. (2007) se identifican dos vórtices en el lado a sotavento del vehículo en condiciones de viento lateral que afectan a la curva que define la relación entre el momento de guiñada y la dirección relativa de viento. Estos vórtices mejoran la estabilidad del vehículo para valores altos de la dirección de viento relativa al vehículo, ya que las variaciones del momento de guiñada resultan más suaves al cambiar la dirección de viento.

Bajo la acción de un flujo de aire simétrico  $\gamma_v = 0^\circ$  (Figura 7) respecto al plano longitudinal de un vehículo en movimiento, las fuerzas aerodinámicas actúan en la dirección de avance del vehículo ( $F_{frontal}$ ) y en la vertical ( $F_{vertical}$ ). Debido a la acción de estas fuerzas existe un momento de cabeceo respecto al eje  $y$  que actuará también sobre el vehículo, cuyo punto de referencia se suele situar a la mitad de la distancia entre los dos ejes de las ruedas y sobre la superficie de la carretera (Wolf-Heinrich, 1998).

En condiciones de flujo asimétrico  $\gamma_v \neq 0^\circ$  la presencia de viento cruzado añade una tercera componente a las fuerzas aerodinámicas ya mencionadas en la dirección transversal al avance del vehículo ( $F_{lateral}$ ). Como consecuencia de la  $F_{lateral}$ , el vehículo soporta dos nuevos momentos aerodinámicos con respecto al eje  $z$  ( $M_{guiñada}$ ) y con respecto al eje  $x$  ( $M_{vuelco}$ ). Por lo tanto un total de 6 componentes de fuerzas y momentos actuarán sobre el vehículo considerando los 3 ejes del sistema de coordenadas. Si dividimos estas componentes entre la presión dinámica del aire en la región del fluido sin perturbar,  $0.5 \cdot \rho \cdot U^2$ , y las dimensiones reales del vehículo, se obtienen unos coeficientes adimensionales independientes de la velocidad del flujo de aire y de las dimensiones reales del vehículo (4).

$$CF_i = \frac{F_i}{1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A} \quad (i = x, y, z) \quad (4)$$

$$CM_i = \frac{M_i}{1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot A} \quad (i = x, y, z) \quad (5)$$

Cuando el flujo es asimétrico el momento de guiñada puede actuar de dos modos, disminuyendo el ángulo  $\gamma_v$  al girar el vehículo con respecto al eje  $z$  o incrementándolo (Figura 7). En el primer caso el vehículo es aerodinámicamente estable, mientras que en el segundo caso es inestable. En la mayoría de turismos y camiones tipo cajón su comportamiento es aerodinámicamente inestable. Solo vehículos suficientemente largos y con alerones especiales en la zona trasera se comportan de un modo estable (Wolf-Heinrich, 1998).

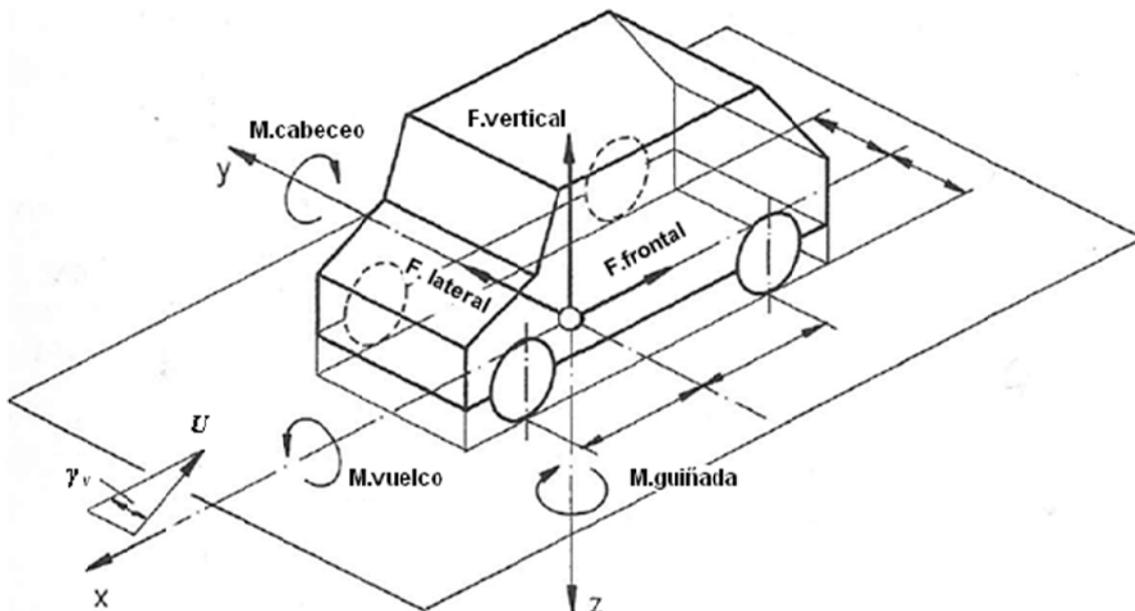


Figura 7. Fuerzas y momentos generales actuando sobre el vehículo con flujo de aire asimétrico (Wolf-Heinrich, 1998).

La geometría del vehículo influirá de manera determinante en el comportamiento aerodinámico del mismo, modificando las características del flujo de aire en sus proximidades. A su vez influirá de manera significativa sobre aspectos como el consumo de combustible, la estabilidad del vehículo, etc. Bajo estas premisas, diversos estudios han abordado la optimización de la geometría de los vehículos para tratar de mejorar sus prestaciones en lo que a aerodinámica se refiere (Heine y Matsche, 2001; Tsubokura et al., 2010; Gohlke et al., 2010; Cheng et al., 2012).

Cheng et al. (2012) definieron un parámetro adimensional para cuantificar el amortiguamiento de un vehículo sujeto a una oscilación en su cabeceo, permitiendo de este modo analizar el efecto de características geométricas de dicho vehículo sobre el amortiguamiento. Para llevar a cabo el estudio se utilizaron dos modelos de vehículo, A y B (Figura 8). El modelo B, más similar a un vehículo real, presentaba un coeficiente de amortiguamiento superior al modelo A en un 40.81%. El flujo de aire circulando bajo el vehículo afectó en mayor medida al amortiguamiento en ambos modelos, debido a que es la mayor superficie continua recorrida por el flujo de aire. En Tsubokura et al. (2010), también se analizaron las características de la estabilidad en el cabeceo para los mismos modelos de vehículo (Figura 8). En este estudio se indica que la principal fuente de influencia sobre la estabilidad en el cabeceo radica en las parejas de vórtices causados por las aristas indicadas en la Figura 8. En el modelo A, el flujo de aire pasando por encima de la zona central del maletero es relativamente bidimensional, quedando las dos parejas de vórtices claramente separadas de esta zona. Mientras, en el modelo B se presenta un fuerte flujo cruzado sobre el centro del maletero debido a la inclinación de los vórtices originados en las aristas.

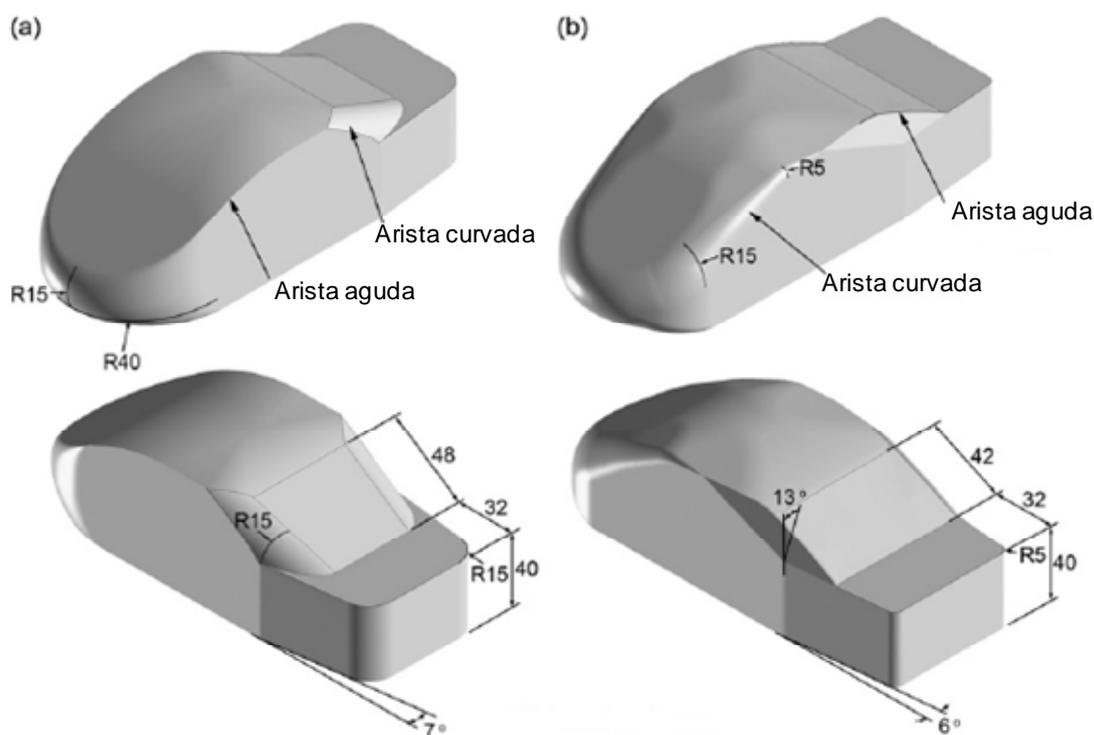


Figura 8. Modelos de vehículos analizados en Cheng et al. (2012): (a) Modelo A; (b) Modelo B.

Estudios sobre la aerodinámica de los vehículos han sido también desarrollados en torno al sector ferroviario. Heine y Matsche (2001) analizaron como influía la geometría de la nariz de un modelo de tren sobre su estabilidad, calculando los coeficientes aerodinámicos para 14 formas distintas de la misma. El estudio se llevó a cabo en un túnel de viento y los coeficientes aerodinámicos fueron determinados en función de la dirección relativa de viento. Los parámetros de la nariz que se modificaron de un modelo a otro fueron la longitud, la anchura y la altura. Junto a estos parámetros también la curvatura del techo del vehículo y el espacio bajo el tren fueron analizados. Los coeficientes aerodinámicos resultaron sensibles a las modificaciones aplicadas a la geometría del tren. Los modelos de nariz con formas agudas y largas disminuían la resistencia aerodinámica al avance y mejoraban la estabilidad frente al viento lateral. Reducir la altura del tren en 0.5m implicó, a su vez, una disminución del momento de vuelco del 25%, lo que destacó a la altura del vehículo como un parámetro clave en su estabilidad frente al viento lateral.

En condiciones de viento lateral, Gohlke et al. (2010) estudiaron el efecto de tres parámetros representativos de la geometría de un vehículo sobre ciertas propiedades aerodinámicas del mismo. Los parámetros analizados fueron: el radio de las aristas, el ángulo entre el capó y el parabrisas y el ángulo formado por el techo del vehículo y el maletero (Figura 9). Los resultados mostraron que un radio menor de las aristas laterales del parabrisas causaba un vórtice más energético en el lado a sotavento del vehículo, con una consecuente disminución de la presión estática en esta región y un incremento del coeficiente de la fuerza lateral sobre la parte delantera del vehículo. Por otra parte, aplicando un redondeo a la arista se lograba disminuir el coeficiente relativo al momento de guiñada y por lo tanto una mejora de la estabilidad del vehículo frente a las acciones del viento lateral. Gohlke et al. (2010) también demostraron que un incremento del ángulo entre el capó y el parabrisas inducía una disminución del coeficiente de fuerza lateral en la parte delantera del vehículo y del momento de guiñada. Por último un incremento del ángulo entre el techo y maletero incrementaba de modo inesperado la fuerza lateral en la parte trasera del vehículo, lo cual tenía un efecto positivo sobre el momento de guiñada. Este estudio demuestra de nuevo que los vórtices generados en las aristas del vehículo condicionan su estabilidad severamente bajo la acción del viento

lateral, de modo que si se controla la intensidad y tamaño de estos vórtices a través de la geometría del vehículo se puede mejorar de modo notable la estabilidad del mismo.

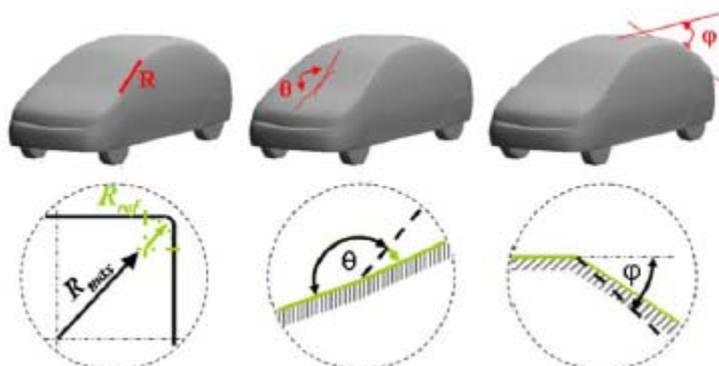


Figura 9. Parámetros de forma estudiados en Gohlke et al. (2010).

Otro aspecto a considerar en la determinación de los coeficientes aerodinámicos mediante ensayos es el movimiento del vehículo. Para determinar su influencia Quinn et al. (2007) obtuvieron las cargas aerodinámicas sobre un vehículo real en movimiento y parado durante un experimento de campo. El ajuste entre el coeficiente de momento vuelco obtenido con el vehículo en movimiento y con el vehículo parado resultó bastante bueno, lo que les permitió afirmar que se podía despreciar el movimiento del vehículo.

### 2.2.2. Principales técnicas de estudio

Los principales métodos utilizados para analizar las características aerodinámicas de los vehículos se pueden desglosar en dos grandes bloques: experimentales y numéricos. Los experimentales pueden ser desarrollados en campo (Quinn et al., 2007; Hibino et al., 2010; Sterling et al., 2010) o bien en túnel de viento, permitiendo estos últimos el control de las condiciones eólicas durante el ensayo. En cuanto a los numéricos, pueden consistir en expresiones analíticas como las desarrolladas en Malviya et al. (2009), o bien basarse en códigos CFD, y habitualmente son validados mediante ensayos experimentales (Perzon y Davidson, 2000; Hemida et al., 2005; Tsubokura et al., 2010). Los códigos CFD se basan habitualmente en dos enfoques para la resolución del modelo numérico, LES (Large Eddy Simulation) o RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), ya que habitualmente el tercer enfoque posible DNS (Direct Numerical Simulation) se suele descartar debido al elevado tiempo de cálculo que requiere la resolución de un modelo sencillo. Con el enfoque LES se obtiene una mayor precisión en los resultados

respecto al RANS, permitiendo analizar con mayor detalle las características de la turbulencia (Krajnovic y Davidson, 2004). Tsubokura et al. (2009) manifiestan su preferencia por el enfoque LES, debido a que proporciona información relativa a las propiedades aerodinámicas del vehículo que no es accesible aplicando el enfoque RANS.

### **2.2.3. Condiciones eólicas**

Un vehículo circulando por carretera puede experimentar condiciones eólicas adversas que comprometan la seguridad del tráfico, aumentando así el riesgo de sufrir un accidente. Este hecho ha impulsado el estudio sobre cómo afectan ciertas variaciones en las condiciones eólicas a la estabilidad de los vehículos (Khier et al., 2000; Hemida et al., 2005; Tsubokura et al., 2010; Baker, 2010; Cheli et al., 2011a).

En Cheli et al. (2011a), se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de un vehículo pesado para tres escenarios de turbulencia distintos mediante una campaña de ensayos en túnel aerodinámico. La finalidad fue comprender el efecto de las características de la turbulencia del aire sobre la estabilidad del vehículo estudiado. Los parámetros de la turbulencia a través de los cuales se simularon distintos escenarios fueron la intensidad de turbulencia y dos componentes de la escala de longitud integral. De forma general, los coeficientes aerodinámicos actuando sobre un camión en función de la dirección relativa de viento mostraron distintas tendencias en base al nivel de turbulencia, a excepción del coeficiente relativo al momento de vuelco (Cheli et al., 2011a).

Otro aspecto característico de las condiciones eólicas que afecta a la estabilidad de un vehículo es su inestabilidad a lo largo del tiempo. En esta línea, Tsubokura et al. (2010) analizaron el efecto de las condiciones inestables del viento natural sobre la respuesta aerodinámica de un vehículo mediante un modelo numérico LES. En este estudio, se estableció por un lado un perfil de velocidades para el viento lateral en forma de función sinusoidal cuya amplitud y longitud de onda fueron modificadas, y por otro lado, se estableció un perfil de viento lateral simulando el efecto de una ráfaga de viento. Para el primer caso se encontró que cuando la longitud de onda disminuía, los coeficientes eran menos sensibles a las variaciones de las direcciones relativas de viento. Las oscilaciones sinusoidales en el momento de vuelco eran ligeramente superiores para una longitud de

onda más corta. Mientras, en el caso del momento de guiñada ocurría todo lo contrario, las oscilaciones registradas en su magnitud eran casi el doble para la longitud de onda más larga. Los resultados obtenidos indicaban que el desfase en las señales temporales de los coeficientes dependía de la longitud de onda del perfil de velocidades de viento lateral. Al incrementar el rango de las direcciones relativas de viento, las oscilaciones tanto en el momento de vuelco como en el de guiñada aumentaron. Los ensayos de Tsubokura et al. (2010) mostraron también que al simular una ráfaga de viento lateral, las fuerzas y momentos aerodinámicos experimentaron cambios bruscos en sus magnitudes en forma de una respuesta no lineal. El tiempo para alcanzar el régimen estacionario fue distinto en cada carga aerodinámica, y especialmente largo en el caso de la fuerza vertical debido a la reacción transitoria del flujo de aire circulando por debajo del vehículo. Esto pone de relevancia la importancia del diseño de la zona inferior del vehículo sobre la estabilidad del mismo.

Otro parámetro con respecto a las condiciones eólicas, como es la dirección del viento relativa a los vehículos, ejerce una gran influencia sobre las cargas aerodinámicas actuando sobre un vehículo. Esto se debe, entre otros aspectos, a que una variación en la dirección de viento modifica las estructuras de vórtices generadas en torno al vehículo, y como ya ha sido mencionado las cargas aerodinámicas dependen de ellas (Khier et al., 2000).

Desde un punto de vista más general, sin centrarse en los problemas de estabilidad de los vehículos, Baker (2010) analizó cómo afecta la presencia del viento lateral a las propiedades del flujo de aire en torno a un tren. Para ello, estudió la aerodinámica del vehículo y los patrones de flujo en torno al mismo para dos situaciones: bajo la acción del viento perpendicular a la trayectoria de los vehículos y sin la acción del mismo. Los resultados muestran que las condiciones del flujo de aire en términos de cizalla y turbulencia en torno al vehículo son distintas considerando la acción del viento lateral frente a no considerarla. En condiciones de viento lateral, la velocidad del flujo de aire en la estela del vehículo tiende a incrementarse.

En otros trabajos, como en Shao et al. (2011), se analizan las características aerodinámicas de un vehículo bajo las condiciones simultáneas de viento lateral y de lluvia. Al comparar los coeficientes aerodinámicos de fuerza vertical, lateral y frontal

considerando el efecto de la lluvia y sin considerarla, se observa que estos son mayores bajo la acción de la lluvia. Además, a medida que se incrementa la velocidad del viento lateral el efecto de la lluvia adquiere más relevancia sobre la estabilidad del vehículo. En este estudio también se determina la velocidad máxima de circulación de un ferrocarril sin comprometer la seguridad del tráfico en diferentes condiciones de viento y lluvia. En base a los resultados obtenidos, se concluye que la presencia de lluvia descende entre un 10% y un 20% la velocidad límite del ferrocarril con el objetivo de evitar su vuelco. También se puede determinar la velocidad crítica de viento lateral que produce el vuelco a través de expresiones analíticas como las propuestas por Hibino et al. (2010). En este trabajo, las ecuaciones propuestas fueron validadas mediante ensayos de campo a escala real.

#### **2.2.4. Afección del viento lateral a la estabilidad de los vehículos**

Algunos de los últimos avances tecnológicos en torno a los medios de transporte terrestres se han dirigido a disminuir los consumos energéticos. Con tal finalidad se han centrado los esfuerzos en dos aspectos: por un lado en el estudio y optimización de la aerodinámica de los vehículos, desarrollando modelos que ejerzan una menor resistencia aerodinámica al aire; y por otra parte en su peso, construyendo vehículos más livianos. Esta última característica, en combinación con un aumento de la velocidad de circulación de los vehículos, ha ocasionado que estos se vuelvan más inestables en condiciones de viento lateral, aumentando el riesgo de accidente y disminuyendo el confort de los usuarios durante el trayecto realizado. Estas circunstancias han impulsado desde los años 70, en países tales como Alemania, Inglaterra y Japón (Matschke et al., 2001), el desarrollo de investigaciones en torno a los efectos del viento lateral en las vías de transporte, especialmente en el sector ferroviario.

Los accidentes experimentados por los vehículos donde la acción del viento lateral puede resultar un factor determinante son el desvío de la trayectoria y el vuelco. En el caso del accidente por desvío de la trayectoria del vehículo intervienen indirectamente la fuerza lateral, cuyo vector coincide con la dirección del eje  $x$ , y directamente el momento de guiñada, cuyo vector coincide con la dirección del eje  $y$  (Figura 10). Mientras en el accidente por vuelco las principales cargas aerodinámicas implicadas indirectamente son la fuerza lateral y vertical y, directamente, el momento de vuelco.

El vuelco del vehículo sucede cuando el momento de vuelco inestabilizador originado por las fuerzas lateral y vertical sobre el punto de apoyo de las ruedas a sotavento del vehículo con el suelo (punto O en la Figura 10), supera al momento estabilizador debido al propio peso del vehículo sobre ese mismo punto. El centro de presión del vehículo (c.p. en la Figura 10) es la posición donde la fuerza resultante de todas fuerzas generadas por el campo de presiones sobre el mismo, tiene el mismo efecto que la suma de los efectos de las fuerzas de presión distribuidas por toda la superficie individualmente. La determinación del centro de presiones resulta útil para el cálculo de los momentos sobre el vehículo a partir de las presiones medidas en ensayos experimentales. Entre las distintas clases de vehículos, las más susceptibles de sufrir este tipo de accidente son aquellos cuyo centro de presiones aerodinámico se sitúa a mayor altura con respecto al suelo y su peso es menor, como ocurre cuando el vehículo viaja con poca carga. Bajo estas premisas se pueden citar como ejemplos de vehículos con un elevado riesgo de experimentar el vuelco: las caravanas, los camiones y los ferrocarriles. A modo de introducción cabe mencionar que el estudio desarrollado en esta Tesis Doctoral se ha enfocado al caso particular de un camión.

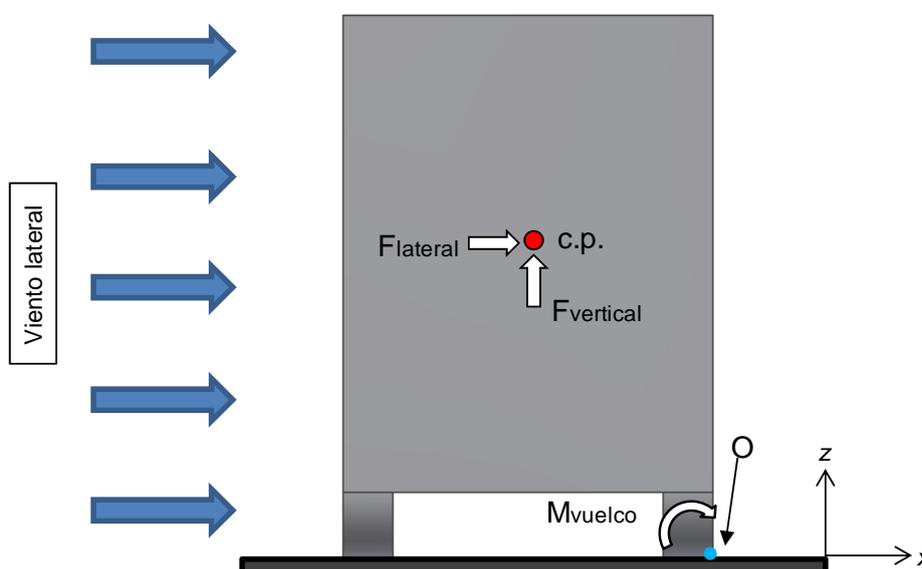


Figura 10. Cargas aerodinámicas causantes del accidente de vuelco, actuando sobre un vehículo pesado de carretera en condiciones de viento lateral.

Algunos de los aspectos con una mayor influencia en el riesgo de vuelco de un vehículo inducido por el viento lateral son: las características principales del viento local, el comportamiento dinámico del vehículo, las condiciones del pavimento y el modo de actuación del conductor.

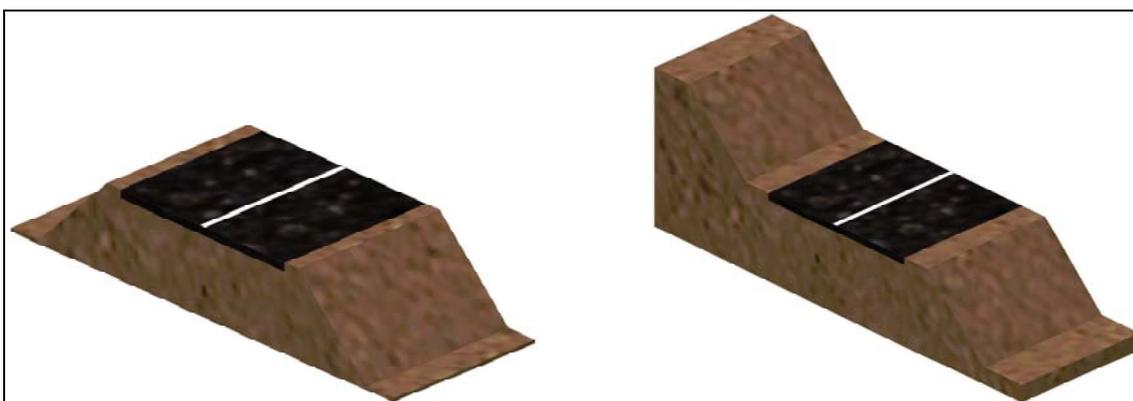
### **2.3. ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE EL VEHÍCULO EN TORNO A DISTINTAS INFRAESTRUCTURAS**

Los factores que determinan en mayor grado las características del viento local en una determinada ubicación son los gradientes de presión y temperatura unidos a las características geométricas de una orografía concreta. En el caso de una ubicación específica como es la que delimitan las vías de transporte, el flujo de aire en las regiones próximas a los vehículos se encuentra afectado por las propias infraestructuras, aparte de los factores ya mencionados. A continuación se exponen, las características más relevantes de los patrones de flujo de aire en torno a infraestructuras, donde la estabilidad de los vehículos se puede ver más comprometida (terraplenes y viaductos). A su vez se lleva a cabo una descripción de los diferentes estudios que abordan la afección del viento lateral sobre la estabilidad de los vehículos circulando en dichas infraestructuras. En estos estudios, son mayoritariamente utilizadas las técnicas numéricas y experimentales para analizar las distintas situaciones. En la mayoría de casos, las técnicas numéricas consisten en códigos basados en la dinámica de fluidos computacional. En cuanto a las experimentales, se pueden dividir entre ensayos de laboratorio (túnel de viento) o de campo.

En el área de Ingeniería Civil se denomina terraplén a la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra (Figura 11). En las vías de transporte los terraplenes actúan como soporte para las carreteras o líneas ferroviarias localizadas sobre el plano de apoyo, quedando los taludes a ambos lados. En función del desnivel pretendido para el plano de apoyo y las características orográficas del terreno en torno a este y el material del terreno, los taludes se definirán con una determinada altura e inclinación dentro de los márgenes prescritos según la normativa vigente que regula su construcción (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carretera y puentes PG-3, 2011).

La configuración de los taludes en función de la dirección de viento determinará el número de pendientes ascendentes o descendentes recorridas por el flujo de aire. Estos aspectos relativos a la configuración de los terraplenes y parámetros eólicos (dirección de viento, módulo de viento, intensidad de turbulencia, etc.) definirán el flujo de aire en

torno a los vehículos en cada instante. Concretamente, los resultados recogidos en Bitsuamlak et al. (2004) y Cheli et al. (2010) indican que cuando el flujo de aire encuentra a su paso una pendiente del terreno ascendente este experimenta una aceleración al recorrerla. Por lo tanto el flujo de aire desprendido desde los taludes puede impactar contra los vehículos a mayor velocidad para ciertas direcciones de viento, comprometiendo en mayor grado su estabilidad. Se puede afirmar a modo de hipótesis inicial, que para un mismo perfil de viento incidiendo sobre una vía de transporte construida sobre un terraplén y sobre un terreno llano, en los tramos de terraplén se pueden dar condiciones más críticas para la estabilidad de los vehículos. Dicha consideración ha motivado que una serie de estudios hayan analizado el efecto de los terraplenes sobre la estabilidad de los vehículos, a través de la medida de sus cargas aerodinámicas para diferentes condiciones eólicas.



**Figura 11.** Diferentes configuraciones de terraplenes comunes en el entorno de las carreteras, denominadas en el estudio como terraplén (izquierda) y media ladera (derecha).

Las principales variables utilizadas para el análisis de la estabilidad de los vehículos, quedan englobadas en los siguientes grupos: fuerzas aerodinámicas, coeficientes aerodinámicos, coeficientes de presión y funciones de admitancia aerodinámica. Por su parte, en los ensayos de túnel de viento desarrollados sobre los terraplenes, a veces se aplican técnicas de visualización mediante humo (Bocciolone et al., 2008) o mediante hilos sujetos a las infraestructuras (Schober et al., 2010) para relacionar el comportamiento del flujo de aire en torno al vehículo y la infraestructura con las cargas aerodinámicas que actúan sobre el mismo.

En ciertos estudios, los resultados obtenidos en terraplenes se comparan con los obtenidos en otros escenarios, tales como viaductos (Suzuki et al., 2003; Bocciolone et

al., 2008) o terrenos llanos (Baker et al., 2004; Diedrichs et al., 2007), con el fin de analizar el efecto de la infraestructura sobre el flujo de aire y, consecuentemente, sobre la estabilidad del vehículo. En Cheli et al. (2011b), los coeficientes aerodinámicos obtenidos indican que el vehículo tiene un menor riesgo de vuelco en el terreno llano en comparación con el terraplén y los dos tipos de viaductos. El terraplén y el viaducto doble se presentan como las infraestructuras más negativas para la estabilidad del vehículo para un rango de direcciones de viento relativas por debajo de  $50^\circ$ , mientras que para ángulos superiores a  $50^\circ$  resulta peor el viaducto simple. En Schober et al. (2010), se concluyó que un vehículo circulando por un terraplén presentaba un mayor riesgo de vuelco en comparación a otras dos infraestructuras, un terreno llano y un terreno llano provisto de balasto y raíl.

Otros parámetros geométricos del terraplén son analizados en Miao et al. (2010). Concretamente el efecto de la inclinación de los taludes del terraplén sobre la estabilidad del vehículo. Cabe destacar entre sus aportaciones las siguientes conclusiones: por un lado, las cargas aerodinámicas sobre el vehículo aumentan al disminuir la pendiente de los taludes para un terraplén simétrico con respecto al eje de la carretera; y por otro lado, al disminuir la pendiente del talud a sotavento desde un ángulo positivo con respecto a la horizontal sin modificar la pendiente del talud a barlovento, se produce un incremento de las cargas aerodinámicas del vehículo. Sin embargo, en Suzuki et al. (2003), al incrementar la pendiente del talud ubicado a barlovento del vehículo se produce un aumento del coeficiente de fuerza lateral.

Bocciolone et al. (2008), analizan los coeficientes de fuerza lateral y vertical de un tren en un terraplén y en un viaducto. En este estudio, los valores obtenidos en el terraplén para direcciones de viento relativas inferiores a  $45^\circ$  resultan ligeramente superiores, mientras que para ángulos mayores de  $45^\circ$  fueron superiores en el viaducto. Por lo tanto, en función de la dirección relativa de viento, una infraestructura puede influir de un modo más o menos negativo sobre la estabilidad del vehículo con respecto a otra. Este aspecto fue considerado en Suzuki et al. (2003), donde se muestra como un incremento en el espesor del cajón de un tablero causa un aumento del coeficiente de fuerza lateral actuando sobre un ferrocarril. Según los autores, también se produce dicho efecto sobre el coeficiente de fuerza lateral al incrementar la altura de un terraplén.

Otro aspecto que condicionará la estabilidad del vehículo en condiciones de viento lateral es el carril por el que circula. Haciendo hincapié en esta cuestión, Cheli et al. (2011b) indicaron que los coeficientes de la fuerza lateral y momento de vuelco disminuían cuando el vehículo se localizaba en el carril a sotavento en comparación a cuando se ubicaba en el carril a barlovento. Esto se debe principalmente a que las líneas de flujo al recorrer la pendiente ascendente del talud situado a barlovento, toman una inclinación con respecto al plano horizontal que las aleja del posible vehículo circulando por el carril situado a sotavento. Además, se registraron mayores diferencias entre los coeficientes obtenidos en ambos carriles para direcciones relativas de viento superiores a 60° (rango de direcciones más próximo a la perpendicular al sentido del tráfico). Sin embargo Diedrichs et al. (2007) concluyó que un tren circulando por el carril a sotavento experimentaba unas condiciones más críticas para su estabilidad bajo la acción del viento lateral.

Otros investigadores han enfocado su trabajo en torno al efecto que generan diferentes parámetros eólicos sobre la estabilidad de los vehículos cuando circulan por terraplenes. Así, según Suzuki et al. (2003), un aumento del espesor de la capa límite considerando el mismo valor de velocidad del flujo libre, implica una mejora de la estabilidad de los vehículos circulando por los terraplenes, hecho que puede ser calificado de obviedad. Otro parámetro analizado es la intensidad de la turbulencia del aire. Bocciolone et al. (2008) muestran que el coeficiente de fuerza lateral para una intensidad de turbulencia alta característica de una capa límite terrestre presenta mayores valores que para un flujo de baja intensidad de turbulencia. Según Robinson y Baker (1987) las escalas de longitud características de la turbulencia afectan a las cargas aerodinámicas del vehículo. Concretamente, los resultados obtenidos por estos autores muestran que el coeficiente de fuerza lateral aumenta al incrementar el tamaño de las escalas presentes en el flujo de aire que incide sobre el vehículo. También es objeto de análisis la sensibilidad de los coeficientes aerodinámicos al número de Reynolds, cuyo valor es directamente proporcional a otro parámetro eólico como es la velocidad del flujo de aire. El motivo por el que se suele realizar dicho análisis radica en que el valor del número de Reynolds en el modelo a escala y en el vehículo real deben ser similares, para que el modelo a escala aporte información representativa del vehículo real.

Con el objetivo de comprender mejor la razón por la cual la presencia de los terraplenes afecta negativamente a la estabilidad de los vehículos, Baker (1985) enfocó su trabajo en torno al comportamiento del flujo de aire al pasar sobre estas infraestructuras. Uno de sus hallazgos fue que para ángulos de viento entre  $90^\circ$  (flujo perpendicular al terraplén) y  $30^\circ$ , la componente perpendicular al terraplén se aceleraba, mientras que la componente paralela se mantenía constante. A partir de aquí planteó un procedimiento de cálculo de los coeficientes aerodinámicos válido para direcciones de viento relativas al vehículo y terraplén superiores a  $30^\circ$  (medidas corriente arriba del terraplén). Este consistía en determinar los coeficientes aerodinámicos de un vehículo sobre un terraplén estándar de 6 m con un balasto de 1 m y un raíl a partir de una expresión que consideraba: los coeficientes aerodinámicos sobre un terreno llano, la dirección de viento relativa en lo alto del terraplén y un coeficiente de aceleración. Este coeficiente de aceleración, en el caso de considerar inicialmente los coeficientes para un terreno llano, tomaba un valor de 1.23, siendo su valor de 1.035 si los coeficientes de partida habían sido obtenidos en un balasto estándar de 1 m y un raíl (caso del ferrocarril). Este método de cálculo quedó recogido en alguna normativa, como por ejemplo en Alemania a través de la Norma DB Netz AG (2006). No obstante, en Schober et al. (2010) los coeficientes obtenidos mediante esta técnica no mostraron un buen ajuste con los obtenidos a través de ensayos en túnel de viento. Específicamente, los coeficientes inductores del vuelco del vehículo obtenidos en base a medidas experimentales eran inferiores a los calculados considerando la hipótesis de Baker. Estas discrepancias fueron atribuidas al desajuste de las velocidades de flujo relativas durante las mediciones en el túnel de viento.

Los viaductos son infraestructuras presentes a lo largo de las vías de transporte donde el riesgo de que los usuarios sufran un accidente causado por las condiciones eólicas aumenta. Las condiciones eólicas adversas para la estabilidad de los vehículos en los terraplenes se debían principalmente a su geometría. Sin embargo, en los viaductos se debe a su localización en el espacio. Dos aspectos asociados a la ubicación espacial de la infraestructura, que influirán significativamente sobre el flujo de aire en torno al vehículo, son: la altura del viaducto con respecto a la superficie terrestre y la orografía sobre la que asienta. Así, el tráfico circulando por una infraestructura situada a una mayor altura respecto al nivel de la superficie terrestre soportará mayores velocidades

de viento. Por otro lado, cabe decir que las características del perfil de velocidades generado en una determinada ubicación dependerán entre otros factores de la rugosidad superficial y de las particularidades geométricas del terreno. De aquí la importancia de su orografía.

A modo de ejemplo, un tablero ubicado sobre un lago o mar soportara mayores fuerzas aerodinámicas que otro localizado sobre un bosque para una misma altura sobre el terreno donde la velocidad de flujo aun no alcanzado su valor estacionario, siendo este último igual en ambos casos. En relación a la forma geométrica del terreno, se puede entender su importancia al poner de ejemplo un viaducto que une dos montañas y se sitúa en la zona de estrechamiento de un valle. Esto es debido a que el flujo de aire sobre el valle se acelera debido a una disminución de la sección transversal, propiciando que la velocidad de viento sobre el tablero sea mayor.

Una serie de estudios han sido desarrollados teniendo en cuenta las posibles condiciones eólicas adversas para la seguridad del tráfico en torno a los viaductos. Como en el caso de los terraplenes, la mayoría de los estudios analizan la acción del viento lateral sobre un vehículo ubicado en este tipo de infraestructura a través del cálculo de las cargas aerodinámicas. Para llevar a cabo las distintas investigaciones se han empleado tanto técnicas numéricas (Bettle et al., 2003; Rocchi et al., 2012) como experimentales (Kozmar et al., 2012; Dorigatti et al., 2012).

Cheli et al. (2010) compararon los coeficientes aerodinámicos de un modelo de tren situado sobre un viaducto (carril barlovento y sotavento) y sobre un terreno llano. Los resultados indican que el coeficiente de fuerza lateral para direcciones relativas de viento inferiores a  $40^\circ$  presenta un comportamiento similar en ambos escenarios. Sin embargo para ángulos más cercanos a la normal a la dirección del tráfico, el terreno llano resulta más crítico. El coeficiente de fuerza vertical en ángulos inferiores a  $35^\circ$  presenta valores más críticos en el terreno llano, y para ángulos mayores los valores más altos se registran cuando el vehículo se encuentra sobre el viaducto.

Las características del comportamiento del flujo en torno a estas infraestructuras y su afeción a la estabilidad de los vehículos han sido analizadas en detalle en distintos estudios. Kozmar et al. (2012) se limitaron a estudiar el campo de velocidad y

vorticidad en un plano transversal al tablero para dos modelos de viaductos. Por su parte Dorigatti et al. (2012) obtuvieron también los coeficientes aerodinámicos de varios vehículos (furgoneta, autobús y camión), para dos modelos de tablero denominados en el estudio como “ideal” y “típico” (Figura 12). Los coeficientes aerodinámicos (vuelco, lateral y vertical) del autobús y camión obtenidos en el tablero típico cuando el vehículo se posiciona en el primer carril (carril más próximo al borde de barlovento del tablero) muestran un buen acuerdo con los obtenidos en el tablero ideal. Sin embargo, en el caso de la furgoneta, el riesgo de vuelco es ligeramente superior en el tablero ideal al compararlo con el tablero típico, como indica el coeficiente de momento de vuelco. Como era de esperar, la geometría del modelo de vehículo influye significativamente sobre su estabilidad independientemente del tipo de tablero analizado. Este comportamiento se manifiesta tanto en los valores medios de los coeficientes como en los valores de pico.

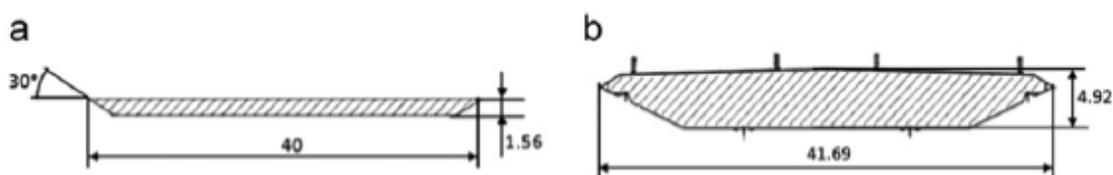


Figura 12. Geometría de los tableros de viaducto en escala real (dimensiones en metros): (a) Tablero ideal y (b) Tablero típico Dorigatti et al. (2012).

El efecto de parámetros representativos de la geometría de tableros y su configuración sobre la aerodinámica de un vehículo pesado con viento lateral ha sido objeto de análisis en Bociolone et al. (2008) y en Suzuki et al. (2003). Los primeros, simulaban un ferrocarril circulando sobre un viaducto con curvas, controlando tanto el ángulo de oscilación lateral del tren con respecto al terreno, como la inclinación del terreno con respecto a un plano horizontal. Los resultados indicaban que, manteniendo el plano del terreno paralelo a un plano horizontal, se da un incremento en los coeficientes (vertical y lateral) al incrementar el ángulo de oscilación del ferrocarril con respecto al terreno. Concretamente, el coeficiente de fuerza vertical presentó una mayor sensibilidad. En este estudio se analizaron dos configuraciones distintas con respecto a la inclinación del ferrocarril y del terreno manteniendo en ambas un ángulo absoluto de oscilación del ferrocarril igual a cero. En una configuración se mantuvo igual a  $0^\circ$  tanto el ángulo relativo a la oscilación del ferrocarril como el de la inclinación del terreno. En la otra configuración, el ángulo relativo a la oscilación del ferrocarril fue  $6^\circ$  mientras que el del

terreno fue  $-6^\circ$ . El coeficiente lateral no experimentó variación entre ambas configuraciones mientras que el coeficiente vertical si presentó alteraciones. En cuanto al estudio abordado por Suzuki et al. (2003), se analizó cómo influye el espesor de un tablero tipo viga o cajón sobre el coeficiente de fuerza lateral de un vehículo pesado para diferentes direcciones de viento, alcanzando la conclusión de que un tablero con un mayor espesor induce unas magnitudes del coeficiente de fuerza lateral mayores.

Las torres de apoyo de los viaductos son zonas de especial interés en cuestiones de seguridad y confort para los usuarios. Esto se debe a que los vehículos experimentan cambios bruscos en sus cargas aerodinámicas al cruzar la región a sotavento de las torres en condiciones de viento lateral. Por tal motivo, se ha impulsado el desarrollo de estudios en torno a esta localización concreta en los viaductos (Charuvisit et al., 2004; Argentini et al., 2011; Rocchi et al., 2012). Según Rocchi et al. (2012), el perfil de viento horizontal medido en el carril más próximo a la torre en su sotavento indica un efecto de aceleración del flujo de aire en la región de entrada y salida a la estela de la torre. Los resultados de este estudio indicaban, además, que la fuerza lateral soportada por un modelo de tráiler experimentaba dos impulsos a la entrada y salida de la estela de la torre. Mientras, el momento de guiñada soportado por el tráiler registraba cambios repentinos de signo cuando cruza la estela de la torre. El momento de guiñada alcanzaba su máximo valor cuando el frontal del tráiler pasaba a estar completamente tapado por la torre y el mínimo valor cuando el tráiler abandonaba la estela de la torre. A modo de conclusión, se expresa que el mayor riesgo de vuelco para el tráiler se presenta cuando penetra y abandona la estela de la torre. Al considerar un modelo de reacción del conductor, se observaron hasta cuatro cambios de dirección por parte del conductor al cruzar la estela. Finalmente, el desplazamiento lateral del vehículo cuando cruzaba la estela de la torre mostraba un acercamiento del tráiler hacia la misma.

Desde Argentini et al. (2011) también se reivindicó el efecto negativo sobre la estabilidad del vehículo al cruzar la estela de una torre. En este estudio, los peores coeficientes relativos a la fuerza lateral y el momento de vuelco se presentaron cuando el vehículo se situaba en centro de la estela de la torre (Figura 13). Esto se debe al efecto de aceleración del aire en las zonas laterales de la torre. Como en Rocchi et al. (2012), el momento de guiñada experimentó varios cambios de signo al cruzar la estela.

Además, los coeficientes de presión obtenidos en el lado del vehículo más próximo a la torre mostraron un efecto de succión sobre la zona tapada por la torre. Charuvisit et al. (2004) estudiaron además el efecto de la geometría de la torre sobre la estabilidad del vehículo considerando tres modelos de torre: rectangular, con cortes en las esquinas y rectangular aplicando una disminución gradual de la sección con la altura (Figura 14). Estos ensayos se llevaron a cabo considerando una velocidad del vehículo de 40 km/h y una velocidad del viento de 20 m/s para tres direcciones de viento. Los resultados fueron muy similares en todos los casos excepto cuando la dirección del viento fue perpendicular al eje del viaducto, ya que se registraron diferencias en la respuesta del vehículo entre la torre con cortes en las esquinas y los otros dos modelos. Las variaciones en los parámetros relativos a la desviación del vehículo se produjeron a una distancia menor al cruzar la torre con cortes en las esquinas. La respuesta máxima de la aceleración de guiñada o giro del vehículo en condiciones de flujo de aire perpendicular al eje del viaducto fue mucho mayor en la torre con las esquinas cortada que en las otras dos. Además en los otros dos modelos de torres la respuesta máxima del vehículo se mostró independiente de la velocidad y dirección de viento.



Figura 13. Posición más crítica del vehículo cuando cruza la estela de la torre en Argentini et al. (2011).

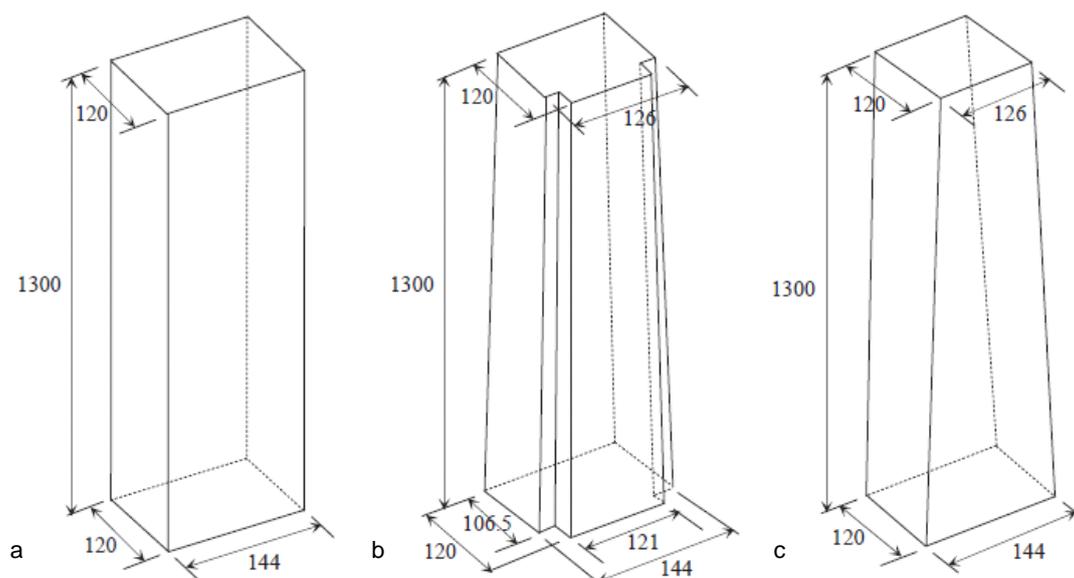


Figura 14. Modelos de torres estudiados en Charuvisit et al. (2004). (a) Rectangular, (b) con cortes en las esquinas y (c) rectangular con disminución gradual de la sección con la altura.

También ha sido objeto de análisis por parte de la comunidad investigadora (Bettle et al., 2003; Charuvisit et al., 2004; Kozmar et al., 2009; Kozmar et al., 2012), cómo afectan las condiciones atmosféricas a la estabilidad de los vehículos circulando por viaductos. Según Kozmar et al. (2012), los vehículos con cierta altura deberían experimentar mayores inestabilidades aerodinámicas cuando el ángulo vertical de incidencia del viento con respecto a la horizontal aumenta. Charuvisit et al. (2004) analizaron la respuesta de un vehículo cruzando la estela de una torre para distintas direcciones y velocidades de viento, concluyendo que las condiciones más críticas para la estabilidad del vehículo se registraron cuando la dirección del viento forma  $30^\circ$  con la normal al eje del viaducto. También en Bettle et al. (2003) se analizó la estabilidad de un camión para varias direcciones relativas de viento. En este estudio se consideraron distintos valores para la velocidad del camión al fijar una velocidad del viento lateral. Los resultados mostraban que las direcciones relativas más críticas en cuanto al riesgo de vuelco para el carril a barlovento y sotavento eran  $90^\circ$  (flujo de aire perpendicular a la trayectoria del vehículo) y  $56.3^\circ$  respectivamente. Por otro lado, Kozmar et al. (2009) estudiaron experimentalmente el efecto de las ráfagas de viento sobre la estabilidad de los vehículos, sometiendo a dos modelos de vehículos (vehículo sin ruedas y con ruedas) a la acción de una serie temporal de viento racheado y dirección normal al viaducto. Los resultados del estudio indicaban que las cargas aerodinámicas del vehículo fueron más elevadas durante la presencia de rachas de viento.

Como en los estudios relativos a terraplenes, en esta infraestructura también se analizan las diferencias aerodinámicas de un vehículo circulando en el carril a barlovento y a sotavento del eje de la carretera (Bettle et al., 2003; Cheli et al., 2010; Kozmar et al., 2012; Dorigatti et al., 2012). En todos los estudios se apreció que el vehículo circulando por el carril más próximo al borde de ataque del tablero tuvo un mayor riesgo de experimentar un accidente a causa del viento lateral. Según Dorigatti et al. (2012), los coeficientes de fuerza lateral y momento de vuelco disminuyen linealmente con el incremento de la distancia del vehículo con respecto al lateral del tablero. De modo cuantitativo, Bettle et al. (2003) establecieron que el momento de vuelco de su modelo de vehículo en el carril a sotavento, era un 30% menor del soportado por el vehículo en el carril a barlovento en condiciones de viento lateral.

Por último, también ha sido objeto de análisis como la clase de vehículo condiciona su estabilidad en condiciones de viento lateral (Dorigatti et al., 2012; Bocciolone et al., 2008). En Dorigatti et al. (2012) se propusieron los siguientes vehículos para valorar su efecto en la estabilidad: una furgoneta, un camión y un autobús. De los tres vehículos ensayados la furgoneta registró un mejor comportamiento aerodinámico independientemente de la geometría de tablero, salvo cuando la dirección de viento relativa se situó en el rango de 15° a 30°. En esta situación, las cargas aerodinámicas fueron similares a las de las otras clases de vehículo. A modo de conclusión se reivindicó que el vehículo más crítico en relación al riesgo de vuelco era el camión. Tres modelos de trenes circulando en un viaducto fueron propuestos para su estudio en Bocciolone et al. (2008). De los tres modelos de trenes dos correspondían a líneas de alta velocidad y el otro modelo a una línea de velocidad convencional. Los coeficientes de fuerza lateral y vertical presentaron las mayores diferencias entre los modelos de trenes de alta velocidad, y el tercer modelo para direcciones relativas de viento próximas a la perpendicular a su sentido de circulación. Cuando las direcciones de viento se aproximaban a la perpendicular, el flujo en torno al tren adquirió un comportamiento más próximo a ser bidimensional y la geometría del tren ejerció una gran influencia sobre las características de la estela. A su vez, las dimensiones de la estela determinaron en gran medida las fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo. Por lo tanto, la similitud de la geometría de los dos modelos de alta velocidad y sus diferencias con respecto al modelo de menor velocidad de circulación, justifican la falta de

similitud entre los coeficientes aerodinámicos obtenidos. Específicamente, se registraron los valores absolutos más altos en los coeficientes aerodinámicos (fuerza lateral y vertical) actuando sobre los modelos de los trenes de alta velocidad, para las direcciones de viento especificadas.

## **2.4. MÉTODOS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN FRENTE AL VIENTO**

### **2.4.1. Protocolos de actuación**

En base a los conocimientos adquiridos sobre los efectos adversos del viento lateral en el comportamiento aerodinámico de los vehículos, diferentes estudios proponen y desarrollan medidas para mejorar la seguridad del tráfico en estas condiciones. Dichos avances se aplican en base a dos enfoques: pasivo y activo. Dentro del enfoque pasivo, a modo de medidas correctoras, se pueden destacar la instalación de barreras cortaviento (ver apartado 2.4.2) o las modificaciones efectuadas sobre la propia carrocería de los vehículos. Las medidas activas se utilizan para disminuir el riesgo de accidente, y se resumen principalmente en procedimientos y sistemas de alerta para la regulación del tráfico, siendo esta cuestión la abordada en el presente apartado. Debido a la ausencia de investigaciones vinculadas al transporte por carretera que aborden esta cuestión, la mayoría de los estudios presentados a continuación se centran en torno al sector ferroviario. Esto puede deberse a que los ferrocarriles están sometidos a unas condiciones más críticas para su estabilidad que los vehículos de carretera debido a sus condiciones de operación, unido a que una menor variedad de los modelos de vehículos facilita la adopción de medidas.

Los procedimientos de actuación o sistemas de alerta en condiciones de fuertes vientos suelen actuar limitando la velocidad de los vehículos o restringiendo su tráfico. Estas decisiones se suelen adoptar en base a mediciones de viento llevadas a cabo a lo largo de la vía de transporte y a una determinación de las curvas características de viento. La curva característica de viento especifica la velocidad límite de ráfaga que ocasiona el vuelco del vehículo en función de la dirección relativa del viento para una determinada ubicación y velocidad de circulación (Imai et al., 2002; Cheli et al., 2010). Por ejemplo, en Japón suelen suspender el tráfico de trenes cuando la velocidad instantánea del

viento supera los 30 m/s en cualquier escenario, excepto en viaductos donde el límite son 25 m/s.

Tratando de determinar unas condiciones de operación del tráfico de trenes que garanticen la seguridad del mismo, Rolén et al. (2004) obtuvieron la curva característica de viento lateral mediante ensayos en túnel de viento y un código CFD. Particularmente, analizaron la sensibilidad de la curva característica de viento lateral al incrementar en un 10% alguno de los coeficientes aerodinámicos, desmarcándose entre todos los coeficientes el asociado al momento de vuelco como el más influyente sobre la curva característica de viento. Por otro lado, evaluó la precisión alcanzada por los resultados mediante simulación numérica, utilizando distintas estrategias matemáticas de modelado de la turbulencia y distintos esquemas de discretización.

Para conocer el riesgo de sufrir un accidente inducido por el viento y adoptar las pertinentes medidas correctoras, en ocasiones se lleva a cabo la caracterización del viento a lo largo de la vía de transporte, tal y como se planteó en Cheli et al. (2010). En este estudio se desarrolló la caracterización eólica de una línea ferroviaria considerando dos aspectos: división de la línea de transporte en secciones homogéneas según las características de la misma (disposición de la topografía, infraestructuras, radios de curvatura y velocidad del vehículo) y análisis probabilístico “Meteo” del módulo y dirección de la velocidad de viento en dichas secciones (medido a 2 m de altura sobre los raíles). Sin embargo Burlando et al. (2010) emplearon un modelado numérico del territorio y, posteriormente, una simulación del viento para caracterizar las condiciones eólicas a lo largo de la línea ferroviaria. El modelado del territorio lo determinaron, por un lado, en base a la cartografía del entorno terrestre y las características de la línea y, por otro lado, en base a históricos de mediciones de estaciones meteorológicas próximas. Desarrollaron la simulación del viento para determinar los coeficientes de transmisión que permitieran transformar las características de viento (dirección y módulo) medidas en las estaciones meteorológicas en las condiciones eólicas a lo largo de la línea.

En Imai et al. (2002) se determinaron las curvas características de viento (la velocidad del viento se representa en el eje de ordenadas y la dirección en el eje de abscisas) a lo

largo de un recorrido real, definiendo un margen  $\delta$  cuya magnitud es la diferencia entre la velocidad de viento que genera el vuelco del vehículo y la velocidad de viento para la que se suspende el tráfico de trenes. Para obtener la curva de velocidades de viento que regulan la suspensión del tráfico de trenes, los autores desplazaron en dirección vertical un margen  $\delta$  la curva característica de viento para el vehículo analizado y en dirección horizontal un margen  $\emptyset$ . El margen  $\delta$  dependía del tiempo que tarde el tren en recorrer la sección y del máximo valor de la velocidad de viento medida en la sección. El margen  $\emptyset$  se determinó en función de la máxima fluctuación de la dirección de viento durante el tiempo que invierta el tren en recorrer la sección. En base a la curva de suspensión del tráfico de trenes, se elaboró una metodología de regulación del tráfico de modo complementario a la instalación de barreras cortaviento a lo largo del recorrido. Esta regulación actuaba del siguiente modo: cuando la barrera perdía eficacia debido a la dirección de viento (ángulos comprendidos entre 240° y 300°), la velocidad del viento para suspender el tráfico se limitaba a 25 m/s. En el rango de 20 m/s a 25 m/s la velocidad del tren se debía reducir. Concretamente el tren debía circular a una velocidad no superior a los 45 km/h para una velocidad del viento de 20 m/s. Después de dos años de aplicar la nueva regulación complementada con la instalación de barreras, se observó una reducción de los trenes que debían someterse a la nueva regulación, alcanzando la cifra de cero cancelaciones en los trayectos.

En cuanto a los sistemas de alarma en tiempo real, varios han sido los estudios que han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de los mismos (Hoppmann et al., 2002; Delaunay et al., 2006; Cheli et al., 2010). En Delaunay et al. (2006) se diseñó un prototipo de sistema de alarma que cumpliera con ciertos requisitos. Así, el sistema de alarma debía permitir al usuario definir parámetros relativos a las características del vehículo, al nivel de riesgo permitido y al procedimiento de predicción. Además, el sistema debía incluir un programa de evaluación de riesgo para determinar los valores umbrales de velocidad de viento en función de su dirección, considerando la topografía. Por otro lado, el sistema debía estar en continua comunicación con una red de puntos de medida de variables meteorológicas a lo largo del recorrido y un sistema de alarma que se activase cuando los valores umbrales del viento fuesen superados por las predicciones. El tipo de vehículo, el nivel de riesgo aceptado y el modelado de la

topografía definían en conjunto toda la información necesaria para configurar el sistema de alarma propuesto.

Otro sistema de alarma, también aplicado sobre una línea ferroviaria, se describió y analizó en Cheli et al. (2010). Este sistema comparaba continuamente datos de viento desde estaciones instaladas a lo largo de la línea en distintos sectores con los valores umbrales más bajos de las curvas características de viento para ese sector. Cuando la velocidad umbral es superada por la velocidad prevista dentro de 30 min, se enviaba una alarma al tren donde se indicaba un nuevo límite de velocidad de circulación. La alarma cesaba transcurridos 30 min desde que la velocidad del viento dejaba de superar la velocidad umbral. El sistema de alarma propuesto en Hoppmann et al. (2002) guardaba una gran similitud en su procedimiento de actuación con el de Cheli et al. (2010). No obstante, entre las diferencias a destacar se encontraba el tiempo de previsión. Mientras que Cheli et al. (2010) lo fijó en 30 min, Hoppmann et al. (2002) lo estableció en 120 s.

El pronóstico eólico a 120 s a lo largo de la línea ferroviaria se basaba en series temporales de datos de viento de 30 min muestreados cada 2 s. La elaboración y calibración de los modelos de predicción se fundamentó en datos de viento recopilados durante los 2 últimos años. Estos datos fueron medidos en nueve estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de 8 km de trayecto. En el estudio se observó que la predicción de la dirección de viento se traducía en una pequeña reducción de los casos de activación de la alarma, pero incrementaba la complejidad del modelo de predicción. La calidad en las predicciones del modelo fue contrastada en campo, donde se evidenció una reducción de la eficacia del modelo en presencia de fuertes vientos. El modo de determinación del umbral de velocidad de viento que enviaba la alerta no quedaba expuesto en el estudio, como en los casos precedentes (Delaunay et al., 2006; Cheli et al., 2010).

Aparte de los modelos mencionados hasta el momento, que predecían las condiciones eólicas, también se han desarrollado otros modelos que permitan predecir otras variables como el número de accidentes en función de las condiciones climáticas (Brijs et al., 2008). En Brijs et al. (2008), se elaboró un modelo auto regresivo a partir de una base de datos de accidentes de vehículos y las series temporales discretas de las condiciones

climáticas registradas durante los mismos. Los resultados indicaban una influencia significativa de las condiciones climáticas en el número de accidentes. Los autores reivindicaban la utilidad de esta clase de modelos para la regular el tráfico bajo condiciones climáticas adversas. También en Baker y Reynolds (1992) se utilizó un registro de accidentes, únicamente inducidos por el viento, para desarrollar su estudio. Los resultados del análisis de datos permiten determinar varios aspectos: cuáles son los vehículos con un mayor riesgo de sufrir un accidente, las causas que indujeron el accidente y las velocidades de viento en el instante del accidente. De modo complementario se llevó a cabo una evaluación del programa de ordenador “Blowover”, que predice la velocidad del viento que causa el accidente en función de unos parámetros de entrada. Los resultados obtenidos con el programa presentan, en líneas generales, un buen acuerdo con los datos registrados, siendo ligeramente superiores las velocidades de viento generadas por el programa.

Los procedimientos o metodologías de actuación en la regulación del tráfico de ferrocarriles expuestos en diferentes estudios forman parte en ocasiones de códigos de seguridad empleados por organismos internacionales. Este es el caso de la Eisenbahn-Bundesamt en Alemania (Matschke et al., 2001). Esta metodología se diferencia de la aplicada en los anteriores estudios en los parámetros implicados en la curva característica de viento para cada vehículo. En este caso, dicha curva describe la velocidad de viento límite en función de la velocidad del vehículo y no de la dirección de viento, como en los anteriores casos. Si bien, previamente sí se considera la dirección de viento para su elaboración. Otra diferencia se presenta también en relación al criterio de actuación sobre la regulación del tráfico de ferrocarriles, ya que se consideran distintos valores para la frecuencia de superación de la velocidad de viento límite permitida a lo largo del recorrido.

Una serie de normativas y guías han sido elaborados en distintos países Europeos con el cometido de salvaguardar la seguridad del tráfico ferroviario en condiciones adversas de viento lateral. En Blakeney (2000) se presenta un estándar de obligado cumplimiento elaborado en el Reino Unido con el objetivo de minimizar el riesgo de vuelco. Esta normativa actúa como guía para llevar a cabo una evaluación del riesgo de vuelco bajo unas determinadas condiciones. Mientras, otras normativas como la DB Netz AG

(2006) en Alemania llegan incluso a emplearse en la homologación tanto de trenes como de infraestructuras (Tielkes et al., 2008). Otros códigos a nivel Europeo, donde se regulan aspectos relacionados con la misma problemática, son la norma Europea EN 14067-6 (2010) y la Especificación Técnica para la Interoperabilidad (DIRECTIVE 2008/57/EC). Así como en el sector ferroviario se ha encontrado una amplia normativa o códigos que tratan la problemática del viento lateral, en el sector del transporte por carretera no ha sido así. No obstante información aportada por dichas normativas puede ser útil para el sector del transporte por carretera. Por ejemplo, en la EN 14067-6 se indican las pautas a seguir en el desarrollo de ensayos experimentales y numéricos para obtener los coeficientes aerodinámicos de un vehículo ferroviario, las cuales pueden también ser aplicadas al estudio de vehículos de carreteras. Esta normativa aporta una serie de bases de datos de coeficientes aerodinámicos obtenidos en túnel de viento para diferentes configuraciones del terreno (terraplén, terreno llano...etc), pero no trata como afecta el viento lateral a los trenes cuando circulan por viaductos. El estudio que se abordará posteriormente tratará además de otras configuraciones del terreno diferentes de las analizadas en la EN 14067-6 (2010), el caso particular de los viaductos, estudiando los coeficientes aerodinámicos de un camión para diferentes tipos de tableros. En las regulaciones citadas se especifican recomendaciones de diseño tanto de las infraestructuras como de los vehículos ferroviarios para mejorar la seguridad frente al posible vuelco del vehículo. Sería de gran interés que similares recomendaciones enfocadas al transporte por carretera quedasen recogidas en regulaciones, cuyo desarrollo se puede ver apoyado por estudios como el llevado a cabo en la presente Tesis Doctoral.

#### **2.4.2. Barreras cortaviento**

En este apartado se profundizará en la interacción fluido barrera y se tratarán aspectos relacionados con las distintas tecnologías existentes de barreras cortaviento y sus aplicaciones. Para tal fin, se hará especial hincapié en los siguientes puntos: comportamiento aerodinámico, cometido, tipología, parámetros constructivos y aplicaciones.

### 2.4.2.1. Generalidades

En ciertas regiones del planeta expuestas con frecuencia a fuertes vientos se han utilizado ampliamente diferentes clases de barreras cortaviento a modo de protección. Así, las barreras cortaviento han sido objeto de estudio de manera sistemática desde la década de los 40 con la finalidad de optimizar su diseño (Dong et al., 2007). Para lograr una zona protegida de la acción del viento, estos dispositivos de protección tienen como cometido principal reducir en la mayor medida posible la velocidad del viento en su sotavento. En ciertas aplicaciones se requiere, además, disminuir los niveles de intensidad de turbulencia en el área a proteger.

Si un flujo de aire cualquiera encuentra en su recorrido un obstáculo tal como una barrera, esta será sometida a unas cargas aerodinámicas, que son consecuencia directa de la transformación de la presión dinámica del aire en presión estática ejercida sobre la superficie de la barrera. Derivado de la acción de dichas cargas aerodinámicas, se produce una pérdida de la cantidad de momento lineal en el flujo de aire, como así reflejan las estelas generadas. A su vez, la estela es una región turbulenta con un elevado contenido en vórtices de diferentes escalas.

Según Judd et al. (1996), las principales regiones de aire originadas en torno a una barrera cortaviento permeable sometida a la acción de un perfil de viento se indican a continuación (Figura 15):

- ✓ Zona de acercamiento del perfil de velocidades (A).
- ✓ Región del campo de flujo desplazado por encima de la barrera (B).
- ✓ Región del campo de flujo tras atravesar la barrera (C).
- ✓ Zona de calma o región protegida que se extiende desde  $x/H_B \approx -1$ , aguas arriba de la barrera, hasta una distancia aguas abajo comprendida entre  $x/H_B \approx 3$  y  $x/H_B \approx 7$ ; siendo  $H_B$  la altura de la barrera y el origen de  $x$  la posición de la barrera (D).
- ✓ Zona de mezcla o de estela fuertemente turbulenta localizada por encima y aguas abajo de la zona de calma (E).

- ✓ Zona de re-equilibrio localizada aguas abajo de la zona de mezcla, donde las perturbaciones de flujo ocasionadas por la barrera desaparecen y el perfil de velocidades aguas arriba de la barrera es restablecido (F).

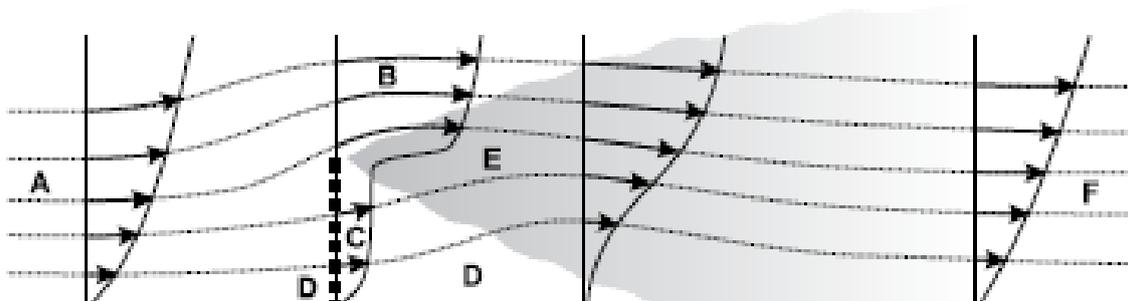


Figura 15. Regiones del campo de flujo bidimensional en torno a una barrera cortaviento (Judd et al., 1996).

#### 2.4.2.2. Tipología de barreras

Las barreras cortaviento se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios, si bien en este caso se ha optado por una organización de las mismas similar a la expuesta en Sañudo-Fontaneda et al. (2012) (Figura 16). En primera instancia, las barreras cortaviento se pueden dividir en dos grandes bloques: estructurales y vegetales. A su vez el bloque de las estructurales también puede ser clasificado en función de las siguientes características asociadas a las barreras: permeabilidad, tiempo de explotación, materiales empleados en su construcción y configuración estructural.

##### *a. Barreras vegetales*

Se entiende por barrera vegetal cualquier tipo de vegetación (plantas, arbusto, maleza, árboles, etc.) que cumpla con el cometido de proteger frente a la acción del viento. La eficacia de esta clase de barreras se ve muy influenciada por características asociadas a las mismas, tales como: altura, frondosidad, flexibilidad, etc. Algunas de las razones por las que este tipo de barreras son seleccionadas como medio de protección son las siguientes: una buena integración en el medio ambiente, un bajo coste de instalación, una mejora del medio perceptual y una mejora de la protección frente a la erosión del terreno.

Se han desarrollado algunas investigaciones en torno al uso de barreras vegetales como medios de protección frente a la acción del viento. Bitog et al. (2012) proporcionaron un análisis de la influencia de diferentes características de los árboles en su eficacia como

barreras de protección mediante técnicas de simulación numérica. Concretamente, el árbol modelado fue un pino negro y los parámetros objeto de estudio fueron: el hueco dejado entre los árboles, el número de filas y su agrupación. Los resultados de dicho estudio indicaban que un hueco entre los arboles menor resultaba más efectivo de cara a reducir la velocidad del aire.

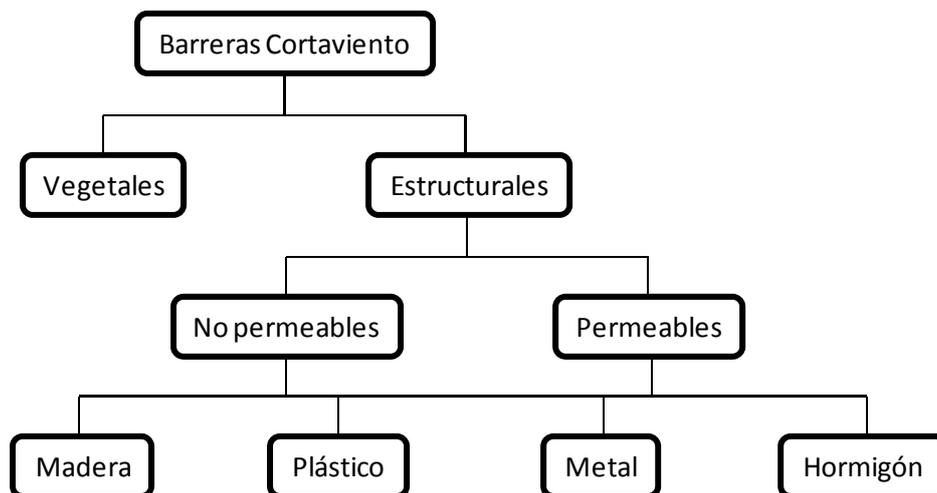


Figura 16. Clasificación de barreras cortaviento (Sañudo-Fontaneda et al., 2012).

En cuanto a la configuración de los árboles, dos filas colocadas de modo alternativo resultaron más eficaces que las otras configuraciones analizadas. En Torita y Satou (2007) el producto del espesor de la barrera y la densidad del área total presentó fuertes correlaciones con la velocidad mínima relativa de viento medida en el área protegida y la distancia de abrigo. En la Figura 17 se muestra una de las ubicaciones en la que Torita y Satou (2007) llevaron a cabo sus estudios de campo.



Figura 17. Protección de campo de cultivo mediante barrera vegetal formada por múltiples filas de pinos (Torita y Satou, 2007).

Otros estudios como Anthony et al. (2007) analizan el efecto de las barreras vegetales sobre el proceso de formación de dunas mediante experimentos de campo. En este estudio se observó que, transcurridas 10 semanas desde la instalación de las barreras en el frente de dunas, estas experimentaron una ganancia de arena en torno al 20%, siendo la ganancia total del 41% en los dos años de estudio. También Tuzet y Wilson (2007), llevaron a cabo ensayos de campo en los que midieron la velocidad de viento y la energía cinética turbulenta a un lado de una barrera vegetal. Esta barrera estaba formada por cipreses de una altura de 8 m y un espesor de 3 m (Figura 18). El mínimo valor de velocidad de viento fue registrado en el anemómetro más próximo a la barrera, concretamente estaba situado a una distancia aguas abajo de la barrera igual a  $H_a/4$  ( $H_a$ , altura árbol). El valor medido de la velocidad de viento se encontraba dentro de un rango comprendido entre el 20% y 25% de su valor aguas arriba.



Figura 18. Anemómetros ultrasónicos ubicados a un lado inmediatamente próximo a la barrera formada por cipreses de una altura de 8 m y un espesor de 3 m, durante el experimento en Tuzet y Wilson (2007).

### ***b. Barreras estructurales***

En este grupo se encuentran todas aquellas barreras que tienen el mismo cometido que las barreras vegetales pero que no están constituidas por vegetación. Otro aspecto de las barreras estructurales, que las diferencia de las barreras vegetales, son los costes asociados a su proceso constructivo. Estos costes suelen ser más altos en el caso de las barreras estructurales. Atendiendo a su permeabilidad, las barreras estructurales se pueden clasificar entre permeables y no permeables.

### ***b.1. Clasificación en función de la permeabilidad***

Las barreras no permeables son aquellas cuya porosidad es nula (Tabler, 1994), entendiéndose por porosidad el ratio entre el área agregada de agujeros y el área total de la barrera (Yeh et al., 2010). A nivel de las características del flujo de aire generado en torno a estas barreras, se diferencian de las permeables en varios aspectos: se generan flujos de recirculación en la región a sotavento de la barrera de una mayor intensidad en la turbulencia; cuando el viento arrastra partículas (polvo, nieve...etc.) estas se acumulan en el sotavento y barlovento de la barrera; y la distancia de protección en el sotavento de la barrera es menor debido a que se produce una recuperación de la velocidad del viento más rápida (Cornelis y Gabriels, 2005). La pantalla acústica mostrada en la Figura 19 fue instalada con la idea de reducir los efectos molestos del ruido generado por el tráfico en las carreteras sobre las zonas urbanas próximas. No obstante, este tipo de elementos también actúan a modo de barreras cortavientos no permeables, protegiendo a los vehículos frente a las cargas aerodinámicas inestables debidas a la acción del viento lateral.



**Figura 19. Ejemplo de pantalla acústica instalada en una carretera próxima a una zona urbana** (<http://www.insonor.com/servicios-aislamientos-acusticos/insonorizacion-acustica-industrial/pantallas-acusticas>).

Dentro de este grupo se encuentran aquellas barreras cuya porosidad es mayor que cero y permiten el paso de aire a través de su estructura. Este tipo de barreras ejercen una menor resistencia aerodinámica al aire que las no permeables, por lo que para el mismo material y estructura pueden soportar condiciones eólicas más adversas. Por otro lado, la

velocidad del viento en el lado a sotavento de la barrera experimenta una recuperación más lenta, permitiendo almacenar más partículas y extendiendo la zona protegida. Por consiguiente, para ciertas aplicaciones este tipo de barreras puede resultar una elección más interesante como medio de protección que las clasificadas como no permeables. En zonas portuarias, canteras u obras, se suelen acumular materiales formados por pequeñas partículas que deben ser protegidos de la posible dispersión ejercida por el viento. En estos casos se suelen adoptar como medida de protección la instalación de pantallas permeables. Se opta por este tipo de pantallas porque generan menos vórtices en su región a sotavento, permitiendo ubicar una pila de material a una distancia menor de la barrera (ver Figura 20).

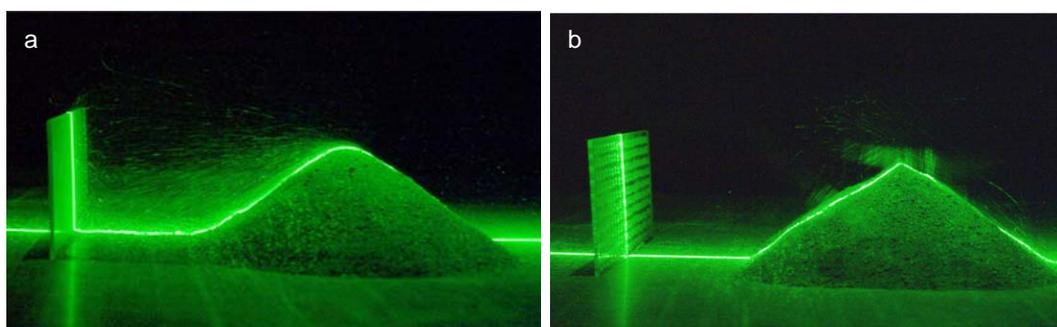


Figura 20. Movimiento de partículas de arena en la región a sotavento de una barrera con nula porosidad (a) y con un 30% de porosidad (b) durante unos ensayos en túnel de viento (Yeh et al., 2010).

Dentro del grupo de barreras permeables existen una gran variedad en función de los elementos estructurales que las conforman y su configuración. Algunos ejemplos de las mismas se muestran en la Figura 21.

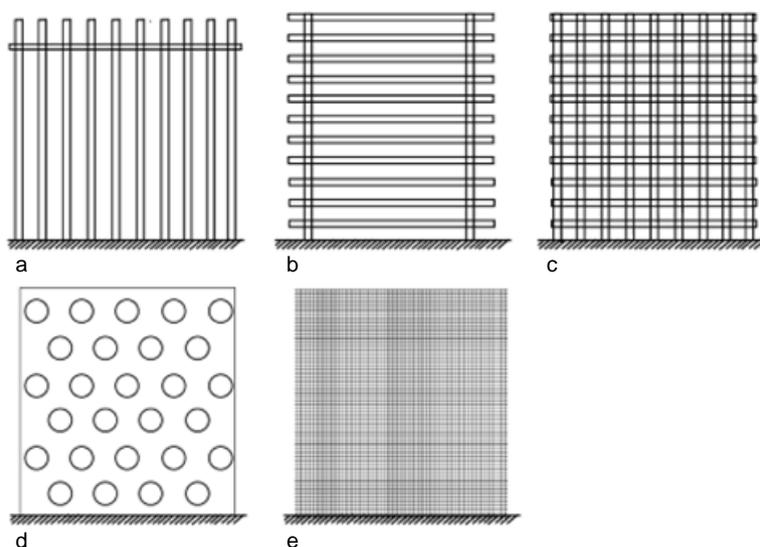


Figura 21. Algunos tipos de barreras permeables: (a) Barrera con tablas verticales; (b) Barrera con tablas horizontales; (c) Barrera con emparrillado; (d) Barrera agujereada; (e) Malla cortaviento (Dong et al., 2007).

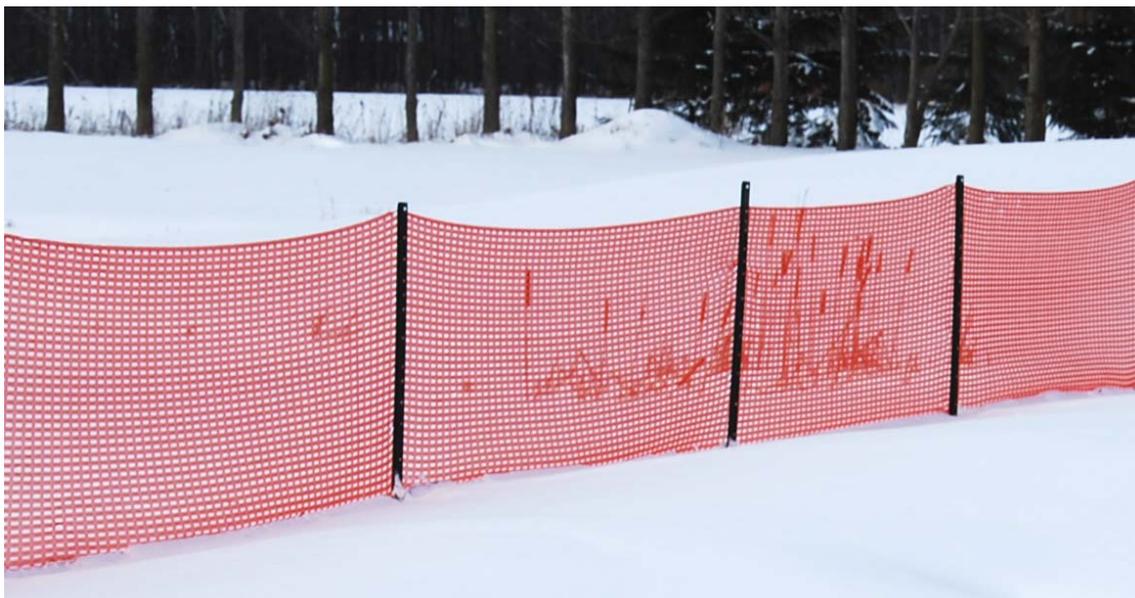
### ***b.2. Clasificación en función de los materiales de fabricación***

Las primeras barreras utilizadas para proteger frente a la acción del viento se componían de madera, debido por un lado a que el proceso de fabricación resultaba más económico y por otro a la inexistencia de la tecnología requerida para fabricarlas con otros materiales. Un modelo muy empleado de barrera de madera es el Wyoming, cuyo cometido es proteger frente a la acción combinada de viento y nieve en ubicaciones como las vías de transporte. Al instalar esta barrera se evita que las partículas de nieve arrastradas por el viento cubran la vía de transporte, ya que estas quedan atrapadas en una región al sotavento de la misma (Figura 22.a). Las barreras formadas por tablas verticales como la mostrada en la Figura 22.b también se utilizan para controlar la dispersión de partículas arrastradas por el viento. La vida de uso de estas barreras depende principalmente de dos factores, las condiciones climáticas y la degradación producida por bacterias (Klaassen y Van Overeem, 2012).



**Figura 22. Ejemplos de barreras constituidas por madera: (a) Pantalla antivientisca tipo Wyoming (Tablet y Meena, 2007) y (b) Barrera para controlar el proceso de formación de dunas (Grafals-Soto, 2012).**

Las barreras de plásticos o polímeros también suelen combinarse con otros materiales como postes metálicos, etc. Con el paso del tiempo estas barreras han sido cada vez más empleadas, especialmente en casos donde se requieren por un periodo de tiempo limitado. Esta situación se da, por ejemplo, en obras civiles en torno a las áreas de acopio de material, donde el objetivo es evitar el levantamiento de polvo debido a la acción del viento. También se suelen instalar en estaciones de esquí (Figura 23) adoptando como principales funciones las siguientes: protección frente a ventiscas, delimitadores de las pistas de esquí, protección frente a avalanchas...etc.



**Figura 23. Barrera formada por paños de malla de plástico unidos por medio de postes metálicos.**  
(<http://www.duboisag.com/en/professional-snow-fence.html>)

Algunas de las principales ventajas de esta clase de barreras son su rápida y sencilla instalación debido a la ligereza y flexibilidad que las caracteriza. Además, tienen una mayor vida útil en comparación a las formadas principalmente por madera debido a una menor degradación de los materiales con el paso del tiempo.

Las barreras constituidas principalmente por metal, material que las dota de una resistencia elevada y un largo periodo de vida útil. Como en los grupos anteriores, existe una gran variedad de modelos en función de su aplicación. A modo de ejemplo, en la Figura 24 se muestra una barrera de acero permeable con deflectores propuesta por Chen et al. (2012) diseñada para reducir la dispersión de partículas de material desde pilas de acopio por acción del viento. El estudio consistía en evaluar mediante técnicas experimentales y numéricas la capacidad del modelo de barrera propuesto frente a otros modelos tradicionalmente utilizados. La principal diferencia en el diseño del nuevo modelo con respecto a los tradicionales se encuentra en los deflectores. Estos han sido inclinados hacia arriba para dirigir el flujo de aire hacia la región por encima de las pilas de material en polvo. Los resultados indicaban que el nuevo modelo de barrera era más efectivo que las tradicionales en el control de dispersión de polvo.

Tomando como base el mismo tipo de barreras, Sakamoto et al. (2001) estudiaron el efecto de la geometría de los deflectores o lamas en la funcionalidad de la barrera, mediante una serie de ensayos en túnel de viento sobre tres tipologías de lamas

metálicas: lamas Joukowski, lamas con arco circular y lamas planas. En el estudio se observó que las lamas con formas curvas reducen la generación de vórtices en el sotavento de la barrera y, por lo tanto, la visibilidad de los usuarios de la vía de transporte mejora. Además, los resultados mostraron que la cantidad de nieve acumulada sobre la vía de transporte era menor cuando se instalaba la barrera con lamas distintas a las planas.



Figura 24. Modelo de barrera permeable de metal formada provista de deflectores (Chen et al., 2012).

Otro material que podría ser utilizado en la construcción de barreras cortaviento es el hormigón, ya que existen ejemplos de barreras de este material destinadas a otro tipo de aplicaciones como la protección frente al ruido (Figura 25). No obstante, los muros mostrados en la Figura 25 no suelen emplearse como barrera de protección frente al viento debido a su elevado coste de instalación y al largo periodo empleado en su construcción. Además, cuando estos sistemas de protección se instalan en climas extremos el hormigón requiere de aditivos específicos que encarecen el material.



Figura 25. Muros de hormigón para proteger viviendas del ruido generado en las vías de transporte (<http://www.allanblock.com>).

Las barreras instaladas en carretera tienen, como aplicaciones más comunes, la protección frente al ruido generado por el tráfico o la protección del tráfico frente a la acción combinada del viento y nieve. No obstante muchos de los modelos utilizados para dichos fines pueden ser igualmente útiles de cara a proteger el tráfico frente a condiciones adversas de viento lateral. Modelos de barreras exclusivamente destinados a proteger frente a la acción del viento lateral han sido propuestos y analizada su eficacia en diferentes estudios (Argentini et al., 2011; Bocciolone et al. 2008; Rocchi et al. 2012). Dichos estudios se analizaran en mayor detalle más adelante.

### **2.4.2.3. Parámetros constructivos**

Entre los parámetros representativos del diseño de los modelos de barreras cortaviento más comunes, cabe mencionar los siguientes:

- ✓ Altura de la barrera.
- ✓ Permeabilidad o porosidad de la barrera.
- ✓ Hueco inferior.
- ✓ Anchura de la barrera.
- ✓ Inclinação de las lamas de la barrera.

En función de la clase de barrera a construir se utilizaran unos u otros parámetros durante su diseño. Por ejemplo, durante el diseño de un muro el nivel de protección frente al viento dependerá principalmente de su altura, mientras que en una barrera compuesta por lamas otros parámetros como el solape entre lamas ó la inclinación de las mismas resultaran también relevantes de cara a la protección ofrecida.

Una gran variedad de estudios han tratado de encontrar relaciones entre algunos de estos parámetros de diseño y parámetros característicos del flujo de aire (Dong et al., 2007; Bitog et al., 2009) con el objetivo de determinar las dimensiones óptimas para diferentes modelos de barrera. A continuación se describen algunos de los estudios, así como sus conclusiones más relevantes. Entre los parámetros expuestos con anterioridad, la porosidad de la barrera resulta el más influyente en su capacidad de protección según Dong et al. (2007). En este estudio experimental se desarrolló un análisis detallado del comportamiento del flujo de aire en la región a sotavento de varias barreras con distintas porosidades. Se identificaron siete regiones de flujo detrás de la barrera caracterizadas

por distintos perfiles de velocidad. Según este estudio, la porosidad óptima de una barrera se encuentra entre 0.2 y 0.3 y se trata de un valor crítico en el control de dispersión de partículas. Esto es así porque un valor de porosidad más alto, propicia un elevado flujo a través de la barrera mientras que un valor más pequeño da lugar a una región de reflujos con una elevada presencia de vórtices en el sotavento de la barrera. Ambas circunstancias en exceso afectan negativamente al control de dispersión de partículas, tales como arena o nieve.

En Bitog et al. (2009) se estudió cómo afecta la altura de la barrera, su porosidad y la distancia entre barreras a la capacidad del sistema para reducir la velocidad de viento en la región a proteger. Para llevar esto a cabo, se aplicaron técnicas experimentales (túnel de viento) que aportaron información útil para el posterior desarrollo de los modelos numéricos. En este caso la porosidad óptima resultó igual a 0.2 ya que para este valor se obtuvo la máxima reducción de velocidad del viento en su sotavento. La altura de la barrera y la distancia entre las mismas resultaron no influir significativamente en su capacidad para reducir la velocidad del viento. La finalidad del estudio consistió en aportar información para prevenir la generación y difusión de polvo en regiones áridas del Sur de Corea mediante el uso de las barreras analizadas.

Las barreras cortaviento se diseñan en ocasiones dejando un hueco en la parte inferior de la misma por donde pasa el aire. Esta característica aporta dos ventajas a la barrera: reduce las cargas aerodinámicas soportadas por la barrera y evita la acumulación de partículas de polvo o nieve en ambos lados de la barrera. Estas acumulaciones generadas en torno a la barrera pueden llegar a deteriorarla hasta perder su funcionalidad. Esto es debido al efecto combinado del peso de la propia nieve y las cargas originadas por la acción del viento. El efecto tanto del hueco inferior como de la porosidad de una barrera en las presiones superficiales ejercidas sobre un modelo ficticio de pila de carbón fue estudiado por Park y Lee (2002). Los valores medios de presiones registrados experimentalmente sobre la superficie amentaban al aumentar el hueco inferior para una porosidad de la barrera de un 40%, considerando como el hueco inferior óptimo aquel que genera los valores mínimos de fluctuaciones de presión sobre las superficies del modelo. Los resultados del estudio indicaron que el tamaño óptimo para el hueco inferior era igual a  $0.125H$  (siendo  $H$  la altura de la barrera). Dividiendo la

barrera en dos partes y dotando cada una con un valor de porosidad, se detectó que la protección ofrecida por la barrera disminuía en relación a la barrera con porosidad uniforme. En el estudio se mostró que cuando la porosidad de la barrera decrece el coeficiente de presión medio disminuye en la superficie a barlovento del modelo, mientras que en la superficie a sotavento no ejerce una influencia significativa.

Por último, el tipo de estructura de una barrera también influye sobre el nivel de protección ofrecido por esta. Esto ha motivado que ciertas investigaciones consideren esta característica como uno de los aspectos a ser incluido en sus análisis. Por ejemplo, según Lin et al. (2007) en el sotavento de la barrera formada por álamos se originaba un penacho más corto en la dirección del flujo de aire en comparación a la formada por coníferas. En cuanto a la anchura del penacho, este fue 2 m más ancho para las coníferas que para los álamos, y la altura del penacho fue similar en ambos casos. También Coleman y Baker (1992) llevaron a cabo ensayos en túnel de viento con varias clases de configuraciones estructurales con el objetivo de reducir el riesgo de accidente de vehículos de carretera en condiciones de viento lateral.

#### **2.4.2.4. Capacidad de protección de las barreras cortaviento en las vías de transporte**

Las barreras cortaviento se encuentran entre las medidas más comúnmente empleadas para combatir las posibles consecuencias desencadenadas en las vías de transporte por condiciones adversas de viento lateral. La resistencia aerodinámica ofrecida por la barrera origina una pérdida de cantidad de movimiento en el flujo del aire tras impactar sobre ella. Por consiguiente, la corriente de aire incidirá sobre el vehículo a una velocidad de viento bastante menor, disminuyendo de este modo las cargas aerodinámicas inestabilizadoras soportadas por el mismo. El uso de las barreras de protección junto a la publicación de distintos procedimientos de actuación para regular el tráfico en condiciones adversas de viento, se ha ido fomentando por parte de algunos gobiernos. En muchos casos esto ha ocurrido después de no haber evitado un suceso trágico, como ocurrió en Febrero de 1994, cuando los fuertes vientos ocasionaron el descarrilamiento de un tren en un tramo de línea ferroviaria en Japón (Imai et al., 2002).

A la vista de la problemática expuesta, diferentes estudios han tratado de mejorar la seguridad del tráfico en base a sistemas de protección compuestos por barreras, siendo algunos de ellos los que a continuación se describen. Charuvisit et al. (2004) observaron que al instalar una barrera en las proximidades de una torre en un viaducto, se mejoraba la estabilidad del vehículo en condiciones de viento lateral. Concretamente, tanto la aceleración lateral como aceleración de giro del vehículo disminuyeron cuando la barrera fue instalada. En este mismo sentido, Argentini et al. (2011) desarrollaron un estudio en base a una campaña de ensayos en túnel aerodinámico (Figura 26). En este estudio se analizó la eficacia de barreras formadas por tablas como medio de protección, frente a la acción del viento lateral sobre un vehículo de gran longitud cruzando la estela de una torre. A diferencia del estudio anterior, en esta investigación se consideró el efecto de la altura de la barrera sobre las cargas aerodinámicas soportadas por el vehículo. Los resultados obtenidos en dicho estudio mostraban que el efecto de la altura de la barrera difería en función del coeficiente aerodinámico siendo evaluado.

Otros estudios se han dirigido hacia la optimización de los parámetros geométricos de distintos modelos de barreras en pos de reducir el riesgo de accidente bajo la acción del viento lateral. Yun et al. (2006), seleccionó para su estudio los siguientes parámetros: altura de la barrera ( $h_f$ ), hueco inferior ( $h_s$ ) y ángulo de plegado de la parte superior de la barrera ( $\alpha_b$ ) (Figura 27). El rango de variación de los parámetros fue: de 1.5 m a 2.5 m para la altura, de 0 m a 1 m para el hueco inferior y de  $-45^\circ$  a  $45^\circ$  para el ángulo de plegado. En este caso, las fuerzas y momentos ejercidos sobre el vehículo circulando por un terreno llano bajo la acción de viento lateral fueron obtenidos mediante técnicas numéricas. Los resultados obtenidos indicaban que al aumentar la altura de la barrera las fuerzas aerodinámicas del vehículo disminuían como parecía lógico a priori. También quedó patente que un plegado de la parte superior de la barrera hacia barlovento resultaba más efectivo que hacia sotavento. Por último, cabe mencionar que el espacio dejado como hueco inferior en la barrera ejerció una influencia significativa sobre la estabilidad del vehículo.

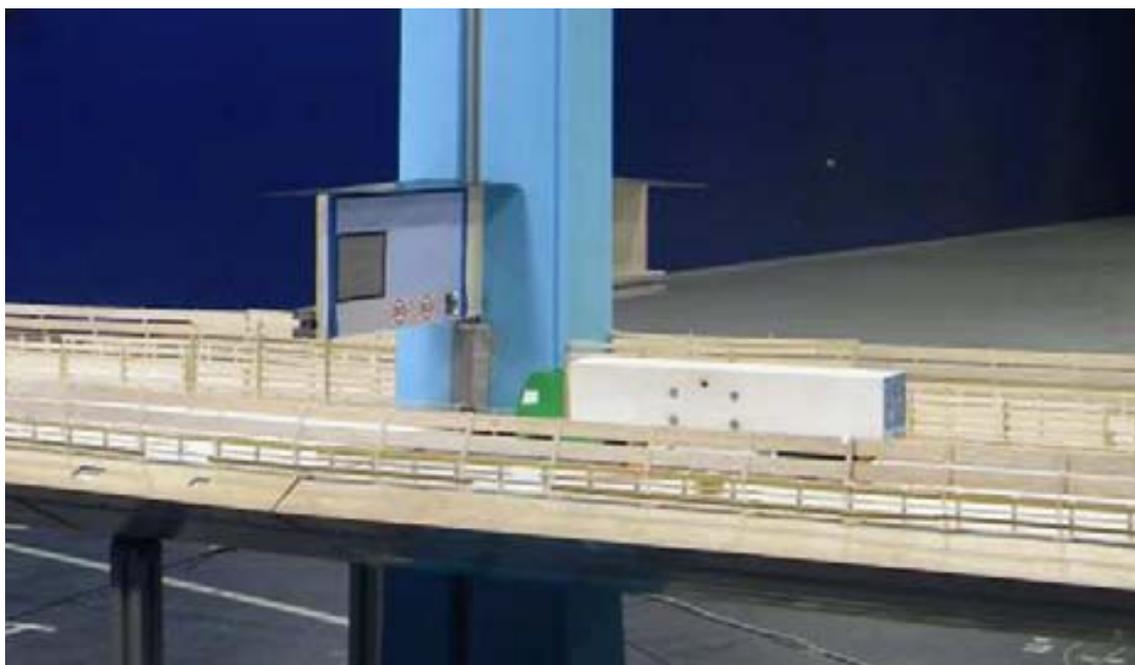


Figura 26. Vista general de la configuración del ensayo en túnel de viento (Argentini et al., 2011).

Según Rocchi et al. (2012), un correcto diseño de las barreras debería considerar el comportamiento dinámico del vehículo y la respuesta del conductor, y no analizar únicamente la aerodinámica de un vehículo estático como sucede en la mayoría de estudios. Esto podría resultar de gran importancia a la hora de evaluar la eficacia de las barreras. Por consiguiente, en este estudio consideraron la reacción del conductor y el comportamiento dinámico del vehículo en las simulaciones llevadas a cabo. Según los resultados obtenidos las barreras reducían significativamente el riesgo de vuelco, pero también inducían un efecto de succión en el vehículo obligando al conductor a realizar varias correcciones en la dirección. Como conclusiones más relevantes del estudio cabe mencionar que el riesgo de vuelco resultó mayor cuando no se instaló barrera alguna, y sin embargo, el riesgo de invasión del carril próximo fue más elevado al ser instaladas debido al mayor gradiente en la fuerza lateral al cruzar la estela.

Los patrones de flujo analizados por Kozmar et al. (2012) sobre dos modelos de tableros de viaducto mostraron una reducción de la velocidad media del viento y un incremento de la turbulencia sobre los tableros al instalar un modelo de barrera. Esto implica según el estudio que las cargas aerodinámicas laterales sobre los vehículos son menores debido a la reducción de la velocidad de viento, de igual forma que las cargas verticales lo son debido al incremento de la turbulencia.

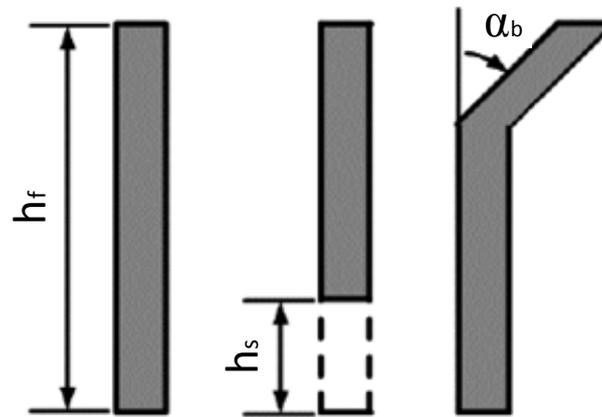


Figura 27. Parámetros geométricos de la barrera analizados en el estudio de sensibilidad (Yun et al., 2006).

Con el mismo objetivo que los estudios precedentes, Bocciolone et al. (2008) llevaron a cabo una comparativa entre la protección ofrecida por una barrera sólida y una barrera con una porosidad del 60% sobre un tren circulando por un viaducto. Los valores registrados en los coeficientes aerodinámicos mostraron que la barrera porosa ofrecía una peor protección que la sólida, pero mejor en comparación a la no instalación de ninguna barrera (Bocciolone et al., 2008).







### **3.1. TÚNEL AERODINÁMICO: FUNDAMENTOS**

#### **3.1.1. Generalidades**

Los túneles de viento se pueden definir como instrumentos científico-tecnológicos, cuyo cometido es la generación de una corriente fluida de características conocidas y controladas (Meseguer et al., 2001). Algunas de sus aplicaciones más comunes son: la determinación de las cargas inducidas por el viento sobre diferentes clases de obstáculos, análisis de estelas, dispersión de partículas, apantallamientos, etc.

Durante el proceso de diseño de una infraestructura (viaductos, edificios, cubiertas de estadios, etc.) resulta necesario establecer las acciones del viento, para lo cual se recurre a normativas o códigos de edificación. Pero estos códigos contemplan ciertas geometrías básicas que pueden distar bastante de la geometría real y, como consecuencia, las cargas reales pueden diferir en gran medida de las cargas previstas en base a la normativa. Para estos casos, estudiar el modelo de infraestructura mediante una serie de ensayos en túnel de viento puede resultar necesario para disminuir el riesgo de que la infraestructura sufra algún daño causado por la acción eólica.

Aunque definir las características locales del viento en torno a una ubicación puede resultar sencillo partiendo de los históricos de variables meteorológicas, la determinación teórica de las cargas aerodinámicas sobre un obstáculo ubicado en dicha región resulta difícil. Esto se debe a la complejidad de la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales que rigen la mecánica de fluidos. Estas circunstancias han motivado la aplicación de técnicas experimentales para determinar los datos de interés en base al problema objeto de estudio. Alguno de los aspectos más relevantes a considerar, en base a los cuales se decide llevar a cabo un estudio en túnel de viento, son los siguientes (Meseguer et al., 2001): coste de la estructura, incertidumbre de las cargas, uso de la infraestructura y criterios de funcionamiento.

Otros sectores, como el de la automoción, también han requerido de la utilización de túneles de viento, y su desarrollo se ha visto fuertemente ligado al desarrollo de esta tecnología. El comportamiento aerodinámico de los vehículos afecta de manera directa a parámetros de vital importancia en el proceso de desarrollo de un nuevo modelo; como

son el consumo de combustible y su estabilidad. Esta es la razón por la que un gran número de túneles de viento han sido construidos por fabricantes de automóviles (Barlow et al., 1999). Como parecía lógico, otros medios de transporte terrestre (trenes, autobuses, camiones, motocicletas, etc.) se han nutrido del conocimiento adquirido por la industria del automóvil y han empleado esta herramienta en sus programas de desarrollo.

### 3.1.2. Tipología de túneles aerodinámicos

En función de las aplicaciones de un túnel aerodinámico, tanto sus características constructivas como las prestaciones ofrecidas por el mismo durante su funcionamiento, difieren. Por ejemplo, un túnel aerodinámico en el que se desarrollen ensayos para el sector aeronáutico debería tener la capacidad de generar regímenes compresibles. Esta clase de túneles se caracterizan por tener secciones en la zona de ensayo más pequeñas y por generar mayores velocidades de viento que en los túneles aerodinámicos destinados al campo de la aerodinámica civil. Por consiguiente, en función del número de *Mach*, el cual describe la relación entre la raíz cuadrada de las fuerzas de inercia y la raíz cuadrada de las fuerzas que tienen su origen en la compresibilidad del fluido, se pueden distinguir las siguientes clases de túneles: de régimen subsónico, de régimen transónico, de régimen supersónico o de régimen hipersónico. Por lo tanto, en función del número de *Mach* (*Ma*), la clasificación queda del siguiente modo:

- ✓ Subsónico  $Ma < 0.7$
- ✓ Transónico  $0.7 < Ma < 1.2$
- ✓ Supersónico  $1.2 < Ma < 5$
- ✓ Hipersónico  $Ma > 5$

Los túneles de régimen subsónicos se pueden clasificar a su vez en incompresibles ( $Ma < 0.3$ ) o compresibles ( $Ma > 0.3$ ).

Considerando la estructura global del conducto, se pueden identificar dos tipos de túneles en función de si tienen o no conducto de retorno. A los primeros se les denomina túneles de circuito cerrado (Figura 28) y a los segundos túneles de circuito abierto o tipo Eiffel (Figura 29). En el caso de los túneles de circuito cerrado el flujo

circula de forma cíclica y se pueden alcanzar mayores velocidades durante el ensayo en comparación a los de circuito abierto. Esto se debe a que las pérdidas de energía en el fluido son menores ya que se aprovecha o recicla la energía con la que el fluido abandonaría el túnel en el caso de ser de circuito abierto. En los túneles de circuito abierto se toma el aire directamente de la atmósfera mediante la succión producida por el ventilador, el cual fluye por el interior del túnel hasta la boca de salida donde se devuelve a la atmósfera (Figura 29).

En ambos tipos de túneles la velocidad del fluido se controla en las diferentes partes que lo componen mediante la modificación de su geometría. A continuación, partiendo de la cámara de ensayos y siguiendo el sentido de la corriente de aire, se describen los elementos habituales que constituyen los túneles en ambas configuraciones (Barlow et al., 1999) según lo indicado en la Figura 28 y la Figura 29:

- a) **Cámara de ensayos y primer tramo recto**: Se trata de la parte del túnel donde se ubica el modelo a estudiar; el ratio entre la longitud de la cámara de ensayos y el diámetro hidráulico suele ser igual o superior a 2.
- b) **Primer Difusor**: Suele tener una longitud que es 3 o 4 veces la longitud de la cámara de ensayos. El ángulo de divergencia típico suele estar comprendido en un rango entre  $2^\circ$  y  $3.5^\circ$ , y el ratio entre el área de salida y entrada suele variar de 2 a 3. La función de este elemento es reducir la velocidad del fluido para mejorar el rendimiento energético del túnel.
- c) **Primera esquina compuesta por deflectores**: Los deflectores permiten reconducir la dirección del flujo de aire y se diseñan con una forma geométrica que perturbe el flujo lo menos posible (mínima turbulencia generada y mínimas pérdidas de carga).
- d) **Segundo tramo recto**: Este tramo puede ser una prolongación del difusor o puede ser una sección de área constante.
- e) **Pantalla de seguridad**: Se utiliza para prevenir que partes desprendidas del modelo alcancen el ventilador y lo puedan dañar.
- f) **Segunda esquina compuesta por deflectores**: Pueden ser una copia de los situados en la primera esquina o bien pueden tener unas dimensiones más pequeñas para ahorrar costes en su construcción.

- g) **Zona de transición de una sección transversal rectangular a circular:** La presencia de este tramo se debe a que la sección del túnel es rectangular mientras que la sección del ventilador es circular.
- h) **Sección del ventilador.**
- i) **Segundo difusor o tramo de retorno:** Este tramo presenta de nuevo una transición desde la sección circular del ventilador a la rectangular del túnel. Este segundo difusor sigue unas recomendaciones similares al primero en torno a su diseño.
- j) **Tercera esquina incorporando deflectores.**
- k) **Tercer tramo recto del túnel:** Este puede ser de área constante.
- l) **Intercambiador de calor.**
- m) **Cuarta esquina incorporando deflectores:** Estos suelen ser una copia de los presentes en la tercera esquina.
- n) **Difusor de amplia divergencia en la sección:** Este difusor presenta una pantalla para minimizar la separación del flujo desde sus paredes. El ángulo entre las paredes y su eje se sitúa en torno a los 45° y el ratio de áreas va de 2 a 4.
- o) **Área de asentamiento.**
- p) **Acondicionadores de flujo:** Suelen tratarse de estabilizadores de flujo y pantallas para controlar la turbulencia.
- q) **Contracción o tobera:** Zona de aceleración del flujo de aire cuyo ratio entre sus áreas de entrada y salida varía de 7 a 12.

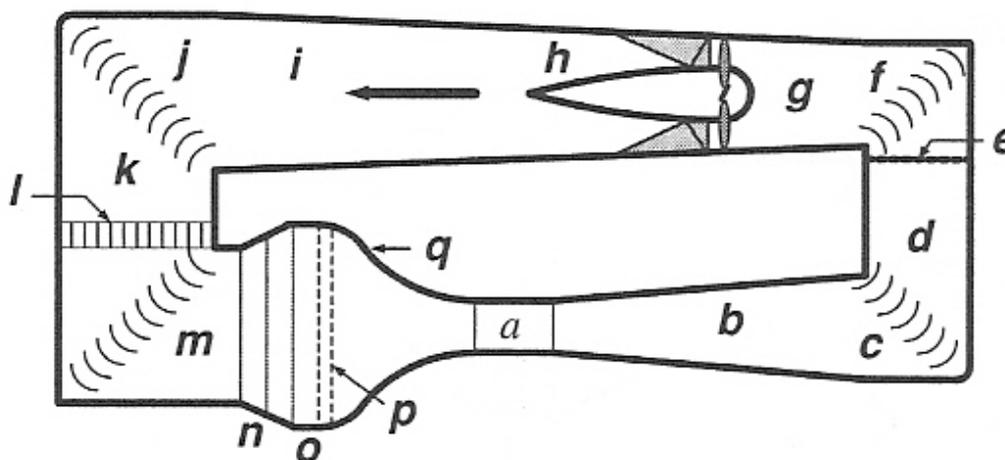


Figura 28. Configuración de un túnel con circuito cerrado y sus componentes (Barlow et al., 1999).

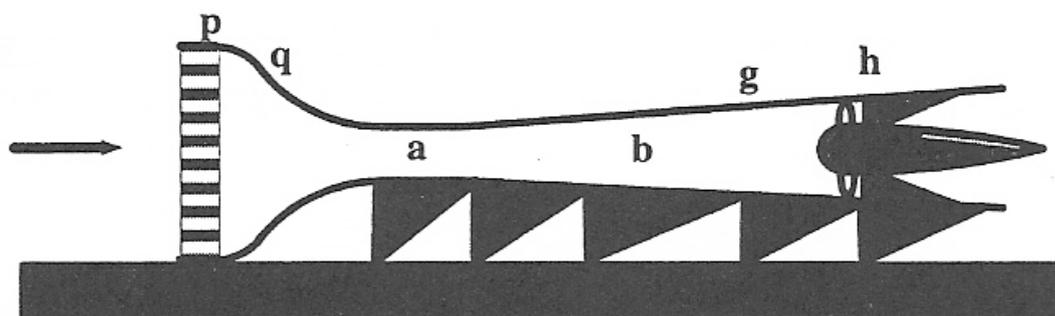


Figura 29. Configuración de un túnel de circuito abierto y sus componentes (Barlow et al., 1999).

Los túneles aerodinámicos pueden tener la cámara de ensayos cerrada o abierta. Un túnel con la cámara abierta tendrá un ratio de energía entre la salida del cono de contracción y entrada al difusor aguas abajo menor que si la cámara estuviera cerrada. La combinación de túnel con circuito abierto y cámara abierta causa ciertos problemas, que se pueden resolver encerrando la cámara en una habitación, es decir pasando a ser una cámara cerrada. Además, los túneles con cámaras abiertas experimentan vibraciones en forma de pulsaciones similares a las presentes en tuberías. Una ventaja de los túneles con cámara abierta frente a los de cámara cerrada, reside en la facilidad de acceso a los modelos objeto de ensayo. La longitud de la cámara abierta debe ser tal que la estela producida por el modelo no se escape en su divergencia de entrar al difusor.

Las cámaras de ensayo cerradas suelen ser de área constante, pudiendo ser de sección cuadrada o rectangular. En este último caso una de las dimensiones transversales suele ser 1.4 veces la otra (Meseguer et al., 2001). Los túneles para aplicaciones aeronáuticas tienen una longitud de cámara relativamente corta en relación a los túneles en los que se simulan las condiciones de una capa límite terrestre. Este tipo de túneles aerodinámicos requieren de una cámara de ensayos suficientemente larga para, por un lado, desarrollar el perfil de velocidades deseado y, por otro lado, posibilitar la instalación de los medios que contribuyan a la generación de turbulencia y del propio perfil de velocidades (Figura 30).

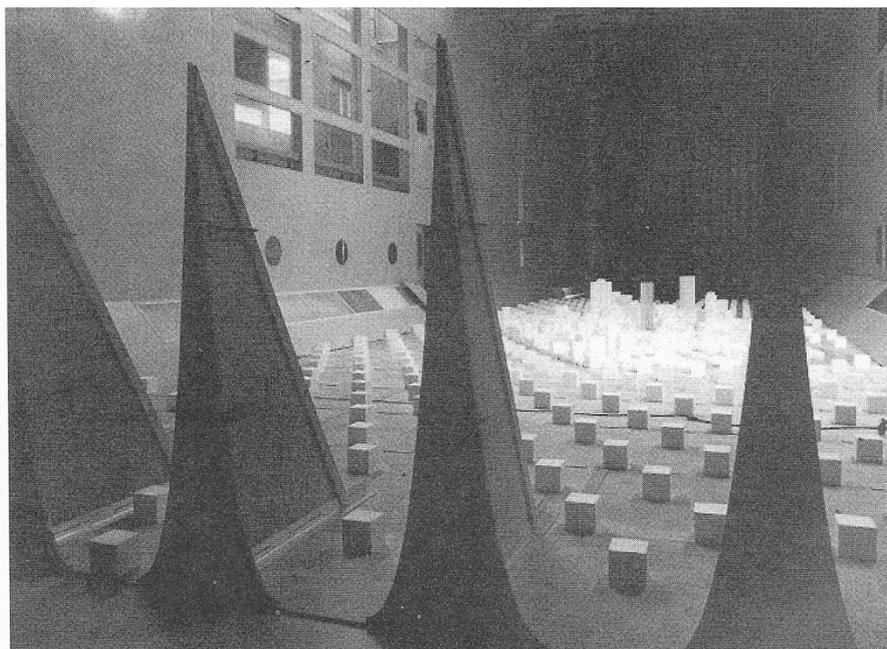


Figura 30. Elementos que contribuyen al modelado de la capa límite atmosférica (Barlow et al., 1999).

### 3.1.3. Consideraciones previas al desarrollo de los ensayos experimentales

Cuantificar los efectos del viento en ciertos casos puede ser de suma importancia, como por ejemplo en el diseño de una estructura o en el control de la dispersión de contaminantes. En estos casos, los túneles aerodinámicos son una herramienta muy útil para llevar a cabo estudios sobre modelos dimensionados a una escala menor de la real. Habitualmente el proyecto que demanda esta información se desarrolla en torno a una localización real con unas determinadas características eólicas, las cuales deben considerarse durante los ensayos en el túnel aerodinámico. Las características eólicas se suelen definir a partir de series temporales de datos de viento, medidos por estaciones meteorológicas instaladas en la zona bajo estudio. La topografía de la región y el flujo de aire aguas arriba del lugar de estudio condicionan el tipo de viento en la zona a caracterizar.

En estudios, por ejemplo, de aerodinámica civil, se suelen utilizar un tipo de túneles de viento conocidos como túneles de capa límite, que permiten generar una capa límite atmosférica acorde al comportamiento real del flujo de aire terrestre. Para estudiar la estabilidad de obstáculos afectados por fuertes vientos se modela habitualmente la capa límite con una estratificación térmica neutral. Esto es debido a que los vientos fuertes no son afectados significativamente por la estratificación térmica y esta resulta más sencilla

de modelar. En los ensayos se genera una capa límite turbulenta con unas propiedades de velocidad fluctuante y media estacionarias. Los requisitos mínimos para simular correctamente unas determinadas condiciones eólicas representativas de una ubicación real, son los siguientes:

- ✓ La distribución vertical de velocidad de viento media debe ser similar a la presente en la región de estudio.
- ✓ Las propiedades relativas a la turbulencia atmosférica deben ser similares a las reales.
- ✓ El gradiente de presión longitudinal en la cámara de ensayos debe ser suficientemente pequeño para no afectar significativamente a los resultados.

Por otra parte, los ensayos en túnel realizados sobre un modelo a escala exigen que se guarden ciertas semejanzas entre el prototipo y el modelo para que los ensayos aporten información representativa del caso real. Las principales semejanzas son: geométrica, cinemática y dinámica. El cumplimiento de estas semejanzas hace posible que el flujo de aire alrededor del modelo y el movimiento de aire alrededor del obstáculo real sean similares.

La **semejanza geométrica** implica que todos aquellos detalles de la geometría del prototipo que influyen en el fenómeno aerodinámico a estudiar se representan en el modelo. A la hora de seleccionar una escala geométrica para el modelo, se debe satisfacer la igualdad entre el número de *Jensen* del prototipo y el del modelo. El número de *Jensen* es el ratio entre una dimensión característica del objeto de estudio,  $L_b$  en la expresión (6) y una longitud meteorológica representativa del viento simulado. Este se puede expresar del siguiente modo:

$$\left( \frac{L_b}{z_0} \right)_m = \left( \frac{L_b}{z_0} \right)_p \quad (6)$$

En este caso se expresa en función de la longitud de rugosidad aerodinámica del terreno,  $Z_0$  en la expresión (6), pero se puede expresar en función de la altura de gradiente de la capa límite o de la escala de turbulencia.

Existirá  **semejanza cinemática**  cuando las líneas de corriente en el modelo y prototipo sean semejantes. Para cumplirla, resulta necesario que la geometría sea también semejante, si bien esta es una condición necesaria pero no suficiente. Por ejemplo, si el estudio queda enmarcado en el campo de la aerodinámica civil, las características de la capa límite presente en el caso real deben simularse correctamente como ya se comentó previamente. A modo de síntesis, se trata de simular las condiciones aguas arriba del modelo para que sean representativas de la realidad.

Por último, la  **semejanza dinámica**  implica que la distribución de fuerzas en los flujos, tanto del modelo como del prototipo, es similar. Concretamente, las fuerzas del mismo tipo (rozamiento, presión, etc.) deben guardar paralelismo entre el modelo y el prototipo en puntos homólogos, y el ratio entre los módulos de las fuerzas del mismo tipo deberán ser iguales en ambos casos. Fruto de esta relación, para predecir las cargas sobre el prototipo, solo será necesario multiplicar por una constante las cargas del modelo obtenidas en los ensayos en el túnel. La existencia de la semejanza dinámica obliga a satisfacer la semejanza cinemática por un lado y, por otro, que el ratio entre las densidades del modelo y del prototipo en puntos homólogos se mantenga constante. Para evaluar si existe o no semejanza se recurre a grupos adimensionales que describen relaciones entre las distintas variables implicadas en el flujo. Estos grupos adimensionales son conocidos en la Mecánica de Fluidos como *números*.

De lo expuesto anteriormente se deriva que la semejanza dinámica conlleva que las fuerzas que actúan sobre una masa de aire en el prototipo están en la misma relación que las presentes en el modelo. En estudios de aeronáutica, uno de los requisitos para validar la existencia de semejanza dinámica es la similitud entre el número de *Mach* (*Ma*) obtenido en el modelo y en el prototipo. En cambio en aerodinámica civil, donde no se presenta variaciones de la densidad del fluido (flujos incompresibles), se utiliza como criterio el número de Reynolds, que describe la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción, y se expresa como sigue:

$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (7)$$

donde *U* y *L* son una velocidad característica del fluido y una longitud característica del sistema respectivamente. Para mantener constante el número de Reynolds en el modelo

y en el prototipo, se debe de conseguir la igualdad del producto  $UL$  en ambos casos, de tal modo que un modelo a escala 1/200 implicaría una velocidad del flujo en los ensayos 200 veces superior a la real. Pero esto conllevaría que el número de Mach aumentaría y que posiblemente el régimen del flujo pasaría de incompresible a compresible. De ahí que para satisfacer la semejanza dinámica en aerodinámica civil no sea estrictamente necesario conseguir la igualdad en el número de Reynolds. De esta forma, se da por satisfecha dicha semejanza si los coeficientes adimensionales de fuerzas y momentos se muestran independientes del número de Reynolds. Esta afirmación se puede observar físicamente en los objetos que presentan aristas agudas ubicadas a barlovento del objeto, las cuales causan el desprendimiento de la capa límite a velocidades relativamente bajas, fenómeno que no cambia con el incremento de la velocidad del viento.

## **3.2. FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

### **3.2.1. Generalidades**

La dinámica de fluidos computacional, conocida por el acrónimo en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics), se encarga de resolver la formulación que rige el movimiento de los fluidos empleando algoritmos y métodos numéricos. Los códigos CFD se traducen en programas informáticos que contemplan en mayor o menor medida la física subyacente de la dinámica de los fluidos con el objetivo de predecir su comportamiento. No obstante, existen dos enfoques alternativos a los códigos CFD para analizar el movimiento de los fluidos: el teórico y experimental (Zikanov, 2010). El enfoque teórico tiene como principal fortaleza la capacidad de alcanzar soluciones exactas, pero queda restringida su aplicación a un limitado número de casos prácticos de una elevada simplicidad. Esto es debido principalmente a los siguientes motivos (Date, 2005):

- La tridimensionalidad de las ecuaciones.
- La no linealidad de las ecuaciones y su acoplamiento.
- Los dominios de la solución para problemas ingenieriles reales son habitualmente de una elevada complejidad.

En cuanto al enfoque experimental, el largo periodo de configuración de los ensayos en túnel de viento unido a los elevados costes (instrumentación, maquetas, energía, tiempo,

etc.) asociados a los mismos, tampoco hacen de esta la opción ideal. Si se compara la metodología basada en la simulación numérica con los ensayos experimentales, en ciertos aspectos como son los costes y la flexibilidad a la hora de medir ciertos parámetros, esta puede resultar una mejor opción en función del estudio a realizar. Habitualmente, en diferentes campos de la ingeniería se suele combinar el enfoque experimental con el numérico en las fases de diseño de nuevos prototipos. Por ejemplo, en el diseño de nuevos aviones se lleva a cabo la mayor parte del estudio y filtrado de una gran variedad de modelos mediante el uso de códigos CFD, y a aquel diseño que muestre unas mejores prestaciones se le aplican las últimas modificaciones a partir de los ensayos en túnel de viento (Wendt, 2009; NASA, 1978).

La principal limitación de los códigos CFD radica en su eficacia al aportar soluciones próximas a la realidad, lo que se debe a varios aspectos. Entre los relacionados con el software cabe destacar una formulación implementada en el código que no recoge toda la física del problema y un tratamiento numérico impreciso. Esto se manifiesta claramente en los flujos turbulentos, ya que la turbulencia aún no ha sido resuelta analíticamente y, requiere por tanto del uso de aproximaciones matemáticas durante su resolución, conocidas como modelos de turbulencia. Dichos modelos se componen en parte de constantes cuyo ajuste se hace mediante datos empíricos. Más adelante se detallarán las principales características de estos modelos, en base a las cuales se opta por uno u otro para una determinada aplicación.

Desde la década de los 70, los paquetes de software comerciales de CFD se han desarrollado tanto cuantitativamente como cualitativamente en base a los avances de los computadores digitales (Blazek, 2001; Tu, 2013), propiciando su aplicación en entornos ingenieriles como defensa, industria, organizaciones ambientales, automoción, etc. (Date, 2005).

### 3.2.2. Propiedades características del flujo y del fluido

A la hora de resolver un determinado problema mediante códigos CFD se deben analizar previamente algunas propiedades relativas al sistema flujo-fluido bajo estudio, tales como:

- Flujo estacionario o transitorio.
- Fluido viscoso o no viscoso.
- Régimen de flujo laminar o turbulento.
- Flujo compresible o incompresible.

Considerar finalmente una opción u otra entre las propiedades del sistema indicadas, depende no solo de las características del caso estudiado si no también del coste computacional que supone su implementación y como puede repercutir sobre los resultados de interés. Por ejemplo, en ciertos casos puede resultar interesante considerar el fluido del sistema como no viscoso aunque no lo sea ya que el cálculo numérico resulta más sencillo y los resultados no dependen significativamente de esta propiedad. Los aspectos a cuestionarse durante el modelado numérico con respecto a las características del flujo están relacionados según el esquema de la Figura 31.

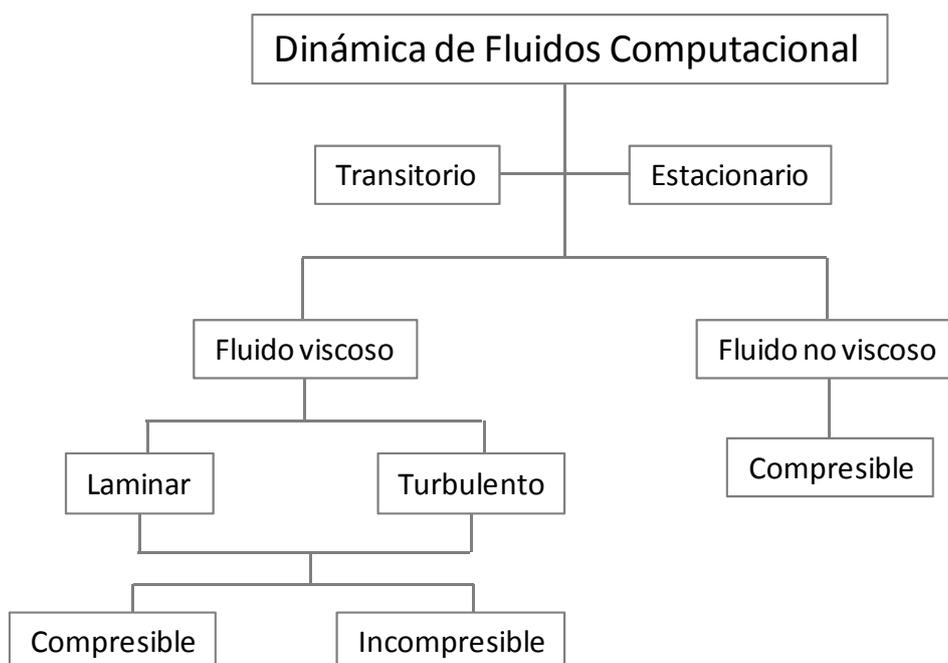


Figura 31. Aspectos a considerar en cuanto a las propiedades del sistema flujo-fluido durante el modelado con CFD (Tu, 2013).

### 3.2.3. Ecuaciones gobernantes del movimiento de los fluidos

Los aspectos físicos que gobiernan el movimiento de los fluidos dependen de tres principios fundamentales: conservación de masa; 2ª ley de *Newton*; y conservación de la energía (Date, 2005; Wendt, 2009; Chung, 2010). Dichos principios se expresan en su forma más genérica mediante ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan la dinámica de fluido. Estas ecuaciones de gobierno forman parte de las bases teóricas en las que se fundamentan los códigos CFD y que resuelven habitualmente mediante alguno de los siguientes métodos numéricos: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. La aplicación de estos permite a los códigos CFD alcanzar soluciones discretas en espacio y tiempo relativas a campos tales como: temperatura  $T(x,y,z, t)$ , velocidad  $u(x,y,z, t)$ , densidad  $\rho(x,y,z, t)$ , etc.

Para el caso objeto de estudio, el flujo de aire que incide sobre los vehículos en la carretera se puede considerar incompresible ( $\rho=\text{cte}$ ), ya que el número de Mach se encuentra por debajo de 0.3 (Tu, 2013). Considerando esta propiedad, y sin despreciar los efectos viscosos del fluido, las ecuaciones de conservación de masa y de momento instantáneas (expresiones (8) y (9)) que forman parte del conjunto de ecuaciones de Navier-Stokes y que gobiernan el movimiento del fluido se pueden expresar en un sistema de coordenadas cartesianas mediante tensores, despreciando fuentes externas adicionales del siguiente modo:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (9)$$

### 3.2.4. Tratamiento numérico de la turbulencia

Se define como turbulencia o flujo turbulento a un estado de régimen del flujo caracterizado, entre otros aspectos, por comportarse de forma caótica en espacio y tiempo. La mayoría de los flujos dados en el ámbito ingenieril son turbulentos, lo que ha motivado su estudio con la finalidad de predecir un comportamiento aún sin resolver numéricamente sin utilizar aproximaciones. El régimen del flujo puede ser laminar o turbulento. Como criterio para establecer la transición entre un régimen y otro se suele

utilizar el número de Reynolds. Por ejemplo, un valor alto del número de Reynolds resulta característico de flujos turbulentos debido a que las fuerzas viscosas no tienen la intensidad suficiente para atenuar las fluctuaciones generadas en el flujo de aire.

Resulta interesante recordar que la turbulencia está formada por un espectro de fluctuaciones de velocidad donde cada una de ellas se caracteriza por una escala espacio-temporal. Considerando un tamaño para la escala del vórtice más pequeño  $\eta$ , la distancia entre nodos de una malla debería ser inferior a dicha escala para registrar sus fluctuaciones. Por ejemplo, para un dominio de fluido con una longitud en los tres ejes igual a  $L_{\text{Dominio}}$ , el número de celdas necesarias en cada dirección sería:

$$N = L_{\text{Dominio}} / \eta \sim Re^{3/4} \quad (10)$$

Considerando las tres dimensiones, el número total de celdas ascendería aproximadamente hasta  $Re^{9/4}$ . Por lo tanto, para la mayoría de casos en los que el número de Reynolds supera frecuentemente la magnitud de  $10^4$ , se requerirían mallas con un número de celdas a partir de  $10^9$ , situación que demandaría un gran esfuerzo computacional. Concretamente, Zikanov (2010) estima que la simulación de un flujo turbulento con un  $Re=10^6$  mediante una estación de trabajo de 100 Gflops tardaría en torno a 3000 años en resolverse. El desafío computacional expuesto ha sido abordado desde distintos enfoques numéricos, cuya principal diferencia radica en si la turbulencia se resuelve o se modela. Cuanto más amplio sea el rango de escalas del espectro de turbulencia resuelto más preciso será el cálculo, pero para ello se requerirá un mayor esfuerzo computacional. Los principales métodos numéricos utilizados, ordenados desde el más al menos preciso, son los siguientes: simulación numérica directa (DNS), simulación de grandes eddys (LES) y ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en base a la descomposición de Reynolds (RANS).

#### 3.2.4.1. Simulación numérica directa (DNS)

La simulación numérica directa permite resolver todas las escalas de turbulencia presentes sobre el flujo medio. Con este método se alcanzan soluciones discretas para las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes sobre una malla suficientemente fina. Dicha malla debe permitir capturar las escalas de longitud más pequeñas en la que se produce la disipación de la energía cinética turbulenta en energía interna. Por otro lado

esta técnica transitoria requiere pasos temporales suficientemente pequeños como para poder registrar las fluctuaciones de velocidad de mayor frecuencia (Andersson et al., 2012).

#### **3.2.4.2. Simulación de grandes Eddys (LES)**

Este método resuelve únicamente las escalas intermedias y grandes que comprenden la zona del espectro de la turbulencia hasta el conocido subrango inercial. Las escalas pequeñas de la turbulencia son las elegidas para ser modeladas debido principalmente a su comportamiento isotrópico, característica que facilita el procedimiento matemático de modelado. Por consiguiente, para evitar su resolución se aplicará un filtrado espacial a las ecuaciones transitorias de Navier-Stokes. Los modelos de turbulencia, denominados comúnmente para este enfoque como modelos de submalla, son el mecanismo que permite considerar el efecto de las pequeñas escalas sobre el flujo resuelto. Este enfoque está siendo empleado en la actualidad con mayor frecuencia para simular flujos bastante sencillos, debido al continuo aumento de la potencia de cálculo de las estaciones de trabajo.

Sin embargo, las simulaciones siguen demandando mallas muy finas y pasos temporales cortos, lo que deriva en tiempos de cálculo que pueden extenderse en el tiempo durante varias semanas para poder alcanzar resultados relativamente fiables en problemas relativamente sencillos aplicando otros métodos (Hirsch, 2007). Tanto el enfoque DNS como el LES no son tan empleados como el RANS, debido por un lado a los altos requisitos computacionales necesarios y, por otro, a que en la mayoría de los problemas donde se aplican técnicas numéricas resulta suficiente con conocer las propiedades del flujo promediadas en el tiempo. En esta idea se basa el uso del tercer enfoque, RANS, el cual se estudiará en mayor detalle que los anteriores debido a que es el empleado en la presente Tesis Doctoral.

#### **3.2.4.3. Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en base a la descomposición de Reynolds (RANS)**

Reynolds propuso hace más de cien años que en un flujo estadísticamente estable, cada variable  $\phi(x_i, t)$ , se podía expresar como la suma de un valor promediado  $\bar{\phi}$ , y una fluctuación  $\phi'$ , sobre ese valor:

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i) + \phi'(x_i, t) \quad (11)$$

donde

$$\bar{\phi}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \phi(x_i, t) dt \quad (12)$$

siendo  $T$  el intervalo promediado. Este intervalo debe ser más grande en relación a la escala de tiempo de las fluctuaciones para eliminar su efecto sobre el flujo medio. Por otro lado si  $T$  es suficientemente grande,  $\bar{\phi}$  no dependerá del instante inicial del promediado. Si el flujo es estadísticamente inestable, el valor medio de las variables no puede ser calculado mediante la expresión (12) del promediado temporal. En estos casos el valor medio se calcula a partir del promedio del conjunto de datos:

$$\bar{\phi}(x_i, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi_n(x_i, t) \quad (13)$$

donde  $N$  es el número de miembros del conjunto, el cual debe ser suficientemente grande para eliminar los efectos de las fluctuaciones, y  $\phi_n(x_i, t)$  es el valor instantáneo de una variable que representa la posición  $n$  en el conjunto de miembros. Este tipo de promediado puede ser aplicado a cualquier clase de flujo, y se efectúa sobre las ecuaciones de Navier-Stokes instantáneas (Expresiones (8)-(9)), obteniéndose las conocidas *ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en base a la descomposición de Reynolds* (RANS).

Antes de presentar las ecuaciones RANS, resulta interesante exponer ciertos aspectos matemáticos empleados en su desarrollo para alcanzar su forma final. El promediado de los términos lineales dará como resultado la parte media de la variable ya que el promediado de la parte fluctuante es nulo. Mientras, el promediado de los términos cuadráticos no lineales se obtiene de la suma del producto de las partes medias de las variables y de un término de covarianza:

$$\overline{u_i \phi} = (\overline{u_i} + \overline{u'_i}) \cdot (\overline{\phi} + \overline{\phi'}) = \overline{u_i} \overline{\phi} + \overline{u'_i \phi'} \quad (14)$$

El último término será cero si las dos cantidades no se correlacionan. Esto no suele ocurrir en flujos turbulentos y, como consecuencia de ello, en la ecuación de conservación de momento surgen nuevos términos, tales como las tensiones de Reynolds o flujos escalares turbulentos  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  que se expresarían como  $\overline{\rho u'_i \phi'}$  de forma

genérica. Sustituyendo las variables instantáneas por la descomposición de Reynolds en las Expresiones (8) y (9), y promediando las ecuaciones resultantes aplicando los conceptos matemáticos indicados, se obtendrán las ecuaciones RANS. Estas ecuaciones para flujos incompresibles, expresadas mediante tensores quedan del siguiente modo:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (16)$$

A su vez, la expresión (16) se puede expresar como sigue

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{p} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right\} \quad (17)$$

La tensión de Reynolds permite incluir el efecto de la parte fluctuante sobre el flujo medio, pero a la vez se presenta como una incógnita adicional que debe ser modelada para cerrar el sistema de ecuaciones. Con tal finalidad surgen una gran variedad de modelos de turbulencia. Las tres categorías en las que se pueden agrupar los modelos de turbulencia RANS, según el método matemático para determinar las tensiones de Reynolds, son las siguientes: modelos de viscosidad del Eddy lineal, modelos de viscosidad del Eddy no lineal y modelo de tensiones de Reynolds. Los modelos que posteriormente se utilizan en la simulación numérica son los siguientes:  $k-\omega$  SST (Menter, 1994); SST transición (Menter et al., 2006; Langtry y Menter, 2009) y RSM (Launder et al., 1975; Launder, 1989). Todos los modelos que más adelante se analizarán, a excepción del modelo RSM, se basan en la hipótesis de viscosidad del Eddy lineal propuesta por Boussinesq.

### ***Modelos basados en la hipótesis de viscosidad del Eddy lineal***

Aquellos modelos que se basan en el concepto de viscosidad del Eddy lineal modelan las tensiones de Reynolds según la aproximación de Boussinesq. La asunción de Boussinesq se apoya en la hipótesis de que existe una analogía entre las tensiones viscosas proporcionales al ritmo de deformación de los elementos del fluido y las tensiones de Reynolds. Según esta, el tensor de tensiones de Reynolds se puede expresar como sigue:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (18)$$

donde  $k$  se puede expresar como  $k = 1/2 \overline{u'_i u'_i}$ .

Una de las desventajas de la aproximación de Boussinesq se presenta al asumir la turbulencia como isotrópica, ya que genera una falta de precisión en los resultados de flujos relativamente sencillos. No obstante, el ahorro en cálculo computacional compensa la falta de precisión y motiva el uso de este tipo de modelos. La viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , introducida por la expresión (18), se presenta como una incógnita adicional a determinarse mediante la siguiente expresión:

$$\mu_t = \rho \nu_t = C_v \frac{l^2}{t} = C_v u l \quad (19)$$

donde  $u$  y  $l$  son las escalas características asociadas a los grandes vórtices y  $C_v$  es una constante de proporcionalidad cuyo valor varía con el modelo de turbulencia empleado. Dichas escalas serán determinadas a partir de un número de ecuaciones de transporte propuestas por los distintos modelos de turbulencia. Este aspecto ha dado lugar a una nueva clasificación de los modelos de turbulencia en función del número de ecuaciones que se proponen para cerrar el sistema. Desde los modelos que no requieren ecuaciones de transporte adicionales, conocidos como modelos de cero-ecuaciones, a otros formados por una, dos, tres y hasta cuatro ecuaciones, denominados de forma equivalente. Los modelos de dos ecuaciones son los más ampliamente validados y empleados en aplicaciones ingenieriles.

Los modelos de cero ecuaciones no suelen utilizarse, principalmente porque no tienen en cuenta ni la acumulación de la turbulencia ni su transporte por difusión y convección, aspecto que incrementa el desacuerdo entre las predicciones de los modelos numéricos y los resultados experimentales. Para mejorar estas discrepancias, se propuso relacionar la viscosidad turbulenta con cantidades turbulentas transportadas, obligando a determinar las escalas de velocidad y longitud, basándose en las ecuaciones de transporte de cantidades turbulentas.

Los modelos de una ecuación determinan la escala de velocidad mediante una ecuación de transporte y la escala de longitud algebraicamente, mientras que los modelos de dos

ecuaciones determinan las dos escalas desde ecuaciones de transporte. Debido a lo expuesto, estos modelos han sido los más ampliamente validados y utilizados en aplicaciones prácticas.

Habitualmente, en los modelos de turbulencia de dos ecuaciones, determinar la escala de velocidad requiere de la resolución de una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta y la resolución de otra ecuación de transporte de una propiedad turbulenta relacionada explícitamente con la escala de longitud. Dicha propiedad, y su relación con la escala de longitud, dependerá del modelo de turbulencia empleado. A continuación se describirán las principales características y expresiones de los modelos de turbulencia empleados en la metodología numérica. No obstante, otros modelos no utilizados como el modelo estándar  $k-\varepsilon$  y el modelo estándar  $k-\omega$ , también serán analizados ya que su estudio resulta útil para comprender el comportamiento de los modelos empleados.

### **Modelo estándar $k-\varepsilon$**

En este modelo la cantidad turbulenta transportada y utilizada para determinar la escala de velocidad es la disipación de energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ . La otra ecuación de transporte, como se ha especificado anteriormente, estará destinada a la energía cinética turbulenta  $k$ , y se puede expresar del siguiente modo:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\overline{u'_j u'_i u'_i}}{2} + \frac{\overline{p' u'_j}}{\rho} \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \quad (20)$$

Los términos indicados en el lado izquierdo de la ecuación, junto al primer término del lado derecho, no requieren ser modelados. El segundo término del lado derecho representa la difusión turbulenta de energía cinética (que es en realidad el transporte de las fluctuaciones de velocidad por sí mismas). Este término se modela habitualmente en base a la asunción de difusión del gradiente:

$$-\left( \frac{\overline{u'_j u'_i u'_i}}{2} + \frac{\overline{p' u'_j}}{\rho} \right) \approx \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (21)$$

donde  $\sigma_k$  es el número de *Prandtl-Schmidt*, cuyo valor es aproximadamente la unidad.

La viscosidad cinemática turbulenta para este modelo de turbulencia se define como:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (22)$$

El tercer término en el lado derecho de la expresión (20) representa la producción de energía cinética turbulenta, definida como el producto entre el ritmo de producción de energía cinética turbulenta y el flujo medio. Físicamente esto se traduce en una transferencia de energía cinética turbulenta desde el flujo medio a la turbulencia. Considerando la hipótesis de viscosidad del Eddy, este término se puede expresar como:

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = v_t S^2 \quad (23)$$

donde:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (24)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (25)$$

El último término del lado derecho de la expresión (20) representa la disipación de energía  $\varepsilon$  calculado a partir de la siguiente ecuación de transporte (expresión (26)):

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (26)$$

La elección de la disipación de turbulencia como propiedad turbulenta para determinar la escala de longitud se origina al observar que se requiere un término de disipación en la ecuación de energía para que el flujo turbulento esté en equilibrio, es decir, para que el ritmo de producción y destrucción de la turbulencia estén compensados. La relación entre ambas variables y la escala de longitud  $l$  es igual a:

$$\varepsilon \approx \frac{k^{3/2}}{l} \quad (27)$$

Esta relación se apoya en la existencia de una cascada de energía desde las grandes escalas de turbulencia hasta las pequeñas y su posterior disipación. A continuación se presenta únicamente la ecuación de transporte que modela  $\varepsilon$ , sin entrar en el modelado de los distintos términos debido a su extensión (Launder y Spalding, 1972; Andersson et al., 2012). Los valores comúnmente empleados de las 5 constantes definidas en el modelo estándar  $k - \varepsilon$  son (Andersson et al., 2012):

$$C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (28)$$

### Modelo estándar $k-\omega$

El segundo modelo de dos ecuaciones más utilizado es el modelo estándar  $k-\omega$ , cuya idea básica fue propuesta por Kolmogorov (1942) y posteriormente desarrollado por Wilcox (Wilcox, 1988; Ferziger y Peric, 2002; Wilcox, 2004). En este modelo se utiliza la velocidad de disipación turbulenta específica  $\omega$  como cantidad turbulenta para determinar la escala de longitud. Esta propiedad turbulenta se puede interpretar como la inversa de la escala de tiempos en la que se produce la disipación. Las ecuaciones de transporte para  $k$  y  $\omega$  se pueden expresar como sigue (Wilcox, 1988; Menter, 2009 y ANSYS, 2014):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* f_{\beta^*} k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (29)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta f_{\beta} \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\omega}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (30)$$

Donde el término de producción  $P_k$  se calcula mediante la expresión (23). La viscosidad cinemática turbulenta para este modelo queda del siguiente modo (ANSYS, 2014):

$$\nu_t = \alpha^* \frac{k}{\omega} \quad (31)$$

donde el coeficiente  $\alpha^*$  amortigua la viscosidad turbulenta en regiones con bajos números de Reynolds y se determina a partir de:

$$\alpha^* = \alpha_{\infty}^* \left( \frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / R_k}{1 + \text{Re}_t / R_k} \right) \quad (32)$$

Donde:

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}; \alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (33)$$

En regiones con números de Reynolds altos  $\alpha^* = \alpha_{\infty}^* = 1$ . En el caso concreto de este estudio, al tratarse de un flujo incompresible  $\beta^* = \beta_i^*$ . Las constantes del modelo y las relaciones auxiliares de cierre son las que se indican a continuación (ANSYS, 2014):

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \text{if } \chi_k \leq 0 \\ \frac{1 + 680 \chi_k^2}{1 + 400 \chi_k^2} & \text{if } \chi_k > 0 \end{cases}; \chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (34)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left( \frac{4/15 + (\text{Re}_t/R_\beta)^4}{1 + (\text{Re}_t/R_\beta)^4} \right) \quad (35)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left( \frac{\alpha_0 + \text{Re}_t/R_\omega}{1 + \text{Re}_t/R_\omega} \right) \quad (36)$$

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega}; \chi_\omega = \frac{|\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}|}{(\beta_\infty^*\omega)^3}; \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (37)$$

$$\alpha_\infty^* = 1; \alpha_\infty = 0.52; \alpha_0 = \frac{1}{9}; \beta_\infty^* = 0.09; \beta_i = 0.072; R_\beta = 8 \quad (38)$$

$$R_k = 6; R_\omega = 2.95; \sigma_k = 2; \sigma_\omega = 2$$

Para resolver flujos de capa límite, el modelo estándar  $k - \omega$  resulta más eficaz que el modelo estándar  $k - \varepsilon$ , debido a su tratamiento matemático de la región viscosa cercana a las paredes y a la consideración de los efectos de los gradientes de presión en la dirección principal del flujo. De hecho, el modelo estándar  $k - \omega$  no requiere el uso de funciones pared ya que las ecuaciones de transporte del modelo son resueltas en estas regiones, en las que el número de Reynolds toma valores bajos. No obstante, definir una malla más fina en estas regiones resulta necesario para aprovechar el potencial del modelo y mejorar la precisión de los resultados, situando el primer nodo de la malla por debajo de un  $y^+$  (distancia a dimensional a la pared más cercana, definida como  $\rho y \mu_t / \mu$ ) de 5. Una desventaja de este modelo es su fuerte sensibilidad a los valores especificados para  $\omega$  en las zonas del flujo de aire no perturbado aguas arriba, ya que su magnitud es difícil determinar de forma precisa. Como consecuencia de esta, la definición de estos parámetros en las condiciones de contorno de entrada al dominio resulta un paso clave para que, en primer lugar el problema converja, y en segundo lugar, se alcance una solución precisa.

### **Modelo $k-\omega$ SST**

El modelo  $k - \omega$  SST (Menter 1993, 1994; ANSYS 2014), sustentado en el concepto de viscosidad del Eddy, ha aumentado su popularidad en los últimos tiempos fruto de sus buenas prestaciones. La formulación de este modelo de transporte de tensión de cizalla (shear stress transport, SST) combina las fortalezas de los modelos  $k - \omega$  y  $k - \varepsilon$ . Concretamente, utiliza la formulación del  $k - \omega$  estándar en las regiones más internas

de la capa límite permitiendo calcular la subcapa viscosa, mientras que el modelo  $k-\varepsilon$  lo emplea para las regiones más alejadas de la pared. Aplicar la formulación de un modelo u otro se logra mediante una función de mezcla, de tal modo que esta toma el valor de uno en las zonas cercanas a las paredes, activando el modelo  $k-\omega$ , y cuando su magnitud es igual a cero se activa el modelo  $k-\varepsilon$ . El modelo  $k-\omega$  SST modifica la expresión de la viscosidad turbulenta planteada por el modelo  $k-\omega$  para considerar los efectos del transporte de tensión de cizalla turbulenta sobre la misma, como después se mostrará.

Comparando el modelo  $k-\omega$  SST con el modelo  $k-\varepsilon$  se observa que los niveles de turbulencia generados en regiones del flujo con grandes deformaciones son inferiores, pero todavía exceden la realidad. Menter (1994) recomienda el uso de este modelo para flujos que presentan fuertes gradientes de presión y separación, aunque no resulta tan eficaz para predecir el reajuste de los flujos de aire. Este modelo se compone de dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta y la otra destinada a la velocidad de disipación específica (Menter, 1994 y ANSYS, 2014):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (39)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{P_k}{\mu_t} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (40)$$

donde  $\sigma_k$  y  $\sigma_\omega$  son los números de *Prandtl* turbulentos determinados a partir de las siguientes expresiones:

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (41)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (42)$$

El término de producción  $P_k$  de las expresiones (39) y (40) se calcula a partir de la expresión (23). El procedimiento de obtención del coeficiente  $\alpha$  en este modelo difiere del planteado en el modelo estándar  $k-\omega$ , en que el término  $\alpha_\infty$  pasa de ser una constante a evaluarse mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (43)$$

donde

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{w,1}\sqrt{\beta_{\infty}^*}}; \alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{k^2}{\sigma_{w,2}\sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (44)$$

En cuanto a los términos de disipación,  $\beta^*k\omega$  y  $\beta\omega^2$ , de las expresiones (39) y (40) respectivamente, se determinan del mismo modo que en el modelo estándar  $k-\omega$ , con la diferencia de que el coeficiente  $\beta_i$  pasa a ser evaluado mediante la siguiente expresión:

$$\beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1-F_1)\beta_{i,2} \quad (45)$$

Por otro lado, la viscosidad turbulenta mostrada en las expresiones (39) y (40) se determina como sigue:

$$\nu_T = \frac{k}{\omega \max\left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1\omega}\right)} \quad (46)$$

donde  $\alpha^*$  se calcula a partir de la expresión (32). Las funciones de mezcla,  $F_1$  y  $F_2$ , por medio de las cuales se consigue que los modelos  $k-\omega$  y  $k-\varepsilon$  figuren bajo una sola formulación en el modelo  $k-\omega$  SST, vienen definidas por las siguientes expresiones:

$$F_2 = \tanh\left[\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right)\right]^2\right] \quad (47)$$

$$F_1 = \tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2}CD_{\omega}^+y^2}\right]\right\}^4\right\} \quad (48)$$

donde  $CD_{\omega}^+$ , es la porción positiva del término de difusión cruzada, cuya magnitud viene dada a su vez por la siguiente expresión:

$$CD_{\omega}^+ = \max\left(2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega,2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right) \quad (49)$$

Este modelo  $k-\omega$  SST mantiene los mismos valores de las constantes coincidentes con el modelo estándar  $k-\omega$  (expresión (38)) e incorpora las siguientes constantes (ANSYS, 2014):

$$\begin{aligned} a_1 &= 0.31; k = 0.41 \\ \beta_{i,1} &= 0.075; \beta_{i,2} = 0.0828 \\ \sigma_{k,1} &= 1.176; \sigma_{k,2} = 1.0 \\ \sigma_{\omega,1} &= 2; \sigma_{\omega,2} = 1.168 \end{aligned} \quad (50)$$

### Modelo de transición SST

El modelo de transición SST (Menter et al., 2006; Langtry y Menter, 2009) se basa en el acoplamiento de las ecuaciones del modelo  $k-\omega$  SST (Menter, 1994) y de dos ecuaciones de transporte adicionales para las siguientes propiedades turbulentas: intermitencia  $\gamma$  y el número de Reynolds de espesor de momento para el que se inicia la transición  $\tilde{\text{Re}}_{\theta}$ . La ecuación de transporte para la intermitencia  $\gamma$  se utiliza para activar el término de producción de energía cinética turbulenta aguas abajo del punto de transición en la capa límite. Mientras, la ecuación de transporte para  $\tilde{\text{Re}}_{\theta}$  resulta necesaria, por un lado, para capturar efectos no locales como son la intensidad de turbulencia y velocidad de flujo libre, y por otro, para predecir las regiones de transición entre el régimen laminar y turbulento. Las dos ecuaciones de transporte aportadas por este modelo se pueden expresar como sigue:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} = P_\gamma - E_\gamma + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (51)$$

$$\frac{\partial \tilde{\text{Re}}_{\theta}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \tilde{\text{Re}}_{\theta}}{\partial x_j} = P_{\theta} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \sigma_{\theta} (\nu + \nu_t) \frac{\partial \tilde{\text{Re}}_{\theta}}{\partial x_j} \right] \quad (52)$$

donde  $P_\gamma$  y  $E_\gamma$  son los términos de producción y destrucción/relaminación de la ecuación de transporte de intermitencia respectivamente, calculados según las expresiones:

$$P_\gamma = F_{length} C_{a1} S [\gamma F_{onset}]^{0.5} (1 - C_{e1} \gamma); F_{length} = f(\tilde{\text{Re}}_{\theta}) \quad (53)$$

$$E_\gamma = C_{a2} \Omega \gamma F_{turb} (C_{e2} \gamma - 1) \quad (54)$$

donde  $\Omega$  es el valor absoluto de la vorticidad, definido como  $(2\Omega_{ij} \Omega_{ij})^{1/2}$ . Por su parte, las funciones  $F_{onset}$  y  $F_{turb}$  se calculan del siguiente modo:

$$F_{onset} = \max(F_{onset2} - F_{onset3}, 0) \quad (55)$$

$$F_{onset2} = \min(\max(F_{onset1}, F_{onset1}^4), 2); F_{onset1} = \frac{\text{Re}_\nu}{2.193 \text{Re}_{\theta c}} \quad (56)$$

$$\text{Re}_\nu = \frac{\rho y^2 S}{\mu}; \text{Re}_{\theta c} = f(\tilde{\text{Re}}_{\theta c}) \quad (57)$$

$$F_{onset3} = \max\left(1 - \left(\frac{R_T}{2.5}\right)^3, 0\right); R_T = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (58)$$

$$F_{turb} = e^{-\left(\frac{R_T}{4}\right)^4} \quad (59)$$

Por su parte, el término fuente  $P_{\theta t}$  de la expresión (52) se define como:

$$P_{\theta t} = \frac{C_{\theta t}}{t} (\text{Re}_{\theta t} - \tilde{\text{Re}}_{\theta t}) (1 - F_{\theta t}) \quad (60)$$

donde

$$t = \frac{500\mu}{\rho U^2} \quad (61)$$

$$F_{\theta t} = \min \left( \max \left( F_{wake} e^{\left(\frac{y}{\delta}\right)^4}, 1 - \left(\frac{\gamma - 1/50}{1 - 1/50}\right)^2 \right), 1 \right) \quad (62)$$

$$F_{wake} = e^{-\left(\frac{\text{Re}_{\omega}}{1E+5}\right)^2}; \text{Re}_{\omega} = \frac{\rho \omega y^2}{\mu} \quad (63)$$

$$\delta = \frac{50\Omega y}{U} \delta_{BL}; \delta_{BL} = \frac{15}{2} \theta_{BL}; \theta_{BL} = \frac{\tilde{\text{Re}}_{\theta t} \mu}{\rho U} \quad (64)$$

Cuando el número de Reynolds de vorticidad  $\text{Re}_v$  (expresión (57)), supera al número de Reynolds de espesor de momento crítico  $\text{Re}_{\theta c}$  comienza el aumento de la intermitencia  $\gamma$  en la capa límite. Este número de Reynolds crítico se determina mediante una función de correlación experimental dependiente de  $\tilde{\text{Re}}_{\theta t}$  (número de  $Re$  de espesor de momento de comienzo de transición obtenido mediante la ecuación de transporte). Esto ocurre aguas arriba del número de Reynolds de transición  $\text{Re}_{\theta t}$ , calculado a partir de una función de correlación experimental dependiente de algunas propiedades del flujo libre como son la intensidad de turbulencia y los gradientes de presión. Mediante esta correlación, la información exterior a la capa límite como la intensidad de turbulencia se logra transmitir al interior de las regiones próximas a paredes por medio del término de producción  $P_{\theta t}$ , de la ecuación de transporte del número de Reynolds de espesor de momento. Este proceso se iniciará de forma simultáneamente al incremento de la intermitencia. De forma sencilla,  $\text{Re}_{\theta c}$  se puede identificar con la localización donde se comienza a aumentar la turbulencia, mientras que  $\text{Re}_{\theta t}$  es la posición a partir de la cual el perfil de velocidad empieza a desviarse del puramente laminar.

La relación o acoplamiento entre el modelo de transición y el modelo  $k-\omega$  SST se puede observar en las siguientes expresiones a través de los términos de producción y destrucción  $\tilde{P}_k$  y  $\tilde{D}_k$ :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tilde{P}_k - \tilde{D}_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (65)$$

$$\tilde{P}_k = \gamma_{eff} P_k; \quad \gamma_{eff} = \max(\gamma, \gamma_{sep}) \quad (66)$$

$$\tilde{D}_k = \min[\max(\gamma_{eff}, 0.1), 1.0] D_k; \quad D_k = \beta^* k \omega \quad (67)$$

$$R_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu}; \quad F_3 = e^{-\left(\frac{R_y}{120}\right)^8}; \quad F_1 = \max(F_{1orig}, F_3) \quad (68)$$

donde los términos  $P_k$  y  $D_k$  son los términos originales de producción y destrucción empleados en el modelo  $k-\omega$  SST y  $F_{1orig}$  es también la función de mezcla original. El término  $\gamma_{sep}$ , enfocado a mejorar las predicciones de la transición en flujos separados, se determina a partir de la expresión:

$$\gamma_{sep} = \min \left( C_{S1} \max \left[ \left( \frac{Re_v}{3.235 Re_{\alpha}} \right) - 1, F_{reattach}, 2 \right] F_{\theta}; \quad F_{reattach} = e^{-\left(\frac{R_T}{20}\right)^4} \right) \quad (69)$$

Las constantes del modelo, definidas en el presente apartado toman los siguientes valores (ANSYS, 2014):

$$C_{a1} = 2; C_{e1} = 1; C_{a2} = 0.06; C_{e2} = 50; c_{\gamma3} = 0.5; \sigma_{\gamma} = 1 \quad (70)$$

$$\sigma_{\theta} = 2; c_{\theta} = 0.03; C_{S1} = 2$$

### **Modelo de tensiones de Reynolds RSM**

El modelo de tensiones de Reynolds RSM (Launder et al., 1975; Gibson y Launder, 1978; Launder, 1989), en lugar de utilizar la hipótesis de Boussinesq en el modelado de las tensiones de Reynolds, propone una ecuación de transporte para cada tensión de Reynolds  $\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j}$ . Se resuelve una ecuación de transporte adicional para determinar los términos de disipación  $\varepsilon$  ó  $\omega$ , proporcionando una escala temporal o de longitud de la turbulencia.

La principal ventaja de este modelo, frente a los modelos de dos ecuaciones basados en el concepto de viscosidad del Eddy, radica en su capacidad para tener en cuenta la historia de las tensiones de Reynolds. Esto se debe a que los efectos de estas tensiones

persisten con el tiempo, causado por el lento intercambio de momento entre los vórtices, lo que no se ajusta a lo supuesto en los modelos expuestos con anterioridad, en los que se asumía un rápido intercambio de momento análogo al comportamiento molecular. De hecho, este modelo presenta un mejor comportamiento que los modelos de dos ecuaciones descritos hasta el momento cuando el flujo a simular exhibe alguna de las siguientes características: curvatura de las líneas de corriente, flujo muy sensible a la anisotropía de las tensiones de Reynolds, elevada presencia de remolinos, cambios rápidos en la velocidad de deformación del fluido, etc. Por otra parte, su coste computacional es más elevado ya que se resolverán 7 ecuaciones de transporte para cerrar el sistema de ecuaciones RANS. Las ecuaciones de transporte para las tensiones de Reynolds se pueden expresar del siguiente modo:

$$\frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \nu \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \overline{u_i' u_j'} \right) \right) + P_{ij} - \varepsilon_{ij} + \phi_{ij} + d_{ij} \quad (71)$$

donde los términos del lado derecho representan los siguiente fenómenos físicos:  $P_{ij}$ , producción;  $-\varepsilon_{ij}$ , disipación;  $\phi_{ij}$ , redistribución y  $d_{ij}$ , difusión turbulenta. El término de producción  $P_{ij}$  se calcula como sigue:

$$P_{ij} = - \left( \overline{u_i' u_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right) \quad (72)$$

En cuanto a los términos involucrados en la disipación, se consideran isotrópicos, ya que la disipación se da en las escalas pequeñas y estas presentan isotropía. Por consiguiente, la transformación de la energía cinética turbulenta en calor se modelara como sigue:

$$\varepsilon_{ij} = 2\nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \beta_{RSM}^* k \omega \quad (73)$$

$$\beta_{RSM}^* = \beta^* f_\beta^* \quad (74)$$

donde  $\beta^*$  y  $f_\beta^*$  son definidos de igual modo que en el modelo estándar  $k-\omega$ . La variable  $\omega$ , se calcula mediante las expresiones (30) del modelo estándar  $k-\omega$ . Cuando la energía cinética turbulenta se requiere para un término del modelo, como sucede en la expresión (73), esta se determina en base a la siguiente expresión del tensor de tensiones de Reynolds:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} \quad (75)$$

Sin embargo, en las superficies solidas del dominio el valor de  $k$  se obtiene resolviendo una ecuación de transporte muy similar a la expresión (20) del modelo estándar  $k$ - $\varepsilon$ . El término de redistribución  $\phi_{ij}$ , también conocido como término de presión-deformación, establece la redistribución de la energía cinética turbulenta de unas componentes de tensión a otras. El modelado de  $\phi_{ij}$  se ajusta a la siguiente expresión:

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} \quad (76)$$

donde  $\phi_{ij,1}$  es el termino de deformación-presión lento y  $\phi_{ij,2}$  es el término rápido, que contrarresta la producción de tensión anisotrópica.

Por su parte, el término de difusión turbulenta de la tensión de Reynolds,  $d_{ij}$ , se aproxima a un modelo de gradiente-difusión simple:

$$d_{ij} = C_s \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\overline{k u_k' u_l'} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_l}}{\varepsilon} \right) \quad (77)$$

Sin embargo esta expresión (77) puede generar inestabilidades numéricas, lo que lleva al código CFD basado en volúmenes finitos FLUENT, a utilizar la expresión:

$$d_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} \right) \quad (78)$$

donde la viscosidad turbulenta  $\nu_t$  se calcula mediante la expresión (31) y la constante  $\sigma_k$  toma el valor 0.82.

### 3.2.5. Tratamiento de la región del fluido próxima a superficies solidas

Actualmente, el cálculo de la región del fluido próxima a las superficies sólidas donde las fuerzas viscosas prevalecen sobre las de inercia se plantea en base a dos enfoques: resolver la región íntegramente o predecirla mediante relaciones empíricas conocidas como *funciones pared*. Las *funciones pared* permiten ahorrar recursos computacionales (no se requieren mallas densas y los cálculos son más sencillos) pero resultan más imprecisas debido a las hipótesis en las que se sustentan (pequeños gradientes de presión, equilibrio local de la turbulencia y una capa cercana a la pared de tensión constante). También resultan imprecisas para predecir la tensión de cizalla para valores

de  $y^+$  por debajo de 15, por lo que si el comportamiento del flujo en esta región puede influir significativamente sobre los datos proporcionados por la simulación, no resultan una buena opción optar por este tratamiento.

Por lo tanto, resolver las ecuaciones de transporte para las variables implicadas se destaca como una alternativa más precisa que las funciones pared, a costa de incrementar el coste computacional. Este enfoque, conocido como *tratamiento de pared mejorado*, es la estrategia seguida por el código del software FLUENT para resolver estas regiones al utilizar ciertos modelos de turbulencia. Para explotar el potencial del tratamiento de pared mejorado y disminuir la falta de precisión en los resultados, el  $y^+$  del nodo situado más próximo a la pared se recomienda que sea próximo a 1 (Tu, 2013; ANSYS 2014). El valor del  $y^+$  se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$y^+ = y\rho u_* / \mu \quad (79)$$

donde  $y$  es la distancia a la pared más cercana. Algunas ecuaciones de transporte de propiedades turbulentas sufren ciertas modificaciones en estas regiones en función del modelo de turbulencia empleado. Por ejemplo, la ecuación  $k$  en el modelo de transición SST incluye un término sumidero de cara a reducir la producción de  $k$  en regiones con un número de Reynolds local bajo, no siendo así en el modelo  $k-\omega$  SST que tiende a sobre predecir este parámetro bajo esas condiciones.

### 3.2.6. Métodos de resolución del problema numérico

Como ya se ha mencionado, determinar las soluciones analíticas de las ecuaciones diferenciales que gobiernan la dinámica de fluidos resulta inviable en la mayoría de problemas ingenieriles, por lo que surge la necesidad de emplear métodos numéricos. El cometido de los métodos numéricos no es otro que el de proporcionar una solución aproximada en un dominio discreto de las ecuaciones diferenciales parciales descritas en los apartados anteriores. Este proceso se puede dividir en dos etapas: una primera etapa conocida como discretización, mediante la cual las ecuaciones diferenciales, junto a una serie de condiciones auxiliares se transforman en un sistema de ecuaciones algebraicas; y una segunda etapa, que consiste en la aplicación de un método numérico para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas obtenido.

La discretización en la dinámica de fluidos computacional se puede llevar a cabo mediante distintas técnicas, tales como: diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos, etc. Inicialmente, la técnica de diferencias finitas fue la utilizada para aproximar las ecuaciones del transporte diferenciales. Este método se basa en las series de Taylor, utilizadas para aproximar las derivadas parciales en espacio y tiempo presentes en las ecuaciones. La aplicación de este método implica la elaboración de mallas estructuradas, debido principalmente a los requisitos que impone su formulación. Entre los distintos métodos utilizados destaca como uno de los más sencillos a nivel de cálculo numérico.

El procedimiento de resolución por elementos finitos se utiliza habitualmente en distintas disciplinas de la ingeniería, y se enfoca a resolver problemas por ejemplo relacionados con el análisis estructural, la transferencia de calor por conducción, etc. Los elementos finitos se puede utilizar en los códigos CFD, pero su uso no es tan habitual como los volúmenes finitos o las diferencias finitas. El enfoque basado en elementos finitos lleva a cabo un primer paso diferenciador del resto, y que consiste en la aproximación de las ecuaciones diferenciales mediante su multiplicación con las conocidas *funciones de forma*, para posteriormente ser integradas en el dominio computacional definido. Este método es muy flexible en cuanto a las características de la malla, permitiendo estudiar todo tipo de geometrías.

La dinámica de fluidos se rige por ecuaciones de conservación local, siendo esta una propiedad no contemplada por defecto en el tratamiento por elementos finitos. Una evolución del método por elementos finitos que considere la conservación local se encuentra aún en vías de desarrollo. La estrategia de resolución por elementos finitos no ha sido tan utilizada en los códigos CFD como en base a volúmenes finitos, debido en gran parte a que esta requiere mayores recursos computacionales. Por otro lado, una ventaja del método de volúmenes finitos frente al método de diferencias finitas se plasma en su capacidad para adaptarse tanto a mallas estructuradas como no estructuradas (Figura 32). Este hecho permite tratar de una manera más sencilla casos con geometrías complejas en los que se requieran mallas no estructuradas. Pero la principal razón que ha motivado que el enfoque por volúmenes finitos sea la opción prioritaria para el estudio de la mecánica de fluidos es la propiedad de conservación

asociada a las expresiones que aplica en su desarrollo. En el siguiente apartado se describirá de forma más detallada el método de volúmenes finitos debido a que es la técnica empleada en el estudio desarrollado en esta Tesis Doctoral.

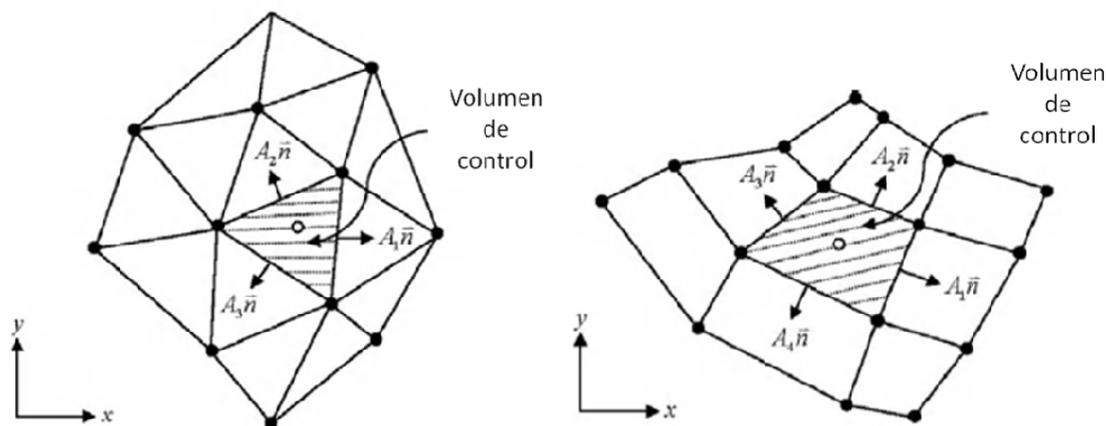


Figura 32. Representación de una malla no estructurada y estructurada para el método de volúmenes finitos (Tu, 2013).

### 3.2.6.1. Método de volúmenes finitos

En cuanto a su funcionamiento, el método de volúmenes finitos lleva a cabo en primer lugar una división del dominio definido para la región de fluido en un número finito de volúmenes de control contiguos. A cada volumen de control se le aplica el principio de conservación de las propiedades relevantes del problema. El algoritmo de resolución puede optar por dos estrategias a la hora de definir la malla dependiendo de si el enfoque se centra en la celda o se centra en el nodo. En el primer caso, los límites de los volúmenes de control coinciden con los límites de las celdas construidas en la malla (Figura 33), mientras que en el segundo caso los volúmenes de control se construyen en torno a los nodos de la malla, los cuales se sitúan en los puntos de intersección de los bordes de las celdas de la malla. El código CFD, FLUENT, define los volúmenes de control centrado en las celdas.

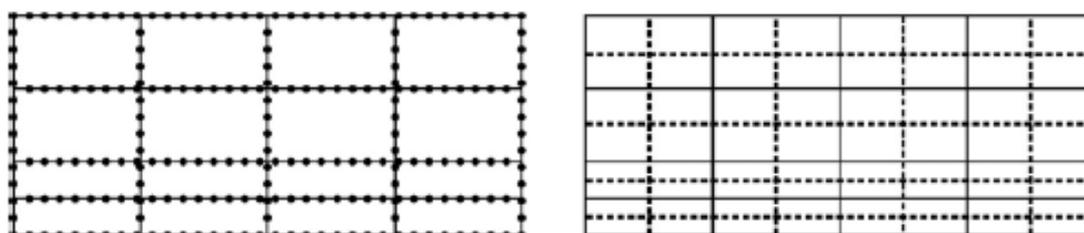


Figura 33. Volúmenes de control según el algoritmo centrado en la celda (izquierda) y según el algoritmo centrado en el nodo (derecha) (Andersson et al., 2012).

Antes de continuar con el procedimiento del método de volúmenes finitos, resulta interesante recordar que las ecuaciones de transporte para una variable aleatoria  $\phi$ , asumiendo que el fluido es incompresible y el proceso es estacionario, se pueden expresar de forma genérica del siguiente modo:

$$\frac{\partial(u_j\phi)}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) + \frac{S_\phi}{\rho} \quad (80)$$

donde  $\Gamma$  es un coeficiente de difusión y  $S_\phi$  es un término fuente. A continuación el método de volúmenes finitos integra la expresión (80) en el volumen de control, obteniendo la siguiente expresión:

$$\int_{C.V.} \frac{\partial(u_j\phi)}{\partial x_j} dV = \int_{C.V.} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) dV + \int_{C.V.} \frac{S_\phi}{\rho} dV \quad (81)$$

El siguiente paso consiste en la discretización de las ecuaciones, que transforma las ecuaciones numéricas en ecuaciones algebraicas. A modo de ejemplo, se introducirán las aproximaciones iniciales de los términos de la expresión (81), de acuerdo a un proceso de convección-difusión estacionario. Los valores de las variables y de los gradientes  $\partial\phi/\partial x_j$  en las superficies del volumen de control se pueden determinar mediante diferentes esquemas de aproximación para alcanzar la forma final del conjunto de ecuaciones algebraicas (Versteeg y Malalasekera, 2007). En función de los esquemas utilizados se puede mejorar la precisión. No obstante, frecuentemente una mayor precisión implica una menor robustez durante la resolución numérica del problema.

$$\int_{C.V.} \frac{\partial(u_j\phi)}{\partial x_j} dV = \int_A (u_j\phi) dA^{x_j} \approx \sum_{i=1}^N u_{j,i} \phi_i A_i^{x_j} \quad (82)$$

$$\int_{C.V.} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) dV = \frac{1}{\rho} \int_A \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) dA^{x_j} \approx \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^N \left( \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right)_i A_i^{x_j} \quad (83)$$

$$\int_{C.V.} \frac{S_\phi}{\rho} dV = \frac{S_\phi}{\rho} V \quad (84)$$





## 4.1. ENSAYOS EN EL TÚNEL AERODINÁMICO

Los ensayos experimentales requeridos para alcanzar los objetivos propuestos inicialmente se desarrollan en el túnel aerodinámico del Grupo de Investigación de la Universidad de Oviedo (GICONSIME). Esta campaña de ensayos en túnel se combina con la aplicación de técnicas numéricas, ya que basar el estudio completo únicamente en los ensayos experimentales encarece bastante el desarrollo del mismo, debido a: la fabricación de maquetas y consumo energético de la instrumentación y equipos empleados.

La campaña de ensayos llevada a cabo en el túnel aerodinámico no solo proporciona información acerca de la aerodinámica del vehículo pesado en los distintos casos analizados, sino que además permite calibrar los modelos numéricos para su posterior uso. A continuación se expondrán: las características y cometido de la instrumentación empleada durante la campaña de ensayos; las maquetas objeto de estudio y las pautas seguidas en su diseño; las configuraciones experimentales adoptadas en los ensayos; los procedimientos de medida; y los resultados que permiten evaluar, por una parte la capacidad de simular condiciones de viento reales, y por otra parte si las cargas aerodinámicas medidas en el vehículo a escala son extrapolables al mismo vehículo a escala real.

### 4.1.1. Instrumentación

A excepción del túnel aerodinámico, cuya función principal es la de simular ciertas condiciones eólicas reales, el resto de instrumentos se utilizan para medir los parámetros objeto de estudio: velocidad, presión y fuerza.

- ✓ **Túnel:** Se trata de un túnel de circuito cerrado con una cámara de ensayo de 4 m longitud y una sección de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  (anchura x altura). El túnel aerodinámico permitía la configuración en circuito abierto, pero se optó por cerrar el circuito debido a que se podían alcanzar mayores velocidades de viento. La cámara de ensayos, con una longitud de 4 m, permite el desarrollo de un perfil de velocidades representativo de una superficie terrestre, como se mostrará a posteriori. La velocidad máxima en flujo libre alcanzada en la cámara de ensayos es de 25 m/s para un perfil de

velocidad uniforme, y se reduce hasta los 20 m/s al simular un perfil de velocidades terrestre mediante la instalación de una serie de bloques en el suelo de la cámara. Por lo tanto, en base a dicha magnitud de velocidad máxima del flujo de aire, se trata de un túnel operando en régimen subsónico. El túnel aerodinámico se descompone en las siguientes partes indicadas en la Figura 34: tramo de entrada, cámara de remanso, cámara de ensayos, difusor, tramo de retorno y sección del ventilador (de 18 kW de potencia nominal y 1200 mm de diámetro de rotor). Para proteger el ventilador (Figura 35.a) del impacto de objetos ubicados en la cámara de ensayos se instala una rejilla entre la salida del difusor y la entrada al tramo de retorno (Figura 35.b).

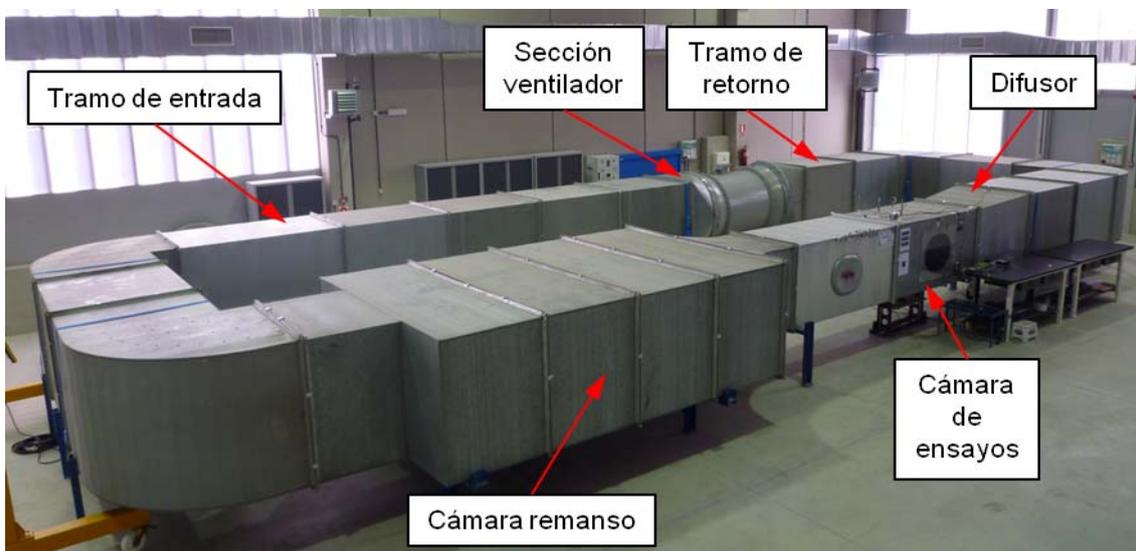


Figura 34. Túnel aerodinámico perteneciente a la Universidad de Oviedo con las respectivas partes que lo conforman.



Figura 35. Ventilador del túnel aerodinámico (a) y rejilla de protección (b).

- ✓ **Tubo pitot:** El tubo pitot se utiliza para medir la velocidad del flujo de aire generado en el interior de la cámara de ensayo del túnel. Dicho instrumento consta de dos entradas de aire (Figura 36), una de las cuales se orienta perpendicularmente a la dirección del flujo de aire para permitir la medición de la presión total, y la otra se orienta tangente a la dirección del flujo de aire permitiendo la medida de la presión estática. Las salidas de las dos canalizaciones se conectan al escáner de presiones mediante tubos flexibles de silicona, y la diferencia entre ambas medidas de presión es la presión dinámica del fluido. Esta magnitud, junto a la de la densidad, se utilizan en el cálculo de la velocidad del fluido mediante la siguiente expresión:

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dinámica}}{\rho}} \quad (85)$$

donde  $p_{dinámica}$  es la *presión dinámica*.

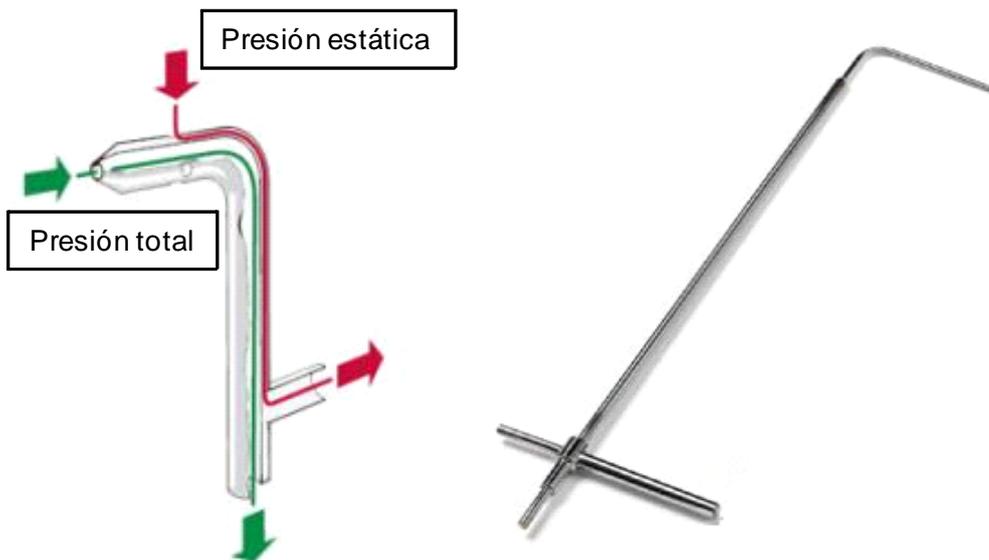


Figura 36. Tubo pitot (<http://www.academiatesto.com.ar>).

- ✓ **Escáner de presiones (Scanivalve):** Se trata del dispositivo encargado de medir las presiones relativas ejercidas por el aire sobre la maqueta (Figura 37). El escáner consta de 16 canales de medida de presiones, en los que se conectan unos tubos de silicona que se encuentran enrasados con la superficie de la maqueta objeto de estudio. De este modo, el aire circula por los tubos hasta alcanzar los transductores de presión situados en el escáner. Las medidas de

presión son relativas a la presión de referencia, por lo tanto se obtienen diferencias de presiones entre cada uno de los 16 canales y el de referencia. El escáner se conecta mediante un cable de red RJ-45 al concentrador Hub/Switch, al que se encuentra conectado el ordenador mediante el mismo tipo de cable. El instrumento se controla desde el software DSA link.vi.



Figura 37. Escáner de presión de Scanivalve modelo DSA3217 ([www.scanivalve.com](http://www.scanivalve.com)).

#### 4.1.2. Diseño y fabricación de las maquetas

##### 4.1.2.1. Elección de escala

La escala de construcción de las maquetas se determina considerando dos aspectos. Por un lado, el bloqueo de la sección del túnel por parte de las maquetas no debería superar el 10% en ningún ensayo (Cermak y Isyumov, 1998). Por otra parte, unas maquetas de mayor tamaño permiten aislar mejor las tomas de presiones, del flujo de aire perturbado por elementos auxiliares que no forman parte de las mismas (soporte de sujeción empleado en el vehículo pesado, por ejemplo). Un incremento elevado del bloqueo tiene como consecuencia principal que el flujo de aire en torno a las maquetas se vea influenciado por las paredes del túnel. Si esto se lleva al caso de estudio, se traduce en que los coeficientes aerodinámicos actuando sobre la maqueta del vehículo pesado no serán iguales a los obtenidos para el mismo vehículo a escala real en las mismas condiciones. Por consiguiente, la escala seleccionada será aquella que permita un mayor tamaño de las maquetas sin superar el bloqueo del 10%, lo que supone que el máximo área de obstrucción de la sección del túnel por parte de la maqueta, es igual a:

$$A_{\text{Maqueta}} = \text{Blocaje} \cdot A_{\text{Sección túnel}} = 0.1 \cdot 1 = 0.1 \text{ m}^2 \quad (86)$$

Como la maqueta que genera un mayor blocaje es la media ladera, se iguala su área de oposición al flujo de aire al máximo área permitida y se determina la altura  $h$  del talud considerando una longitud de este igual a 950 mm. Esta longitud resulta suficiente para limitar los efectos de los extremos de la maqueta sobre el flujo de aire y dotar a esta de cierta holgura para facilitar su instalación en la cámara de ensayos. Considerando el máximo blocaje permitido y la longitud del talud, la altura del talud resulta igual a:

$$H_{\text{Talud}} = \frac{A_{\text{Max Maqueta}}}{L_{\text{Talud}}} = \frac{0.1/2}{0.95} = 52.6 \text{ mm} \quad (87)$$

Si se desea que la maqueta sea representativa de un talud real con una altura igual a 3 m, la relación entre alturas indica la siguiente escala a aplicar:

$$\frac{H_{\text{TaludReal}}}{H_{\text{Talud Maqueta}}} = \frac{3000}{52.6} = 57; \text{Escala} = 1 : 57 \quad (88)$$

Si las dimensiones de la caja del vehículo pesado a escala real son 2.8 m x 2.2 m x 6.35 m (altura x anchura x longitud), a la escala 1:57 quedan como sigue:

$$H_{\text{Vehículo Maqueta}} = 2.8/57 = 49.1 \text{ mm} \quad (89)$$

$$W_{\text{Vehículo Maqueta}} = 2.2/57 = 38.6 \text{ mm} \quad (90)$$

$$L_{\text{Vehículo Maqueta}} = 6.35/57 = 111.4 \text{ mm} \quad (91)$$

Un ancho del vehículo tan pequeño provocaría la flexión de los tubos de silicona instalados en las paredes laterales del vehículo, lo que generaría errores en las mediciones registradas por el escáner de presiones. Por consiguiente, se descartó esta escala y se recalculó aplicando el mismo procedimiento sobre la maqueta del terraplén en lugar de la media ladera. En base a lo cual, la altura del talud es:

$$H_{\text{Talud Maqueta}} = \frac{A_{\text{Max Maqueta}}}{L_{\text{Talud Maqueta}}} = \frac{0.1}{0.95} = 105.2 \text{ mm} \quad (92)$$

y por lo tanto la escala requerida es:

$$\frac{H_{\text{TaludReal}}}{H_{\text{Talud Maqueta}}} = \frac{3000}{105.2} = 28.5; \text{Escala} = 1 : 30 \quad (93)$$

Al incluir en el cálculo del área de obstrucción el asociado al vehículo pesado, el blocaje superará el 10% para una escala de 1:30. Por lo tanto, se calculó nuevamente el blocaje

considerando la obstrucción del vehículo desde una escala de 1:30 hasta 1:35, donde el bloqueo se sitúa por debajo del 10%, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de bloqueo obtenidos para distintas escalas de fabricación de las maquetas.

Escala	Bloqueo (%)
1:30	13.06
1:31	12.23
1:32	11.48
1:33	10.79
1:34	10.17
1:35	9.59

Para la escala de 1:35 se calcularon nuevamente las dimensiones de la caja del vehículo pesado para comprobar la viabilidad de los ensayos a nivel de instrumentación.

$$H_{\text{Vehículo Maqueta}} = 2.8/35 = 80 \text{ mm} \quad (94)$$

$$W_{\text{Vehículo Maqueta}} = 2.2/35 = 62.85 \text{ mm} \quad (95)$$

$$L_{\text{Vehículo Maqueta}} = 6.35/35 = 181.42 \text{ mm} \quad (96)$$

Debido a que la anchura calculada del vehículo pesado resulta suficiente para evitar la flexión de los tubos flexibles instalados en la maqueta durante su fabricación, se elige esta como escala final de fabricación. Así, la maqueta de la media ladera causará un bloqueo de la sección del túnel ligeramente superior al 10%, concretamente de un 16.2%, afectando a la precisión en los resultados obtenidos para este caso.

#### 4.1.2.2. Propuesta de maquetas

Para llevar a cabo el estudio se deben representar en la cámara de ensayos los distintos escenarios objeto de análisis formados por una serie de maquetas. Específicamente, se fabricaron las siguientes maquetas: diferentes clases de infraestructuras presentes en las carreteras, diferentes tipologías de barreras cortaviento y un vehículo pesado donde se recogen los efectos de las dos anteriores. La elección de estas infraestructuras de entre todas las presentes en el entorno de la carretera fue motivada por las condiciones eólicas críticas asociadas a las mismas, tal y como se detallará en los siguientes párrafos. En cuanto a las infraestructuras, se analizaron distintas configuraciones correspondientes a dos grupos, perfiles viarios y tableros de viaductos. Se puede apreciar, en primera

instancia, una diferencia entre estas infraestructuras a nivel de las condiciones eólicas a las que se pueden ver expuestas, ya que por lo general las velocidades de viento serán superiores en las infraestructuras situadas a mayor altura sobre la superficie terrestre para unas mismas condiciones climáticas y orográficas.

### ***Perfiles del terreno***

Los perfiles del terreno elegidos para este estudio responden a tres configuraciones: media ladera, terraplén y terreno llano (Figura 38). Este último actúa como referencia para analizar los efectos de las otras dos configuraciones sobre las cargas aerodinámicas experimentadas por el vehículo en condiciones de viento lateral. La elección de los perfiles viarios responde a dos razones: en primer lugar se trata de configuraciones del terreno muy presentes en las carreteras y en segundo lugar, el efecto de las pendientes ascendentes del terreno sobre el flujo de aire puede afectar negativamente a la estabilidad del vehículo. Según los resultados obtenidos en diferentes investigaciones expuestas en la revisión de Bitsuamlak et al. (2004), el flujo de aire experimenta una aceleración al encontrar en su trayectoria una pendiente ascendente. Por consiguiente, es de esperar que la estabilidad de un vehículo se vea afectada negativamente cuando circula por el carril próximo a una pendiente ascendente situada en su barlovento, en mayor medida que en un terreno llano en condiciones de viento lateral.

En el caso de la media ladera y del terraplén, la altura del talud y la anchura de la plataforma horizontal sobre la que asienta la carretera tienen las mismas dimensiones, 3 y 11 m (escala real) respectivamente (Figura 38.a y 38.b). Las pendientes de los taludes se fabricaron formando  $45^\circ$  con la horizontal en el caso de la media ladera. Mientras, para el terraplén se han construido tres maquetas, una con las pendientes a  $45^\circ$  para analizar el efecto de la configuración del terreno, y otras dos con las pendientes a  $30^\circ$  y  $60^\circ$  para estudiar el efecto de la inclinación de la pendiente sobre las cargas aerodinámicas soportadas por el vehículo pesado. Las dimensiones elegidas se ajustan a las que se pueden encontrar en un caso real.

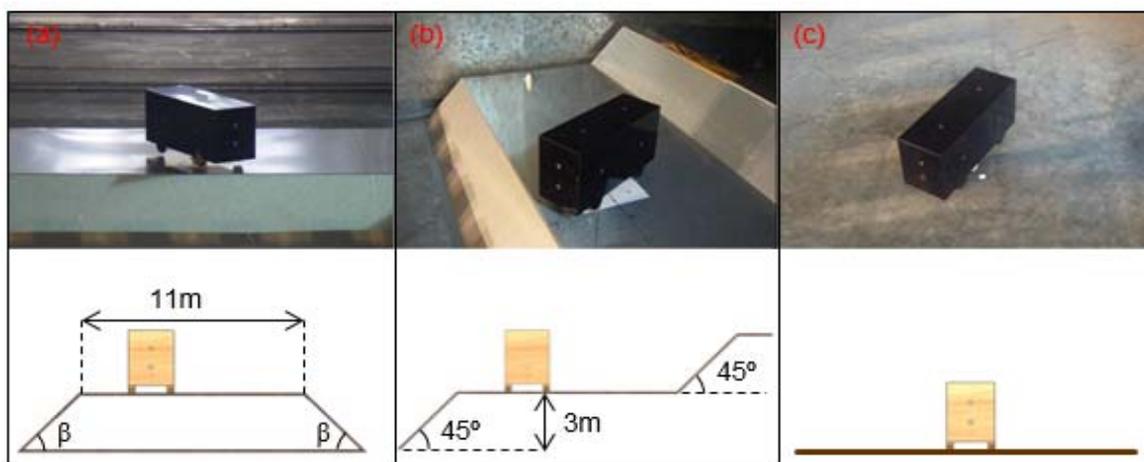


Figura 38. Maquetas de los perfiles viarios objeto de estudio: Terraplén (a), Media ladera (b) y terreno llano (c).

### Viaductos

La velocidad del viento bajo las mismas condiciones eólicas será por lo general superior en torno al tablero de un viaducto en comparación a la alcanzada por el flujo de aire en un terreno llano. Esto se debe al incremento de la velocidad del viento al aumentar la altura sobre el terreno (Figura 39) como consecuencia del efecto de la superficie terrestre en combinación con la viscosidad del aire.

Otro factor que contribuye al aumento de la velocidad del viento en los tableros de los viaductos es la propia orografía del terreno, ya que es frecuente que en zonas montañosas los viaductos unan las laderas de montañas por las zonas donde el estrechamiento del valle es mayor (Figura 40). Considerando el principio de conservación de masa, este estrechamiento del valle causa un estrangulamiento de las líneas flujos con el consiguiente incremento de la velocidad del viento. Como consecuencia, las condiciones eólicas en torno a los tableros de los viaductos pueden resultar más adversas para el confort y seguridad del tráfico que las presentes en otras infraestructuras. Con la finalidad de analizar el efecto de la configuración de los tableros sobre el flujo de aire, y a su vez sobre las cargas aerodinámicas soportadas por el vehículo pesado, se propuso la construcción de las maquetas de tres tipos de tableros comúnmente encontrados en la vías de transporte: losa de espesor uniforme, sección cajón y tablero de vigas (Samartín, 1979; Monleón 1990) (Figura 41). Se analizaron para cada uno de los casos las cargas aerodinámicas del vehículo para una dirección relativa de viento perpendicular al sentido del tráfico.

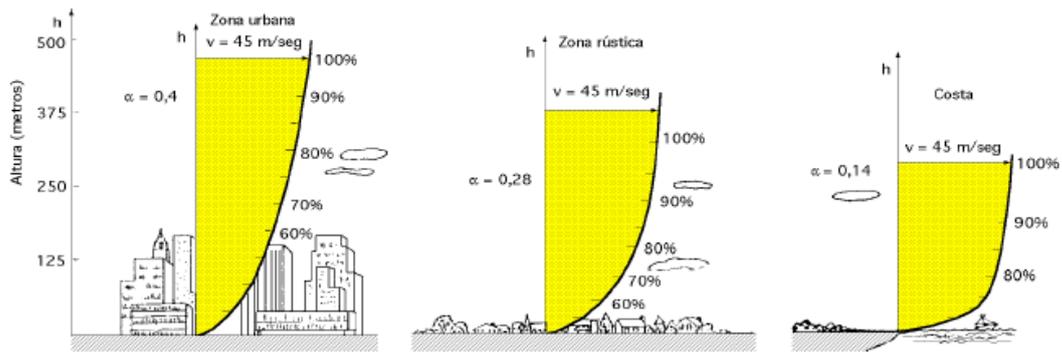


Figura 39. Variación de la velocidad de viento con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann (<http://es.pfernandezdiez.es>).



Figura 40. Viaducto de Montalbliz ([http://newsroom.ferrovial.com/en/press-room/photo\\_gallery/montalbliz-viaduct/](http://newsroom.ferrovial.com/en/press-room/photo_gallery/montalbliz-viaduct/)).

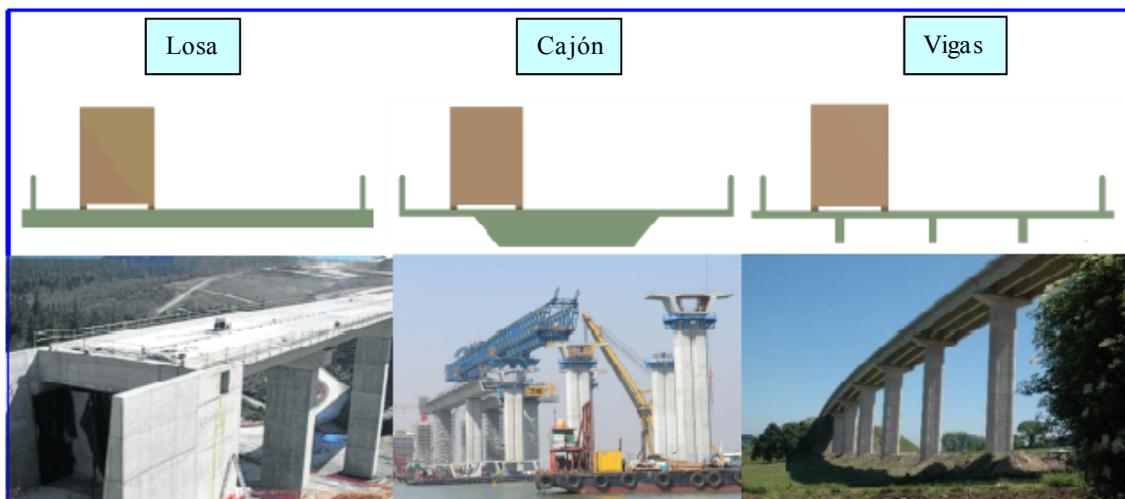


Figura 41. Tableros estudiados en el túnel aerodinámico.

### ***Barreras cortaviento***

En los apartados anteriores se propusieron distintas infraestructuras en las que los efectos del viento pueden comprometer en gran medida la seguridad en la conducción. A modo de protección, se pueden emplear distintos modelos de barreras cortaviento junto a distintos tipo de señales que advierten del riesgo de condiciones adversas de viento. Pero en la mayoría de ocasiones se instalan unas u otras sin conocer cuantitativamente la capacidad de protección de cada modelo, y si el modelo que disminuye en mayor medida la velocidad del aire en su sotavento es el más adecuado para una determinada ubicación. Por consiguiente, con la finalidad de obtener datos empíricos relativos a la eficacia de los distintos modelos de barrera en su función de protección, se fabricaron las maquetas de 3 tipologías de barreras (Figura 42): muro, barrera formada por tablas y barrera con aperturas circulares. Las dimensiones de las barreras propuestas para su estudio se pueden encontrar en los planos que figuran en el Anexo. La infraestructura sobre la que se instalaron los distintos modelos de barreras para su análisis fue el perfil viario tipo terraplén con una inclinación de los taludes formando 45° con la horizontal.

Además, para estudiar el efecto de la permeabilidad de las barreras sobre los coeficientes aerodinámicos que actúan en el vehículo pesado, se construyeron varias maquetas de la barrera con aperturas circulares, variando el tamaño de los diámetros y el número de ellos (Figura 43). Los valores asignados a los diámetros de los agujeros para su estudio son los siguientes: 0.5 m, 0.4 m, 0.3 m y 0.2 m. Mediante estos valores se consigue variar la permeabilidad de las barreras dentro de un rango comprendido entre un 10% y un 50%.

También se analizó la capacidad de protección de una barrera cortaviento no permeable para la infraestructura de los viaductos. Concretamente, en el caso de la sección cajón se fabricó una maqueta adicional provista de una pletina a modo de barrera de protección contra el viento (Figura 44). Esta pletina simula el efecto de una barrera de nula permeabilidad cuyo material permite someterla a varias flexiones sin romperse con el objetivo de determinar el ángulo óptimo de inclinación de la barrera respecto al plano horizontal.

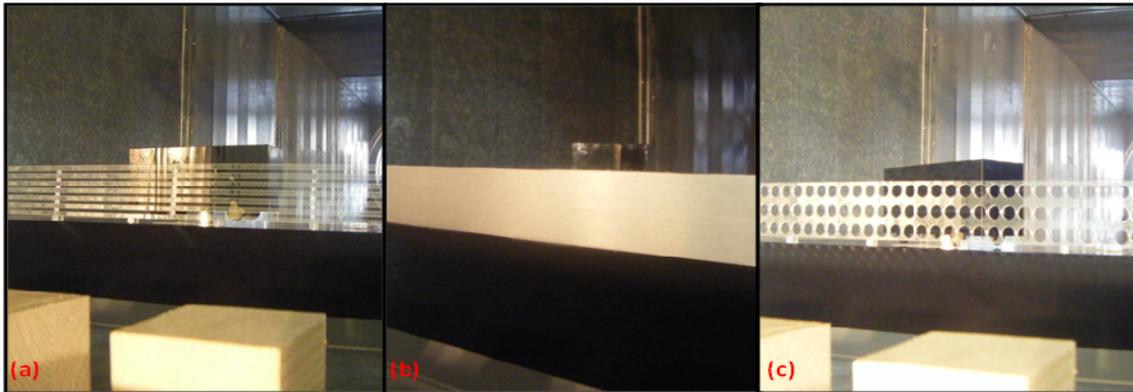


Figura 42. Maquetas de las barreras cortaviento estudiadas en el túnel aerodinámico.

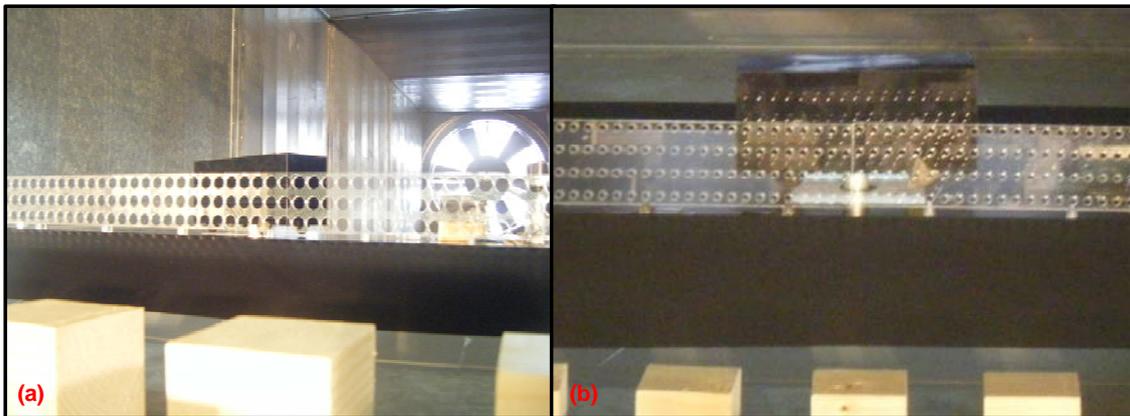


Figura 43. (a) Barrera con taladros de un diámetro igual a 0.5 m a escala real y (b) barrera con taladros igual a 0.2 m a escala real.

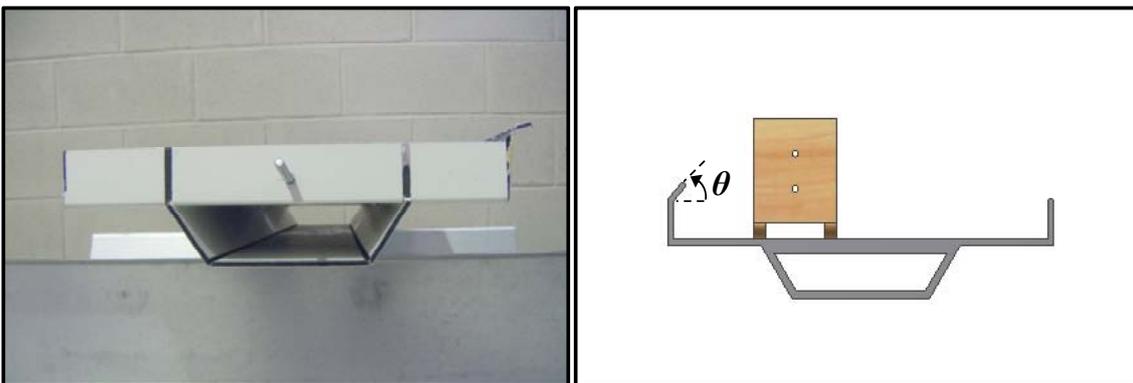


Figura 44. Tablero tipo cajón provisto de una pantalla cuyo ángulo de inclinación,  $\theta$  fue modificado durante los ensayos en túnel aerodinámico.

### 4.1.3. Disposición experimental y procedimientos de medida

En este apartado se aborda la disposición en la cámara de ensayos de los distintos instrumentos empleados, así como de las maquetas analizadas. Además, se establecerán las principales pautas para llevar a cabo las mediciones de interés.

Los elementos dispuestos en la cámara de ensayos siguiendo la trayectoria del flujo de aire desde su entrada hasta su salida son los siguientes: en primer lugar se instalaron una serie de bloques o cubos de dos tamaños (la arista de los cubos de menor tamaño mide 60 mm y en los de mayor tamaño 80 mm) en el espacio comprendido entre la entrada a la cámara de ensayos y una distancia de 0.3 m en la dirección del flujo de aire para generar un perfil de velocidades; en segundo lugar se ubicó el *tubo Pitot* a 1 m de distancia aguas arriba de la maqueta del vehículo, quedando en la vertical nivelado a la mitad de la altura de la caja del vehículo, y por último se situaron las maquetas al final de la cámara de ensayos (Figura 45 y Figura 46). Esta ubicación, lo más alejada posible de la entrada a la cámara de ensayos, tiene por finalidad generar un perfil de velocidad de viento lo más homogéneo posible en la dirección del flujo de aire. Por otra parte, se instaló el *tubo Pitot* a la mitad de la caja del vehículo debido a que a esta altura la presión dinámica del flujo de aire que incide sobre el vehículo se aproxima al valor medio de la presión dinámica en la región de afección al mismo.

En cuanto a la posición vertical de las maquetas, los perfiles viarios se fijaron al suelo de la cámara de ensayos y, los tableros se situaron a una altura tal que el centro geométrico de la caja del camión quede a 0.5 m del suelo (mitad de la dimensión en  $z$  de sección de la cámara de ensayos). Mediante esta disposición de las maquetas, los perfiles viarios se situaron dentro de la región del perfil de velocidades donde la velocidad depende de la altura, no siendo así en el caso de los tableros de viaductos afectados por un flujo de aire bastante homogéneo. En cuanto a la maqueta del vehículo, esta se situó en el carril más próximo al barlovento de las infraestructuras tanto en los tableros como en los perfiles del terreno, ya que las cargas aerodinámicas deberían a priori ser mayores en este carril. Las maquetas de las barreras cortaviento se instalaron únicamente sobre uno de los lados de calzada, tanto en el perfil viario tipo terraplén como en la sección del tablero de viaducto con cajón (Figura 45 y Figura 46).

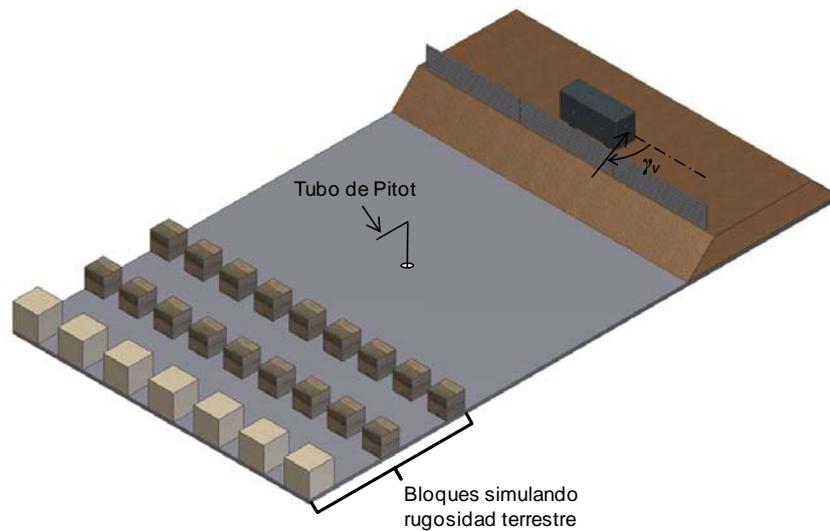


Figura 45. Disposición experimental de los ensayos realizados en el túnel aerodinámico sobre los perfiles viarios.

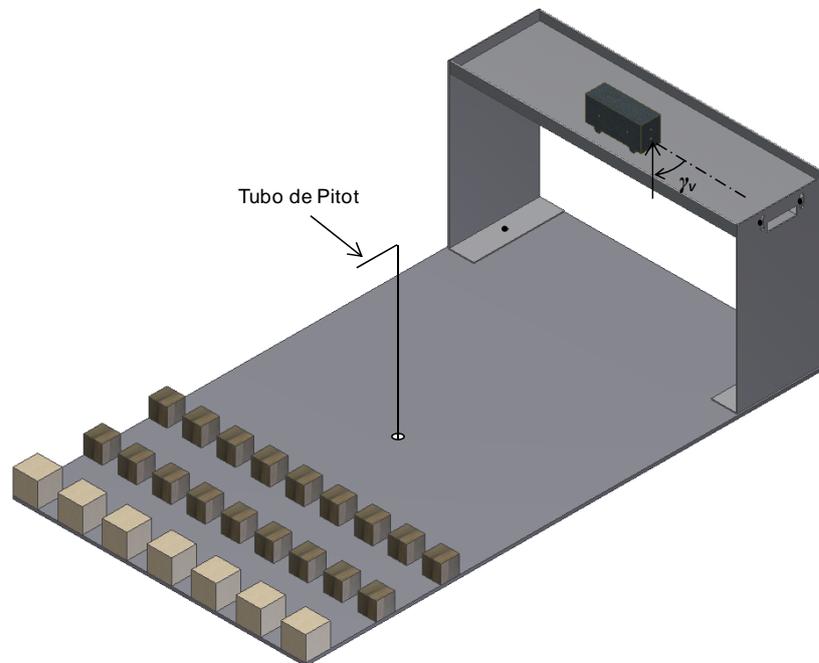


Figura 46. Disposición experimental de los ensayos realizados en el túnel aerodinámico sobre los viaductos.

Durante los ensayos experimentales se tomaron únicamente mediciones de presión a través del escáner de presiones, calculándose a partir de estas medidas distintas variables de interés. El escáner de presiones muestrea cada uno de los 16 canales a una frecuencia de 7 Hz tomando un total de 200 muestras, considerando su valor promedio el valor representativo de cada canal para los siguientes cálculos. Dos de los 16 canales se conectaron mediante un par de tubos flexibles de silicona a las tomas de presión estática y total de un *tubo Pitot*, para el cálculo de la velocidad del flujo de aire.

También se determinó la intensidad de la turbulencia en la dirección del flujo de aire con las 200 medidas de velocidad. Para ello se utilizó la siguiente expresión:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (97)$$

donde  $\sigma_u$  es la desviación estándar de la serie de medidas de velocidad y  $U$  es el valor promedio de dicha serie. Otros 12 canales se canalizaron mediante tubos flexibles de 1.5 m de longitud por el interior de la maqueta del vehículo pesado hasta los 12 orificios taladrados en las caras de la caja del vehículo (2 por cada cara del vehículo), quedando enrasados como se muestra en la Figura 47. Estas medidas de presión se utilizaron en el cálculo de las cargas aerodinámicas ejercidas por el aire sobre el vehículo. Las fuerzas y momentos aerodinámicos actuantes que fueron analizados son: fuerza lateral ( $F_L$ ), fuerza vertical ( $F_V$ ) y momento de vuelco ( $M_V$ ). A partir de las dos tomas de presión en cada cara del vehículo se obtuvo la presión media sobre esa superficie. El producto entre esta magnitud y el área de esa superficie define la fuerza aerodinámica sobre cada una de las 6 caras del vehículo. Concretamente, la fuerza lateral se calculó como la diferencia entre las fuerzas aerodinámicas actuando en las caras laterales del vehículo (paralelas a su trayectoria) por el lado de barlovento y sotavento respectivamente. La fuerza vertical se obtuvo a partir de la diferencia de las fuerzas actuando en la cara superior e inferior del vehículo. El momento de vuelco del vehículo se obtiene sumando los momentos generados por la fuerzas actuantes sobre el punto de apoyo exterior de la rueda situada a sotavento, punto O indicado en la Figura 47. El punto de acción de la resultante de las fuerzas de presión actuando sobre las caras, fue situado en la posición del centro de presiones (c.p.) de cada cara (Figura 47) para el cálculo del momento de vuelco. Cada uno de los c.p. requeridos fueron estimados en base a la distribución de presiones sobre cada cara obtenida posteriormente mediante los modelos numéricos validados. Por consiguiente, el momento de vuelco se puede expresar como:

$$M_V = F_{x(\text{BAR})} \cdot z_{c.p.(\text{BAR})} + F_{x(\text{SOT})} \cdot z_{c.p.(\text{SOT})} + F_{Z(\text{SUP})} \cdot x_{c.p.(\text{SUP})} + F_{Z(\text{INF})} \cdot x_{c.p.(\text{INF})} \quad (98)$$

A continuación las fuerzas y momentos indicados se transforman en coeficientes adimensionales mediante las siguientes expresiones:

$$Cf.Lateral = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 A_L} \quad (99)$$

$$Cf.Vertical = \frac{F_V}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_S}$$

$$Cm.Vuelco = \frac{M_V}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_L H}$$

donde  $U$  es la velocidad del perfil de velocidades calculada mediante el *tubo pitot*,  $A_L$  es el área de la superficie lateral del vehículo y  $A_S$  es el área de la superficie superior del vehículo.

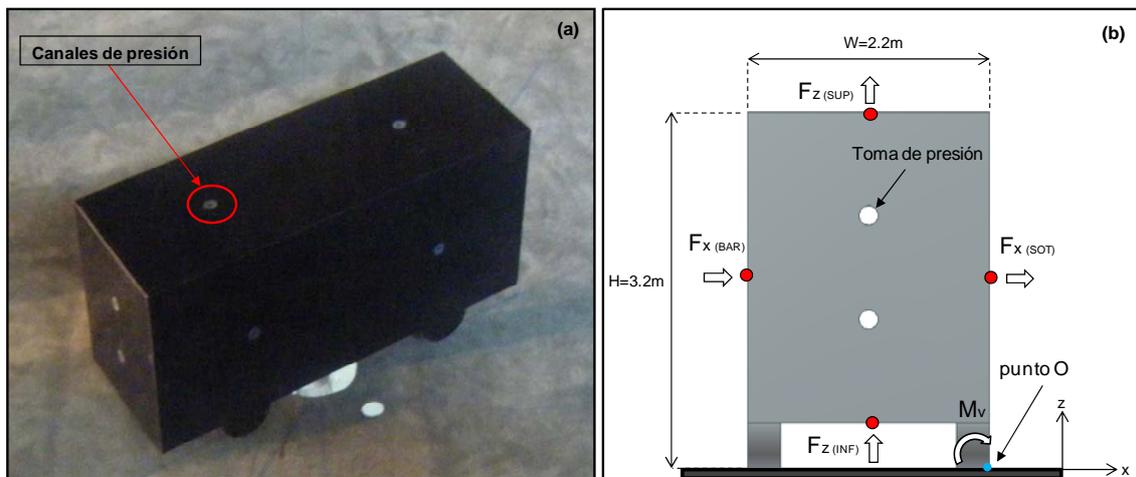


Figura 47. (a) Orificios aplicados en torno a la superficie del camión para la toma de las presiones ejercidas por el aire sobre el vehículo. (b) Cargas aerodinámicas actuando sobre el vehículo implicadas en el accidente de vuelco.

#### 4.1.4. Validación de los ensayos

Los dos primeros ensayos desarrollados en el túnel aerodinámico tienen por finalidad comprobar, por un lado, que las condiciones eólicas en la cámara de ensayos son representativas de la realidad, y por otro lado, que los coeficientes aerodinámicos obtenidos para la maqueta del vehículo son representativos de ese vehículo a escala real.

##### 4.1.4.1. Perfil de velocidades en la cámara de ensayos

El perfil de velocidades en la cámara de ensayos se determinó mediante la toma de una serie de medidas de la velocidad del flujo de aire a distintas alturas comprendidas entre el suelo de la cámara de ensayos, que simula la superficie terrestre, y una altura de 0.5 m a la mitad de la cámara de ensayos. Aparte de la velocidad del flujo de aire, también se obtuvo a cada altura la intensidad de la turbulencia, que posteriormente se utilizará en

la definición de las condiciones de contorno del modelo numérico de cara a configurar los modelos de un modo más preciso. El perfil de velocidades se obtuvo para las infraestructuras que presentaban mayores diferencias en relación al bloqueo de la cámara de ensayos (media ladera, terraplén, terreno llano y sección de tablero con cajón).

La velocidad en la cámara de ensayos depende de las revoluciones por minuto de giro del ventilador. Este alcanza las 750 r.p.m trabajando la máquina a un rendimiento igual al 78%, el máximo permitido por el fabricante para ensayos prolongados. Se optó por desarrollar los ensayos a 650 r.p.m para que la máquina funcionase por debajo del límite mencionado. No obstante, la velocidad alcanzada por el flujo de aire fue suficientemente alta como para anular los efectos de escala, como se demostrará a posteriori en el análisis de independencia de Reynolds. A la hora de seleccionar los niveles donde se midió la velocidad del flujo de aire, se tomaron muestras más cercanas entre sí espacialmente a medida que disminuía la distancia con respecto al suelo ya que el gradiente de velocidad es mayor en esta región. Concretamente, las alturas donde se midió la velocidad del flujo de aire fueron las siguientes: 45 mm; 60 mm; 80 mm; 90 mm; 112 mm; 130 mm; 150 mm; 168 mm; 200 mm; 218 mm; 250 mm; 268 mm; 325 mm y 500 mm. Las medidas experimentales obtenidas para las distintas infraestructuras se ajustan bastante bien a la función matemática potencial propuesta por Hellman en 1916 (Figura 48), y cuya expresión es:

$$\frac{u(z)}{u_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (100)$$

donde  $u_{ref}$  es la velocidad de referencia medida a una altura de referencia  $z_{ref}$ , siendo en este caso igual a 0.5 m. Según las funciones matemáticas de aproximación a los datos empíricos, el exponente  $\alpha$  puede tomar un valor de 0.24 ó 0.27 (Figura 48). El parámetro  $\alpha$  permite determinar de qué tipo de terreno es representativo el perfil de velocidades obtenido en cada caso. Un valor de  $\alpha$  de 0.24 indica que el perfil de velocidades generado en la cámara de ensayos se encuentra próximo al generado por un terreno con zonas de cultivos altos y obstáculos dispersos ( $\alpha$  igual a 0.22). Mientras, el de 0.27 está más cercano al perfil originado por zonas boscosas, donde  $\alpha$  toma un valor de 0.29 (Cermak y Isyumov, 1998). Un 5% de intensidad de turbulencia longitudinal se

obtuvo aproximadamente en la cámara de ensayos resultado del promediado de los valores a distintas alturas.

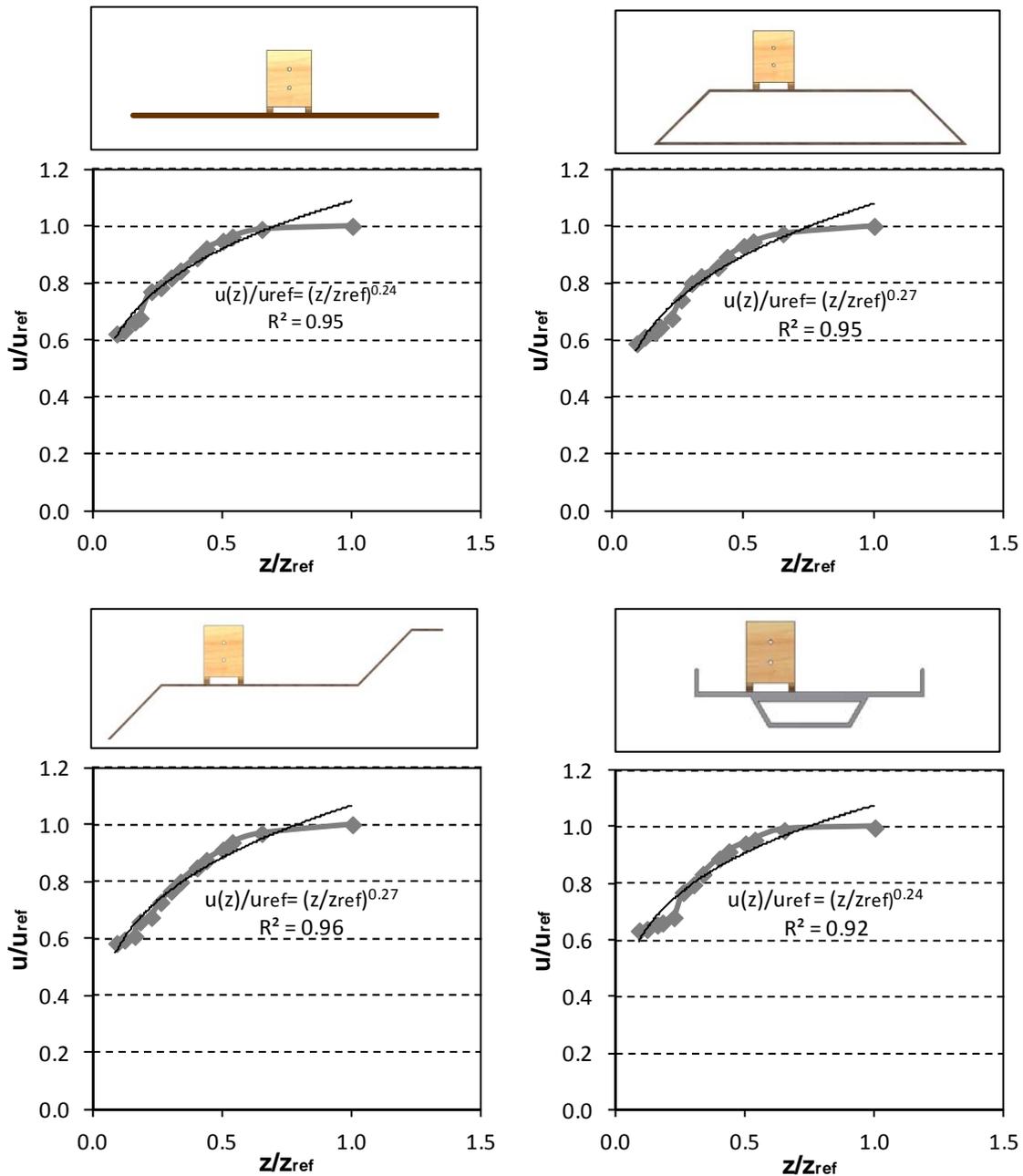


Figura 48. Perfiles de velocidades obtenidos en la cámara de ensayos para distintas infraestructuras.

Otro parámetro de interés que permite también identificar el tipo de terreno que se está modelando en los ensayos es la longitud de la rugosidad aerodinámica. Para determinar este parámetro se recurrió a la conocida distribución logarítmica, que describe el perfil de velocidades de viento en la capa superficial atmosférica, como indica la siguiente expresión:

$$u(z) = (u^* / k) \ln(z / z_0) \quad (101)$$

Para estimar la longitud de rugosidad aerodinámica y otros parámetros de interés como la velocidad de fricción, se representó el  $\ln(z)$  en función de la velocidad  $u$ (m/s) y se obtuvo la función matemática lineal ajustada a los datos empíricos como se muestran en la Figura 49 (Arya, 2001). A continuación, los valores de los parámetros se determinaron comparando el modelo de regresión lineal mostrados en las gráficas de la Figura 49 con la siguiente expresión teórica:

$$\ln z = \frac{uk}{u^*} + \ln z_0 \quad (102)$$

Los valores obtenidos para la rugosidad aerodinámica se indican en la Tabla 2.

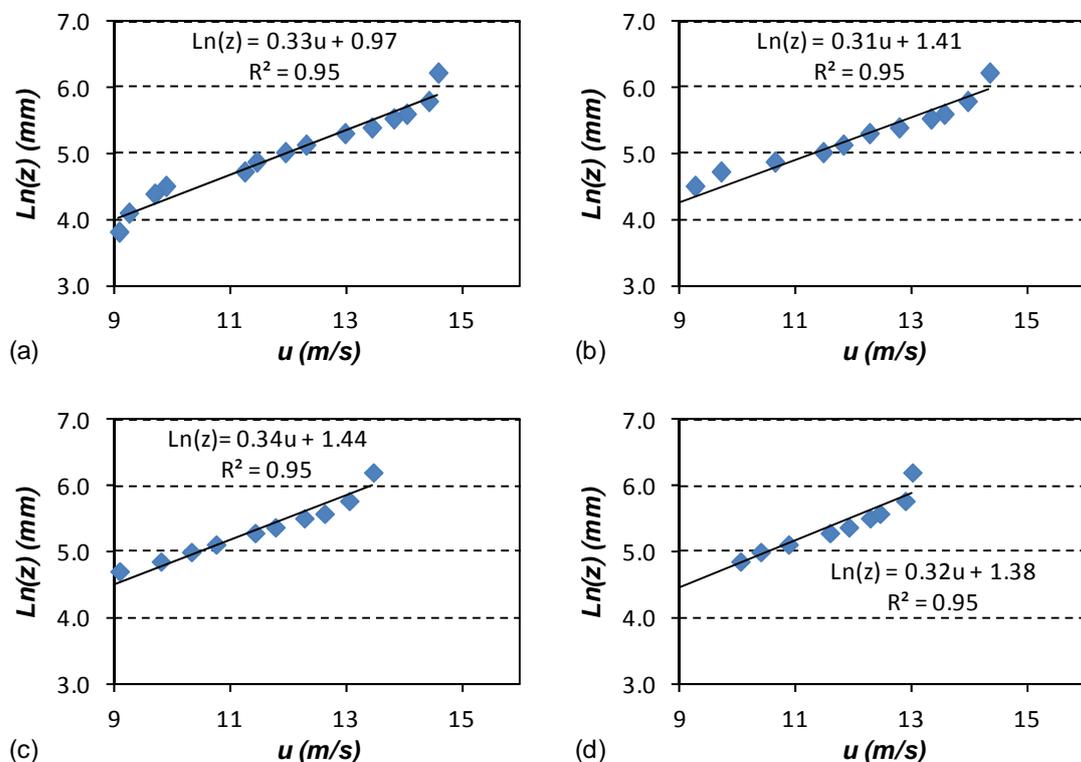


Figura 49. Representación del logaritmo del nivel sobre el suelo del túnel aerodinámico en función de la velocidad del flujo de aire, para las siguientes infraestructuras: (a) Terreno llano; (b) Terraplén; (c) Media ladera y (d) Sección de tablero con cajón.

Según las magnitudes de  $z_0$  obtenidas durante los ensayos en el túnel aerodinámico, el tipo de superficie que se está simulando puede ser también representativo de un terreno con escasa presencia de árboles (Tabla 3).

**Tabla 2. Longitudes de rugosidad aerodinámica durante los ensayos con las distintas infraestructuras.**

<b>Infraestructura</b>	<b><math>Z_0(m)</math></b>
Terreno llano	0.09
Terraplén	0.14
Media ladera	0.15
Tablero con cajón	0.12

**Tabla 3. Valores de longitud de rugosidad para diferentes tipos de superficies terrestres (Bañuelos-Ruedas et al., 2010).**

<b>Características terrestres</b>	<b><math>Z_0(mm)</math></b>
Muy suave; hielo o barro	0.01
Mar abierta en calma	0.2
Alta mar picada	0.5
Superficie nevada	3
Pastizales y zonas verdes	8
Áreas de pastos	10
Terreno cultivable	30
Terreno con cultivos	50
Árboles escasos	100
Zonas muy boscosas y pocos edificios	250
Zonas boscosas con árboles de gran tamaño	500
Zonas periféricas de ciudades	1500
Zonas centrales de las ciudades con edificios de gran altura	3000

#### 4.1.4.2. Semejanzas entre el modelo y el prototipo

Con la finalidad de que la información obtenida en los ensayos en el túnel aerodinámico sobre un modelo a escala sea representativa de un prototipo a escala real, deben darse

las siguientes semejanzas entre el modelo y el prototipo: geométrica, cinemática y dinámica.

- ✓ *Semejanza geométrica:* Existe semejanza geométrica entre el modelo y el prototipo si dimensiones homologas de ambos están relacionadas mediante una constante de proporcionalidad (escala). Es decir, el modelo debe guardar la misma forma que el prototipo con dimensiones distintas. Los modelos objeto de estudio son semejantes geoméricamente según su forma y dimensiones a posibles prototipos reales de infraestructuras y vehículos pesados.
- ✓ *Semejanza cinemática:* La semejanza cinemática existe entre el modelo y prototipo si los vectores de velocidad en puntos homólogos del fluido satisfacen una relación de proporcionalidad constante en cuanto a sus módulos, manteniendo la misma dirección en cualquier instante de tiempo. Mediante la simulación de unas condiciones eólicas características de un escenario real, y existiendo una semejanza geométrica entre el modelo y prototipo, se dan las condiciones para satisfacer la semejanza cinemática entre las condiciones simuladas en el túnel aerodinámico y ese posible escenario real.
- ✓ *Semejanza dinámica:* La semejanza dinámica se da entre el modelo y el prototipo si los vectores de fuerzas del mismo tipo en puntos homólogos del modelo y prototipo están relacionados mediante una constante de proporcionalidad, manteniendo la misma dirección en cualquier instante de tiempo. Para tal fin resulta necesario que exista semejanza cinemática, por lo que comprobando únicamente la semejanza dinámica se pueden controlar implícitamente las otras dos semejanzas. La existencia de semejanza dinámica entre el modelo y el prototipo se evalúa mediante algunos de los números adimensionales de la mecánica de fluidos que establecen relaciones entre distintos tipos de fuerzas.

Los tipos de fuerzas que pueden actuar en un problema de interacción fluido estructura son los siguientes: fuerzas de inercia  $F_i$ , estimuladas por la variación temporal de la cantidad de movimiento de una masa; fuerzas de rozamientos,  $F_\mu$ , debidas a la viscosidad dinámica del fluido; fuerzas gravitacionales  $F_g$ ; fuerzas de presión debidas a

los gradientes de presión  $F_p$ ; fuerzas de elasticidad determinadas por la compresibilidad del fluido  $F_e$ ; y fuerzas debidas a tensiones superficiales  $F_\sigma$ . La existencia de semejanza dinámica total implica satisfacer la siguiente expresión:

$$E_F = \frac{Fi_p}{Fi_m} = \frac{F\mu_p}{F\mu_m} = \frac{Fg_p}{Fg_m} = \frac{Fp_p}{Fp_m} = \frac{Fe_p}{Fe_m} = \frac{F\sigma_p}{F\sigma_m} \quad (103)$$

En función de ciertas características del flujo (compresibilidad, presencia de superficies libres, etc.) unas fuerzas toman mayor relevancia que otras y, por consiguiente, el control de la semejanza se centra sobre las mismas. En el problema objeto de estudio las fuerzas a controlar son de dos tipos, de inercia y viscosas, por lo tanto (103) queda reducida a la siguiente expresión:

$$\frac{Fi_p}{Fi_m} = \frac{F\mu_p}{F\mu_m}, \quad \frac{Fi_p}{F\mu_p} = \frac{Fi_m}{F\mu_m}; \quad Re_p = Re_m \quad (104)$$

Por consiguiente, existirá semejanza dinámica en el caso de estudio si el número de Reynolds en el modelo y prototipo toman la misma magnitud. Debido a que la escala del modelo es 1:35, la velocidad del flujo de aire durante los ensayos en el túnel aerodinámico debería ser 35 veces mayor a la del prototipo real para cumplir la igualdad entre los números de Reynolds. Esto se puede deducir al observar la expresión del número de Reynolds:

$$\left[ \frac{\rho u L}{\mu} \right]_p = \left[ \frac{\rho u L}{\mu} \right]_m \quad (105)$$

No obstante, este aumento de la velocidad hasta un valor 35 veces mayor a la del prototipo no se debe acometer, ya que el flujo dejaría de ser incompresible, situación que no se da en el flujo de aire cuando incide sobre un vehículo circulando por una carretera. Como la igualdad es un requisito inadecuado, el objetivo normalmente buscado en estas situaciones es lograr una independencia entre los coeficientes aerodinámicos y el número de Reynolds. Para tal fin, se analizan aquellos en función del número de Reynolds, controlando este por medio de la velocidad del flujo de aire en la cámara de ensayos y esta a su vez a través de la velocidad del ventilador (rpm). Durante los ensayos, el número de Reynolds cambiará de una infraestructura a otra únicamente debido a la variación de la velocidad del flujo de aire en base a la altura de instalación del *tubo Pitot* mencionada, ya que el resto de parámetros son constantes. Concretamente, los valores de densidad, viscosidad dinámica y dimensión característica

del sistema son:  $\rho=1.21 \text{ kg/m}^3$ ;  $\mu=1.74\text{E-}5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  y  $L=91 \text{ mm}$  (altura de la maqueta del vehículo), respectivamente.

Así, considerando los perfiles de velocidad simulados, la infraestructura que debe presentar un número de Reynolds más bajo es el terreno llano. Por dicho motivo se optó por esta infraestructura para analizar la relación entre el  $Re$  y los coeficientes aerodinámicos. Las velocidades del flujo de aire generadas en la cámara de ensayos que definieron los distintos valores del  $Re$  se establecieron marcando una diferencia aproximada entre valores consecutivos de 2 m/s, tomando como valor de partida la máxima velocidad del flujo de aire permitida en la cámara de ensayos. Por otra parte, el rango analizado del  $Re$  será únicamente útil para los posteriores ensayos, si alberga el valor característico generado en los mismos.

Así, las siguientes magnitudes de velocidad del flujo de aire al nivel del *tubo pitot* fueron generadas: 4.88 m/s, 6.92 m/s, 8.83 m/s, 10.91 m/s y 12.94 m/s. Como se puede observar en la Figura 50, los coeficientes aerodinámicos se pueden considerar prácticamente independientes del valor del  $Re$ . Como el número de  $Re$  acorde al perfil simulado en el terreno llano es igual a  $5.76 \times 10^4$ , se puede afirmar que la semejanza dinámica entre el prototipo y el modelo queda satisfecha. En el resto de las infraestructuras el número de  $Re$  toma valores más altos, y por consiguiente también se pueden considerar satisfechas las semejanzas en estos casos.

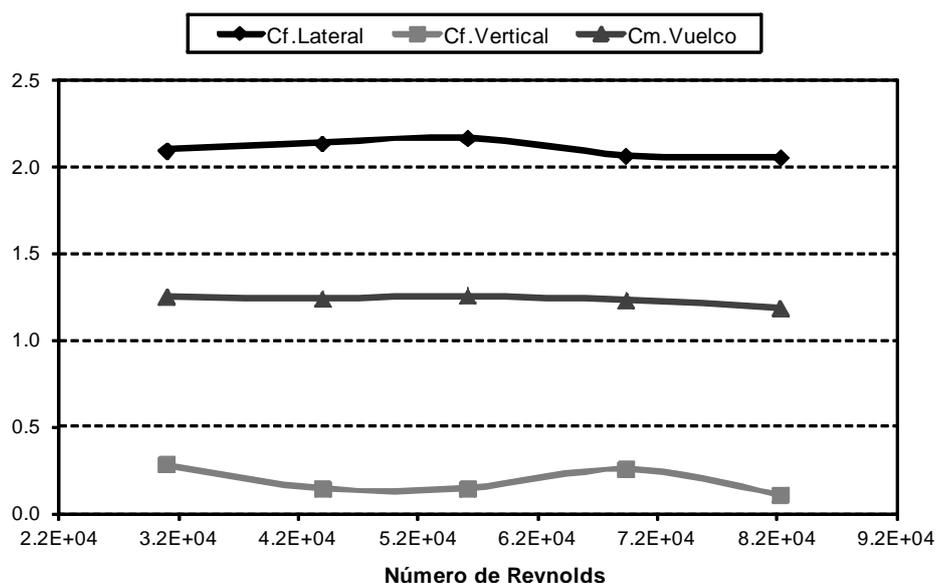


Figura 50. Coeficientes aerodinámicos analizados en función del número de Reynolds para el caso del terreno llano.

## 4.2. MODELADO NUMÉRICO

En este apartado se desarrollan las tareas llevadas a cabo en torno a la simulación numérica que permitieron resolver los modelos a posteriori. Con el objetivo de que la simulación numérica proporcione información similar a la obtenida en un ensayo en túnel de viento, la configuración de los modelos se desarrolló en base al estudio de las condiciones generadas durante la campaña de ensayos experimentales en túnel aerodinámico. Concretamente, las medidas y características de las condiciones del flujo en la cámara de ensayos del túnel de viento se utilizaron y consideraron en la definición de las condiciones de contorno del problema y en la selección de los modelos físicos implicados. Así, una vez validada la simulación, esta reemplazó al túnel de viento en su cometido, permitiendo estudiar otros aspectos de interés.

### 4.2.1. Planificación de los casos analizados

En primer lugar se abordaron las distintas clases de infraestructuras propuestas para estudio: perfiles del terreno y tableros de viaductos. A continuación, se estudió un modelo de barrera cortaviento para una de las infraestructuras pertenecientes a cada grupo (terraplén y tablero tipo cajón). En el caso de la barrera cortaviento instalada en el tablero tipo cajón se resolvieron 5 modelos numéricos, modificando únicamente el ángulo de inclinación de la barrera. Por último, se llevaron a cabo tres diseños de experimentos, de los cuales dos son sobre el perfil tipo terraplén y el tercero sobre el tablero tipo cajón (Figura 51).

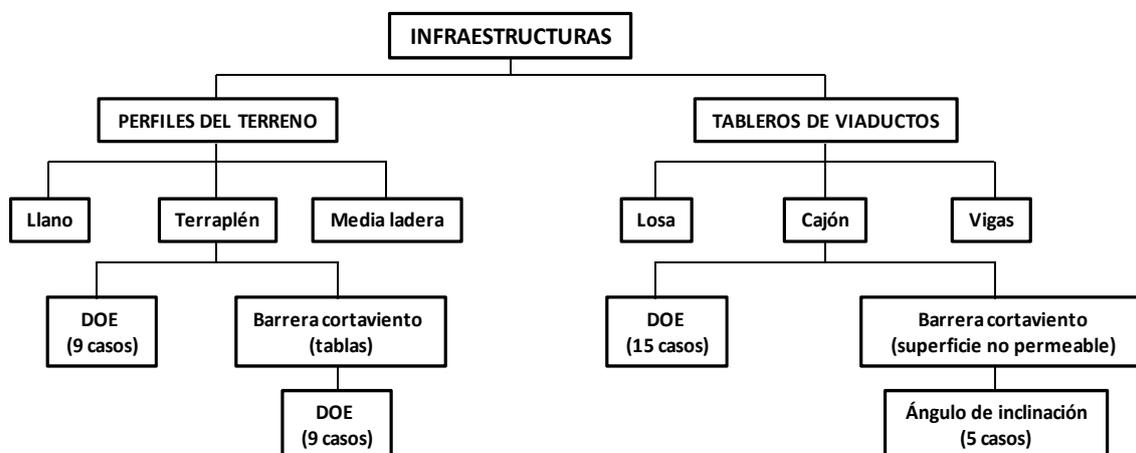


Figura 51. Diagrama de los casos analizados mediante simulación numérica.

#### **4.2.2. Geometría de los modelos y condiciones de contorno**

La geometría de los modelos numéricos analizados responde a un cubo al que se le substrajeron las infraestructuras y el modelo de vehículo. Esta geometría tridimensional corresponde a la región del fluido que rodea los objetos analizados, y que posteriormente fue dividida en volúmenes de control para resolver las principales características del flujo de aire por medio del código de FLUENT (ANSYS, 2014). Con el objetivo de que los resultados obtenidos mediante simulación numérica se asemejasen a los conseguidos en la campaña de ensayos experimentales (túnel de viento), se trató de guardar una similitud con la geometría y dimensiones de la cámara de ensayos al construir la geometría de los modelos numéricos. No obstante, se llevaron a cabo algunas simplificaciones para optimizar los recursos computacionales, siempre y cuando no implicasen que la información aportada por el modelo se desviara en gran medida de la obtenida a partir de los ensayos en el túnel.

La altura del dominio de fluido coincide con la altura de la cámara de ensayos, mientras que la anchura se redujo de 1 m a 0.1 m, como se muestra en la Figura 52. Esta simplificación disminuye en gran medida la región del dominio a mallar, permitiendo emplear los recursos computacionales para refinar la malla donde sea necesario y utilizar modelos matemáticos más ricos y completos desde una perspectiva física. Por otro lado, aplicar esta simplificación no debería implicar un aumento en las diferencias entre cargas aerodinámicas calculadas en la simulación y las determinadas a partir de los ensayos experimentales, en vista del diseño del experimento desarrollado. Con el mismo fin, las ruedas del vehículo y el soporte del mismo también se suprimieron, ya que requieren de un elevado refinamiento de la región del fluido próxima a su superficie debido a los fuertes gradientes generados en estas zonas curvas. Esta simplificación podría afectar al flujo de aire circulando por debajo del vehículo y, como consecuencia, a la fuerza aerodinámica vertical. No obstante, la contribución de la fuerza vertical al momento de vuelco debería ser lo suficientemente pequeña como para no enmascarar los peores escenarios para la estabilidad del vehículo. Los soportes de anclaje de las barreras en las maquetas también se eliminaron de la geometría de los modelos, ya que el porcentaje de bloqueo de la sección transversal del hueco inferior resulta mínimo y, por consiguiente, no afecta en gran medida al flujo de aire que incide sobre el vehículo.

Las dimensiones del dominio se expresan de forma paramétrica en función de la altura del obstáculo  $H_{obs}$  (suma de la altura de la infraestructura y del vehículo), ya que las dimensiones a asignar dependen de la altura del objeto analizado (Figura 52). Las distancias establecidas entre la entrada y salida de aire del dominio y el objeto analizado deben ser suficientes como para permitir que el fluido se estabilice tras las perturbaciones originadas por la presencia de un obstáculo. Concretamente, se asignan a estas distancias valores superiores a los especificados en trabajos tales como los realizados por Bettle et al. (2003) y Tsubokura et al. (2010). En la Figura 52 se muestran dos casos analizados, representativos de los grupos de infraestructuras objeto de estudio.

El dominio de fluido fue dividido en tres subdominios, tal y como se indica en la Figura 52. Concretamente, dos dominios más alejados de los modelos analizados, con las mismas dimensiones y de mayor tamaño al otro dominio orientado a modelar la región de aire más próxima al vehículo y a la infraestructura correspondiente. Definir dos dominios en lugar de uno para las regiones de aire más alejadas de la maqueta tiene su origen en la necesidad de establecer diferentes condiciones de contorno para cada zona. En cuanto a la finalidad de definir un subdominio que albergase la región de aire más próxima a la maqueta, esta no es otra que permitir establecer una malla más fina en esta región.

El tipo de condiciones de contorno establecidas en las distintas superficies del dominio se pueden observar de forma genérica también en la Figura 52, detallándose a continuación los valores y expresiones asignados a los distintos parámetros que las constituyen:

✓ **Entrada:**

Se estableció un perfil de velocidad  $u(z)$  desde el suelo del túnel hasta una altura de 0.5 m igual al perfil de velocidades indicado previamente en la Figura 48 para cada caso. Mientras, un perfil de velocidades uniforme se asignó desde la altura de 0.5 m hasta el techo de la cámara cuya magnitud también depende del caso de estudio. Las componentes de la velocidad del viento en las direcciones  $y$  y  $z$  fueron nulas. Las cantidades turbulentas definidas fueron la intensidad de turbulencia y la escala de

longitud turbulenta. La intensidad de turbulencia se ajustó a un 5%, valor medido experimentalmente en el túnel. La escala de longitud turbulenta se aproximó a  $l_u=0.07L$  (ANSYS, 2014), donde  $L$  es el diámetro hidráulico igual a 1 m. La relación entre estos parámetros y las variables estimadas por cada modelo de turbulencia se indican a continuación. El modelo  $k-\omega$  SST determina como sigue los valores de  $k$  y  $\omega$  en función de los parámetros descritos:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{u} \cdot I_u)^2 \quad (106)$$

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C_\mu^{1/4} \cdot l_u} \quad (107)$$

donde  $C_\mu = 0.09$ . El modelo SST de transición, aparte de los parámetros obtenidos según las expresiones (106) y (107), requiere del cálculo de la intermitencia  $\gamma$ , cuyo valor en la entrada es igual a 1, y del número de Reynolds de espesor de momento  $\tilde{Re}_\theta$ , cuya expresión en la entrada para una  $I_u > 1.3$  es:

$$\tilde{Re}_\theta = 331.50 [I_u - 0.5658]^{-0.671} F(\lambda_\theta) \quad (108)$$

donde  $F(\lambda_\theta)$  se obtiene como sigue:

$$F(\lambda_\theta) = 1 - [-12.986\lambda_\theta - 123.66\lambda_\theta^2 - 405.689\lambda_\theta^3] e^{-\left[\frac{I}{1.5}\right]^{1.5}}, \lambda_\theta \leq 0 \quad (109)$$

$$F(\lambda_\theta) = 1 + 0.275 [1 - e^{-35.0\lambda_\theta}] e^{-\left[\frac{-I}{0.5}\right]^{1.5}}, \lambda_\theta > 0 \quad (110)$$

$$\lambda_\theta = \frac{\rho \theta^2}{\mu} \frac{dU}{ds} \quad (111)$$

donde  $\theta$  es el espesor de momento y  $dU/ds$  es la aceleración a lo largo de la dirección principal del flujo, calculada a partir de las contribuciones de las derivadas de  $U$  en los tres ejes del sistema de coordenadas  $(x, y, z)$ , y aplicando la siguiente expresión:

$$U = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2) \quad (112)$$

Por último, el modelo RSM (Launder et al., 1975; Launder, 1989) determina  $k$  mediante una ecuación de transporte muy similar a la expresión (20), y  $\omega$  según la expresión (107). Las tensiones de Reynolds, considerando la turbulencia isotrópica en la entrada, son obtenidas utilizando las siguientes expresiones:

$$\overline{u_i u_j} = 0 \quad (113)$$

$$\overline{u_\alpha u_\alpha} = \frac{2}{3} k \quad (114)$$

✓ **Salida:**

La presión estática relativa en la superficie de contorno de salida del flujo se especificó como  $p = 0$ .

✓ **Simetría:**

La condición de contorno de Neumann se aplica a todas las variables mientras que la componente de velocidad normal al plano de simetría es nula. Por lo tanto, los flujos son iguales a cero para todas las cantidades a través del plano de simetría.

✓ **Paredes:**

Se aplicó a las paredes solidas del dominio (paredes del túnel y superficies de las maquetas analizadas) una condición de no deslizamiento ( $u_x, u_y, u_z=0$ ). A la variable turbulenta,  $k$ , se le asigna la condición de contorno de Neumann en las paredes:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (115)$$

Mientras, el valor de  $\omega$  se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\omega_w = \frac{\rho (u^*)^2}{\mu} \omega^+ \quad (116)$$

Las soluciones analíticas utilizadas para calcular  $\omega^+$ , en la subcapa laminar y en la región logarítmica son las de las expresiones (117) y (118), respectivamente:

$$\omega^+ = \frac{6}{\beta_i (y^+)^2} \quad (117)$$

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta^*}} \frac{\partial u_{turb}^+}{\partial y^+} \quad (118)$$

En cuanto a las variables de intermitencia,  $\gamma$ , y el número de Reynolds de espesor de momento de transición  $\tilde{Re}_\theta$  se les asigna flujo cero en la pared.

Por último las tensiones de Reynolds, incógnitas del modelo RSM, se expresan considerando un sistema de coordenadas local, donde  $\tau$  es la coordenada tangencial,  $\eta$  es la coordenada normal al plano y  $\lambda$  es la coordenada binormal. Por lo tanto, las tensiones

de Reynolds en las celdas adyacentes a la pared se determinan a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{\overline{u_\tau'^2}}{k} = 1.098, \frac{\overline{u_\eta'^2}}{k} = 0.247, \frac{\overline{u_\lambda'^2}}{k} = 0.655, -\frac{\overline{u_\tau' u_\eta'}}{k} = 0.255 \quad (119)$$

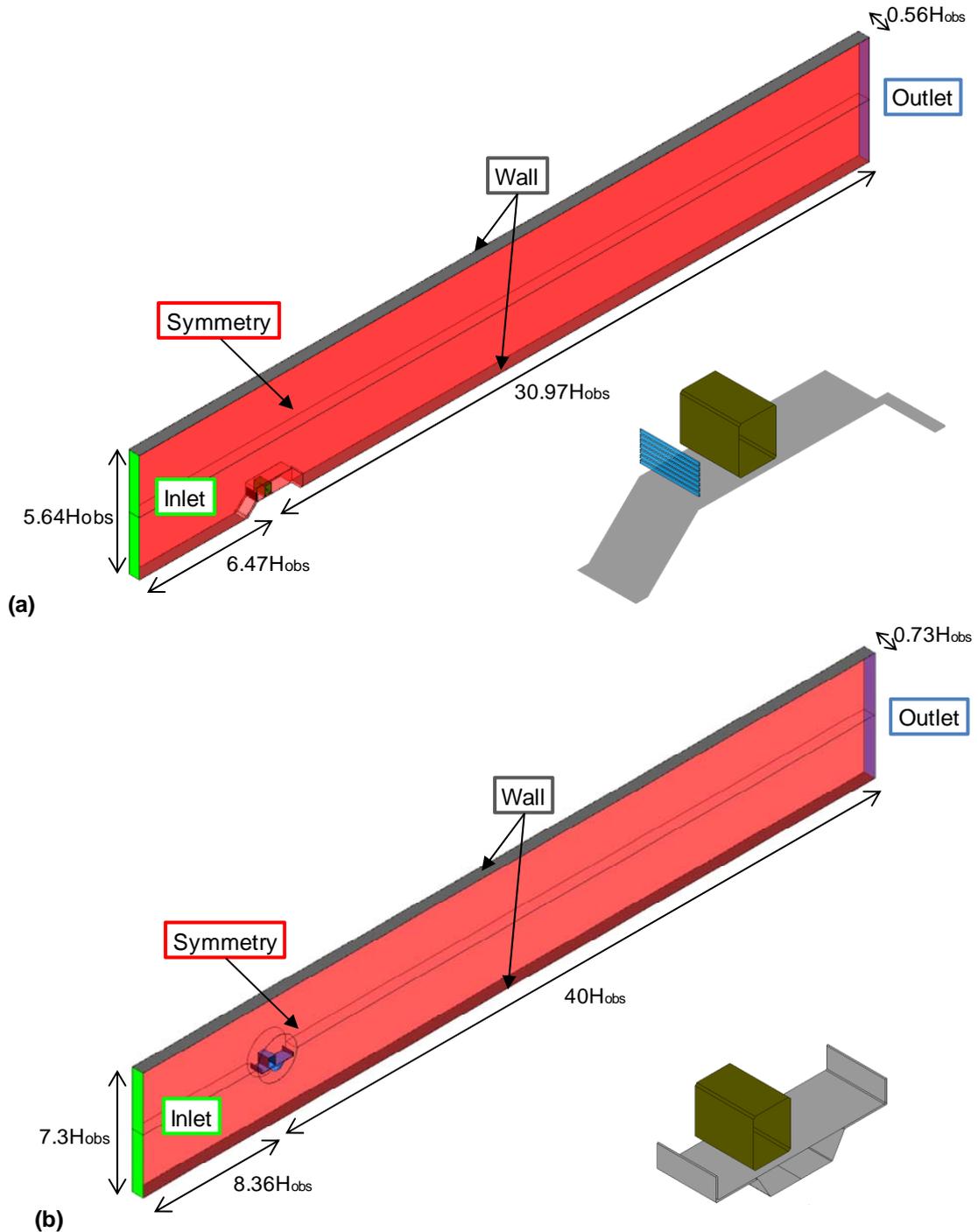


Figura 52. Geometrías de los modelos numéricos y sus condiciones de contorno para los casos del terraplén con barrera (a) y el tablero tipo cajón (b).

### 4.2.3. Construcción de la malla

En todos los modelos numéricos se empleó un tipo de malla no estructurada, compuesta en las regiones del flujo próximas a superficies sólidas por elementos tipo prisma y en el resto de regiones por tetraedros (Figura 53 y Figura 54). Las regiones de la malla formadas por elementos tipo prisma se crearon debido a que se aplicó un *control de inflation* sobre las superficies solidas (Figura 54). Este control agrupa los prismas por capas, las cuales se generan mediante la extrusión de una de las caras triangulares de los elementos en dirección normal a las superficies sobre las que se apoyan dichas caras y se aplica el control. Por otra parte, esta herramienta se utilizó porque facilita el control de las características geométricas de la malla en la capa límite, lo que permite a su vez optimizar los recursos del tratamiento de pared aplicado. Por lo tanto, aplicar el *control de inflation* en estas regiones mejora la precisión al resolver la capa límite. Dos fueron los parámetros que se utilizaron para definirlo, la altura de la primera capa de primas y el número de capas utilizadas para cubrir la región de la capa límite. El primer parámetro se determinó con el objetivo de situar la altura de la primera capa en torno a un valor de  $y^+$  igual a 1. Para ello se consideró el valor de la velocidad de fricción obtenido a partir del perfil de velocidades generado en los ensayos experimentales. Mientras, un total de 15 capas se construyeron para cubrir esta región, lo que supone un valor intermedio según el rango recomendado por ANSYS (2014), entre 10 y 20.

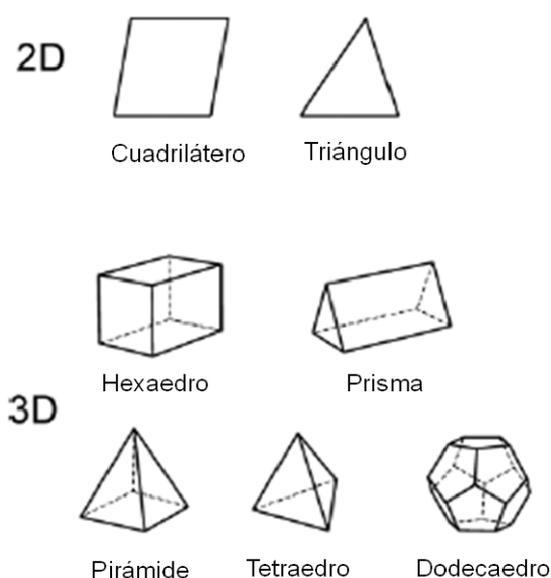


Figura 53. Elementos disponibles para mallas 2D y 3D (Andersson et al., 2012).

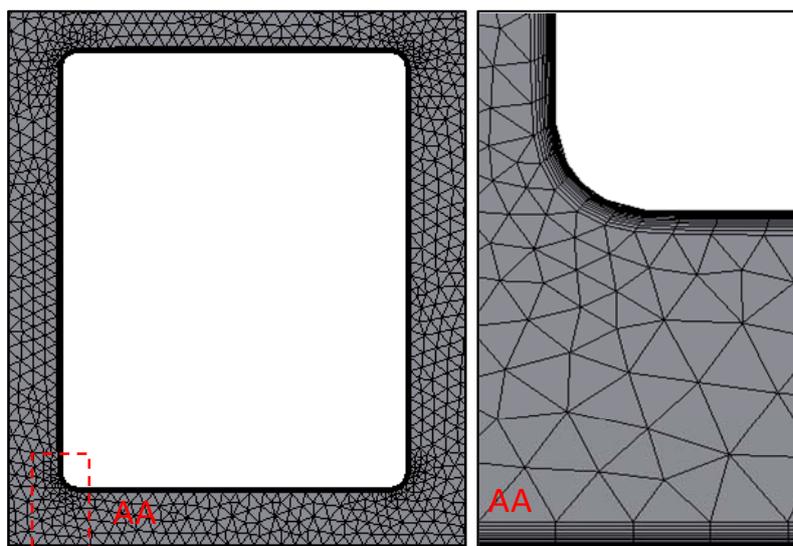


Figura 54. Malla en torno al vehículo (izquierda) y región ampliada de la malla en torno a la esquina inferior izquierda del vehículo.

Para establecer el refinado de ciertas regiones de la malla se utilizó un *control de tamaño*. Este control se aplicó tanto a caras (planos 2D) como a regiones del dominio fluido (espacios 3D), de tal modo que los elementos en contacto con las caras e incluidos en las regiones del fluido no adquieran un tamaño superior al asignado en el control. En el primer caso, las caras seleccionadas coincidían con las paredes inferior y superior del dominio que simulan las paredes de la cámara de ensayos del túnel. En el segundo caso se seleccionó el subdominio que alberga la región de fluido que rodea al vehículo, denominado como cercano en la Figura 55. Además, se activaron funciones de tamaño avanzadas para llevar a cabo un refinado de la malla en geometrías con cierta curvatura, como pueden ser las aristas del vehículo (Figura 54). Por otra parte, para estimar el tamaño del elemento a partir del cual un mayor refinado no proporciona más información se llevó a cabo un estudio de sensibilidad del tamaño de la malla, como se detalla en el próximo apartado.

#### 4.2.4. Elección del modelo de turbulencia y del tamaño de malla

El proceso de ajuste de los modelos numéricos se suele centrar principalmente en dos puntos vinculados a su definición. En primer lugar, la selección y caracterización de los modelos matemáticos, de modo que representen mejor la física asociada al problema implicado. En segundo lugar, y no menos importante, la construcción de una malla cuyas principales características permitan alcanzar un compromiso entre la precisión y el coste computacional. Aunque existen guías de buenas prácticas destinadas a hacer un

buen uso de los códigos CFD, las recomendaciones en ciertos casos son muy generales, es decir, se puede dar que para un determinado caso de estudio estén justificadas varias recomendaciones. Esto es lo que sucede en la elección del modelo de turbulencia. Así, del abanico de modelos ofrecidos por FLUENT, se puede hacer un filtrado inicial de algunos de ellos en base a las características del flujo dadas en el caso de estudio. La selección entre el resto de modelos de turbulencia se llevó a cabo mediante un estudio de sensibilidad, que permitió valorar el efecto de los modelos de turbulencia sobre las variables de interés.

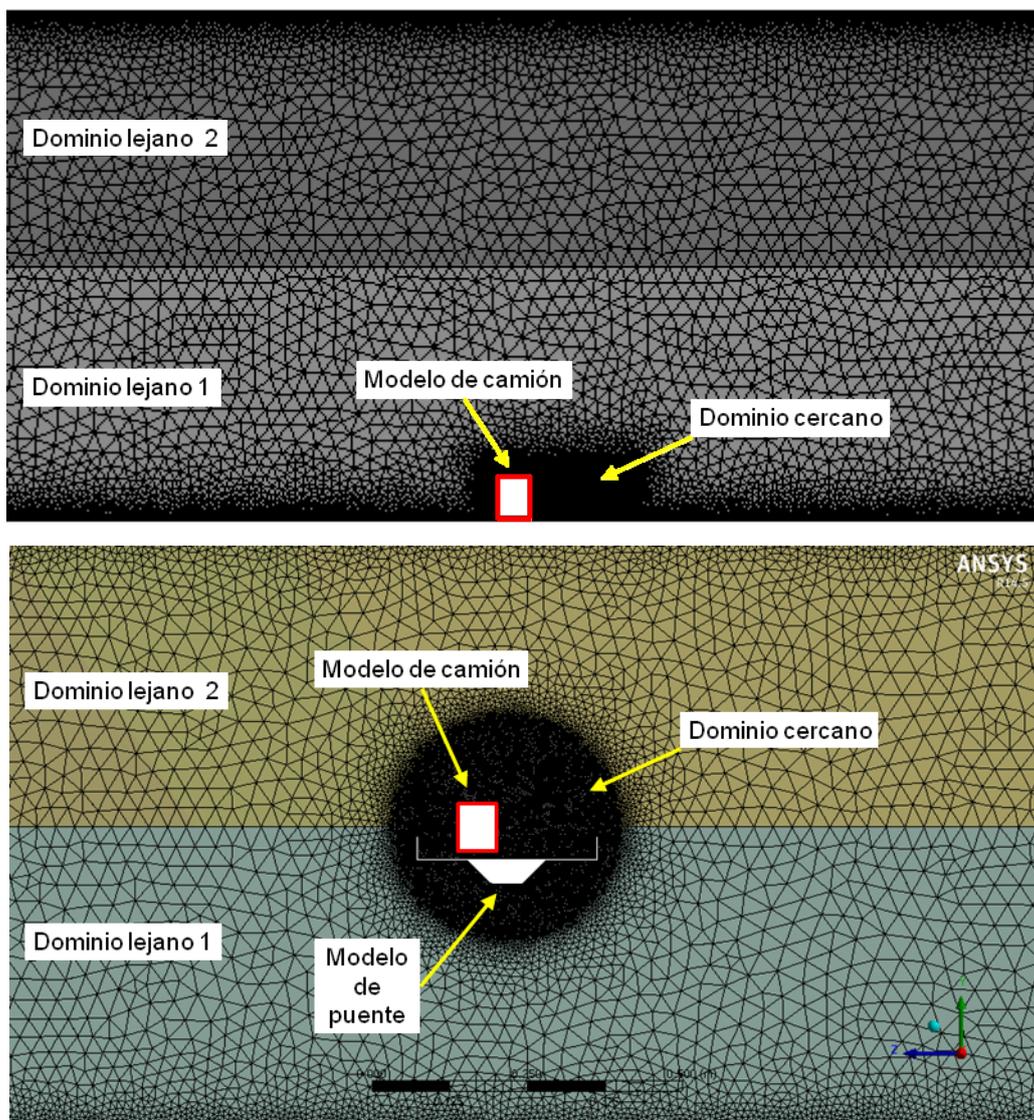


Figura 55. Vista del mallado definido en distintas regiones del dominio para dos de los casos analizados, el modelo del terreno llano (imagen superior) y el tablero tipo cajón (imagen inferior).

Las principales características del tipo de flujo generado durante los ensayos en el túnel aerodinámico, dada la geometría de los obstáculos encontrados por el flujo a su paso y los valores del Reynolds alcanzados, son las siguientes: regiones de números de Reynolds bajos, presencia de flujos separados, gradientes de presión adversos, presencia de remolinos, etc. Concretamente, las regiones próximas a las superficies sólidas son regiones de bajos números de Reynolds. Los gradientes de presión se pueden generar, por ejemplo, en el flujo de aire en las proximidades de una superficie paralela a su dirección debido a la tensión de cizalla viscosa. Los flujos separados se manifiestan, por ejemplo, al ensayar cuerpos con geometrías que no se adaptan suavemente a las líneas de corriente, como pueden ser las aristas del vehículo formando un ángulo de  $90^\circ$  entre las caras, o la pendiente del terraplén situada en el barlovento del camión. Los remolinos se presentan a lo largo de las estelas turbulentas generadas, por ejemplo, por los bloques situados a la entrada de la cámara de ensayos o en la región a sotavento de las maquetas estudiadas.

A modo de recordatorio, los modelos de turbulencia seleccionados para su evaluación son:  $k-\omega$  SST (Menter, 1994); SST transición (Menter et al., 2006; Langtry y Menter, 2009) y RSM (Launder et al., 1975; Launder, 1989). La elección del modelo de transición SST y  $k-\omega$  SST fue motivada por el buen comportamiento que presentan estos modelos en la resolución de regiones de bajos números de Reynolds (Andersson et al., 2012; Tu, 2013; ANSYS, 2014). Mientras, el modelo RSM fue seleccionado por su capacidad para capturar regiones con presencia de remolino o curvatura de las líneas de corriente de un modo más preciso que los modelos de una y dos ecuaciones.

Simultáneamente al análisis de sensibilidad en torno al modelo de turbulencia, se efectuó otro análisis de sensibilidad enfocado a determinar la configuración óptima para la malla. Este estudio se llevó a cabo mediante el análisis del efecto del tamaño de malla sobre las variables objeto de estudio. El número de elementos de la malla se varió mediante el *control del tamaño* asignado a los elementos en el subdominio cercano. Esta región de fluido próxima al vehículo y la infraestructura exhibirá fuertes gradientes en las variables, afectando significativamente al comportamiento aerodinámico del vehículo. Concretamente, se utilizaron cinco tamaños de malla para los modelos numéricos resueltos: 0.5, 4, 7, 10 y 14 millones de elementos (valores aproximados).

Las variables elegidas para valorar la influencia del modelo de turbulencia y del tamaño de malla para tres tipos de infraestructuras (llano, terraplén y media ladera) fueron los coeficientes aerodinámicos de fuerza vertical y lateral. Utilizar tres infraestructuras en lugar de una para el análisis de sensibilidad, se hizo con el objetivo de que las opciones elegidas a nivel de configuración de los modelos queden avaladas por una mayor amplitud de resultados.

Los coeficientes aerodinámicos en función del tamaño de malla y de los modelos de turbulencia para cada infraestructura analizada se muestran en la Figura 56. Se puede apreciar de forma bastante clara un elevado grado de independencia entre los coeficientes aerodinámicos y el tamaño de malla a partir de 7 millones de elementos, siendo más fuerte esta tendencia al emplear el modelo  $k-\omega$  SST y el modelo de transición SST (Figura 56). Una vez determinado la configuración de malla óptima, se decidió el modelo de turbulencia a utilizar en base a los resultados obtenidos con los distintos modelos propuestos y un tamaño de malla en torno a los 7 millones de elementos.

Los resultados relativos a la fuerza lateral ( $C_f.Lateral$ ) exhiben diferencias muy pequeñas respecto a los obtenidos con los distintos modelos de turbulencia y los procedentes de los ensayos en túnel aerodinámico. Sin embargo, el coeficiente de fuerza vertical ( $C_f.Vertical$ ) presenta mayores diferencias entre ambas técnicas. Así, mientras que la simulación numérica proporciona valores negativos para el  $C_f.Vertical$ , los valores obtenidos para este coeficiente en los ensayos en túnel aerodinámico son positivos. Estas diferencias se pueden deber a que durante la simulación numérica no se consideraron ciertos elementos presentes en los ensayos experimentales, como pueden ser las ruedas del vehículo o el soporte del vehículo en forma de tubo, por incrementar fuertemente el coste computacional, no impidiendo su omisión lograr los objetivos establecidos en este estudio. En los modelos numéricos el flujo de aire circula por la parte inferior del vehículo a mayor velocidad al no encontrar ningún obstáculo en su recorrido, no siendo igual en las maquetas del túnel donde se topa con las ruedas y el soporte del vehículo. Esto deriva en que el efecto de succión sobre la superficie inferior del vehículo es menor en la experimentación que en la simulación numérica y, como

consecuencia, la fuerza vertical sea ascendente en el túnel y descendente en los modelos CFD.

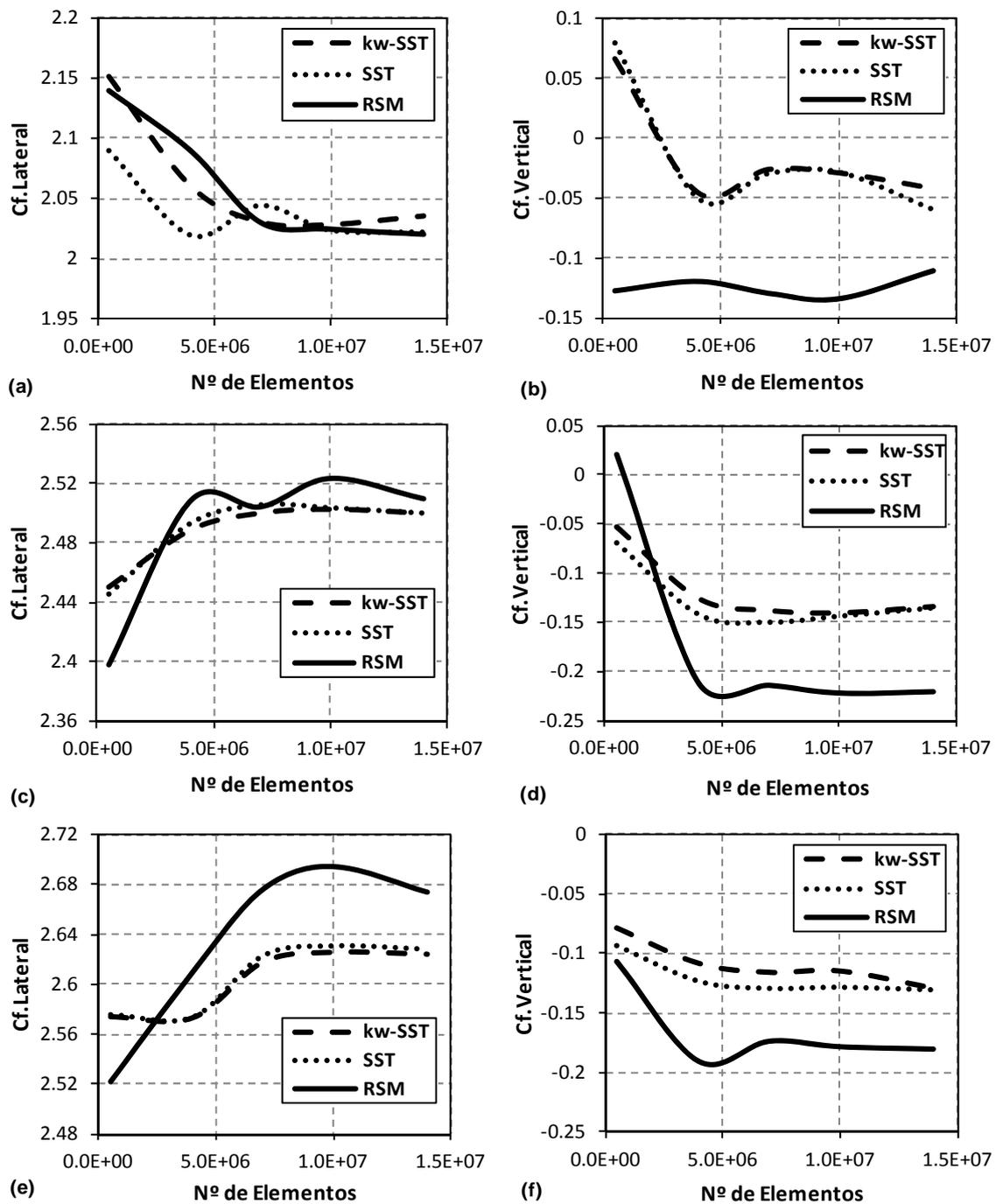


Figura 56. Análisis de sensibilidad del tamaño de malla en los coeficientes aerodinámicos estudiados para los modelos de turbulencia analizados en las siguientes infraestructuras: (a) y (b) Terreno llano; (c) y (d) Terraplén y (e) y (f) Media ladera.

La selección del modelo de turbulencia se sustentó en los valores obtenidos en el  $Cf.Vertical$  a través de ambas técnicas, ya que los errores relativos entre la simulación para cada modelo de turbulencia y el valor experimental para este coeficiente fueron

superiores a los mostrados por el  $C_f.Lateral$  (Figura 57). En base a lo anterior, el modelo de turbulencia que se ajusta mejor a los resultados experimentales es el  $k-\omega$  SST. A modo de resumen, y en base a los resultados mostrados en este apartado, la configuración de la malla para el resto de los modelos numéricos estudiados se mantuvo igual a la definida para en el tamaño de malla próximo a los 7 millones de elementos o volúmenes de control y la turbulencia fue modelada mediante el modelo  $k-\omega$  SST.

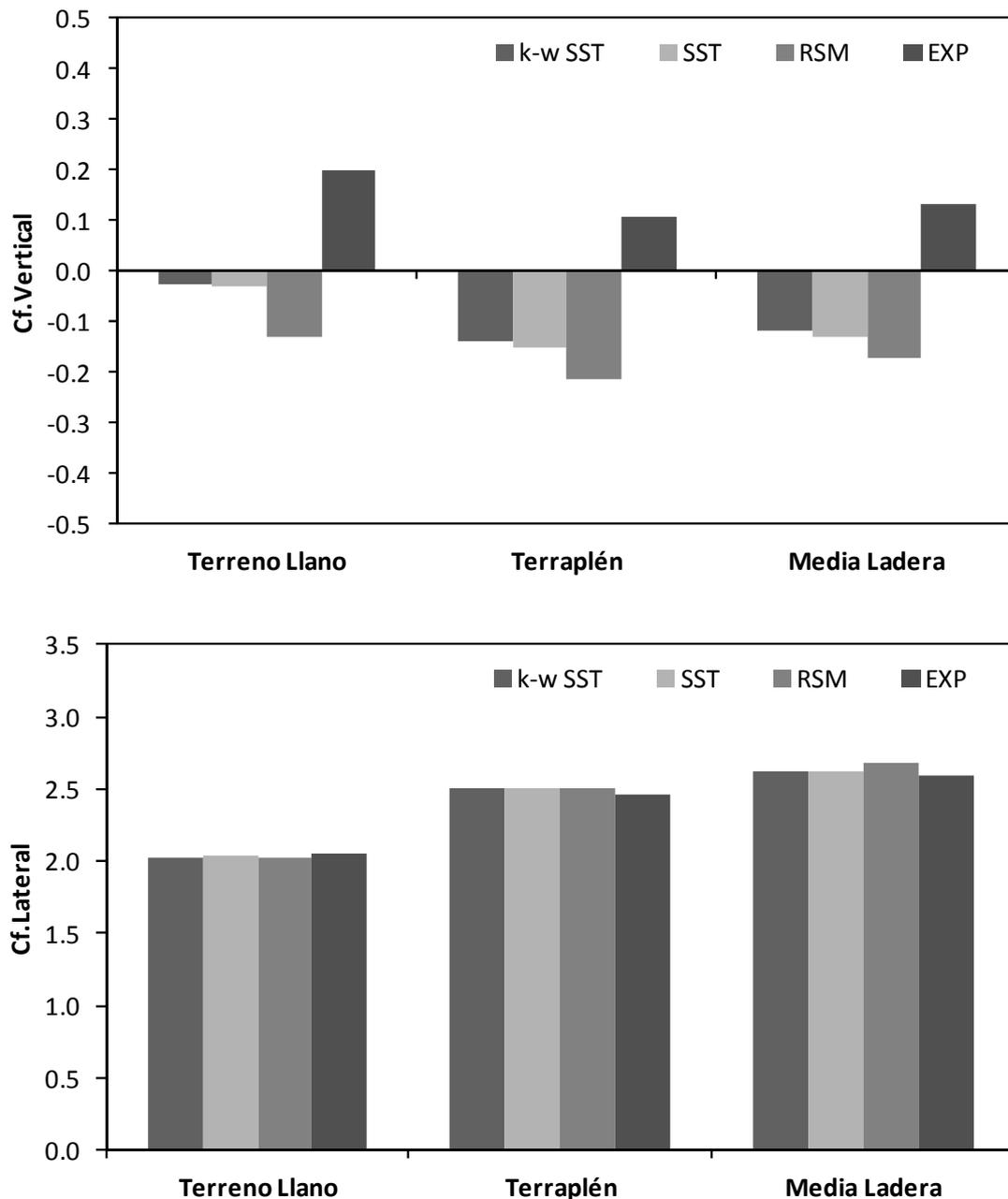


Figura 57. Comparativa entre los resultados obtenidos en el coeficiente de fuerza vertical (arriba) y lateral (debajo) de forma experimental y mediante la simulación numérica empleando distintos modelos de turbulencia.

#### 4.2.5. Configuración del diseño de experimentos

El diseño de experimentos DOE (Design of Experiments), viene implementado dentro del programa de simulación numérica ANSYS en forma de herramienta. Esta herramienta estadística permitió analizar la influencia de ciertos parámetros establecidos como variables de entrada sobre otros definidos como variables de respuesta o salida. Por otra parte, la principal razón que motivó el uso de esta herramienta radica en la posibilidad de optimizar las variables de entrada dentro de unos rangos definidos con el objetivo de maximizar o minimizar ciertas variables respuesta.

El primer paso del procedimiento de configuración del DOE (Myers et al., 2009; Del Coz Díaz et al., 2012) consiste en seleccionar un método que determine el número de casos a resolver, indicándose para cada caso los valores asignados a las variables de entrada. El método utilizado para tal fin es un diseño compuesto central, donde las variables de entrada codificadas  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , son representadas por cinco niveles. Los valores codificados de las variables varían entre -1 y +1. El número de puntos o combinación de valores asignados a los parámetros de entrada, según el diseño central compuesto, se determina como sigue:

- ✓ Un punto en el centro de los intervalos de valores especificado para cada variable.
- ✓  $2n$  puntos axiales localizados en las posiciones -1 y +1 de los ejes asociados a cada variable de entrada.
- ✓  $2^{(n-f)}$  puntos situados en las diagonales del espacio definido por las variables de entrada se localizan en determinadas posiciones entre los extremos (-1 y +1) y el punto central, donde el valor de  $f$  (fracción del diseño factorial para el caso de estudio) es cero.

Una vez determinadas las combinaciones de valores de las variables de entrada para cada punto o caso, se procede a calcular cada caso numéricamente, obteniendo entre los resultados los valores de las variables de salida o respuesta. A continuación se generan los modelos de superficie respuesta, que consisten en funciones matemáticas que se aproximan a los resultados obtenidos en los distintos casos simulados. Los modelos de

superficie respuesta permiten identificar los puntos críticos, siendo esta una de sus principales ventajas de cara a un proceso de optimización (máximos, mínimos, o de inflexión). Se utilizó un modelo de regresión polinomial de segundo orden como modelo de aproximación, cuya ecuación se puede expresar de forma genérica como sigue (Montgomery, 2001):

$$\widehat{Y} = \xi_0 + \sum_{i=1}^n \xi_i x_i + \sum_{i=1}^n \xi_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n \xi_{ij} x_i x_j \quad (120)$$

donde  $\xi_0$ ,  $\xi_i$ ,  $\xi_{ii}$ ,  $\xi_{ij}$  representan los coeficientes de regresión (término de offset, principal, cuadrático y efectos de interacción, respectivamente). Los coeficientes de regresión se determinan por el método ordinario de mínimos cuadrados mediante la siguiente expresión (Montgomery, 2001; Del Coz Díaz et al., 2011):

$$\vec{\xi}_{OLS} = \left( \begin{matrix} \vec{X}^T & \vec{X} \end{matrix} \right)^{-1} \vec{X}^T \vec{Y} \quad (121)$$

A continuación se exponen los valores asignados durante la configuración del DOE en torno a dos casos de infraestructuras.

#### 4.2.5.1. Terraplén

Este primer diseño de experimentos tiene como objetivo principal optimizar algunos parámetros constructivos del perfil de terreno tipo terraplén, con el fin de disminuir el efecto adverso del viento lateral durante la circulación de los vehículos. Por un lado se estudió la influencia del ángulo de inclinación de las pendientes del terraplén (Figura 58) sobre los coeficientes aerodinámicos seleccionados (fuerza lateral, fuerza vertical y momento de vuelco), y por otro lado se analizó la variación de los mismos coeficientes al acercarse o alejarse el vehículo de la pendiente del terraplén ubicada a barlovento (Figura 58). A modo de resumen, las variables de entrada seleccionadas y sus respectivos rangos de variación, junto a las variables salida, son los que se muestran en la Tabla 4.

Se desarrolló un segundo DOE con la finalidad de optimizar el diseño de un tipo de barrera cortaviento (Figura 59) para la mejora de la seguridad del tráfico. El modelo de barrera a optimizar está formado por una serie de tablas horizontales, separadas una cierta distancia vertical. La elección de las variables de entrada responde a parámetros

geométricos de la barrera, y son los siguientes: espesor de las tablas,  $t_T$ , y anchura de las tablas,  $w_T$ . Los rangos de variación establecidos para las variables de entrada (máximo, mínimo y actual) como parte de la metodología del DOE, son los que se indican en la Tabla 5.

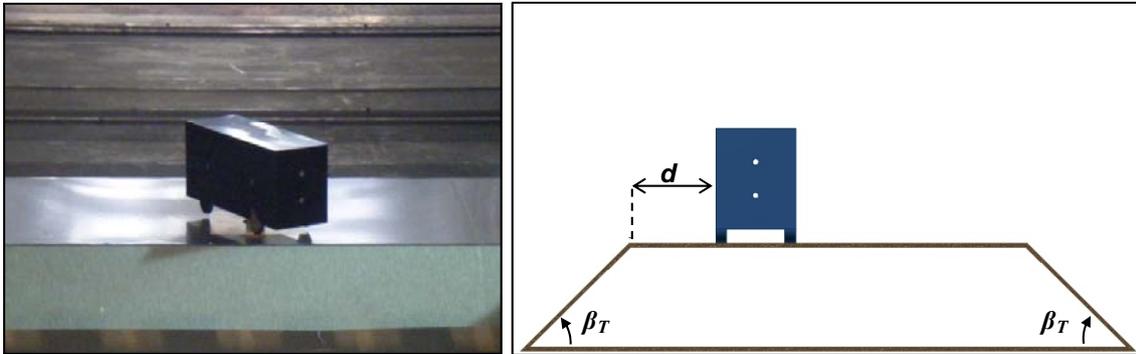


Figura 58. Parámetros geométricos relativos al terraplén, estudiados mediante un DOE (imagen derecha) y foto de la maqueta en el interior del túnel aerodinámico (imagen izquierda).

Tabla 4. Variables de entrada y sus respectivos rangos de variación especificados en el DOE.

Variables de Entrada	$\beta_T^a$ (°)	$d^b$ (mm)	
		Escala maqueta	Escala real
Máximo	60	82.9	2900
Mínimo	30	54.3	1900
Actual	45	68.6	2400
Variables de Salida	$Cf.Lateral$	$Cf.Vertical$	$Cm.Vuelco$

<sup>a</sup>Ángulo de la pendiente con el plano horizontal (Ver Figura 58).

<sup>b</sup>Distancia horizontal entre el vehículo y el inicio de la pendiente situada en su barlovento (Ver Figura 58).

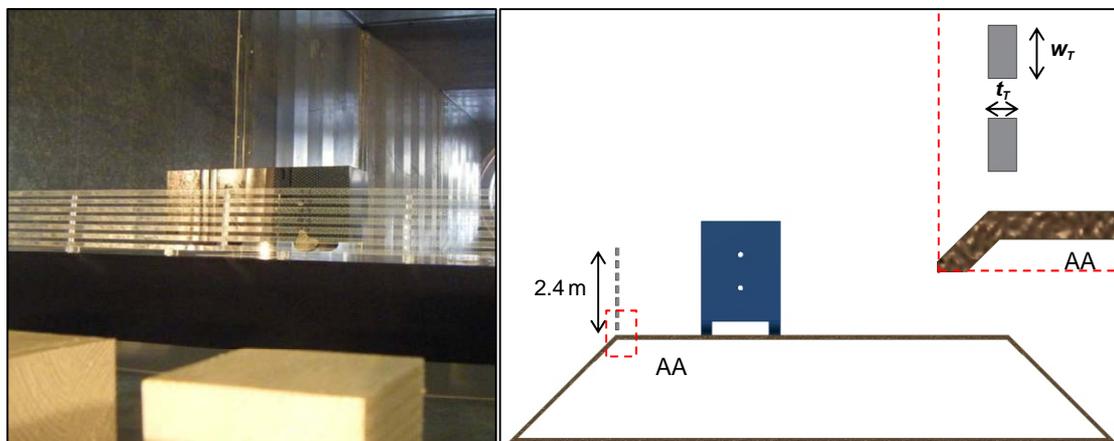


Figura 59. Foto dentro del túnel aerodinámico de la barrera compuesta por tablas (imagen izquierda) y parámetros analizados mediante un DOE (imagen derecha).

**Tabla 5. Variables de entrada representativas de la barrera cortaviento y sus respectivos rangos de variación especificados en el DOE.**

Variables de Entrada	$w_T^a$ (mm)		$t_T^b$ (mm)	
	Escala maqueta	Escala real	Escala maqueta	Escala real
Máximo	6.28	220	3	105
Mínimo	2.85	100	0.85	30
Actual	4.57	160	1.93	67.5

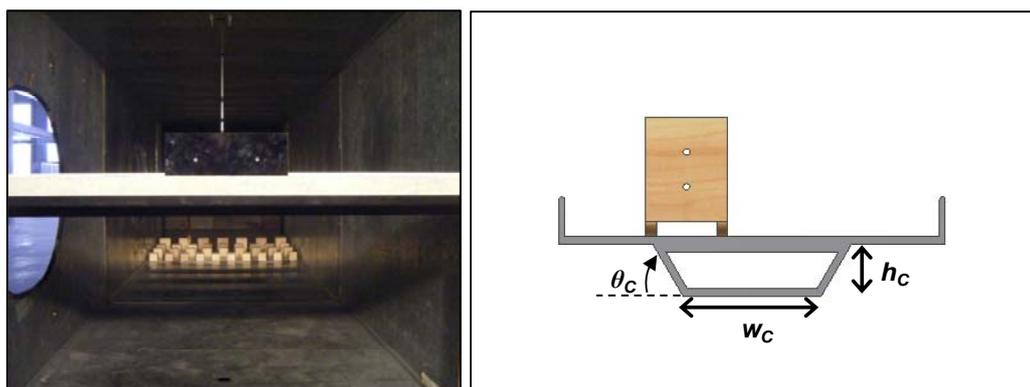
  

Variables de Salida	$Cf.Lateral$	$Cf.Vertical$	$Cm.Vuelco$
---------------------	--------------	---------------	-------------

<sup>a</sup>Anchura de las tablas de la barrera cortaviento (Figura 59).  
<sup>b</sup>Espesor de las tablas de la barrera cortaviento (Figura 59).

#### 4.2.5.2. Tablero tipo cajón

En el tablero tipo cajón se realizó nuevamente un DOE para, entre otros aspectos, optimizar las dimensiones geométricas del cajón con el objetivo de minimizar el coeficiente de momento de vuelco del vehículo. Por otro parte, se obtuvieron los modelos de regresión que relacionan los parámetros geométricos del tablero con los coeficientes aerodinámicos objeto de estudio en base a los resultados obtenidos para los casos propuestos por el DOE. Concretamente, las variables de entrada estudiadas son las siguientes: ángulo del cajón del tablero,  $\theta_c$ ; anchura del cajón,  $w_c$ , y altura del cajón,  $h_c$  (Figura 60).



**Figura 60. Foto dentro del túnel aerodinámico del tablero tipo cajón (imagen izquierda) y los parámetros representativos del cajón analizados mediante un DOE (imagen derecha).**

Los rangos de valores asignados a dichos parámetros geométricos del cajón quedan recogidos en la Tabla 6, junto a los coeficientes aerodinámicos (variables salida) empleados para analizar la estabilidad del vehículo en condiciones de viento lateral.

**Tabla 6. Variables de entrada y salida definidas en el DOE realizado sobre el tablero tipo cajón.**

<b>Variables de Entrada</b>	$hc^a$ (mm)		$\theta c^b$ (°)	$wc^c$ (mm)	
	Escala maqueta	Escala real		Escala maqueta	Escala real
Máximo	62.85	2200	60	71.42	2500
Mínimo	17.14	600	30	28.57	1000
Actual	40	1400	45	50	1750

<b>Variables de Salida</b>	$Cf.Lateral$	$Cf.Vertical$	$Cm.Vuelco$
----------------------------	--------------	---------------	-------------

<sup>a</sup> Altura del cajón del tablero (Figura 60).  
<sup>b</sup> Ángulo del cajón del tablero (Figura 60).  
<sup>c</sup> Ancho del cajón del tablero (Figura 60).





## **5.1. ACCIÓN DEL VIENTO LATERAL SOBRE UN VEHÍCULO CIRCULANDO POR DISTINTAS INFRAESTRUCTURAS**

En este apartado se analiza el efecto de las infraestructuras objeto de estudio y de algunos de sus parámetros geométricos sobre los coeficientes aerodinámicos en condiciones de viento lateral. Dicho análisis se apoya tanto en los resultados obtenidos para los coeficientes aerodinámicos como en los gráficos proporcionados por FLUENT donde se representan las características del flujo de aire en torno al vehículo e infraestructuras. Por otra parte, se optimiza la geometría de un tipo de infraestructura para cada grupo (perfiles del terreno y tableros de viaductos) en base a los modelos numéricos validados. Además, se desarrollan modelos de regresión lineal mediante el programa estadístico SPSS en base a los resultados obtenidos tras el proceso de optimización.

### **5.1.1. Perfiles del terreno**

A continuación, se analiza el efecto de tres configuraciones de perfiles del terreno (tablero formado por vigas, tablero con cajón y tablero tipo losa) y de algunos parámetros geométricos sobre los coeficientes aerodinámicos actuantes en el vehículo.

#### **5.1.1.1. Coeficientes aerodinámicos del vehículo y características del flujo de aire**

En los tres casos se consideró que el vehículo circula por el carril situado aguas arriba respecto a la dirección del viento debido a que su estabilidad se ve más comprometida en condiciones de viento lateral (Bettle et al., 2003; Cheli et al., 2011b). Considerando que en función de la dirección del viento un perfil del terreno podría resultar más negativo que otro para la estabilidad del vehículo, se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos para tres direcciones de viento.

Las relaciones obtenidas entre los coeficientes aerodinámicos y la dirección de viento mediante ensayos experimentales son las que se muestran en la Figura 61. Todos los coeficientes aerodinámicos analizados manifiestan una disminución en sus valores a medida que la dirección del viento se aleja de la perpendicular a la trayectoria del vehículo. En el caso del coeficiente de la fuerza vertical, al disminuir la dirección de viento, las sondas de presión situadas en la parte inferior del vehículo se ven cada vez más afectadas por el flujo de aire exterior, ya que la estela generada por las ruedas del

vehículo se aleja de su zona de influencia. Como consecuencia de ello, la fuerza vertical disminuirá debido al incremento de la succión producida por el aire sobre la superficie inferior del vehículo. En el caso de la fuerza lateral, la tendencia obtenida responde a lo esperado, ya que la superficie de oposición del vehículo proyectada en un plano normal a la dirección del viento se reduce a medida que la dirección de viento tiende a ser paralela a la trayectoria del tráfico.

Por otro lado, el coeficiente de fuerza vertical alcanza valores más altos en el caso del terreno llano si se compara con las otras dos infraestructuras. Esto puede ser debido a la inclinación que adquieren las líneas de corriente al circular por encima de los taludes, tanto en el terraplén como en la media ladera (Figura 62). De este modo, las líneas de corriente pasaran por encima del vehículo a mayor distancia que en el caso del terreno llano, disminuyendo el efecto de succión sobre la superficie superior y, como consecuencia, el coeficiente de fuerza vertical será menor. Esta hipótesis, utilizada para explicar el comportamiento del coeficiente vertical, se apoya en la premisa de que el flujo de aire por debajo del vehículo se comportará de modo similar en los tres perfiles de terreno. No obstante este mayor coeficiente de fuerza vertical en el terreno llano no compensa el mayor coeficiente de fuerza lateral obtenido en la media ladera y terraplén, como así queda reflejado en el coeficiente de momento de vuelco para estas infraestructuras (Figura 61).

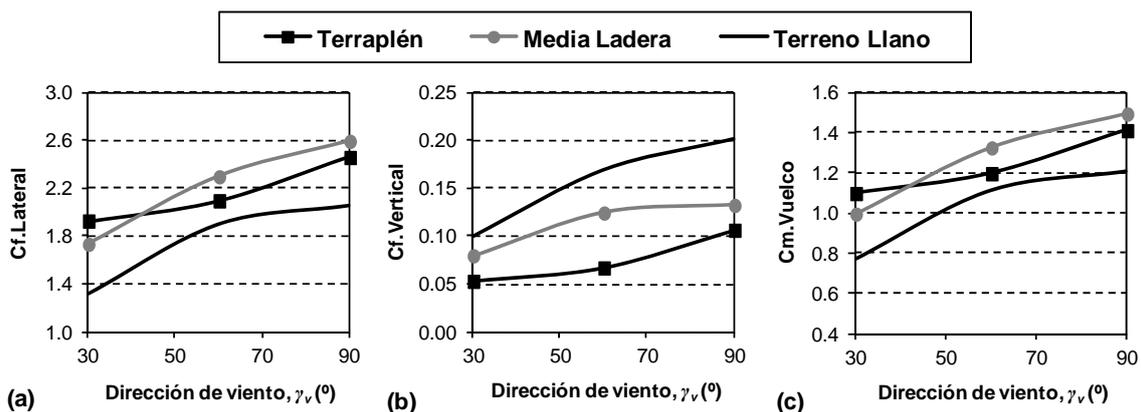


Figura 61. Coeficientes aerodinámicos obtenidos mediante ensayos experimentales en función de la dirección de viento para diferentes escenarios: (a) Fuerza lateral, (b) Fuerza de elevación, (c) Momento de vuelco.

El parámetro más representativo para evaluar la estabilidad de un vehículo frente a un posible accidente de vuelco en condiciones de viento lateral es el coeficiente de momento de vuelco (Schober et al., 2010). Considerando este aspecto, los resultados

indican que tanto el terraplén como la media ladera afectan más negativamente a la estabilidad de vehículo que el terreno llano. Cheli et al. (2011b) estudiaron únicamente el caso del terreno llano frente al terraplén, resultando también este último más crítico para la estabilidad del vehículo. Por consiguiente, se puede afirmar que algunas infraestructuras incrementan el riesgo de vuelco bajo las condiciones de viento lateral planteadas. Al comparar la media ladera con el terraplén, se observa que el coeficiente aerodinámico de momento de vuelco es ligeramente superior en la media ladera para las direcciones de viento iguales a  $60^\circ$  y  $90^\circ$ . En base a ello, para las direcciones de viento estudiadas se puede considerar que la media ladera afecta más negativamente a la estabilidad del vehículo que el resto de los perfiles del terreno estudiados.

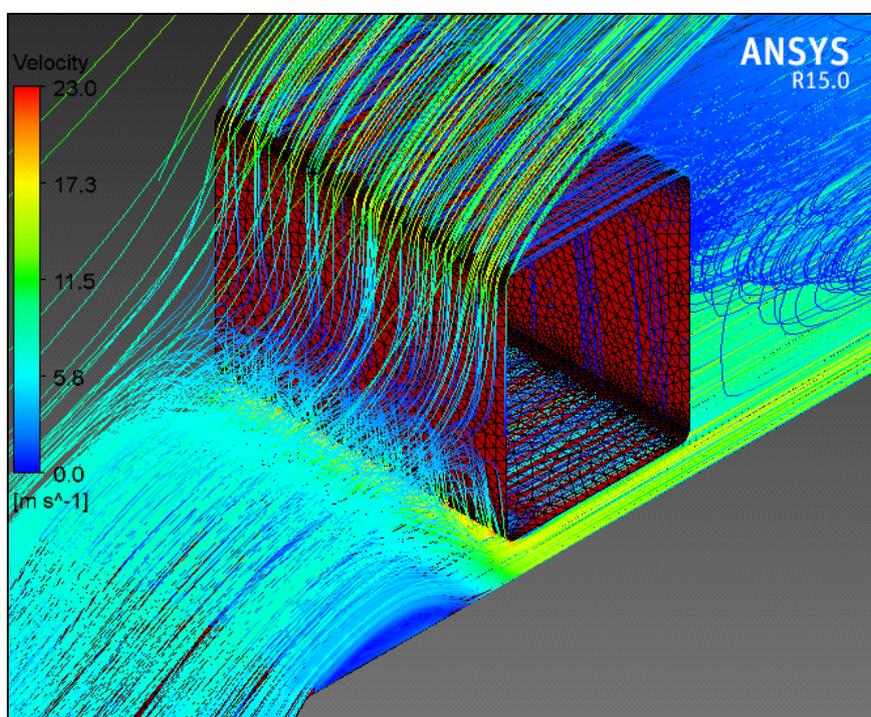


Figura 62. Representación de las líneas de corriente en torno al vehículo pesado localizado en el terraplén.

Una muestra de los resultados numéricos obtenidos en relación a la presión estática, en la región de aire en torno al vehículo cuando el flujo de aire es perpendicular a la trayectoria del mismo, se muestran en la Figura 63. Las diferencias de presión entre el lado a barlovento y sotavento más bajas se obtuvieron para el caso del terreno llano. En los casos de la media ladera y el terraplén, se obtuvieron unas diferencias de presión entre el barlovento y sotavento del vehículo que no indican claramente en cual de ambos casos la fuerza lateral resulta superior. Por otra parte, las diferencias de presión en las

regiones de aire situadas en la parte superior e inferior del vehículo son pequeñas y, consecuentemente, el coeficiente de fuerza vertical también lo debe ser.

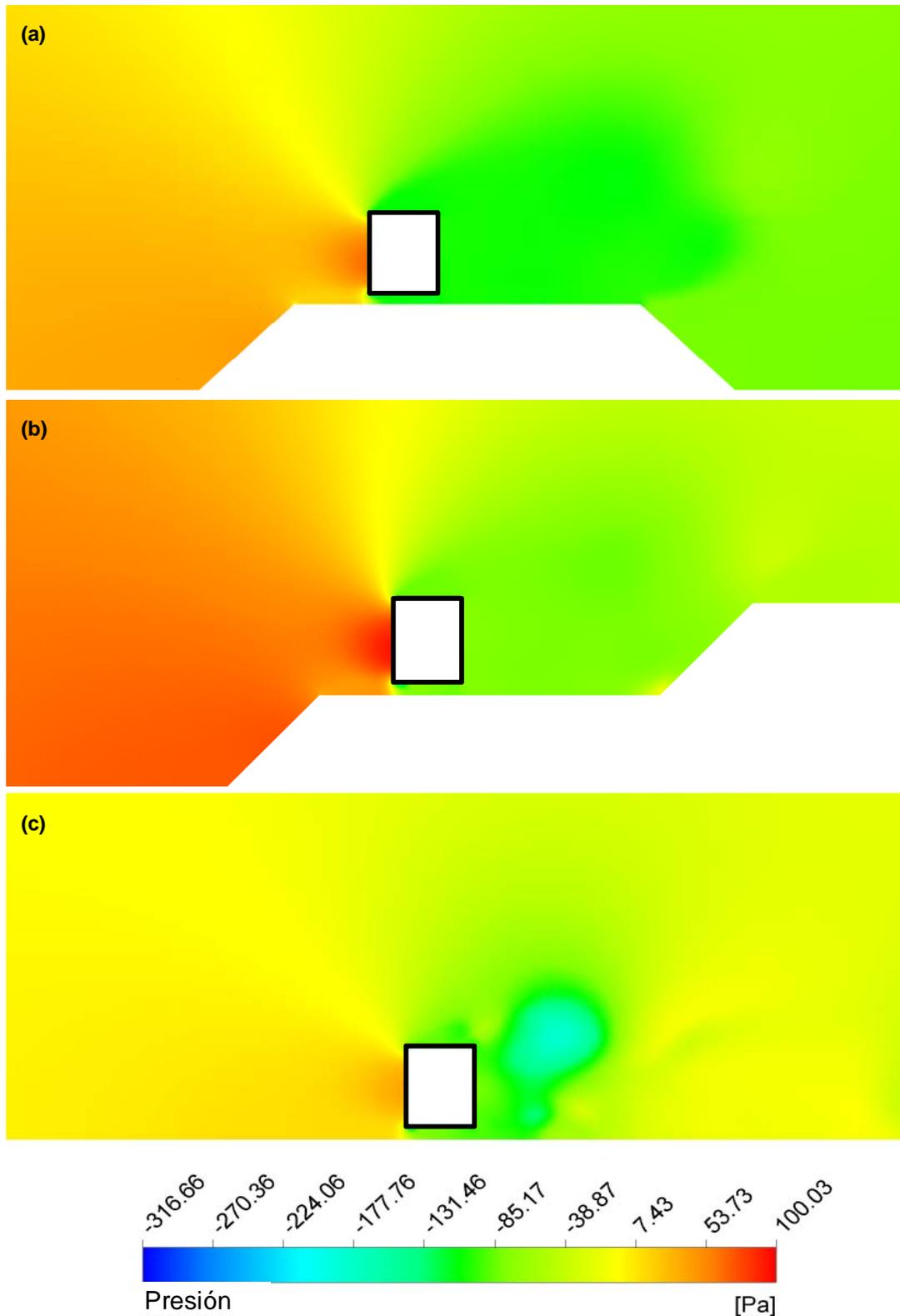


Figura 63. Contornos de presión calculados mediante modelado numérico para los siguientes escenarios: (a) Terraplén; (b) Media ladera; (c) Terreno llano.

### 5.1.1.2. Optimización y análisis de sensibilidad del perfil de terreno tipo terraplén

La optimización del terraplén se llevó a cabo mediante el cálculo de nueve casos del modelo numérico propuesto en base a la metodología del diseño de experimentos (DOE). En cada caso se empleó un tiempo total de CPU para su resolución igual a 82800 s, habiéndose satisfecho previamente los criterios de convergencia al alcanzar los residuales de los monitores seleccionados valores por debajo de  $10^{-5}$ . En base a los resultados obtenidos para el conjunto de casos calculados, se determinó la máxima variación de los coeficientes aerodinámicos actuando en el vehículo como una función de la posición del vehículo,  $d$ , y del ángulo de inclinación de la pendiente,  $\beta_T$ , del terraplén (Figura 64).

Considerando que el riesgo de tener un accidente de vuelco disminuye al decrecer el coeficiente de momento de vuelco actuando sobre el vehículo, los valores óptimos de los parámetros estudiados (inclinación de la pendiente y posición del vehículo) se determinaron con el objetivo de minimizar dicho coeficiente. En base a esta consideración, el mínimo valor del coeficiente de momento de vuelco obtenido fue de 1.33 para las siguientes condiciones: una distancia entre el vehículo y la pendiente a su barlovento  $d = 82.86$  mm (2900 mm en escala real) y un ángulo de inclinación de la pendiente  $\beta_T = 60^\circ$ . Mientras, las peores condiciones para la estabilidad del vehículo se registraron cuando el vehículo se situaba a una distancia respecto a la pendiente igual a  $d = 58.39$  mm (2043.65 mm en escala real) y un ángulo de inclinación de la pendiente  $\beta_T = 38.9^\circ$ .

Secundariamente, se llevó a cabo un análisis para conocer cuantitativamente la sensibilidad de los coeficientes aerodinámicos frente a variaciones de la posición del vehículo e inclinación de las pendientes del terraplén. Los resultados obtenidos a partir del análisis indican que todos los coeficientes aerodinámicos son ligeramente sensibles a variaciones de la posición del vehículo. Sin embargo, no todos los coeficientes son sensibles frente a cambios de inclinación de las pendientes del terraplén, como se observa en el coeficiente de la fuerza lateral en la Figura 65. Concretamente, el ángulo de inclinación de las pendientes influye significativamente en el coeficiente de fuerza vertical y, como consecuencia de ello, también en el coeficiente de momento de vuelco.

No obstante, el coeficiente de momento de vuelco presenta una mayor correlación con la posición del vehículo, mientras que en el caso del coeficiente de la fuerza vertical, la inclinación de los taludes del terraplén ejerce una mayor influencia.

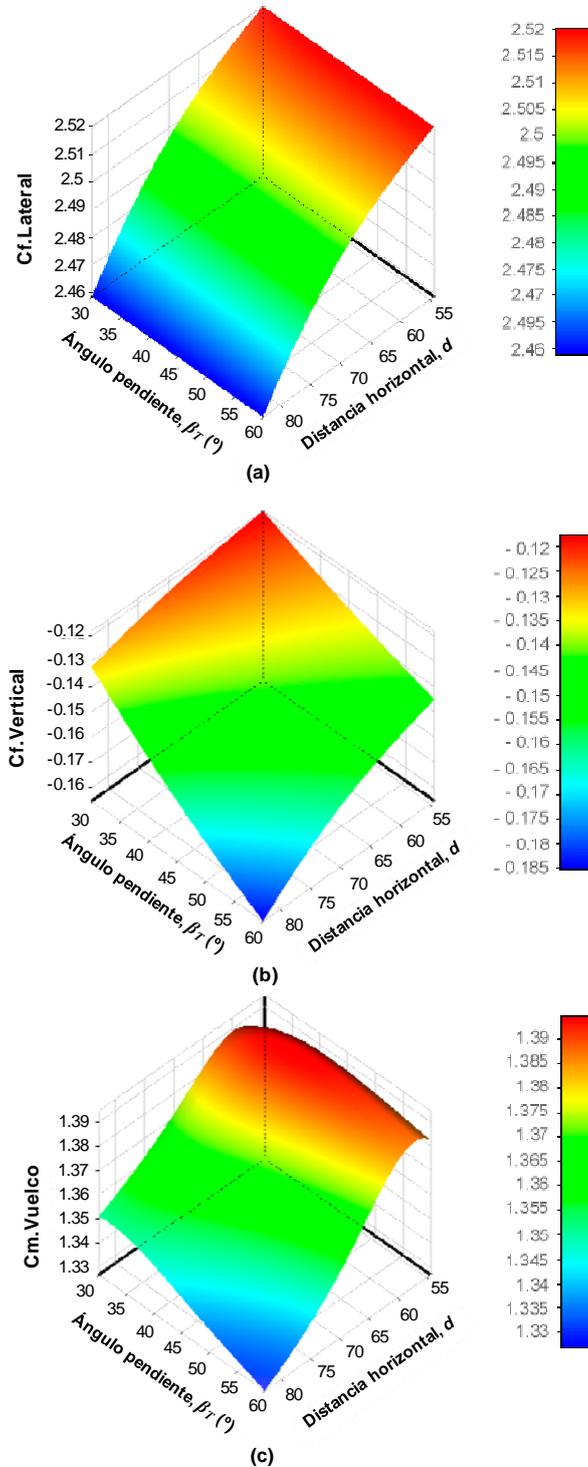


Figura 64. Superficies respuesta que relacionan la posición del vehículo en la carretera y el ángulo de inclinación de las pendientes con los coeficientes aerodinámicos para: (a) la fuerza lateral; (b) la fuerza de vertical; (c) el momento de vuelco.

El aumento de los coeficientes relativos al momento de vuelco y a la fuerza lateral al acercarse el vehículo a la pendiente a barlovento, se debe a que líneas de corriente proyectadas desde la pendiente del talud inciden sobre una mayor superficie lateral del vehículo. Por otro lado, un incremento tanto de la distancia del vehículo a la pendiente como del ángulo de inclinación de las mismas, causa que parte de las líneas de corriente pasen a una mayor distancia de la superficie superior del vehículo y, por consiguiente, que la fuerza vertical disminuya.

En base a lo expuesto, la variable que resulta más influyente en la estabilidad del vehículo con relación al accidente de vuelco es la posición del vehículo. Se puede afirmar que en condiciones de viento lateral, la estabilidad de un vehículo se verá más comprometida a medida que circula más próximo a la pendiente situada en su barlovento, intensificándose la falta de estabilidad si las pendientes del terraplén se reducen. Por consiguiente, la propia construcción del terraplén puede actuar como una medida de seguridad frente al riesgo de vuelco por viento lateral a través de la ampliación de los arcenes y/o ampliación de la inclinación de sus pendientes. En base a esta afirmación se propone un nuevo enfoque basado en el diseño de la infraestructura que permita mejorar la seguridad del tráfico combatiendo los efectos adversos del viento lateral.

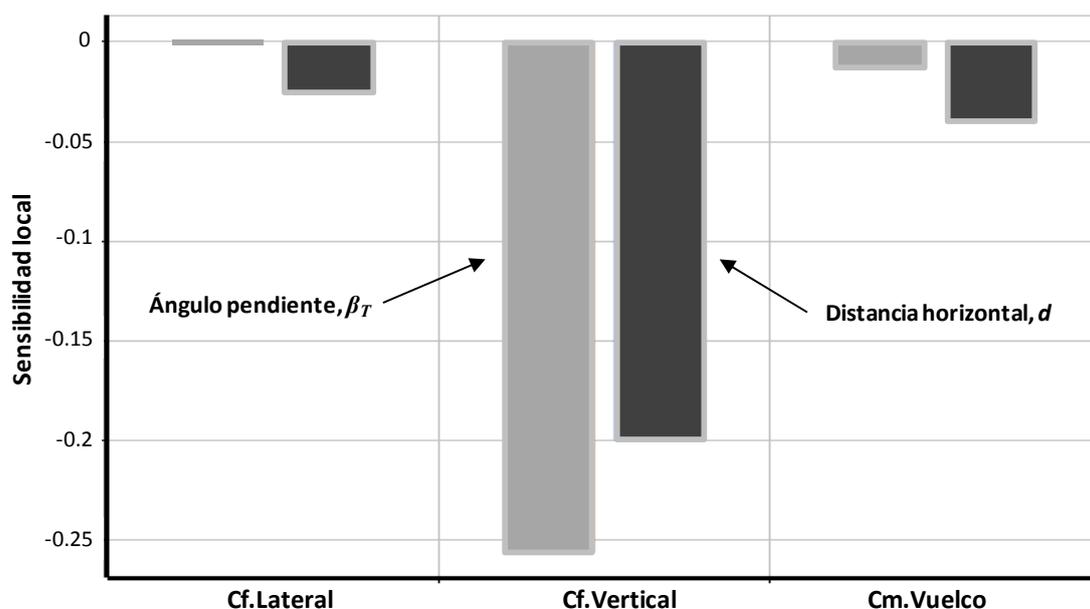


Figura 65. Sensibilidades locales entre las variables de salida y las variables de entrada.

### 5.1.1.3. Modelos de regresión obtenidos mediante ANSYS y SPSS

A los modelos de regresión obtenidos en base al DOE, y representados previamente en la Figura 64, la herramienta estadística de ANSYS les aplica un tipo de transformación a las variables estandarizadas para desarrollar el modelo de regresión Tabla 7. Como se puede observar en dicha tabla, el subíndice "*trns*" indica que a las variables de entrada y salida se les aplicó un tipo de transformación, concretamente la transformación *Yeo-Johnson*. Esta transformación, de tipo potencial, se aplica habitualmente sobre las variables que compondrán el modelo de regresión para que sus distribuciones de probabilidad se ajusten al tipo de distribución normal, supuesto exigido para el análisis de regresión. En este caso, dicha transformación se aplica sobre las variables estandarizadas que se designan con el subíndice "*scal*" (valores codificados entre -1 y 1), las cuales a su vez se calculan a partir de las variables de entrada y salida tal y como se indica en la Tabla 7.

Los modelos de regresión obtenidos asociados a las superficies respuesta se componen de términos independientes, términos lineales, términos cuadráticos y términos de interacción entre dos variables distintas, como se muestra en la Tabla 8. El p-valor asignado a cada término en los tres modelos no supera en ningún caso el límite de 0.05, lo que indica que los términos considerados por la herramienta estadística de ANSYS influyen significativamente en las respuestas de los modelos.

Uno de los factores que determina la aplicabilidad de un modelo matemático, aparte de su precisión, es su simplicidad. Un modelo será más simple cuantos menos términos lo compongan y más sencillas sean las operaciones implicadas. Sin embargo, el módulo de estadística de ANSYS aplica una serie de transformaciones por defecto sobre las variables que dotan al modelo de una complejidad innecesaria para el caso que nos ocupa. Esto motivó que se llevara a cabo un análisis de regresión con un mayor control sobre el procedimiento mediante el software estadístico SPSS.

Así, con el objetivo de dotar a los modelos de una mayor sencillez se eliminaron ciertos términos que no aportan una gran mejoría en la precisión del modelo. Además, no se aplicaron transformaciones sobre las variables, ni han sido estandarizadas. Este análisis

de regresión se llevó a cabo con los datos obtenidos tras resolver mediante simulación numérica los casos propuestos en el DOE. Fruto de este análisis de regresión se han obtenido los modelos respuesta presentados en la Tabla 9. En el caso del coeficiente de fuerza vertical, el término independiente no se tendrá en cuenta en la elaboración del modelo matemático por no tener una influencia significativa en la respuesta.

Tabla 7. Operaciones realizadas sobre las variables consideradas en los modelos.

Variables respuesta	Estandarización de las variables	Transformación de las variables
$Cf_{Lateral}$	$\beta_{T_{scal}} = 0.066\beta_T - 3$ $d_{scal} = 0.07d - 4.8$ $Cf_{Lateral} = Cf_{scal}$	$\beta_{T_{trns}} = [(\beta_{T_{scal}} + 1)^{0.9} - 1]/0.9$ para $\beta_{T_{scal}} \geq 0$ $\beta_{T_{trns}} = -[(-\beta_{T_{scal}} + 1)^{(2-0.9)} - 1]/(2-0.9)$ para $\beta_{T_{scal}} < 0$ $d_{trns} = [(d_{scal} + 1)^{1.867} - 1]/1.867$ para $d_{scal} \geq 0$ $d_{trns} = -[(-d_{scal} + 1)^{(2-1.867)} - 1]/(2-1.867)$ para $d_{scal} < 0$ $Cf_{scal} = (Cf_{trns} \cdot 14.68)^{(1/1.468)} - 1$ para $Cf_{trns} \geq 0$ $Cf_{scal} = 1 - (1 - (2 - 1.46) \cdot Cf_{trns})^{(1/(2-1.467))}$ para $Cf_{trns} < 0$
$Cf_{Vertical}$	$\beta_{T_{scal}} = 0.066\beta_T - 3$ $d_{scal} = 0.07d - 4.8$ $Cf_{Vertical} = -Cf_{scal} / 10$	$\beta_{T_{trns}} = [(\beta_{T_{scal}} + 1)^{0.8} - 1]/0.8$ para $\beta_{T_{scal}} \geq 0$ $\beta_{T_{trns}} = -[(-\beta_{T_{scal}} + 1)^{(2-0.8)} - 1]/(2-0.8)$ para $\beta_{T_{scal}} < 0$ $d_{trns} = [(d_{scal} + 1)^{1.831} - 1]/1.831$ para $d_{scal} \geq 0$ $d_{trns} = -[(-d_{scal} + 1)^{(2-1.831)} - 1]/(2-1.831)$ para $d_{scal} < 0$ $Cf_{scal} = (Cf_{trns} \cdot 2.71)^{(1/1.71)} - 1$ para $Cf_{trns} \geq 0$ $Cf_{scal} = 1 - (1 - (2 - 1.71) \cdot Cf_{trns})^{(1/(2-1.71))}$ para $Cf_{trns} < 0$
$Cm_{Vuelco}$	$\beta_{T_{scal}} = 0.066\beta_T - 3$ $d_{scal} = 0.07d - 4.8$ $Cm_{Vuelco} = -Cm_{scal}$	$\beta_{T_{trns}} = [(\beta_{T_{scal}} + 1)^{0.033} - 1]/0.033$ para $\beta_{T_{scal}} \geq 0$ $\beta_{T_{trns}} = -[(-\beta_{T_{scal}} + 1)^{(2-0.033)} - 1]/(2-0.033)$ para $\beta_{T_{scal}} < 0$ $d_{trns} = [(d_{scal} + 1)^{-0.482} - 1]/-0.482$ para $d_{scal} \geq 0$ $d_{trns} = -[(-d_{scal} + 1)^{(2-0.482)} - 1]/(2-0.482)$ para $d_{scal} < 0$ $Cm_{scal} = (Cm_{trns} \cdot 3)^{(1/2)} - 1$ para $Cm_{trns} \geq 0$ $Cm_{scal} = 1 - e^{-Cm_{trns}}$ para $Cm_{trns} < 0$

Los modelos mostrados en la Tabla 9 para los coeficientes aerodinámicos se estudiaron en mayor detalle para finalmente considerarlos válidos de cara a su aplicación. Así, los modelos estadísticos deben cumplir una serie de condiciones, conocidas como supuestos, para garantizar su validez desde una perspectiva estadística: normalidad de los residuos, media nula de los residuos, independencia de los residuos frente a la respuesta, homogeneidad de la varianza de los residuos, independencia de los residuos entre sí e independencia entre las variables predictivas (Tabla 10). Como se puede observar, los supuestos son satisfechos para todos los modelos, y únicamente el modelo para el coeficiente de fuerza vertical supera ligeramente el límite establecido en relación a la colinealidad de las variables de entrada. No obstante, el valor límite de 15 marca el punto a partir del cual pueden existir problemas de colinealidad, siendo a partir de 30 cuando existirán con total seguridad (Tabla 10).

**Tabla 8. Modelos de regresión lineal obtenidos mediante ANSYS e información relativa a la calidad de los modelos.**

Variable respuesta	Término	Coefficiente	p-valor	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
$C_{f_{trns\_Lateral}}$	Independiente	3.602	0	84.66%
	$d_{trns}$	-0.051	2.749E-4	
$C_{f_{trns\_Vertical}}$	Independiente	2.086	4.764E-9	96.50%
	$\beta_{T\ trns}$	0.339	1.028E-4	
	$d_{trns}$	0.258	2.308E-4	
	$\beta_{T\ trns} \cdot d_{trns}$	0.128	1.212E-2	
$C_{m_{trns\_Vuelco}}$	Independiente	2.308	2.054E-8	98.14%
	$\beta_{T\ trns}$	-0.029	8.257E-3	
	$d_{trns}$	-0.091	7.832E-4	
	$\beta_{T\ trns}^2$	-0.015	4.377E-2	
	$d_{trns}^2$	-0.037	3.335E-3	
	$\beta_{T\ trns} \cdot d_{trns}$	-0.013	1.021E-2	

**Tabla 9. Modelos de regresión lineal obtenidos mediante SPSS e información relativa a la calidad de los modelos.**

Variable respuesta	Término	Coefficiente	p-valor	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
$Cf_{Lateral}$	Independiente	2.640	0	81.3%
	$d$	-0.002	0.001	
$Cf_{Vertical}$	Independiente	-0.019	0	89.8%
	$\beta_r$	-0.001	0	
	$d$	-0.001	0.003	
$Cm_{Vuelco}$	Independiente	1.464	0	78.7%
	$d$	-0.001	0.001	

**Tabla 10. Comprobación de los supuestos de los modelos de regresión.**

Supuestos	Tipo de comprobación	Criterio	Valor	Cumple
Normalidad de los residuos	Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)	Sig>0.05	$Cf_{Lateral}$ : Sig=0.085 $Cf_{Vertical}$ : Sig=0.23 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=0.898	SI
Media nula de los residuos	Test de hipótesis $H_0: \mu_{RES}=0$	Sig>0.05	$Cf_{Lateral}$ : Sig=1 $Cf_{Vertical}$ : Sig=1 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=1	SI
Independencia de los residuos frente a la respuesta	Regresión lineal residuos vs. respuesta	Sig <sub>ajuste</sub> >0.05	$Cf_{Lateral}$ : Sig=0.28 $Cf_{Vertical}$ : Sig=0.472 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=0.246	SI
Homogeneidad de la varianza de los residuos (homocedasticidad)	Regresión lineal residuos vs. entrada	Sig <sub>ajuste</sub> >0,05	$Cf_{Lateral}$ : Sig=1 $Cf_{Vertical}$ : Sig=1 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=1	SI
Independencia de los residuos entre ellos	Contraste Durbin-Watson	1.5<DW<2.5	$Cf_{Lateral}$ : DW=1.829 $Cf_{Vertical}$ : DW=2.229 $Cm_{Vuelco}$ : DW=1.998	SI
Independencia entre las variables predictoras	Análisis de colinealidad	Índice de condición <15	$Cf_{Lateral}$ : IC=11.843 $Cf_{Vertical}$ : IC=15.306 $Cm_{Vuelco}$ : IC=11.843	SI*

\* Se excede para el coeficiente de fuerza vertical el valor límite de 15.

### **5.1.2. Tableros de viaductos**

De modo similar al caso de los perfiles del terreno, se analiza el efecto de tres configuraciones de tableros de viaductos (tablero formado por vigas, tablero con cajón y tablero tipo losa) y de algunos parámetros geométricos sobre los coeficientes aerodinámicos actuantes en el vehículo.

#### **5.1.2.1. Coeficientes aerodinámicos del vehículo y características del flujo del aire**

Los valores obtenidos en los coeficientes aerodinámicos objeto de estudio para tres tipologías de tableros en condiciones de flujo de aire perpendicular a la trayectoria de los vehículos se muestran en la Figura 66. Se puede observar que los coeficientes no presentan grandes diferencias entre las distintas infraestructuras objeto de estudio (Figura 66). Esto se podría deber a que la región de aire perturbada por la parte inferior del tablero no se extiende lo suficiente para alcanzar la zona de interacción con el vehículo, ya que las diferencias estructurales de un tablero a otro se presentan en la parte inferior de los mismos.

Por otro lado, utilizar ambas técnicas para los tres tipos de tableros permite validar los ajustes efectuados durante el proceso de configuración de los modelos numéricos. La Figura 66 permite comprobar también que los datos obtenidos mediante simulación numérica presentan un buen ajuste con respecto a los obtenidos a través de la experimentación. Este hecho valida la configuración numérica definida para estos modelos de cara a ser utilizada en los casos propuesto por el DOE durante el estudio de otros parámetros de interés. Por otra parte, el coeficiente de momento de vuelco presenta mayores valores al ser calculado mediante simulación numérica, como indica la Figura 66, de tal modo que si se deseara determinar el límite de velocidad de viento a partir del cual la seguridad del tráfico se puede ver comprometida (accidente de vuelco), el enfoque numérico resultaría más conservador. Al igual que en los perfiles del terreno las mayores diferencias relativas entre los resultados experimentales y numéricos se presentan en el coeficiente de fuerza vertical. Esto puede ser debido a las aproximaciones llevadas a cabo en la zona inferior del vehículo durante el desarrollo de la simulación numérica.

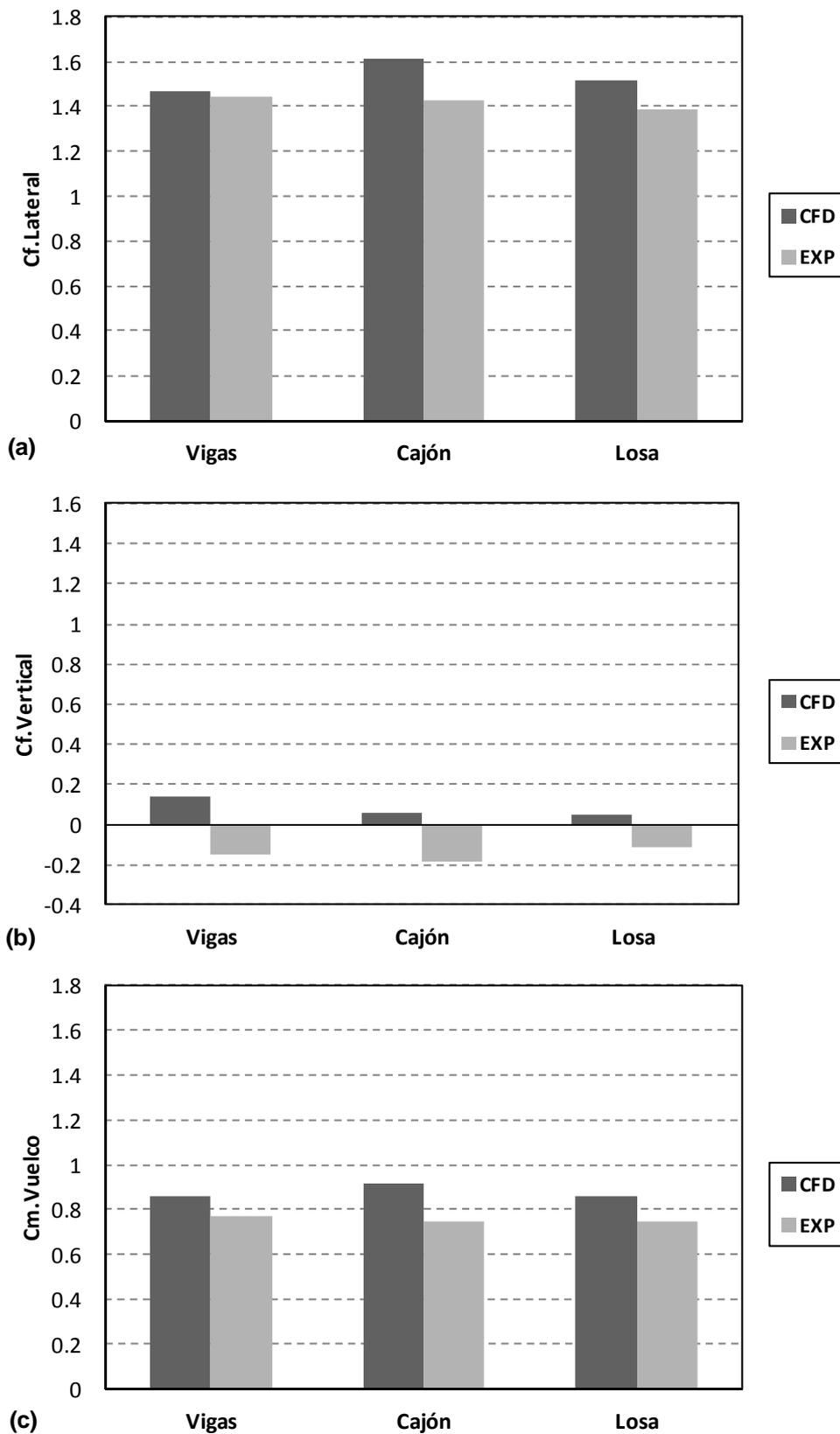


Figura 66. Coeficientes aerodinámicos del vehículo obtenidos en diferentes configuraciones de tableros para una dirección de viento normal a la dirección de circulación de los vehículos: (a) Fuerza lateral; (b) Fuerza vertical y (c) Momento de vuelco.

### 5.1.2.2. Optimización y análisis de sensibilidad del cajón de un tablero

Se realizó nuevamente un diseño de experimentos para determinar las dimensiones óptimas representativas del cajón de un tablero de viaducto. En base al procedimiento ya expuesto del DOE, se resolvieron un total de 15 modelos de CFD considerando unos criterios de convergencia idénticos a los establecidos para los perfiles del terreno. A partir de los valores calculados para las variables respuesta en cada caso de diseño (combinación de valores asignados a las variables de entrada) se determinaron las curvas de superficie respuesta, funciones matemáticas expresadas gráficamente en la Figura 67. Las Figura 67.a, 67.c y 67.e muestran la máxima variación de los coeficientes aerodinámicos analizados, obtenida al modificar la anchura del cajón del tablero,  $w_c$ , y el ángulo de inclinación de los paneles laterales del mismo,  $\theta_c$ , dentro de los valores límites especificados.

Mientras, en las Figura 67.b, 67.d y 67.f, el parámetro ángulo del cajón se reemplaza por la altura del mismo. Los valores óptimos para las dimensiones y ángulos del cajón del tablero se determinaron bajo el mismo criterio que en el otro tipo de infraestructuras: la minimización del coeficiente de momento de vuelco. A continuación, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad a partir del cual se comprueba que el único parámetro analizado que afectaba significativamente al coeficiente del momento de vuelco es el ángulo del cajón del tablero (ver Figura 68 y Figura 67.e). Concretamente, el valor negativo obtenido para sensibilidad local entre el ángulo de inclinación y el coeficiente de momento de vuelco, indica que un aumento en el ángulo de inclinación genera una disminución en el momento de vuelco y viceversa. Consecuentemente, en vista de la mejora en la seguridad del tráfico, el valor óptimo para el ángulo definido en el cajón es de  $60^\circ$ , siendo el valor del coeficiente de momento de vuelco en este caso igual a 0.86.

El coeficiente de momento de vuelco resulta ligeramente afectado por las variaciones del ángulo del cajón debido a la influencia ejercida por este parámetro sobre el coeficiente de fuerza vertical. No obstante, el bajo peso que tiene la fuerza vertical en el momento de vuelco en comparación con la fuerza lateral, hace que la sensibilidad calculada entre la altura del cajón y el coeficiente de fuerza vertical no se manifieste implícitamente en el momento de vuelco (Figura 68).

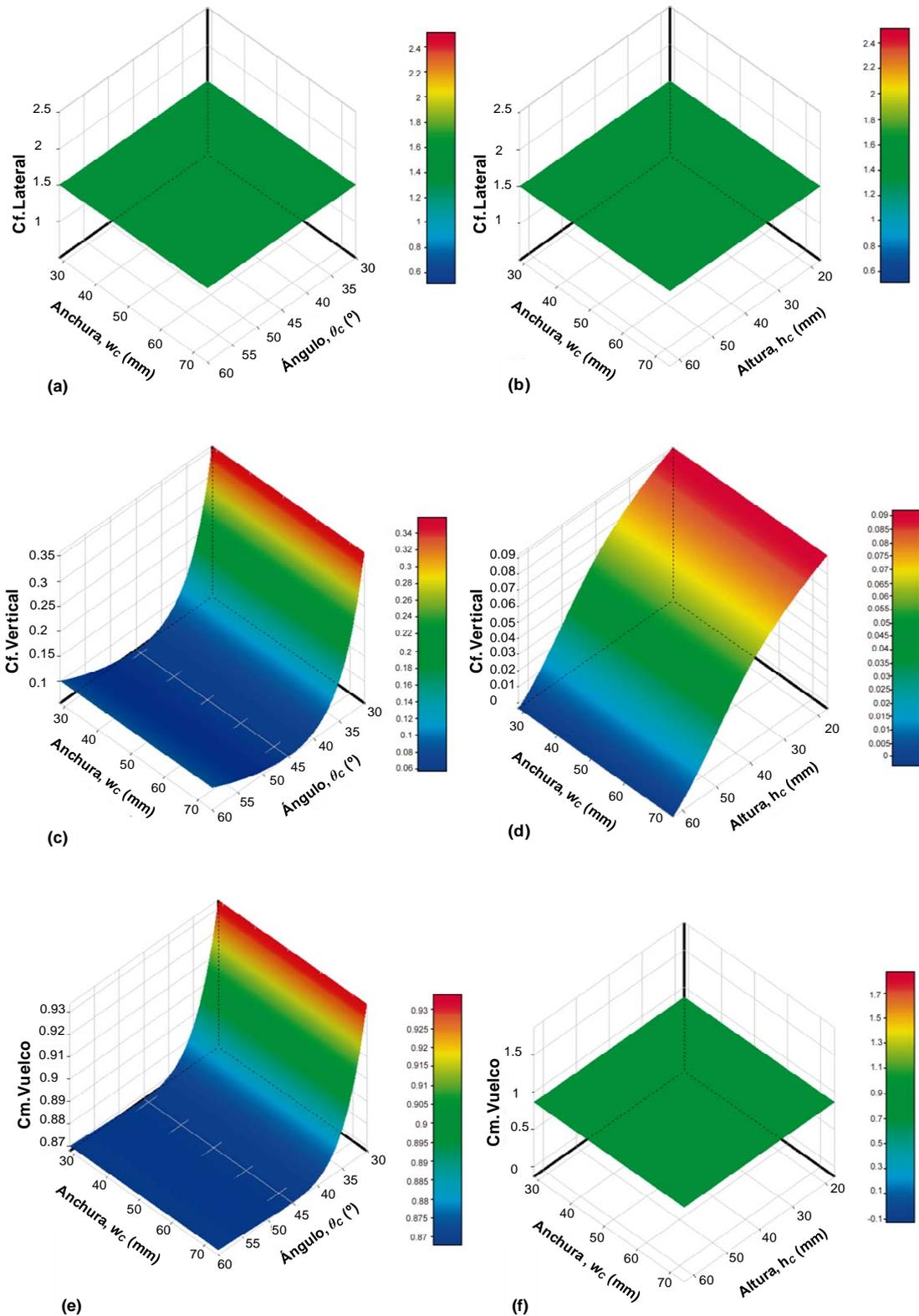


Figura 67. Modelos de superficie respuesta relacionando los parámetros geométricos del cajón de un tablero (ancho caja, ángulo de caja y altura de caja) con los siguientes coeficientes aerodinámicos: fuerza lateral (a) y (b), fuerza vertical (c) y (d); y momento de vuelco (e) y (f).

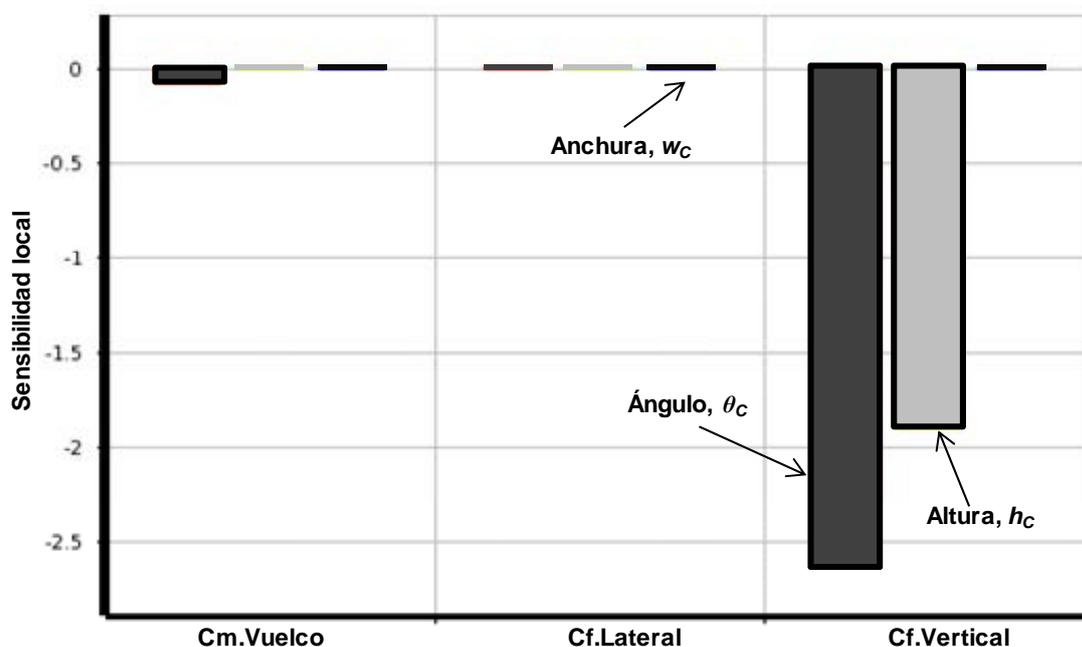


Figura 68. Valores de la sensibilidad local entre los coeficientes aerodinámicos actuando sobre el vehículo y los parámetros geométricos del cajón de un tablero.

### 5.1.2.3. Modelos de regresión obtenidos mediante ANSYS y SPSS

En este caso, ANSYS transforma y estandariza las variables consideradas en los modelos de regresión representados gráficamente en la Figura 67, tal y como se indica en la Tabla 11. Los modelos obtenidos tras dicha transformación y estandarización de las variables consideradas explican un porcentaje relativamente bajo de la varianza de la respuesta, tal como manifiestan los respectivos coeficientes de determinación  $R^2_{adj}$  (Tabla 12). Además, el término lineal  $H_{trns}$  en el modelo del coeficiente de fuerza vertical, presenta un p-valor que habitualmente invitaría a descartar este término en la expresión del modelo de regresión. Teniendo en cuenta los aspectos indicados, la calidad de los modelos no resulta suficiente como para ser utilizados en la práctica.

El débil ajuste obtenido entre los modelos representativos de los coeficientes asociados a la fuerza lateral y momento de vuelco y la nube de puntos generada mediante simulación numérica (Tabla 12) está en concordancia con la falta de correlación exhibida en la Figura 68.

Tabla 11. Operaciones realizadas sobre las variables consideradas en los modelos.

Variables respuesta	Estandarización de las variables	Transformación de las variables
$Cf_{Lateral}$	$\theta_{C_{scal}} = 0.112\theta_C - 5.045$ $h_{C_{scal}} = 0.073h_C - 2.943$ $w_{C_{scal}} = 0.073w_C - 3.784$ $Cf_{Lateral} = Cf_{scal}$	$\theta_{C_{trns}} = [(\theta_{C_{scal}} + 1)^2 - 1] / -2$ para $\theta_{C_{scal}} \geq 0$ $\theta_{C_{trns}} = -[(-\theta_{C_{scal}} + 1)^4 - 1] / 4$ para $\theta_{C_{scal}} < 0$ $h_{C_{trns}} = [(h_{C_{scal}} + 1)^{0.995} - 1] / 0.995$ para $h_{C_{scal}} \geq 0$ $h_{C_{trns}} = -[(-h_{C_{scal}} + 1)^{1.005} - 1] / 1.005$ para $h_{C_{scal}} < 0$ $w_{C_{trns}} = [(w_{C_{scal}} + 1)^{-1.922} - 1] / -1.192$ para $w_{C_{scal}} \geq 0$ $w_{C_{trns}} = -[(-w_{C_{scal}} + 1)^{3.922} - 1] / 3.922$ para $w_{C_{scal}} < 0$ $Cf_{scal} = (Cf_{trns} \cdot 0.441 + 1)^{(1/0.441)} - 1$ para $Cf_{trns} \geq 0$ $Cf_{scal} = 1 - (1 - (2 - 0.441) \cdot Cf_{trns})^{(1/(2-0.441))}$ para $Cf_{trns} < 0$
$Cf_{Vertical}$	$\theta_{C_{scal}} = 0.112\theta_C - 5.045$ $h_{C_{scal}} = 0.073h_C - 2.943$ $w_{C_{scal}} = 0.073w_C - 3.784$ $Cf_{Vertical} = Cf_{scal} / 100$	$\theta_{C_{trns}} = [(\theta_{C_{scal}} + 1)^{0.35} - 1] / 0.35$ para $\theta_{C_{scal}}$ $\theta_{trns} = -[(-\theta_{scal} + 1)^{1.649} - 1] / 1.649$ para $\theta_{C_{scal}}$ $h_{C_{trns}} = [(h_{C_{scal}} + 1)^2 - 1] / 2$ para $h_{C_{scal}} \geq 0$ $h_{C_{trns}} = -\ln(-h_{C_{scal}} + 1)$ para $h_{C_{scal}} < 0$ $w_{C_{trns}} = [(w_{C_{scal}} + 1)^{0.197} - 1] / 0.197$ para $w_{C_{scal}} \geq 0$ $w_{C_{trns}} = -[(-w_{C_{scal}} + 1)^{1.803} - 1] / 1.803$ para $w_{C_{scal}} < 0$ $Cf_{scal} = (Cf_{trns} \cdot 0.435 + 1)^{(1/0.435)} - 1$ para $Cf_{trns} \geq 0$ $Cf_{scal} = 1 - (1 - (2 - 0.435) \cdot Cf_{trns})^{(1/(1.565))}$ para $Cf_{trns} < 0$
$Cm_{Vuelco}$	$\theta_{C_{scal}} = 0.112\theta_C - 5.045$ $h_{C_{scal}} = 0.073h_C - 2.943$ $w_{C_{scal}} = 0.073w_C - 3.784$ $Cm_{Vuelco} = Cm_{scal} / 10$	$\theta_{C_{trns}} = [(\theta_{C_{scal}} + 1)^{-0.482} - 1] / -0.482$ para $\theta_{C_{scal}}$ $\theta_{C_{trns}} = -[(-\theta_{C_{scal}} + 1)^{-2.482} - 1] / -2.482$ para $\theta_{C_{scal}}$ $h_{C_{trns}} = -[(h_{C_{scal}} + 1)^{0.403} - 1] / 0.403$ para $h_{C_{scal}} \geq 0$ $h_{C_{trns}} = -[(-h_{C_{scal}} + 1)^{1.597} - 1] / 1.597$ para $h_{C_{scal}} < 0$ $w_{C_{trns}} = [(w_{C_{scal}} + 1)^{1.192} - 1] / 1.192$ para $w_{C_{scal}} \geq 0$ $w_{C_{trns}} = -[(-w_{C_{scal}} + 1)^{0.808} - 1] / 0.808$ para $w_{C_{scal}} < 0$ $Cm_{scal} = (-0.239 \cdot Cm_{trns} + 1)^{(1/-0.239)} - 1$ para $Cm_{trns} \geq 0$ $Cm_{scal} = 1 - (1 - (2 + 0.239) \cdot Cm_{trns})^{(1/2.239)}$ para $Cm_{trns} < 0$

**Tabla 12. Modelos de regresión lineal obtenidos mediante ANSYS y parámetros representativos de la calidad de los modelos y de la influencia de los distintos términos.**

Variable Respuesta	Término	Coefficiente	p-valor	$R^2_{adj}$
$C_{f_{trns\_Lateral}}$	Independiente	1.136	0	60.67%
	$\theta_{C_{trns}} \cdot h_{C_{trns}}$	-3.987E-3	3.78E-4	
$C_{f_{trns\_Vertical}}$	Independiente	2.948	2.087E-2	72.21%
	$h_{C_{trns}}$	-1.078	7.134E-2	
	$\theta_{C_{trns}}^2$	0.942	4.527E-2	
$C_{m_{trns\_Vuelco}}$	Independiente	1.751	0	54.31%
	$\theta_{C_{trns}}^2$	2.093E-3	1.222E-3	

De igual modo que en el caso del terraplén, se realizó un análisis de regresión con los datos obtenidos en la simulación numérica utilizando para ello el software estadístico SPSS. De los coeficientes aerodinámicos calculados se seleccionó para su modelado el coeficiente de fuerza vertical, ya que es el único que se correlaciona significativamente con las variables de entrada consideradas. De nuevo, antes de plantear un modelo de regresión, se determinó la correlación entre el coeficiente de fuerza vertical y los términos lineales, cuadráticos y cruzados. Únicamente dos términos mostraron una correlación significativa con la variable respuesta: el término lineal  $\theta_c$  y el término cruzado  $\theta_c \cdot h_c$ . Por lo tanto, se llevaron a cabo dos análisis de regresión: en el primero se consideró solo el término lineal y en el segundo se añadió el término cruzado. Ambos modelos fueron descartados debido al bajo valor obtenido para el coeficiente de determinación,  $R^2_{adj}$ , que concretamente fue de 0.249 para el primer análisis y de 0.315 para el segundo análisis.

---

## **5.2. BARRERAS CORTAVIENTO COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN FRENTE AL VIENTO LATERAL**

En este apartado se analiza la capacidad de protección de distintas clases de barreras cortaviento en los dos tipos de infraestructuras estudiadas previamente con el objetivo de mejorar la seguridad de los usuarios en las vías de transporte bajo la acción del viento lateral. Por otro lado, también se lleva a cabo una optimización de uno de los modelos de barreras objeto de estudio aplicando la metodología del DOE.

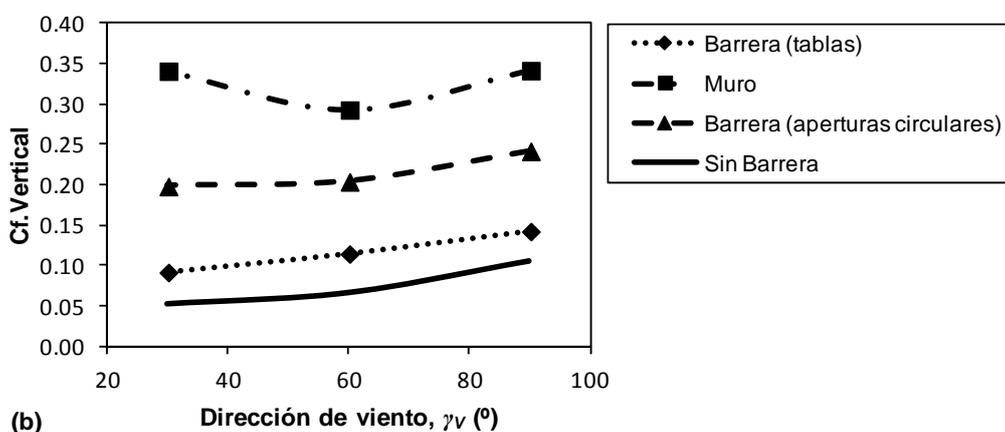
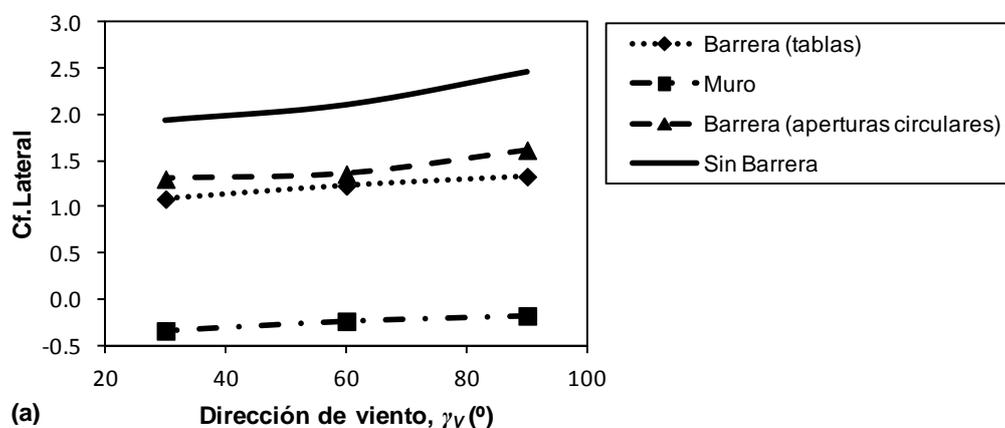
### **5.2.1. Capacidad de protección de distintos modelos de barreras cortaviento**

La capacidad de protección de los distintos modelos de barreras cortaviento instaladas sobre el terraplén se analiza en base a las relaciones obtenidas entre los coeficientes aerodinámicos y la dirección de viento en los ensayos experimentales. Esta información permite identificar las prestaciones aerodinámicas de cada modelo, y en base a ello, decidir sobre la idoneidad de un modelo concreto para una aplicación determinada. Cabe recordar que los modelos de barreras comparadas son: el muro, barrera compuesta por tablas y barrera provista de agujeros. Estos dos últimos casos presentan una misma permeabilidad del 41%.

Como se podía esperar, tanto el coeficiente de fuerza lateral como el de momento de vuelco en todos los modelos de barreras muestran un aumento en su valor cuanto más se aproxima la dirección de viento a la normal a la trayectoria del vehículo (Figura 69). Como ya ha sido expuesto previamente, esto es debido al incremento de la superficie lateral del vehículo proyectada sobre un plano normal al flujo de aire. Como se puede apreciar en la Figura 69, la tendencia seguida por los coeficientes asociados a la fuerza lateral y al momento de vuelco en función de la dirección de viento, resulta prácticamente idéntica. Esto es consecuencia de la elevada diferencia de magnitud entre la fuerza lateral y vertical soportada por el vehículo. El efecto del hueco inferior de las barreras se puede observar al comparar los resultados obtenidos para el modelo del muro frente al resto de modelos. Al cerrar el hueco inferior como sucede en el muro, se evita que parte de las líneas de corriente provenientes del talud a barlovento penetren directamente hacia la región inferior del vehículo, y, como consecuencia, el efecto de succión del aire sobre la superficie inferior del vehículo disminuirá. Esto dará lugar en

primera instancia a un incremento de la fuerza vertical, como queda reflejado en la Figura 69.b, y por consiguiente, contribuirá en mayor medida a la parte del momento de vuelco derivada de la acción de esta.

Otro aspecto relevante que se puede apreciar en la relación entre el coeficiente de fuerza vertical obtenido en el muro y la dirección de viento es la falta de una tendencia clara entre ambos parámetros. Esto indica que la dirección de viento afecta principalmente al flujo de aire circulando por debajo del vehículo, ya que una de las diferencias estructurales que afectarían a la fuerza vertical entre este modelo y el resto es el hueco inferior para el aire, que este modelo no presenta y el resto sí. En el caso de la barrera formada por tablas y en la barrera con apertura circulares, el flujo de aire cercano al suelo encuentra aperturas a través de las que puede pasar, alcanzando así la región inferior del vehículo. Como consecuencia de ello, las sondas de presión quedan menos protegidas por la sombra de las ruedas al aumentar la dirección de viento. Finalmente, el incremento del coeficiente de la fuerza lateral con la dirección de viento responde a lo expuesto en los otros ensayos desarrollados.



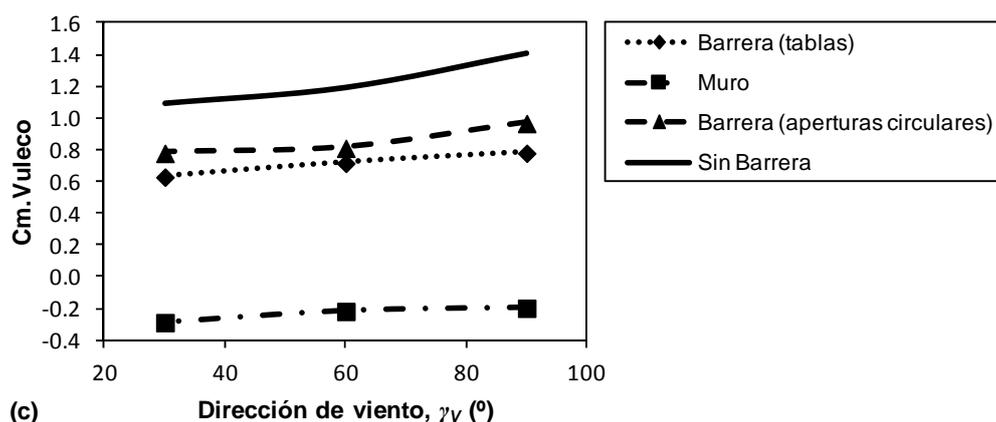


Figura 69. Coeficientes aerodinámicos experimentales actuando sobre el vehículo en función de la dirección de viento para diferentes tipos de barreras: (a) Fuerza lateral; (b) Fuerza vertical y (c) Momento de vuelco.

La eficacia de los distintos modelos de barreras cortaviento objeto de estudio, respecto a su cometido de reducir el riesgo de vuelco, se evaluó en base a los valores obtenidos para el coeficiente aerodinámico relativo al momento de vuelco. La razón es que cualquier tipo de barrera cumplirá con su cometido de forma más eficaz, cuanto mayor sea la reducción de momento de vuelco actuando sobre el vehículo debido al viento lateral. Atendiendo a este criterio, y considerando las direcciones de viento impuestas en los ensayos experimentales, se puede establecer un orden de elección entre las barreras analizadas. Dicho orden, acorde a los resultados mostrados en la Figura 70, quedaría del siguiente modo: Muro, Barrera formada por tablas y Barrera con aperturas circulares.

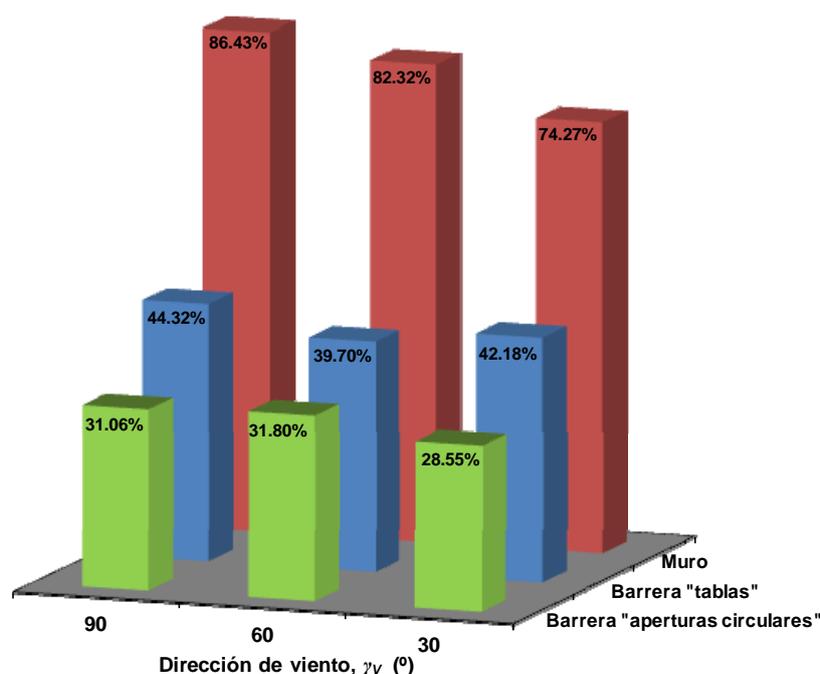


Figura 70. Gráfico de barras donde se representa la reducción del momento de vuelco con respecto al caso sin barrera para tres direcciones relativas de viento, mediante ensayos experimentales.

### **5.2.2. Efecto de la permeabilidad**

El análisis del efecto de la permeabilidad se llevó a cabo en torno al modelo de barrera con aperturas circulares en base a una serie de ensayos experimentales. Para tal cometido se emplearon tres modelos adicionales de barreras del mismo tipo con distintos diámetros para los agujeros circulares. Por lo tanto, junto a la barrera ya estudiada, cuyos agujeros tienen un diámetro igual a 0.4 m, se estudiaron tres barreras más con los siguientes valores de diámetro de los agujeros: 0.2 m, 0.3 m y 0.5 m. Los valores de permeabilidad de la barrera calculados para los diámetros especificados son los siguientes: 10.3%, 23.3%, 41.4% y 48%. Estas barreras se instalaron sobre el perfil del terreno tipo terraplén para aprovechar los resultados obtenidos en el apartado anterior para el mismo tipo de barrera. De igual modo que en la barrera formada por tablas, se dejó un hueco equivalente a 200 mm a escala real, en la parte inferior de las mismas.

Los valores experimentales obtenidos para los coeficientes aerodinámicos asociados a la fuerza lateral y momento de vuelco actuando en el vehículo muestran un aumento al incrementar la permeabilidad de la barrera (Figura 71). El coeficiente de momento de vuelco menor no se obtiene para el menor valor de permeabilidad de la barrera sino para un valor de permeabilidad comprendido entre un 10% y un 23%. Por consiguiente, una barrera permeable con un valor pequeño de permeabilidad resulta una mejor opción de cara a disminuir el riesgo de vuelco que un muro de nula permeabilidad. Un comportamiento distinto se observa en el coeficiente de fuerza vertical (Figura 71), cuya variación en función de la permeabilidad resulta mínima, con una ligera tendencia a disminuir a medida que aumenta la permeabilidad. Este incremento del coeficiente de fuerza vertical se debe al incremento de la velocidad del flujo de aire en la región próxima a la superficie superior del vehículo y al descenso del flujo de aire por debajo del vehículo, ya que al disminuir la permeabilidad, un menor flujo de aire atravesará la barrera y, como consecuencia de ello, se producirá un incremento del flujo de aire circulando por encima del vehículo. De aquí que el gradiente de presión entre la parte inferior del vehículo y la superior aumente para una menor permeabilidad, generándose un ligero incremento de la fuerza vertical.

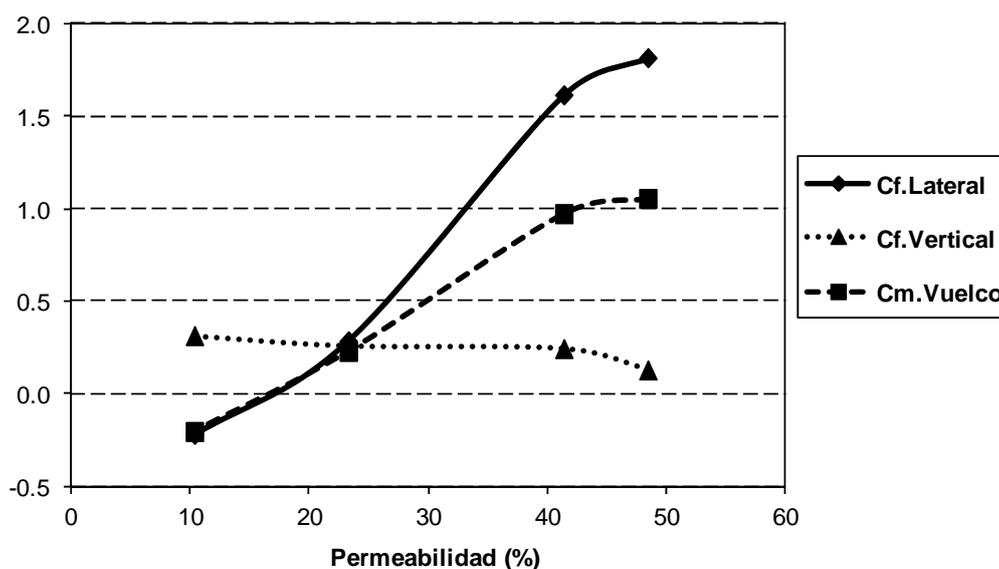


Figura 71. Representación de los coeficientes aerodinámicos analizados en función de la permeabilidad (%) de las barreras con aperturas circulares.

### 5.2.3. Optimización de un modelo de barrera

Previamente a la optimización mediante la metodología del DOE de algunos parámetros representativos de la barrera formada por tablas, se validó nuevamente la configuración numérica empleada. El buen ajuste entre los resultados obtenidos de forma numérica y experimental (Figura 72), corrobora la validez de la configuración adoptada durante la simulación numérica. Por lo tanto, se utilizó esta configuración en la resolución de los casos propuestos durante el proceso de optimización de este modelo de barrera. No obstante, se puede observar que las mayores diferencias entre los resultados numéricos y experimentales se presentan en el coeficiente de fuerza vertical, de igual modo que sucedió en los perfiles del terreno. Esto puede achacarse a la falta de similitud entre lo que encuentra el flujo de aire a su paso por la zona inferior del vehículo en la simulación numérica y en los ensayos experimentales. Por otro lado, la capacidad de protección de este modelo de barrera queda reflejada en los valores de presión y velocidad para las regiones de aire próximas al vehículo, según se muestra en la Figura 73. Así, se puede apreciar en el espacio comprendido entre la barrera y el vehículo una región de aire de bajas presiones que genera succión sobre la cara a barlovento del vehículo disminuyendo la fuerza lateral generada por la succión en el sotavento. Mientras, en el caso sin barrera la presión positiva en la cara a barlovento contribuye al aumento de la fuerza lateral.

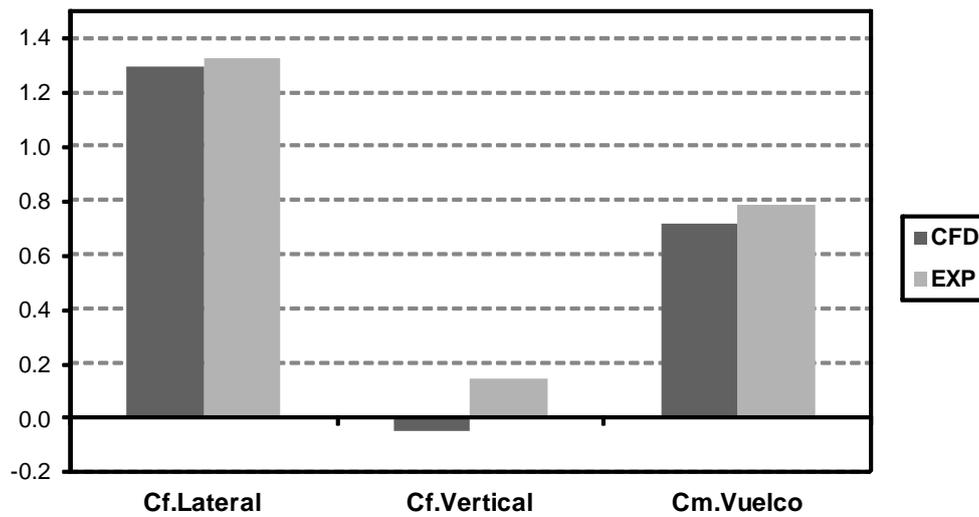


Figura 72. Comparativa entre los coeficientes aerodinámicos experimentales (EXP) y numéricos (CFD) al instalar el modelo de barrera formado por tablas sobre el terraplén, para una dirección de viento igual a 90°.

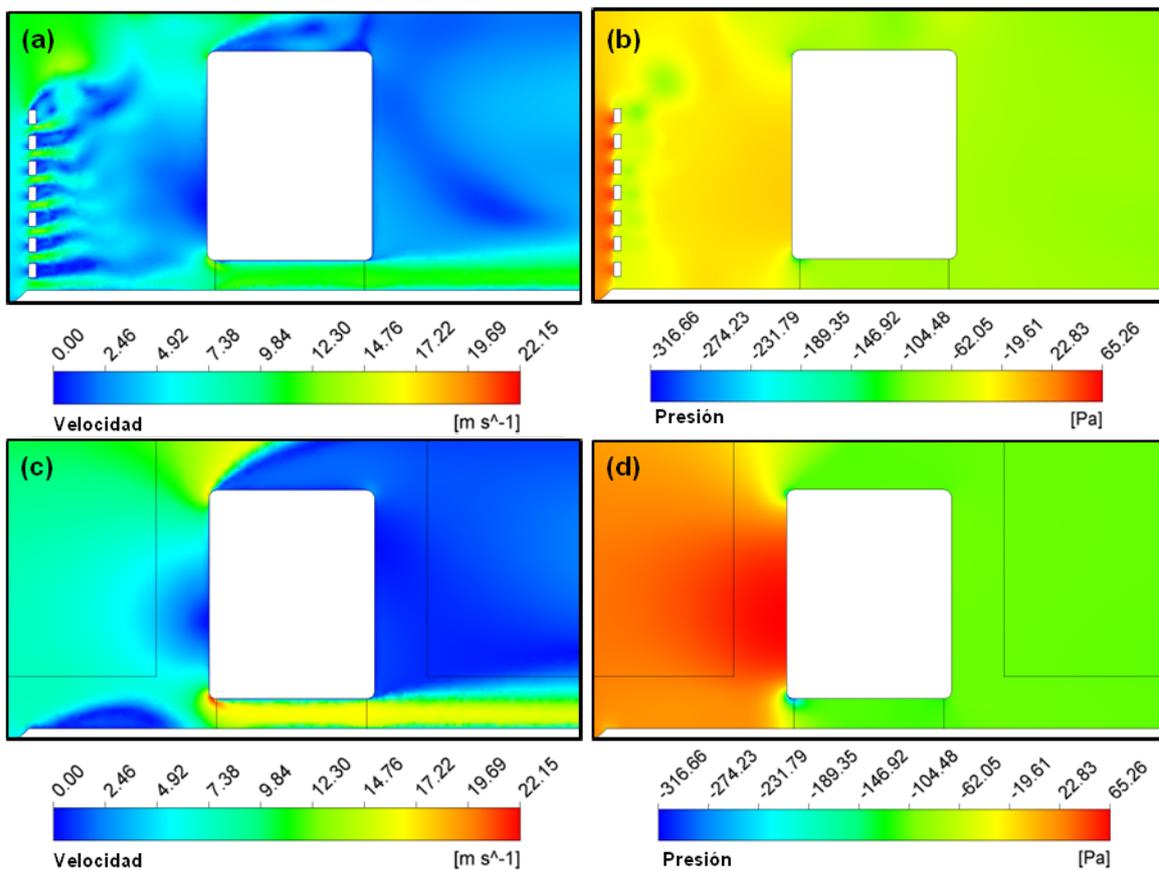


Figura 73. Contornos de presión y velocidad calculados a partir de los modelos numéricos para los casos sin ninguna barrera (debajo) y con la barrera formada por tablas (arriba).

Siguiendo la metodología del DOE, un total de nueve modelos de CFD se resolvieron considerando los mismos criterios de convergencia que en casos anteriores. Las relaciones obtenidas entre los coeficientes aerodinámicos analizados y los parámetros geométricos de la barrera objeto de estudio (definidos en el apartado 4.2.5.1) se muestran gráficamente en la Figura 74. Según las mismas, todos los coeficientes aerodinámicos muestran una fuerte sensibilidad frente a variaciones en la anchura de las tablas, no siendo así frente a cambios en el espesor de las tablas.

En cuanto al efecto de la anchura de las tablas sobre los coeficientes aerodinámicos, entra dentro de lo esperable a priori, ya que un incremento de la anchura de las mismas provoca una disminución de la permeabilidad de la barrera. Por lo tanto, en línea con los resultados obtenidos en el estudio de la permeabilidad, los coeficientes aerodinámicos asociados a la fuerza lateral y momento de vuelco aumentan al disminuir la anchura de las tablas, mientras que el coeficiente asociado a la fuerza vertical disminuye (Figura 74). Considerando que el proceso de optimización tiene por objeto minimizar el momento de vuelco debido al viento lateral, los valores óptimos calculados para los parámetros objeto de estudio son:

- ✓ Un espesor de tablas igual a 0.85 mm (29.75 mm en escala completa).
- ✓ Un ancho para las tablas de 6.28 mm (219.8 mm en escala completa).

Las tendencias observadas en las curvas de superficie respuesta representadas en la Figura 74, se cuantifican mediante un análisis de sensibilidad local en la Figura 75. En este análisis se aprecia no solo que todos los coeficientes aerodinámicos estudiados son influenciados por la anchura de las tablas de la barrera, sino que además el coeficiente de fuerza vertical presenta una correlación más fuerte y de signo opuesto al compararlo con los otros dos coeficientes.

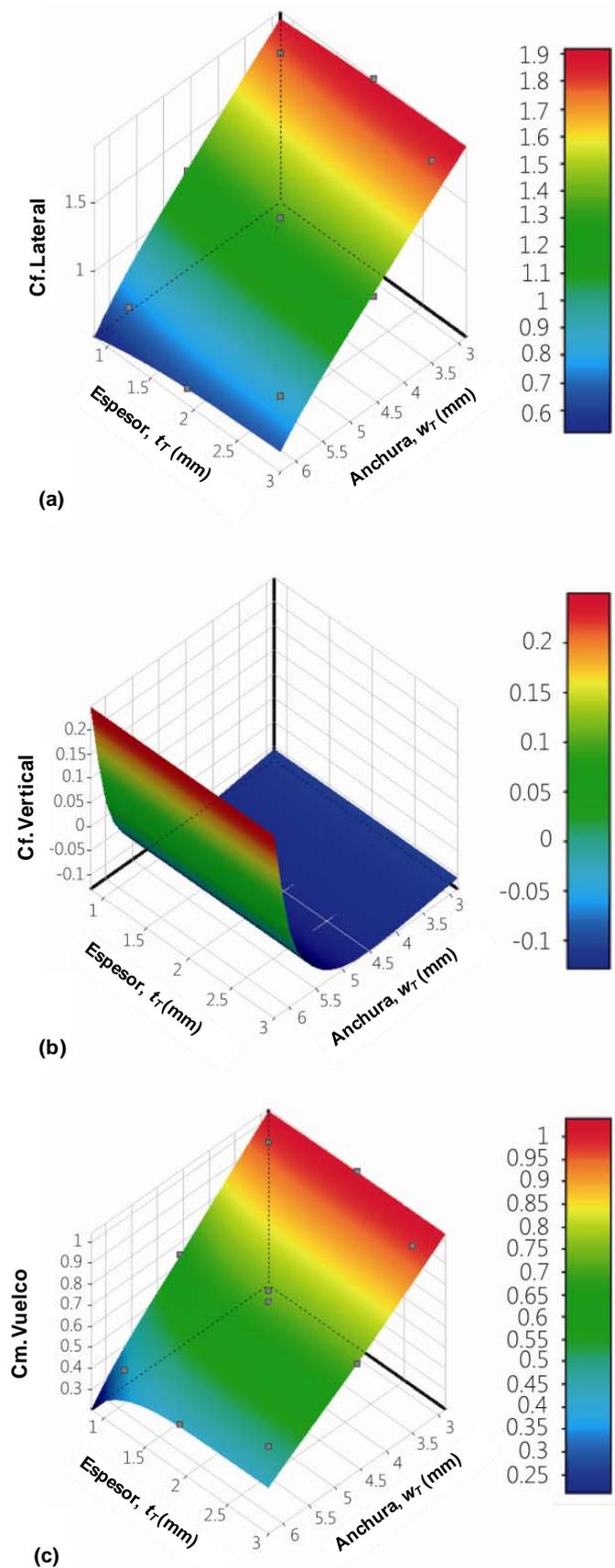


Figura 74. Superficies respuesta relacionando la anchura y el espesor con los siguientes coeficientes aerodinámicos: fuerza lateral (a), fuerza vertical (b) y momento de vuelco (c).

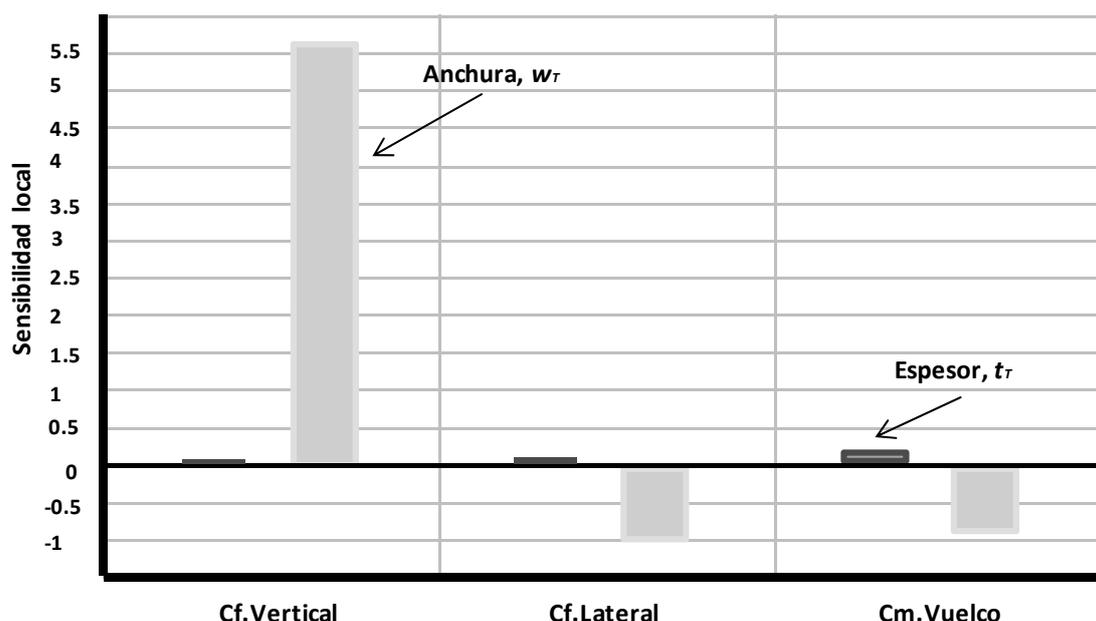


Figura 75. Valores de la sensibilidad local entre los coeficientes aerodinámicos objeto de estudio y los parámetros geométricos de la barrera cortaviento.

#### 5.2.4. Modelos de regresión obtenidos mediante ANSYS y SPSS

Las transformaciones y estandarizaciones efectuadas por la herramienta estadística de ANSYS sobre las variables objeto de estudio se presentan en la Tabla 13 y en base a ellas se obtuvieron los modelos presentados en la Tabla 14.

Los modelos matemáticos obtenidos se ajustan correctamente a los resultados obtenidos en la simulación numérica, tal y como se refleja en los valores del coeficiente de determinación,  $R^2_{adj}$ , para cada modelo. Nuevamente, la herramienta estadística de ANSYS incluye ciertos términos en los modelos que, en base a un nivel de confianza del 95%, serían descartados, tal y como se comentó anteriormente. Esto ocurre, por ejemplo, con el término cruzado incluido en el modelo del coeficiente de vuelco, con un p-valor que recomendaría no ser considerado durante el modelado.

Al igual que en los casos anteriores, se realizó un análisis de regresión con los datos generados en la simulación numérica, utilizando para ello el software estadístico SPSS. Antes de plantear un modelo de regresión, se determinó la correlación entre los distintos coeficientes aerodinámicos analizados y los siguientes términos: lineales, cuadráticos y cruzados. Los tres coeficientes aerodinámicos mostraron una correlación significativa

con los siguientes términos: término lineal  $w_T$  y término cuadrático  $w_T^2$ . El término cuadrático no fue tenido en cuenta en la elaboración de los modelos, ya que el incremento de calidad de los modelos no justificaba su inclusión. Como se muestra en la Tabla 15, los modelos elaborados para los coeficientes aerodinámicos de la fuerza lateral y momento de vuelco explican un elevado porcentaje de la varianza de la respuesta, no siendo así en el caso del coeficiente de fuerza vertical. Por consiguiente, solo se han comprobado los supuestos estadísticos para los modelos de estos dos coeficientes aerodinámicos (fuerza lateral y momento de vuelco).

Tabla 13. Operaciones realizadas sobre las variables consideradas en los modelos.

Variables respuesta	Estandarización de las variables	Transformación de las variables
$Cf_{Lateral}$	$t_{Tscal} = 1.564t_T - 3.012$ $w_{Tscal} = 0.981w_T - 4.477$ $Cf_{Lateral} = Cf_{scal} / 10$	$t_{Ttrns} = \left[ (t_{Tscal} + 1)^{-0.016} - 1 \right] / -0.016$ para $t_{Tscal} \geq 0$ $t_{Ttrns} = - \left[ (-t_{Tscal} + 1)^{2.016} - 1 \right] / 2.016$ para $t_{Tscal} < 0$ $w_{Ttrns} = \left[ (w_{Tscal} + 1)^{0.711} - 1 \right] / 0.711$ para $w_{Tscal} \geq 0$ $w_{Ttrns} = - \left[ (-w_{Tscal} + 1)^{1.289} - 1 \right] / 1.289$ para $w_{Tscal} < 0$ $Cf_{scal} = (Cf_{trns} \cdot 2 + 1)^{(1/2)} - 1$ para $Cf_{trns} \geq 0$ $Cf_{scal} = 1 - e^{-Cf_{trns}}$ para $Cf_{trns} < 0$
$Cf_{Verticall}$	$t_{Tscal} = 1.564t_T - 3.012$ $w_{Tscal} = 0.981w_T - 4.477$ $Cf_{Lateral} = Cf_{scal} / 1000$	$t_{Ttrns} = \left[ (t_{Tscal} + 1)^{1.944} - 1 \right] / 1.944$ para $t_{Tscal} \geq 0$ $t_{Ttrns} = - \left[ (-t_{Tscal} + 1)^{0.056} - 1 \right] / 0.056$ para $t_{Tscal} < 0$ $w_{Ttrns} = \left[ (w_{Tscal} + 1)^2 - 1 \right] / 2$ para $w_{Tscal} \geq 0$ $w_{Ttrns} = -Ln(-w_{Tscal} + 1)$ para $w_{Tscal} < 0$ $Cf_{scal} = (Cf_{trns} \cdot 0.909 + 1)^{(1/0.909)} - 1$ para $Cf_{trns} \geq 0$ $Cf_{scal} = 1 - (1 - 1.091 \cdot Cf_{trns})^{(1/1.091)}$ para $Cf_{trns} < 0$
$Cm_{Vuelco}$	$t_{Tscal} = 1.564t_T - 3.012$ $w_{Tscal} = 0.981w_T - 4.477$ $Cm_{Vuelco} = Cm_{scal} / 10$	$t_{Ttrns} = \left[ (t_{Tscal} + 1)^{-1.87} - 1 \right] / -1.87$ para $t_{Tscal} \geq 0$ $t_{Ttrns} = - \left[ (-t_{Tscal} + 1)^{3.87} - 1 \right] / 3.87$ para $t_{Tscal} < 0$ $w_{Ttrns} = \left[ (w_{Tscal} + 1)^{0.582} - 1 \right] / 0.582$ para $w_{Tscal} \geq 0$ $w_{Ttrns} = - \left[ (-w_{Tscal} + 1)^{1.418} - 1 \right] / 1.418$ para $w_{Tscal} < 0$ $Cm_{scal} = (Cm_{trns} \cdot 2 + 1)^{(1/2)} - 1$ para $Cm_{trns} \geq 0$ $Cm_{scal} = 1 - e^{-Cm_{trns}}$ para $Cm_{trns} < 0$

**Tabla 14. Modelos de regresión lineal obtenidos mediante ANSYS y parámetros representativos de la calidad de los modelos y de la influencia de los distintos términos.**

Variable Respuesta	Término	Coefficiente	p-valor	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
$Cf_{trms\_Lateral}$	Independiente	98.97	0	99.33%
	$t_{trms}$	2.466	3.565E-2	
	$w_{trms}$	-50.9	0	
$Cf_{trms\_Vertical}$	Independiente	-0.018	3.613E-5	72.89%
	$w_{trms}^2$	36.47	5.806E-4	
$Cm_{trms\_Vuelco}$	Independiente	32.55	0	97.93%
	$t_{trms}$	0.488	2.136E-2	
	$w_{trms}$	-14.78	0	
	$t_{trms} \cdot w_{trms}$	0.199	2.619E-1	

**Tabla 15. Modelos de regresión lineal obtenidos mediante SPSS e información relativa a la calidad de los modelos.**

Variable Respuesta	Término	Coefficiente	p-valor	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
$Cf_{Lateral}$	Independiente	2.977	0	97.3%
	$w_T$	-0.372	0	
$Cf_{Vertical}$	Independiente	-0.361	3E-3	38.6%
	$w_T$	0.067	8E-3	
$Cm_{Vuelco}$	Independiente	1.574	0	96%
	$w_T$	-0.191	0	

Los valores obtenidos permiten considerar válidos estos modelos desde una perspectiva estadística, ya que satisfacen todos los supuestos exigidos, tal y como se indica en la Tabla 16.

Tabla 16. Comprobación de los supuestos estadísticos para los modelos de regresión.

Supuesto	Tipo de comprobación	Criterio	Valor	Cumple
Normalidad de los residuos	Prueba de normalidad (shapiro-wilk)	Sig>0.05	$Cf_{Lateral}$ : Sig=0.81 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=0.432	Si
Media nula de los residuos	Test de hipótesis $H_0: \mu_{res}=0$	Sig>0.05	$Cf_{Lateral}$ : Sig=1 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=1	Si
Independencia de los residuos frente a la respuesta	Regresión lineal residuos vs. Respuesta	$Sig_{ajuste}>0.05$	$Cf_{Lateral}$ : Sig=0.643 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=0.493	Si
Homogeneidad de la varianza de los residuos (homocedasticidad)	Prueba de Levene	$Sig_{ajuste}>0,05$	$Cf_{Lateral}$ : Sig=0.419 $Cm_{Vuelco}$ : Sig=0.239	Si
Independencia de los residuos entre ellos	Contraste Durbin-watson	$1.5 < DW < 2.5$	$Cf_{Lateral}$ : DW=2.043 $Cm_{Vuelco}$ : DW=2.406	Si
Independencia entre las variables predictoras	Análisis de colinealidad	Índice de condición <15	$Cf_{Lateral}$ : IC=7.766 $Cm_{Vuelco}$ : IC=7.76	Si

### 5.2.5. Efecto del ángulo de inclinación de una barrera instalada en el tablero tipo cajón

En este apartado se presentan las relaciones entre el ángulo de inclinación,  $\theta_P$ , de una pantalla cortaviento instalada sobre el tablero de viaducto con cajón, y los coeficientes aerodinámicos analizados.

Los coeficientes actuando en el vehículo se obtuvieron de forma experimental y numérica en condiciones de flujo perpendicular a la trayectoria del tráfico. Las tendencias seguidas por los coeficientes aerodinámicos al variar el ángulo de inclinación de la pantalla,  $\theta_P$ , resultan bastante similares al comparar los dos enfoques (Figura 76). Los coeficientes aerodinámicos para la fuerza lateral y momento de vuelco exhiben dos regiones donde muestran un comportamiento distinto (Figura 76.a y 76.c). En la primera región los coeficientes especificados decrecen fuertemente desde una inclinación de la pantalla de  $30^\circ$  a  $90^\circ$ . Mientras, en la segunda región, comprendida en el rango de inclinación de la pantalla de  $90^\circ$  a  $150^\circ$ , los coeficientes presentan el comportamiento opuesto, aumentando su valor con el ángulo de inclinación. Esta recuperación de los coeficientes en la segunda región se produce de forma más rápida en el caso experimental que en el numérico. Incluso se puede llegar a considerar que el coeficiente de fuerza lateral se mantiene prácticamente constante a partir de una inclinación de la pantalla superior a  $90^\circ$ .

Los valores negativos obtenidos en el coeficiente de fuerza lateral cuando la pantalla se posiciona perpendicular al plano de la carretera se deben a la región de bajas presiones características de la estela generada en el sotavento de la pantalla, que causa una ligera fuerza de empuje lateral sobre el vehículo hacia la propia pantalla. Un ángulo de inclinación de la pantalla igual a  $120^\circ$  se desmarcó como el óptimo entre los valores estudiados, ya que el coeficiente de momento de vuelco para este ángulo presentó un valor más próximo a cero aplicando ambas técnicas. Concretamente, el coeficiente de momento de vuelco se redujo con respecto al caso sin barrera en un 93% y un 78% de forma numérica y experimental, respectivamente.

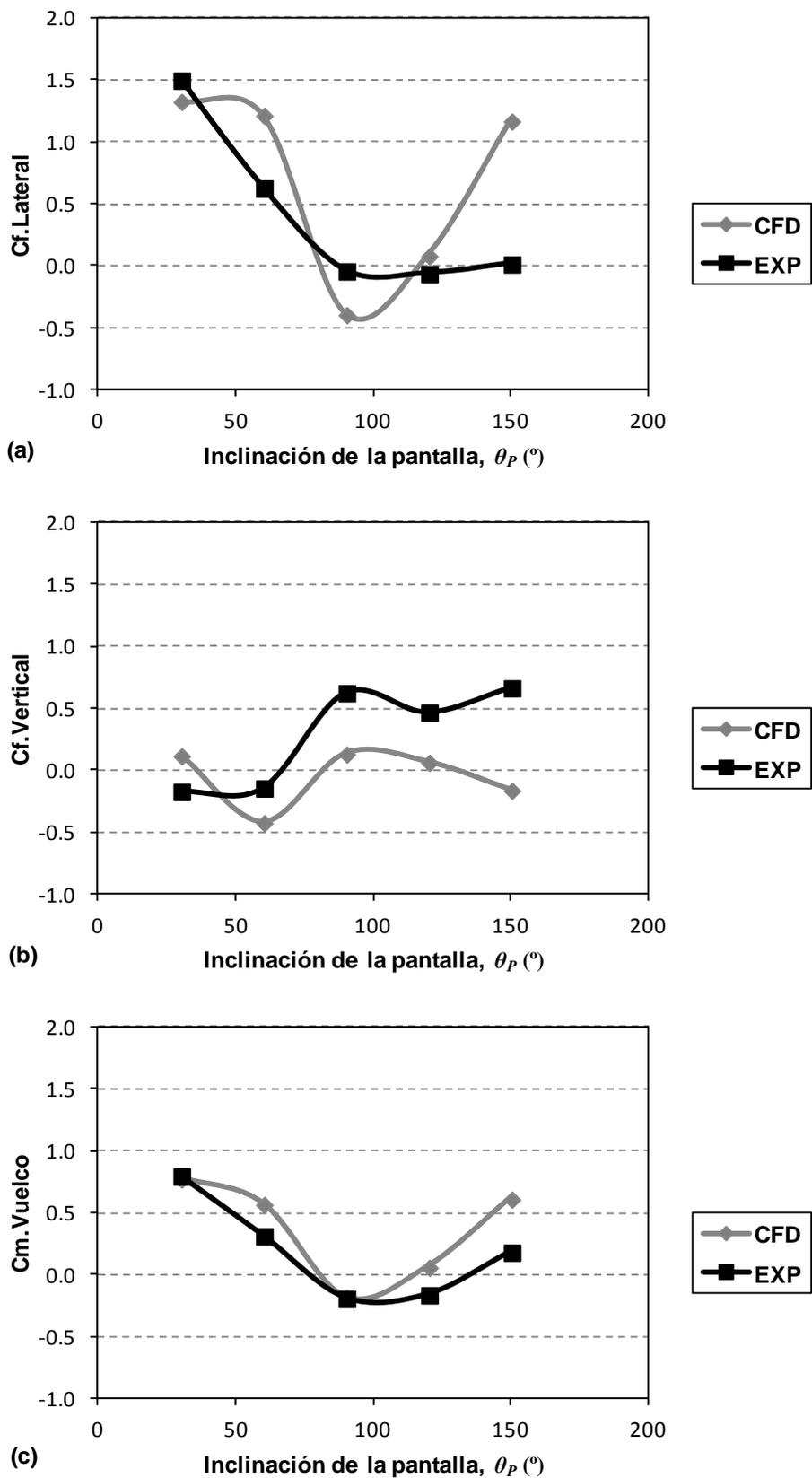


Figura 76. Comparativa entre los coeficientes aerodinámicos experimentales (EXP) y numéricos (CFD) y el ángulo de inclinación de la barrera instalada en el tablero con cajón, para una dirección de viento perpendicular a la trayectoria del vehículo: fuerza lateral (a), fuerza vertical (b) y momento de vuelco (c).





A lo largo de esta Tesis Doctoral se analizó la influencia de diferentes clases de infraestructuras de carretera y de la dirección de viento sobre los coeficientes aerodinámicos de un vehículo pesado que afectan al vuelco del vehículo. Las infraestructuras seleccionadas para su estudio en base al efecto adverso que puede suponer la carga lateral del viento sobre la estabilidad de los vehículos se agrupan en dos bloques: perfiles del terreno y tableros de viaductos. Además, se determinó como afectan la inclinación de las pendientes de los taludes así como la distancia entre el vehículo y la pendiente a barlovento para el perfil de terreno tipo terraplén. También, se estudio el efecto de los parámetros geométricos del cajón de un tablero de viaducto sobre coeficientes aerodinámicos objeto de estudio. Por otra parte, se estudió la capacidad de protección de varios posibles modelos de barreras cortaviento: muro, barrera formada por tablas y barrera provista de aperturas circulares. Para llevarlo a cabo, se aplicaron tanto técnicas numéricas (código CFD, FLUENT) como experimentales (ensayos en túnel aerodinámico). Fruto de los resultados obtenidos se elaboraron modelos estadísticos que permiten optimizar la geometría de las infraestructuras y de las barreras cortaviento con el objetivo de disminuir el riesgo de vuelco para los vehículos.

## 6.1. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se pueden extraer de forma resumida las siguientes conclusiones:

- ✓ La configuración empleada durante la campaña de ensayos experimentales en el túnel aerodinámico permitió modelar con éxito unas condiciones eólicas representativas de un caso real.
- ✓ Las semejanzas entre la maqueta y el modelo a escala real necesarias para obtener información representativa de la realidad durante los ensayos de túnel aerodinámico fueron satisfechas.
- ✓ Los parámetros de diseño de las propias infraestructuras influyeron significativamente en la estabilidad del vehículo en condiciones de viento

lateral. Por consiguiente, se puede afirmar que las especificaciones de diseño adoptadas en relación a ciertos parámetros representativos de la geometría de las infraestructuras, pueden actuar a modo de medida de seguridad activa en pos de reducir el riesgo de accidente en condiciones de viento lateral.

- ✓ Los coeficientes aerodinámicos analizados fueron sensibles al tipo de perfil de terreno utilizado y a la dirección relativa de viento. Concretamente, el tipo de perfil de terreno que afecta más negativamente a la estabilidad del vehículo, considerando el momento de vuelco debido al viento lateral, es la media ladera. Por otra parte, la dirección relativa de viento más crítica para la estabilidad del vehículo localizado en los distintos perfiles viarios fue de  $90^\circ$ .
- ✓ Los coeficientes aerodinámicos analizados para los tres tipos de tablero de puente propuestos se mantuvieron relativamente constantes para una dirección relativa de viento de  $90^\circ$ .
- ✓ Tras comparar diferentes modelos de barreras con el objetivo de disminuir el coeficiente de vuelco, se pudo establecer el siguiente orden de elección: Muro; Barrera formada por tablas y Barrera con aperturas circulares. No obstante, en un análisis posterior se apreció que la barrera con aperturas circulares con una permeabilidad entre un 10% y un 23% puede disminuir el coeficiente de vuelco en valor absoluto incluso más que el Muro y por consiguiente resultar una mejor opción.
- ✓ La permeabilidad y el ángulo de inclinación de las barreras presentaron una fuerte influencia sobre los coeficientes aerodinámicos analizados. Por lo tanto, el control de estos parámetros es el que debe determinar la capacidad de protección de las barreras frente al viento lateral.
- ✓ Como parte de la metodología numérica aplicada, queda demostrado que el método de volúmenes finitos resuelve exitosamente el problema de interacción

fluido-estructura presente en el estudio de las cargas aerodinámicas actuantes sobre un vehículo.

- ✓ La configuración numérica basada en un modelo de turbulencia  $k-\omega$  SST resulta más precisa que la basada en los modelos de turbulencia SST transición y RSM, para los perfiles del terreno estudiados. En estos mismos casos de estudio, a partir de un tamaño de malla de aproximadamente 7 millones de elementos, los resultados obtenidos fueron independientes del número de elementos utilizados.
- ✓ La herramienta estadística DOE de ANSYS permitió optimizar los parámetros geométricos seleccionados de una estructura con el objetivo de minimizar el coeficiente de momento de vuelco actuando sobre el vehículo.
- ✓ La información obtenida a partir del estudio estadístico de los modelos numéricos dio lugar a la elaboración de modelos matemáticos mediante el programa SPSS, que permiten controlar los coeficientes aerodinámicos del vehículo analizado actuando sobre los parámetros geométricos asociados al diseño de las infraestructuras.
- ✓ La buena concordancia exhibida entre los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales y el modelado numérico avala a los códigos CFD como una poderosa herramienta que, en combinación con los ensayos experimentales, permite reducir parte de los costes derivados del desarrollo de ensayos en túneles aerodinámicos.

## 6.2. FUTURAS LÍNEAS DE ESTUDIO

A continuación se proponen posibles líneas futuras de investigación en base al trabajo desarrollado en la presente Tesis:

1. Análisis del comportamiento aerodinámico de un vehículo durante una maniobra de adelantamiento en condiciones de viento lateral, ya sea

---

utilizando ensayos experimentales o por medio de los modelos numéricos validados en esta Tesis.

2. Estudio del comportamiento de los coeficientes aerodinámicos actuantes sobre un vehículo durante los metros iniciales recorridos por el mismo al abandonar un túnel de carretera en presencia de viento lateral.
3. Resolución del comportamiento inestable del fluido y análisis de las cargas aerodinámicas transitorias actuando sobre un vehículo mediante la aplicación de las nuevas técnicas, aun poco desarrolladas, de simulación con resolución de escalas, más conocidas por las siglas SRS.
4. Realización de ensayos de campo en condiciones reales en torno a las infraestructuras aquí analizadas con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos mediante la metodología aplicada en este estudio.
5. Desarrollo de nuevas tecnologías de barreras de protección frente a condiciones eólicas adversas, estableciendo como requisito de diseño que su presencia en las infraestructuras se ajuste a las condiciones eólicas del momento.
6. Desarrollo de una guía de recomendaciones que fundamente técnicamente bajo qué circunstancias se deben instalar medios de protección, tales como las barreras cortaviento, a lo largo de las vías de transporte.





## Extended Abstract

Under strong crosswind conditions, vehicle stability driving on roads or rails is adversely affected and as a consequence the risk of having an accident is higher (Baker y Reynolds, 1992; Chen y Chen, 2011). Around the world, several accidents due to cross wind have been registered and analyzed on different occasions (Imai et al., 2002; Shao et al., 2011; Coleman and Baker, 1990). High sided vehicles such as trucks, caravans and trains are specially affected by cross wind since the risk of rollover is higher than for other kind of vehicles (Dorigatti et al., 2012). This issue has motivated the development of this work in order to improve traffic safety under crosswind conditions (Figure 1). To achieve this goal, a series of objectives have been established that can be grouped in two lines of action: on the one hand, to provide technical information that can be used by the responsible authorities to take corrective actions against adverse crosswind conditions, and on the other hand, to propose measures based on the results obtained in this study.

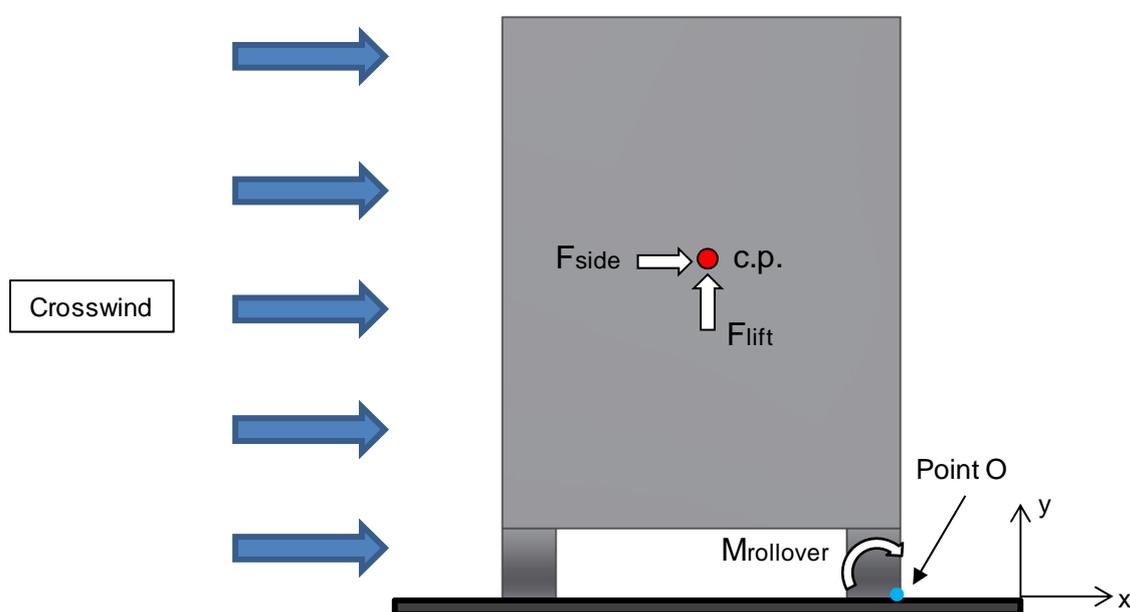


Figure. 1. Aerodynamic loads causing rollover accident, acting on a heavy road vehicle in crosswind conditions.

In this study, the effect of different infrastructures and wind conditions on truck aerodynamic coefficients is analyzed by means of wind tunnel tests and numerical simulation. These methods along with field experiments have been widely used in other

researches with similar objectives (Cheli et al., 2010; Suzuki et al., 2003). The studied infrastructures are divided into two groups: terrain profiles/configurations and bridge decks. Specifically, three classes of terrain profiles (an embankment with downward-slope in the leeward side, embankment with upward-slope in the leeward side and flat ground) and bridge decks (box, girder and board) were analyzed. With respect to wind conditions, the relationships between the yaw angle and the aerodynamic coefficients were obtained for the terrain profiles. In addition, the influence of geometry parameters related to the infrastructures on vehicle aerodynamic was analyzed. This analysis allowed optimizing the geometry parameters to minimize the rollover moment coefficient for crosswind conditions.

On the other hand, several models of wind fence were located on embankment with downward-slope in the leeward side, and then, their performance was analyzed for a yaw angle of  $90^\circ$  (wind direction perpendicular to vehicle trajectory). Also, the geometry parameters of one model of wind fence were optimized to improve traffic safety, by means of minimizing the rollover coefficient. In addition, the relationship between the permeability of a wind fence model and the aerodynamic coefficient of vehicle was obtained. This model is provided with circular openings for the passage of air. Several wind fences of this model were manufactured with different sizes of holes in order to control the permeability for each case.

On the other hand, the mean wind profile simulated in the wind tunnel tests and numerical simulation was representative of an actual terrain (high crops or forested areas). For both techniques the longitudinal turbulence intensity at the inlet of air flow had an average value of 5%. A board covered by cubes of two dimensions was used to generate these wind conditions. The mean velocity and turbulence intensity were measured by means of a *Pitot probe* located at 1 m upwind from the truck model. The truck model was instrumented with two pressure taps in each side and mean pressures were measured with the DSA3217 pressure scanner. The aerodynamic loads and moments acting on the truck calculated were side force, lift force and rollover moment. The data obtained in the campaign of experimental tests developed in the wind tunnel, fulfill two functions: to provide information that allow to achieve the objectives set and to validate the numerical models.

The numerical simulation was developed by FLUENT (CFD code) and the turbulent flow was modeled by the Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS) equations and the  $k-\omega$  SST turbulence model. During numerical setup, the boundary conditions were defined according to the conditions simulated during the campaign of wind tunnel test. The selection of the turbulence models and the setting of grid parameters were based on a sensitivity analysis. This sensitivity analysis was developed for the different classes of terrain profiles. Three different RANS-based turbulence models were used to solve the numerical problem:  $k-\omega$  SST (Menter, 1994); SST transition (Menter et al., 2006; Langtry and Menter, 2009) and RSM (Launder et al., 1975; Launder 1989). Among the models tested, the results obtained for the  $k-\omega$  SST model showed a better fit with the experimental results. With respect to the setup of grid, the results exhibited a quite independent behavior of the grid size from about 7 million of cells.

The optimization procedure of different parameters related to infrastructure and wind fence geometry was carried out by means of the statistical tool provided by ANSYS software. Particularly, a DOE (design of experiment) and a sensitivity analysis was developed to determine the influence of these parameters on aerodynamic coefficients acting on the vehicle. The selected infrastructures in order to optimize from terrain profiles and bridge decks groups were embankment with downward-slope in the leeward side and bridge deck with box respectively. Specifically, the parameters studied were the horizontal distance between the edge of embankment slope and the vehicle and the slope angle for the embankment together with the height of deck box, angle of deck box and deck box width for the bridge deck. On the other hand, the parameters optimized for the wind fence were the board thickness and the board width. The numerical models used in this analysis were previously validated against experimental results.

In relation to the results, the aerodynamic coefficients acting on the truck model exhibited nearly constant values independently of the Reynolds number. These aspects, together with the other considerations, allow maintaining that the required similarities between the model and the prototype are fulfilled. Regarding terrain profiles analyzed the flat ground is the scenario where the truck has a lower risk of having a rollover accident for all yaw angles analyzed (Figure 2), while the worst scenario for most of

yaw angles studied is the embankment with upward-slope in the leeward side. Specifically, the higher values of rollover coefficient were obtained for a yaw angle of  $90^\circ$  (air flow perpendicular to vehicles trajectory). The results from DOE analysis indicate that the rollover moment coefficient shows negative sensitivity to variations of the truck position on road and the slope angle. In the case of bridge deck studied, the aerodynamic coefficients are quite similar for the different types of bridge decks. Therefore, the bridge deck type does not affect the risk of suffering a rollover accident. In addition, the only geometrical parameter of the bridge box that significantly influences the rollover moment coefficient is the box angle and the local sensitivity is negative.

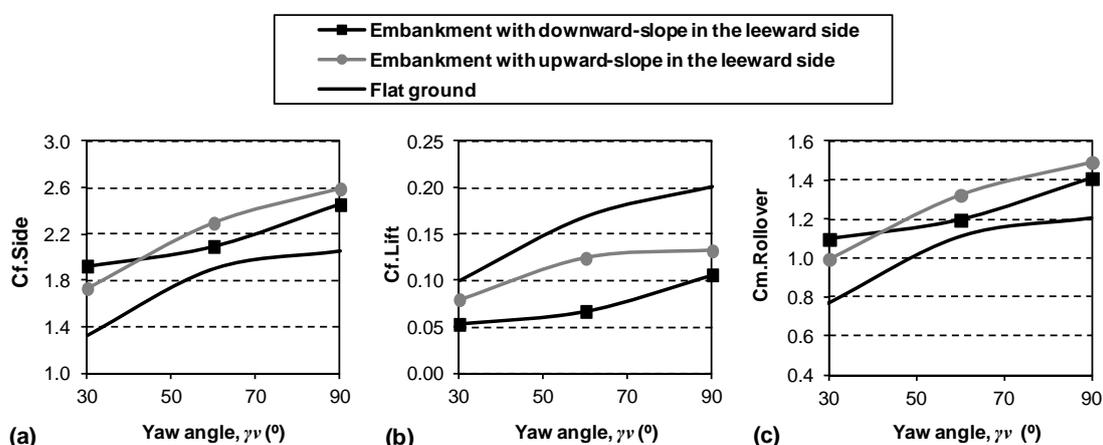


Figure. 2. Aerodynamic coefficients obtained by wind tunnel tests, depending on the yaw angle for different scenarios. (a) Side force; (b) Lift force; (c) Rollover moment.

On the other hand, the non-permeable wind fence stands out among the group of wind fences studied by providing a greater reduction in the rollover moment coefficient. However, the wind fence model with holes for a value of permeability between a 10% and a 23% reduces the rollover moment coefficient more than the non-permeable wind fence. The permeability and the angle of inclination of the wind fences show a strong influence on the aerodynamic coefficients analyzed. Therefore, the control of these parameters determines the capacity of protection of wind fence against crosswind.

This study indicates that the safety and comfort of the vehicles can be improved from the sizing and configuration of the different infrastructures analyzed. Furthermore, CFD codes used in combination with experimental tests can be very useful tool to study aerodynamics because the costs of test development in tunnels aerodynamic are

reduced. Moreover, the study of new scenarios for critical vehicle stability and development of new protection systems and field tests for the infrastructure analyzed can be some of the future lines of research.

## **Conclusions**

In this study, the influence of different types of infrastructures and the wind direction on the aerodynamic coefficients of road vehicle causing the rollover accident was analyzed. The infrastructures to be studied can be divided in two groups: ground profiles and bridge decks. In addition, how some geometrical parameters of infrastructures affect the vehicle aerodynamic is determined. On the other hand, several models of wind fence were located on the embankment with upward-slope in the leeward side and their performance was studied in crosswind conditions. Both numerical and experimental techniques were used to develop this study. Statistical models that allow optimizing some geometrical parameters of the infrastructures and wind fences with the goal of decreasing the risk of rollover accident are developed.

The main remarks arising from the results are summarized as follows:

- ✓ The wind conditions generated during the campaign of wind tunnel tests were representative of an actual ground surface.
- ✓ The similarities between the model and full-scale model necessary to obtain information representative of reality during the wind tunnel tests were satisfied.
- ✓ The design parameters of the infrastructures significantly influence vehicle stability in crosswind conditions. Accordingly, the risk of rollover accidents can be decreased from the design of infrastructures.
- ✓ The aerodynamic coefficients studied were sensitive to the type of terrain profile and the yaw angle. Among the terrain profiles studied, the flat ground is the scenario where the truck has a lower risk of having a rollover accident for all yaw angles values analyzed, while the worst scenario for most of the yaw angles studied is the embankment with upward-slope in the leeward side. On the other hand, a yaw angle of 90° was the most critical value for the vehicle stability.

- ✓ The aerodynamic coefficients acting on the vehicle keep quite constant for three kinds of bridge deck studied and a yaw angle of 90°.
- ✓ After comparing different models of wind fence with the aim of reducing the rollover coefficient. The results indicate that the solid wind fence provides the higher level of protection against crosswind. Among the other two models, the wind fence with boards is a better option than the wind fence with holes since the rollover coefficient is higher in the last one. However, the wind fence with circular openings with permeability between 10% and 23% can reduce the rollover coefficient even more than the solid wind fence and therefore be a better choice based on the approach taken.
- ✓ The aerodynamic coefficients acting on the vehicle were strongly affected by two parameters: the permeability and the slope angle of wind fence. Therefore, the control of these parameters will determine the performance of wind fence.
- ✓ The finite volume method has proved to be a powerful tool to solve the fluid-structure interaction problems, present in the study of the aerodynamic loads acting on a vehicle.
- ✓ Specifically, results with higher accuracy were obtained for the  $k-\omega$  SST turbulence model in comparison to the transition SST turbulence models and RSM for the terrain profiles studied. In these cases, the results were independent of the number of elements used from a mesh size of 7 million elements.
- ✓ The statistical tool of ANSYS, DOE, is very useful in quantifying the sensitivity of the analyzed aerodynamic coefficients, against variations in the geometric parameters studied. This tool allowed optimizing the selected geometric parameters of a structure in order to minimize the rollover moment coefficient acting on the vehicle.
- ✓ The information obtained through the statistical study of the numerical models led to the development of mathematical models using the SPSS program for

controlling the aerodynamic coefficients of the vehicle analyzed by acting on the geometric parameters associated with the design of infrastructure.

- ✓ The results from both techniques (wind tunnel test and numerical modeling) show a good fit for the aerodynamic coefficients analyzed. Therefore, CFD codes used in combination with experimental tests can be very useful tool to study aerodynamics because the costs of test development in tunnels aerodynamic are reduced.

### **Future lines of research**

Some possible future research lines based on the study developed in this thesis are proposed below:

1. Analysis of the vehicle aerodynamic during an overtaking maneuver in crosswind conditions by the techniques applied in this thesis.
2. Study of the aerodynamic coefficients acting on the vehicle during the first meters driven from road tunnel exit in crosswind conditions.
3. Solve unstable fluid behavior and analysis of transient aerodynamic coefficients acting on the vehicle by applying new techniques of simulation with resolution of scales.
4. Perform a campaign of field tests around infrastructure analyzed in order to validate the methodology used in this study.
5. Development of new technologies for wind fences whose presence on roads depends on the instantaneous wind conditions.
6. Development of a recommendations guide to decide under what circumstances the wind fence should be installed on roads.







Allanblock, constructor de muros. <http://www.allanblock.com>. Fecha de acceso: 25/3/2013.

Ansys Inc, 2014. ANSYS User Manual. Canonsburg, PA.

Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Rahman, S. and Berend, V.W., 2012. *Computational fluid dynamics for engineers*. Cambridge University Press, New York, USA.

Anthony, E.J., Vanhee, S. and Ruz, M.H., 2007. "An assessment of the impact of experimental brushwood fences on foredune sand accumulation based on digital elevation models". *Ecological Engineering*, (31), 41-46.

Argentini, T., Ozkan, E., Rocchi, D., Rosa, L. and Zasso, A., 2011. "Cross-wind effects on a vehicle crossing the wake of a bridge pylon". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (99), 734-740.

Arya, S.P., 1998. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press, New York, Oxford.

Arya, S.P., 2001. *Introduction to Micrometeorology*. Academic press, San Diego, London.

Baker, C.J., 1985. "The determination of topographical exposure factors for railway embankments". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (21), 89-99.

Baker, C.J., 1987. "Measures to control vehicle movement at exposed sites during windy periods". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (25), 151-161.

Baker, C.J. and Reynolds, S., 1992. "Wind-induced accidents of road vehicles". *Accident Analysis and Prevention*, (24), 559-575.

Baker, C.J., Jones, J., Lopez-Calleja, F. and Munday, J., 2004. "Measurements of the cross wind forces on trains". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (92), 547-563.

Baker, C., 2010. "The flow around high speed trains". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (98), 277-298.

Baker, J.T., 2007. "Cotton seedling abrasion and recovery from wind blown sand". *Agronomy Journal*, (99), 556-561.

Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C. and Rios-Marcuello, S., 2010. "Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (14), 2383-2391.

Barlow, J.B., William, H.R. and Alan, P., 1999. *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & Sons, New York.

- 
- Bearman, P., 2009. "*Bluff body flow research with application to road vehicles*". Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, 41, pp. 3-13.
- 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 on a bridge in cross-wind*". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (91), 573-592.
- Bitog, J.P., Lee, I.B., Shin, M.H., Hong, S.W., Hwang, H.S., Seo, I.H., Yoo, J.I., Kwon, K.S., Kim, Y.H. and Han, J.W., 2009. "*Numerical simulation of an array of fences in Saemangeum reclaimed land*". Atmospheric Environment, (43), 4612-4621.
- Bitog, J.P., Lee, I.B., Hwang, H.S., Shin, M.H., Hong, S.W., Seo, I.H., Mostafa, E. and Pang, Z., 2011. "*A wind tunnel study on aerodynamic porosity and windbreak drag*". Forest Science and Technology, (7:1), 8-16.
- Bitog, J.P., Lee, I.B., Hwang, H.S., Shin, M.H., Hong, S.W., Seo, I.H., Kwon, K.S., Mostafa, E. and Pang, Z., 2012. "*Numerical simulation study of a tree windbreak*". Biosystems Engineering, (111), 40-48.
- Bitsuamlak, G.T., Stathopoulos, T. and Bédard, C., 2004. "*Numerical evaluation of wind flow over complex terrain: Review*". Journal of Aerospace Engineering, (17), 135-145.
- Blakeney, A., 2000. *Resistance of railway vehicles to roll-over in gales*. Railway group standard, Railtrack PLC.
- Blazek, J., 2001. *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Elsevier, Oxford, UK.
- Bocciolone, M., Cheli, F., Corradi, R., Muggiasca, S. and Tomasini, G., 2008. "*Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses*". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (96), 584-610.
- Brijs, T., Karlis, D. and Wets, G., 2008. "*Studying the effect of weather conditions on daily crash counts using a discrete time-series model*". Accident Analysis and Prevention, (40), 1180-1190.
- Burlando, M., Freda, A., Ratto, C.F. and Solari, G., 2010. "*A pilot study of the wind speed along the Rome-Naples HS/HC railway line. Part 1-Numerical modelling and wind simulations*". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (98), 392-403.
- Cermak, J.E. and Isyumov, N., 1998. *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*. ASCE, Reston, Virginia.
- Charuvisit, S., Kimura, K. and Fujino, Y., 2004. "*Effects of wind barrier on a vehicle passing in the wake of a bridge tower in cross wind and its response*". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (92), 609-639.

- Cheli, F., Corradi, R., Rocchi, D., Tomasini, G. and Maestrini, E., 2010. "Wind tunnel tests on train scale models to investigate the effect of infrastructure scenario". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (98), 353-362.
- Cheli, F., Corradi, R., Sabbioni, E. and Tomasini, G., 2011. "Wind tunnel tests on heavy road vehicles: Cross wind induced loads-Part 1". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (99), 1000-1010.
- Cheli, F., Ripamonti, F., Sabbioni, E. and Tomasini, G., 2011. "Wind tunnel tests on heavy road vehicles: Cross wind induced loads-Part 2". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (99), 1011-1024.
- Chen, F. and Chen, S., 2011. "Injury severities of truck drivers in single- and multi-vehicle accidents on rural highways". Accident Analysis and Prevention, (43), 1677-1688.
- Chen, G., Wang, W., Sun, C. and Li, J., 2012. "3D numerical simulation of wind flow behind a new porous fence". Powder Technology, (230), 118-126.
- Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Nakashima, T., Okada, Y. and Nouzawa, T., 2012. "Numerical quantification of aerodynamic damping on pitching of vehicle-inspired bluff body". Journal of Fluids and Structures, (30), 188-204.
- Chung, T.J., 2010. *Computational fluid dynamics*. Cambridge University Press, New York.
- Cleugh, H.A., 1998. "Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields". Agroforestry Systems, (41), 55-84.
- Coleman, S.A. and Baker, C.J., 1990. "High sided road vehicles in cross winds". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (36), 1383-1391.
- Coleman, S.A. and Baker, C.J., 1992. "The reduction of accident risk for high sided road vehicles in cross winds". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (44), 2685-2695.
- Commission Decision 2012/464/EU of 23 July 2012 amending Decisions 2006/861/EC, 2008/163/EC, 2008/164/EC, 2008/217/EC, 2008/231/EC, 2008/232/EC, 2008/284/EC, 2011/229/EU, 2011/274/EU, 2011/275/EU, 2011/291/EU and 2011/314/EU concerning technical specifications for interoperability.
- Cornelis, W.M. and Gabriels, D., 2005. "Optimal windbreak design for wind-erosion control". Journal of Arid Environments, (61), 315-332.
- Date, A.W., 2005. *Introduction to computational fluid dynamics*. Cambridge University Press, New York.
- DB Netz AG, 2006. Richtlinie80704 Aerodynamik/Seitenwind. Deutsche Bahn.

Del Coz Díaz, J.J., García Nieto, P.J., Castro-Fresno, D. and Menéndez Rodríguez, P., 2011. "Steady state numerical simulation of the particle collection efficiency of a new urban sustainable gravity settler using design of experiments by FVM". Applied Mathematics and Computation, (217), 8166-8178.

Del Coz Díaz, J.J., Serrano López, M.A., López-Colina Pérez, C. and Álvarez Rabanal, F.P., 2012. "Effect of the vent hole geometry and welding on the static strength of galvanized RHS K-joints by FEM and DOE". Engineering Structures, (41), 218-233.

Delaunay, D., Baker, C.J., Cheli, F., Morvan, H., Berger, L., Casazza, M., Gomez, C., Cleac'h C.Le., Saffell, R., Grégoire, R. and Vinuales, A., 2006. "Development of wind alarm systems for road and rail vehicles: presentation of the WEATHER project". In: Proceedings of the SIRWEC2006, 13th International Riad Weather Conference, Turin - Italy, March 25-27.

Diedrichs, B., Sima, M., Orellano, A. and Tengstrand, H., 2007. "Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, (221), 205-225.

Dierickx, W., Gabriels, D. and Cornelis, W., 2001. "A wind tunnel study on wind speed reduction of technical textiles used as windscreen". Geotextiles and Geomembranes, (19), 59-73.

Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008, on the interoperability of the rail system within the Community.

Dong, Z., Luo, W., Qian, G. and Wang, H., 2007. "A wind tunnel simulation of the mean velocity fields behind upright porous fences". Agricultural and Forest Meteorology, (146), 82-93.

Dorigatti, F., Sterling, M., Rocchi, D., Belloli, M., Quinn, A.D., Baker, C.J. and Ozkan, E., 2012. "Wind tunnel measurements of crosswind loads on high sided vehicles over long span bridges". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (107-108), 214-224.

Duboisag, proveedores de materiales utilizados en el sector agrícola. <http://www.duboisag.com/en/professional-snow-fence.html>. Fecha de acceso: 20/04/2013.

Fernandez, P. "Apuntes de la asignatura titulada Energías Renovables". Universidad de Cantabria. <http://es.pfernandezdiez.es>. Fecha de acceso: 12/02/2013.

Ferrovial, constructor de infraestructuras. [http://newsroom.ferrovial.com/en/press-room/photo\\_gallery/montabliz-viaduct/](http://newsroom.ferrovial.com/en/press-room/photo_gallery/montabliz-viaduct/). Fecha de acceso: 7/9/2014.

Ferziger, J.H. and Peric, M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, New York.

- 
- Gibson, M.M. and Launder, B.E., 1978. "Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer". *Journal of Fluid Mechanics*, (86), 491-511.
- Gohlke, M., Beaudoin, J.F., Amielh, M. and Anselmet, F., 2007. "Experimental analysis of flow structures and forces on a 3D-bluff-body in constant cross-wind". *Experiments in Fluids*, (43), 579-594.
- Gohlke, M., Beaudoin, J.F., Amielh, M. and Anselmet, F., 2010. "Shape influence on mean forces applied on a ground vehicle under steady cross-wind". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (98), 386-391.
- Grafals-Soto, R., 2012. "Effects of sand fences on coastal dune vegetation distribution". *Geomorphology*, (145-146), 45-55.
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S. and Ruck, B., 2008. "Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations - Evaluation of CFD data with experimental data". *Atmospheric Environment*, (42), 8640-8650.
- Heine, C. and Matsche, G., 2001. "The influence of the nose shape of high speed trains on the aerodynamic coefficients". *Proceedings of the World Congress of Railway Research WCRR, Cologne*.
- Hemida, H., Krajnovic, S. and Davidson, L., 2005. "Large-eddy simulation of the flow around a simplified high speed train under the influence of a cross-wind". *17th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Toronto, Canada, 6-9 June*.
- Hibino, Y., Shimomura, T. and Tanifuji, K., 2010. "Full-Scale Experiment on the Behavior of a Railway Vehicle being subjected to Lateral Force". *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, (3), 35-43.
- Hirsch, C., 2007. *Numerical computation of internal & external flows*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Hokkaido, 1974. *Snow disaster prevention techniques using snow fences*. Part I. Snow fence research report No. 3, Hokkaido Development Bureau, Construction Machinery Plant, Engineering Development Section (Sapporo).
- Hoppmann, U., Koenig, S., Tielkes, T. and Matschke, G., 2002. "A short-term strong wind prediction model for railway application: Design and verification". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (90), 1127-1134.
- Imai, T., Fujii, T., Tanemoto, K., Shimamura, T., Maeda, T., Ishida, H. and Hibino, Y., 2002. "New train regulation method based on wind direction and velocity of natural wind against strong winds". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (90), 1601-1610.

- 
- Insonor, distribuidor de aislamientos acústicos. <http://www.insonor.com/servicios-aislamientos-acusticos/insonorizacion-acustica-industrial/pantallas-acusticas>. Fecha de acceso: 7/10/2014.
- Judd, M.J., Raupach, M.R. and Finnigan, J.J., 1996. "*A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks, part I: Velocity fields*". *Boundary-Layer Meteorology*, (80), 127-165.
- Khier, W., Breuer, M. and Durst, F., 2000. "*Flow structure around trains under side wind conditions: A numerical study*". *Computers and Fluids*, (29), 179-195.
- Klaassen, R.K.W.M. and Van Overeem, B.S., 2012. "*Factors that influence the speed of bacterial wood degradation*". *Journal of Cultural Heritage*, (13), S129-S134.
- Kolmogorov, A.N., 1942. "*Equations of turbulent motion of an incompressible fluid*". *Izvestia Academy of Sciences, USSR, Physics, Fiz.* 6, 56–58.
- Kozmar, H., Butler, K. and Kareem, A., 2009. "*Aerodynamic loads on a vehicle exposed to cross-wind gusts: An experimental study*". 7th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, APCWE-VII. Taipei, Taiwan, November 8-12.
- Kozmar, H., Procino, L., Borsani, A. and Bartoli, G., 2012. "*Sheltering efficiency of wind barriers on bridges*". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (107-108), 274-284.
- Krajnovic, S. and Davidson, L., 2004. "*Large-eddy simulation of the flow around simplified car model*". SAE Technical Papers.
- Langtry, R.B. and Menter, F.R., 2009. "*Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes*". *AIAA Journal*, (47), 2894-2906.
- Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., 1975. "*Progress in the development of a reynolds-stress turbulence closure*". *Journal of Fluid Mechanics*, (68), 537-566.
- Launder, B.E., 1989. "*Second-moment closure: present... and future?*". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, (10), 282-300.
- Lettau, H.H., 1962. "*Theoretical Wind Spirals in the Boundary Layer of a Barotropic Atmosphere*". *Beitraege zur Physik der Atmosphaere*, (35), 195-212.
- Li, W., Wang, F. and Bell, S., 2007. "*Simulating the sheltering effects of windbreaks in urban outdoor open space*". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (95), 533-549.
- Lin, X.J., Barrington, S., Choinière, D. and Prasher, S., 2007. "*Simulation of the effect of windbreaks on odour dispersion*". *Biosystems Engineering*, (98), 347-363.
- Lumley, J.L. and Panofsky, H., 1964. *The Structure of Atmospheric Turbulence*. John Wiley and Sons.

- Malviya, V., Gundala, N. and Mishra, R., 2009. "Effect of cross wind on aerodynamic coefficients of ground vehicles". In: Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers' Conference 2009: CEARC'09. University of Huddersfield, Huddersfield.
- Matschke, G., Deeg, P. and Schulte-Werning, B., 2001. "Effects of strong winds on high speed trains: a methodology for assessment and countermeasures". Proceedings World Congress on Railway Research WCRR 2001, Köln, 25-29 November.
- Menter, F.R., 1993. "Zonal Two Equation Turbulence Models for Aerodynamic Flows", AIAA J., Proceedings of the 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, July 6-9.
- Menter, F. R., 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, (32), 1598-1605.
- Menter, F.R., Langtry, R.B., Likki, S.R., Suzen, Y.B., Huang, P.G. and Völker, S., 2006. "A correlation-based transition model using local variables - Part I: Model formulation". Journal of Turbomachinery, (128), 413-422.
- Menter, F.R., 2009. "Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective". International Journal of Computational Fluid Dynamics, (23), Issue 4, 305-316.
- Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J.M. and Pindado, S., 2001. *Cargas de Viento en las Edificaciones*. McGraw-Hill, Madrid.
- Miao, X.J., Tian, H.Q. and Gao, G.J., 2010. "Effect of railway environment on aerodynamic performance of train on embankment". Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Central South University (Science and Technology), (41), 2028-2033.
- Monleón, S., 1990. *Curso de puentes*. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica, Valencia.
- Montgomery, D.C., 2001. *Design and Analysis of Engineering Experiments*. John Wiley & Sons, New York.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M., 2009. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, New York.
- NASA, 1978. "Advanced Technology Airfoil Research". Proceedings of a Conference Held at Langley Research Center, Hampton, Virginia, March 7-9.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary layer climates*. Routledge, London.
- Park, C.W. and Lee, S.J., 2002. "Verification of the shelter effect of a windbreak on coal piles in the POSCO open storage yards at the Kwang-Yang works". Atmospheric Environment, (36), 2171-2185.

---

Perzon S. and Davidson L., 2000. *"On Transient Modeling of the Flow Around Vehicles Using the Reynolds Equations"*. In ACFD Beijing: International Conference on Applied Computational Fluid Dynamics, China, Oct 17-20.

PG-3, 2011. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Ministerio de Fomento.

Quinn, A.D., Sterling, M., Robertson, A.P. and Baker, C.J., 2007. *"An investigation of the wind-induced rolling moment on a commercial vehicle in the atmospheric boundary layer"*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, (221), 1367-1379.

Robinson, C.G. and Baker, C.J., 1990. *"The effect of atmospheric turbulence on trains"*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (34), 251-272.

Rocchi, D., Rosa, L., Sabbioni, E., Sbroisi, M. and Belloli, M., 2012. *"A numerical-experimental methodology for simulating the aerodynamic forces acting on a moving vehicle passing through the wake of a bridge tower under cross wind"*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (104-106), 256-265.

Rolén, C., Rung, T. and Wu, D., 2004. *"Computational modelling of cross-wind stability of highspeed trains"*. ECCOMAS 2004 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering.

Sakamoto, H., Moriya, M., Takai, K. and Obata, Y., 2001. *"Development of a new type snow fence with airfoil snow plates to prevent blowing snow disasters: Part 1, Evaluation of performance by blowing snow simulation in a wind tunnel"*. J.Nat.Disaster Sci., (23), 1-11.

Samartín, A.F., 1979. Aplicación del método de los elementos finitos al análisis estructural de tableros de puentes: discurso de inauguración del Curso Académico 1979-1980.

Sañudo-Fontaneda, L.A., Castro-Fresno, D., Del Coz-Díaz, J.J. and Rodríguez-Hernandez, J., 2012. *"Classification and comparison of snow fences for the protection of transport infrastructures"*. Journal of Cold Regions Engineering, (25), 162-181.

Scanivalve, fabricante de instrumentación. [www.scanivalve.com](http://www.scanivalve.com). Fecha de acceso: 6/02/2014.

Schober, M., Weise, M., Orellano, A., Deeg, P. and Wetzel, W., 2010. *"Wind tunnel investigation of an ICE 3 endcar on three standard ground scenarios"*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, (98), 345-352.

Shao, X.M., Wan, J., Chen, D.W. and Xiong, H.B., 2011. *"Aerodynamic modeling and stability analysis of a high-speed train under strong rain and crosswind conditions"*. Journal of Zhejiang University: Science A, (12), 964-970.

Sterling, M., Quinn, A.D., Hargreaves, D.M., Cheli, F., Sabbioni, E., Tomasini, G., Delaunay, D., Baker, C.J. and Morvan, H., 2010. "A comparison of different methods to evaluate the wind induced forces on a high sided lorry". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (98), 10-20.

Stull, R., 2000. *Meteorology For Scientists and Engineers*. Brooks/Cole, USA.

Stull, R.B., 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Suzuki, M., Tanemoto, K. and Maeda, T., 2003. "Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (91), 209-218.

Tabler, R.D. and Jairell, R.L., 1993. "Trapping efficiency of snow fences and implications for system design". *Transportation Research Record No. 1387, Snow Removal and Ice Control Technology (Papers presented at a Symposium Sept. 14-18, 1992, Minneapolis, MN)*. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, 108-114.

Tabler, R. D., 1994. Design guidelines for the control of blowing and drifting Snow. Strategic highway research program, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Tabler, R.D. and Meena, J.A., 2007. "Effects of snow fences on crashes and road closures: A 34-year study on wyoming interstate-80". 13th International Conference on Cold Regions Engineering, 23-26 July.

Testo, fabricante de instrumentos de medida. <http://www.academiatesto.com.ar>. Fecha de acceso: 5/02/2014.

Tielkes, T., Heine, C., Möller, M. and Driller, J., 2008. "A probabilistic approach to safeguard cross wind safety of passenger railway operation in Germany: The new DB guideline ril 80704". *Proceedings of the Eighth World Congress on Railway Research, South Korea*.

Torita, H. and Satou, H., 2007. "Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction". *Agricultural and Forest Meteorology*, (145), 186-194.

Tsubokura, M., Kobayashi, T., Nakashima, T., Nouzawa, T., Nakamura, T., Zhang, H., Onishi, K. and Oshima, N., 2009. "Computational visualization of unsteady flow around vehicles using high performance computing". *Computers and Fluids*, (38), 981-990.

Tsubokura, M., Nakashima, T., Kitayama, M., Ikawa, Y., Doh, D.H. and Kobayashi, T., 2010. "Large eddy simulation on the unsteady aerodynamic response of a road vehicle in transient crosswinds". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, (31), 1075-1086.

Tu, J., 2013. *Computational fluid dynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.

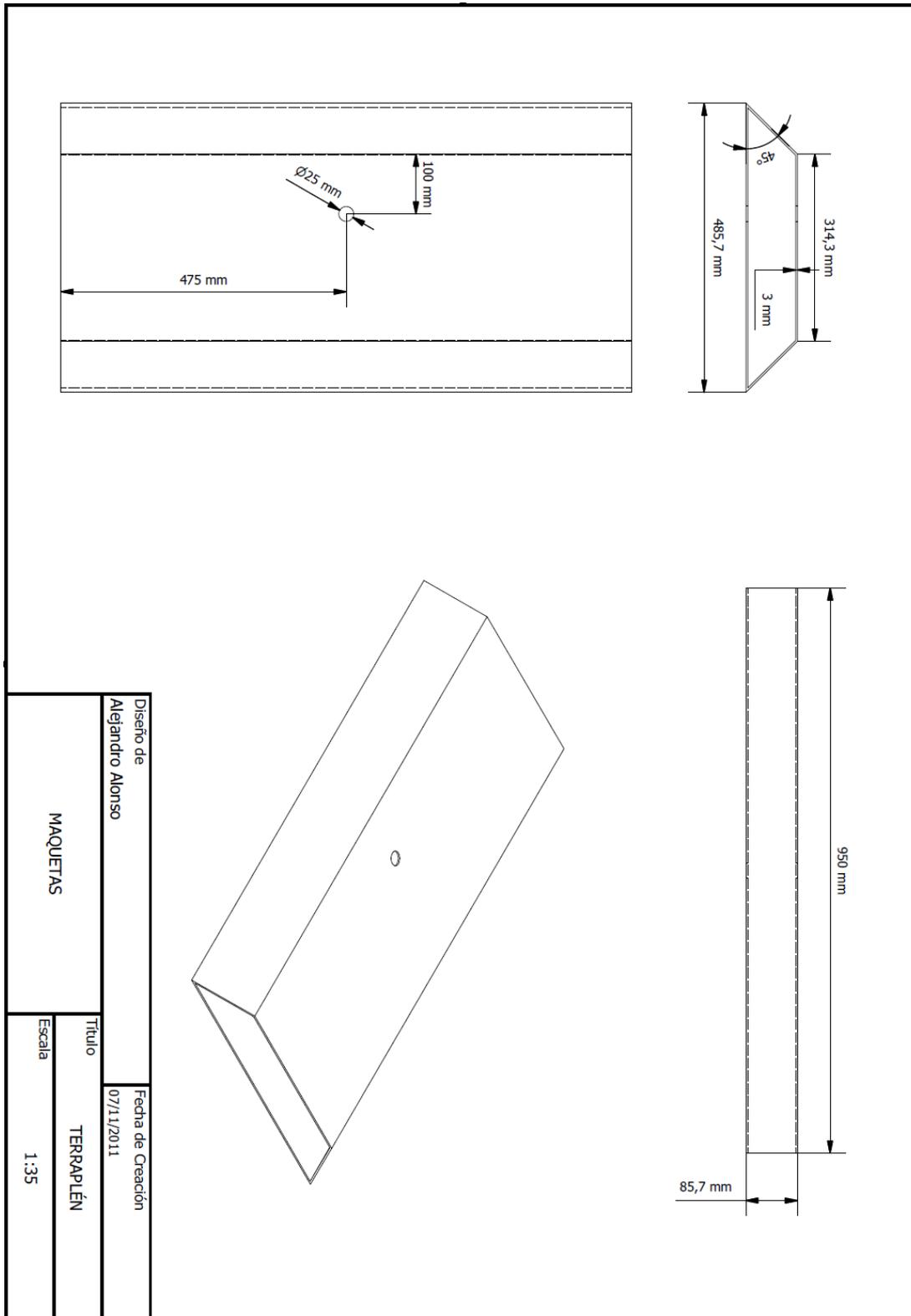
- 
- Tuzet, A. and Wilson, J.D., 2007. "Measured winds about a thick hedge". *Agricultural and Forest Meteorology*, (145), 195-205.
- UNE-EN 14067-6, 2010. Aplicaciones ferroviarias-Aerodinámica-Parte 6: Requisitos y procedimientos de ensayo para la evaluación del viento cruzado. Comité europeo de normalización (CEN), Bruselas.
- Van der Hoven, I., 1957. "Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour". *Journal of Meteorology*, (14), 160.
- Wendt, J.F., 2009. *Computational fluid dynamics. An introduction*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education, England.
- Wendt, J.F., 2009. *Computational fluid dynamics. An introduction*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wilcox, D.C., 1988. "Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models". *AIAA Journal*, (26), 1299-1310.
- Wilcox, D.C., 2004. *Turbulence Modelling for CFD*. DCW Industries, Inc., California, USA.
- Wilson, J.D. and Yee, E., 2003. "Calculation of winds disturbed by an array of fences". *Agricultural and Forest Meteorology*, (115), 31-50.
- Wolf-Heinrich, H., 1998. *Aerodynamics of Road Vehicles*. SAE, USA.
- Yeh, C.P., Tsai, C.H. and Yang, R.J., 2010. "An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (98), 520-532.
- Yun, S.H., Ku, Y.C., Rho, J.H., Ko, T.H., Kwon, H.B. and Lee, D.H., 2006. "Numerical Study on the Interactions between Rail Vehicle and Wind Fence under Strong Cross Wind-For the Effective Wind Fence Design". 7<sup>th</sup> World Congress on Railway Research. Montréal, Canada, 4-8 June.
- Zikanov, O., 2010. *Essential Computational Fluid Dynamics*. John Wiley & Sons, New Jersey.



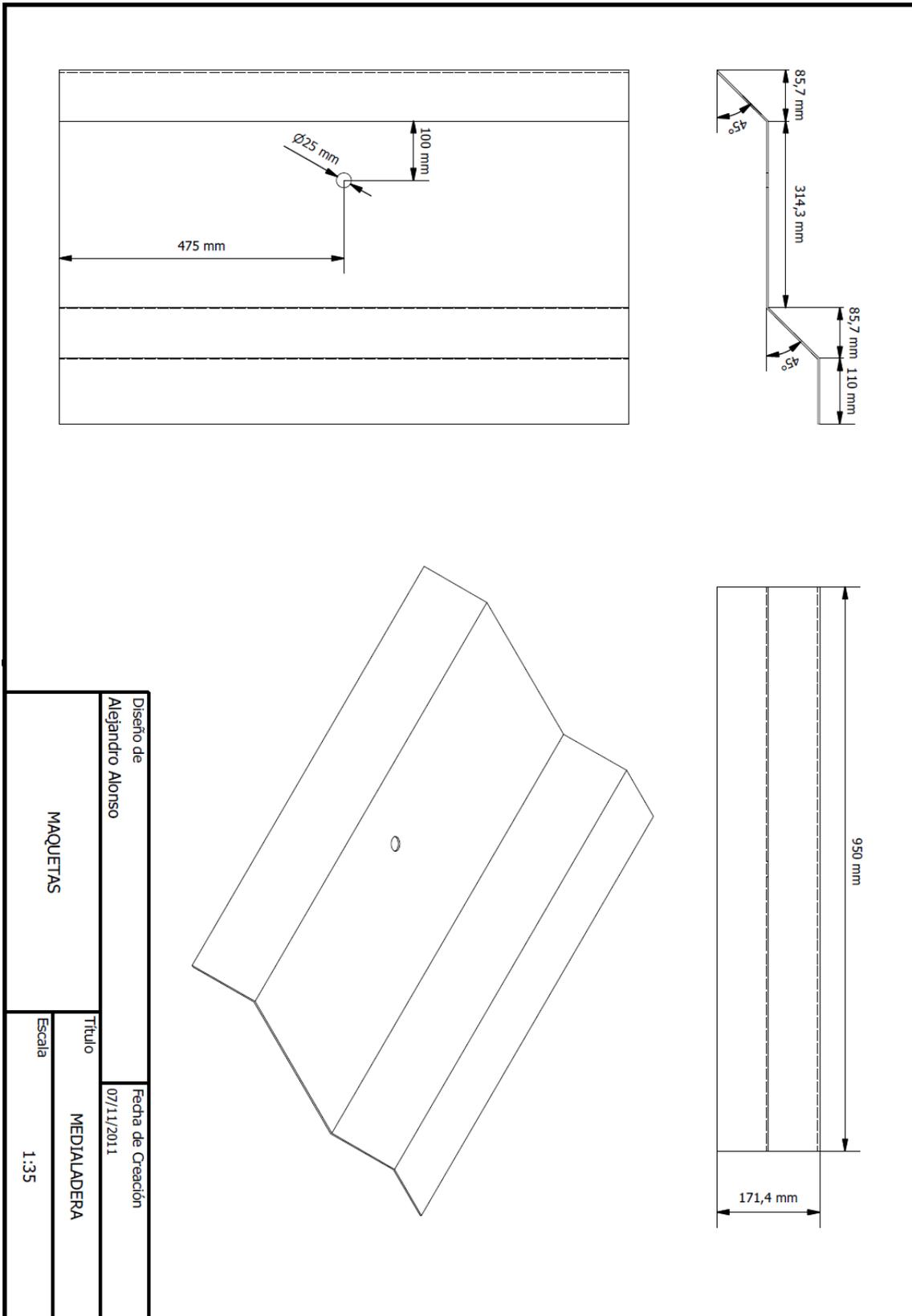


## A) PLANOS

### A.I. Perfiles de Terreno

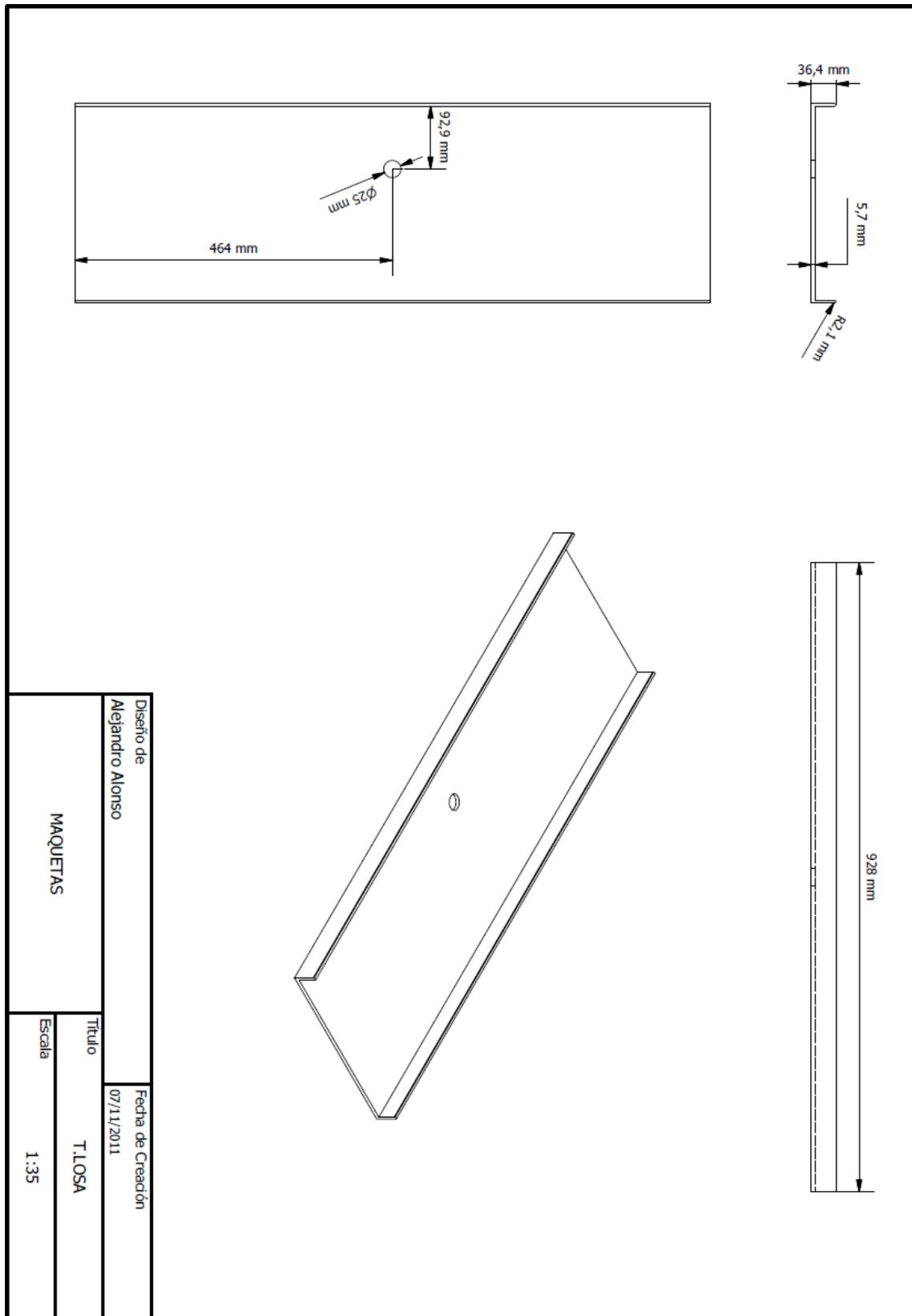




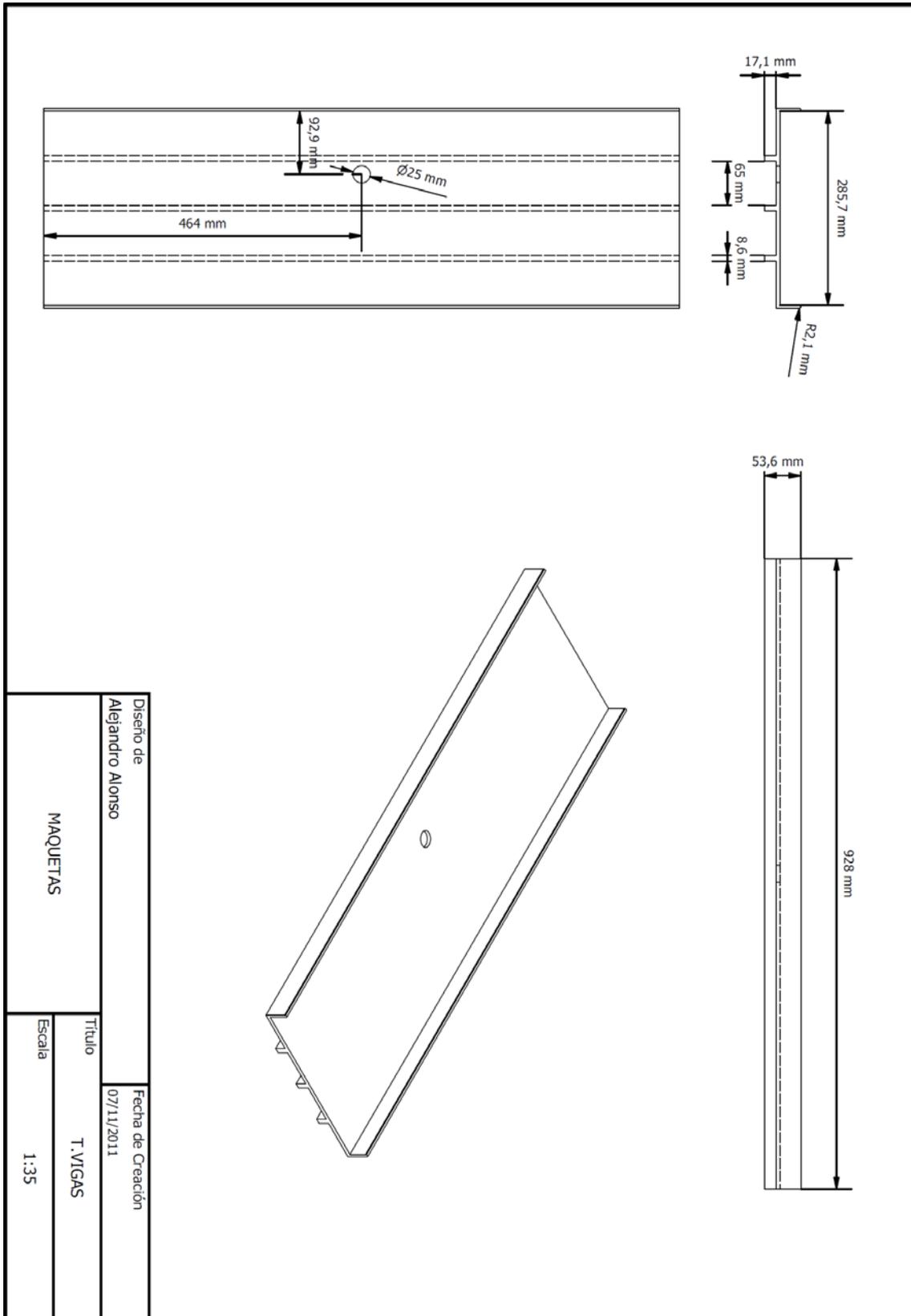




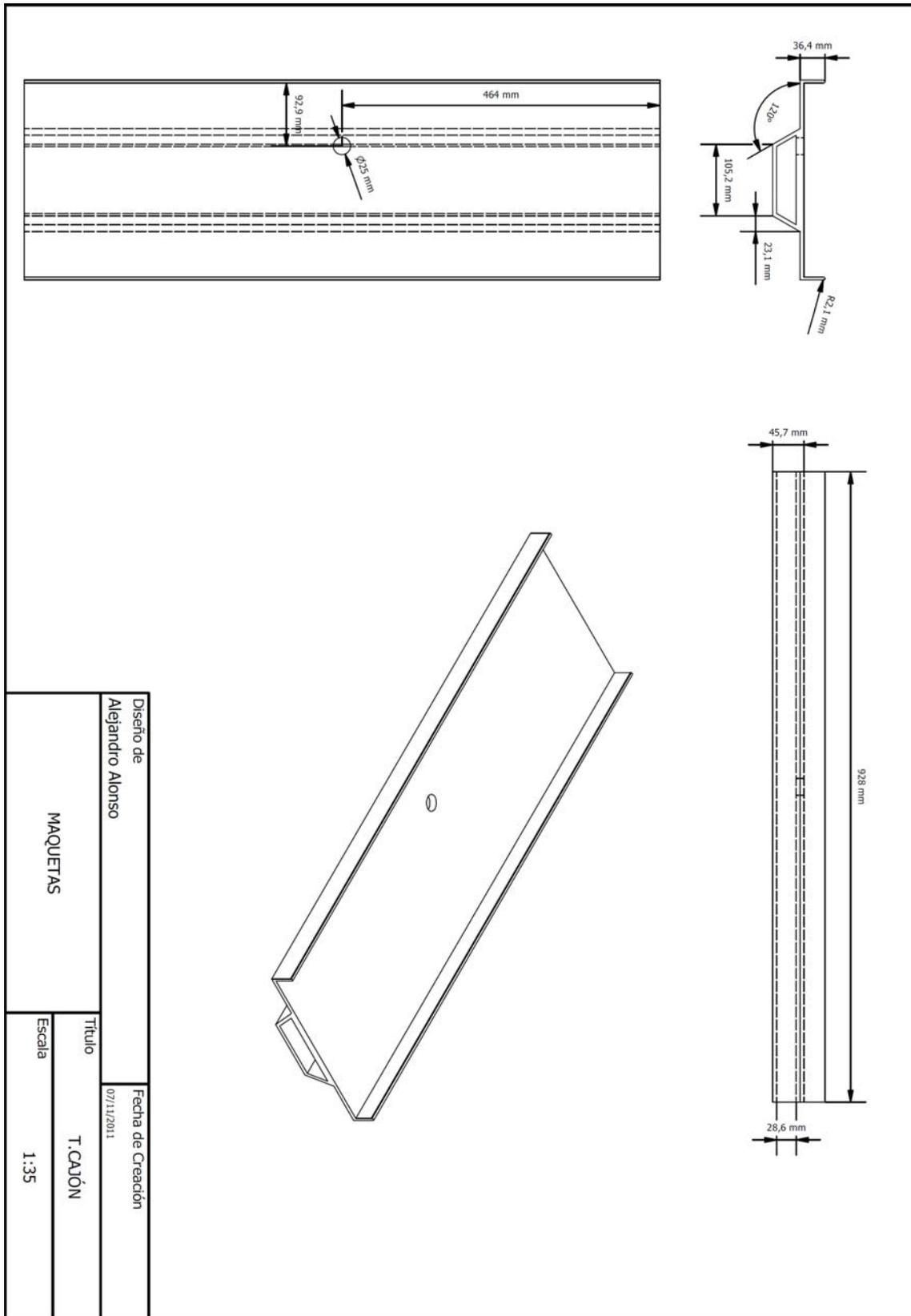
## A.II. Tableros de Viaductos













### A.III. Barreras Cortaviento

