

TÚNELES AERODINÁMICOS PARA ENSAYOS DE MEDIDA DE CARGAS DE VIENTO EN EDIFICIOS

José Meseguer, Angel Sanz-Andrés, Sebastián Franchini y Santiago Pindado.

Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" (IDR/UPM), E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid

Resumen

Es una realidad que la mejora de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la edificación, junto con la incorporación de nuevos materiales y la adopción de nuevas técnicas de construcción, permite que las edificaciones sean cada día más sofisticadas y audaces. A lo anterior hay que añadir que existe una tendencia a construir edificios de carácter emblemático, y debido al carácter singular de muchas de estas edificaciones, de formas muy alejadas de las que se recogen en la normas de cálculo de cargas de viento, resulta complicado estimar con fiabilidad las cargas aerodinámicas sobre las mismas. Por esta razón hay cada vez más construcciones en las que las cargas del viento (estáticas y dinámicas) juegan un papel importante, y ocurre así que el viento, un factor secundario en la construcción tradicional, es ahora determinante a la hora de evaluar las cargas de diseño sobre bastantes construcciones.

Cuando se dan estas circunstancias de incertidumbre sobre la acción del viento, el proceso de diseño debe avanzar sometido al riesgo que supone el desconocimiento de las cargas de viento, lo que conlleva aplicar factores de seguridad exagerados que pueden desembocar en diseños en extremo conservadores, o bien intentando determinar con más precisión las cargas aerodinámicas, para lo que hay que acudir, normalmente, a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos.

Los túneles aerodinámicos son pues instrumentos cuya finalidad es suministrar información sobre las particularidades del viento en las proximidades del edificio en consideración, proveer información sobre la distribución de presión en las superficies externas del mismo y sobre las cargas globales producidas por el viento y, si la estructura es flexible y susceptible de experimentar fenómenos aeroelásticos, proporcionar los datos necesarios sobre efectos dinámicos inducidos por el viento.

La Universidad Politécnica de Madrid posee varias instalaciones para medidas de cargas de viento que proporcionan servicios de ensayos aerodinámicos dentro de un amplio espectro, que se extiende desde la medida de las cargas del viento sobre vehículos (aeronaves, automóviles, trenes, vehículos marinos), y construcciones (edificios singulares, puentes, estadios deportivos, etc.), hasta aplicaciones agrícolas (barreras cortavientos para protección de cultivos o para protección de entornos habitados, estelas de edificios y montes), y domésticas (ventilación natural de casas y factorías industriales, apantallamientos, y un largo etcétera), habiéndose realizado hasta la fecha más de cien ensayos para empresas nacionales y extranjeras.

En esta comunicación se describe en primer lugar la configuración típica de un túnel aerodinámico para aplicaciones no aeronáuticas, a continuación se detallan las condiciones que permiten asegurar la validez de los ensayos en túnel como fuente de conocimiento para las cargas de viento. También se presentan las instalaciones de ensayos de la Universidad Politécnica de Madrid, tanto las que ya están en funcionamiento como las que están en construcción, de inminente entrada en servicio, y por último se presentan algunos ejemplos de ensayos en túnel representativos.

1.- Introducción

Un túnel aerodinámico (o túnel de viento en su traducción literal del inglés) es un instrumento científico y tecnológico de aplicación a problemas aerodinámicos, tanto aeronáuticos como otros

relacionados con muy diversos aspectos de la ciencia y la tecnología que aparecen en la vida cotidiana. Habida cuenta de la multiplicidad de sus aplicaciones, se entiende que la mayoría de los túneles para ensayos de cargas de viento estén contruidos para un cierto uso específico, lo que suele condicionar muchos aspectos del diseño. Resulta evidente que un túnel para aplicaciones de aerodinámica no aeronáutica, que ha de funcionar a baja velocidad, en régimen incompresible, ha de tener unos requisitos de diseño muy distintos a los de un túnel para determinar las características de perfiles de ala en régimen supersónico, o que las necesidades de un ensayo de calibración de anemómetros difieran notablemente de las de medidas de cargas aerodinámicas sobre obstáculos no fuselados.

Todo ello hace que exista una amplia variedad de túneles aerodinámicos, pudiéndose encontrar una gran diversidad en los números de Mach de funcionamiento, tamaños de cámaras de ensayo y formas de los conductos. Atendiendo al primer concepto (número de Mach) los túneles pueden funcionar en régimen subsónico (y dentro de éste incompresible o compresible), en régimen transónico, en régimen supersónico o en régimen hipersónico. Respecto al tamaño, si éste se mide, por ejemplo, por el área de la sección de la cámara de ensayos, los valores típicos de las secciones de ensayo pueden variar varios órdenes de magnitud, desde valores típicos de 0.01 m² de los túneles supersónicos hasta casi 1000 m² de algunos grandes túneles subsónicos (figura 1).

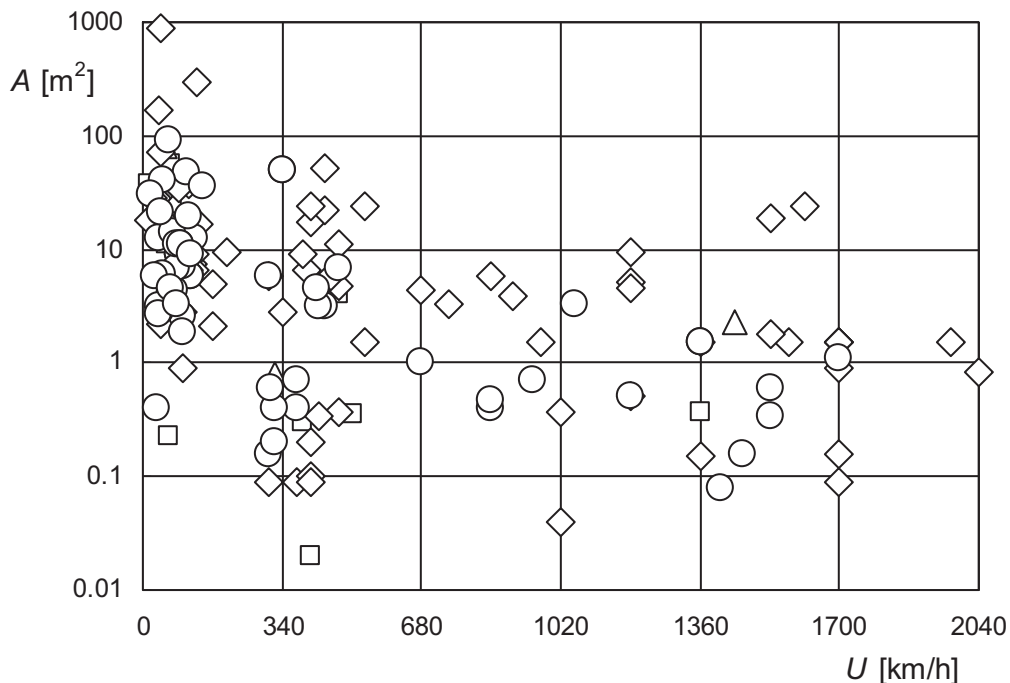


Fig. 1. Tamaño, medido por el área de la sección de ensayo, A , en función de la velocidad en la cámara en ensayos, U , de diversos túneles aerodinámicos. Los símbolos indican el área geográfica donde se ubican los diversos túneles de acuerdo con la siguiente clave: EE.UU. (rombos), Europa (círculos), Canadá (triángulos) y Japón (cuadrados); datos obtenidos de [1].

En una descripción en extremo simplificada un túnel de viento es un conducto por el que se hace pasar un flujo de aire en condiciones controladas de temperatura, velocidad y turbulencia. Para conseguir estas condiciones en la cámara de ensayos suele ser preciso colocar ciertos elementos acondicionadores antes y después de la cámara de ensayos. Centrando la atención en la geometría global del conducto, los túneles aerodinámicos pueden ser, según tengan o no conducto de retorno, de circuito cerrado (con un circuito de retorno específico) o circuito abierto, en los que el aire retorna a través del local donde está el túnel (así ocurre con la mayoría de los túneles aerodinámicos de IDR/UPM, [2, 3]) o bien se toma directamente de la atmósfera y se descarga posteriormente a ésta. Respecto a la cámara de ensayos, en los túneles subsónicos ésta puede ser de sección abierta, es decir, sin paredes laterales, o de sección cerrada (con paredes laterales). Aunque esta pareja de alternativas parece conducir a únicamente tres tipos de túnel (si la corriente retorna a través del local no es recomendable emplear una cámara de sección

abierta por las interferencias entre la vena fluida de la cámara y el flujo de retorno), la realidad es que dentro de estos tres tipos básicos la variedad de diseños es enorme.

En la figura 2 se muestran de forma esquemática las plantas de los tres tipos básicos de túneles [4]. En un túnel sin circuito de retorno el aire pasa a través del conducto, normalmente organizado en la secuencia tradicional de sección de entrada (U), contracción (C), cámara de ensayos (E), difusor de adaptación a la sección de ventiladores (A), ventilador (V) y difusor de salida (D). En los túneles con conducto de retorno (R) este puede ser único, doble o incluso anular (aunque en este último caso se estaría prácticamente en el caso representado en el segundo esquema de la figura 2).

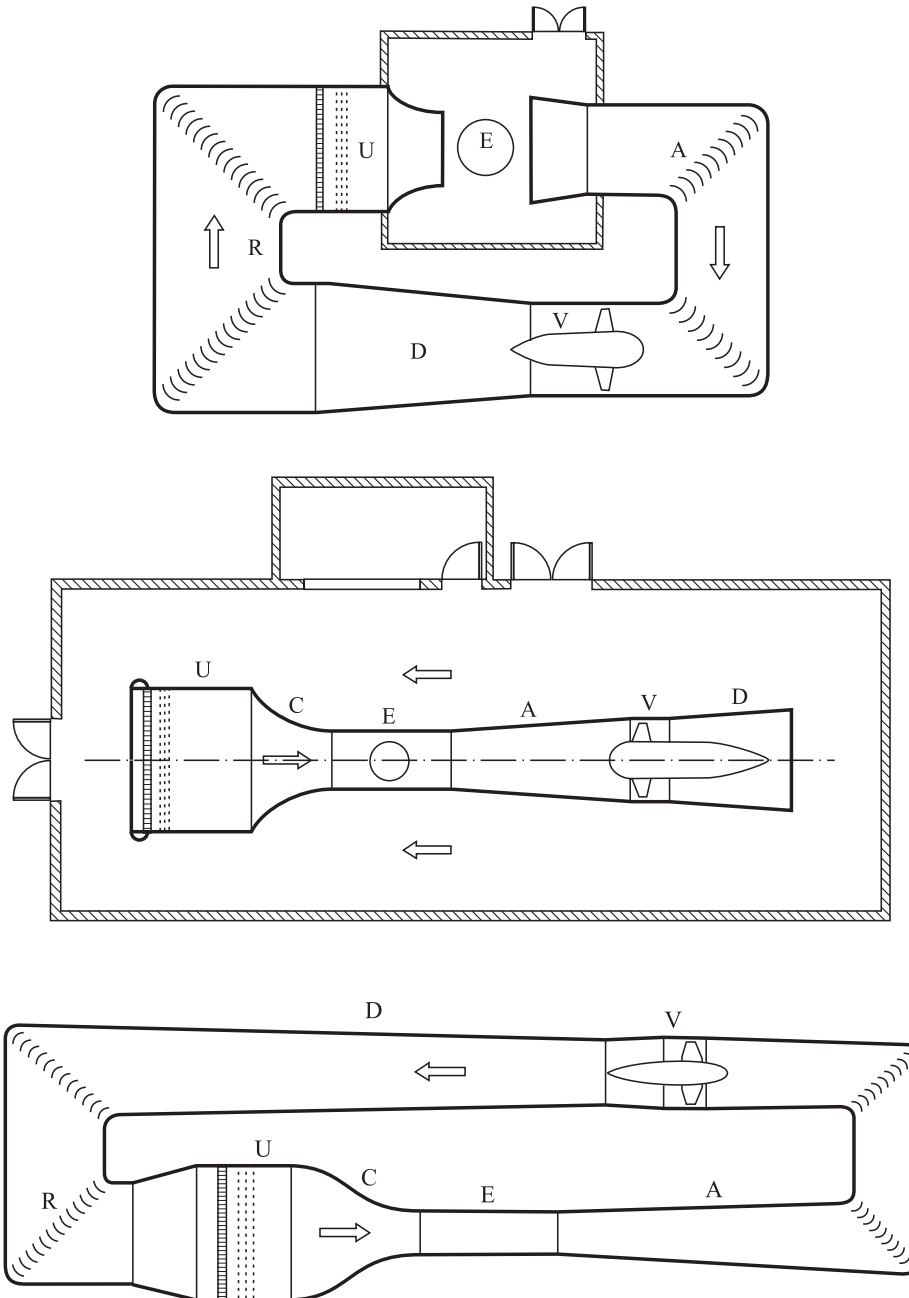


Fig. 2. Tipos básicos de túnel aerodinámico: de sección de ensayos abierta y con circuito de retorno, de sección de ensayos cerrada y sin circuito de retorno, y de sección de ensayos cerrada y con circuito de retorno [4]. Para la identificación de los distintos componentes véase el texto.

Cada configuración presenta sus ventajas y sus inconvenientes. Así, en los túneles sin circuito de retorno el coste de fabricación suele ser menor, pero también lo es el rendimiento energético de la instalación (para una misma potencia consumida la velocidad en la cámara de ensayos es menor

debido a que las pérdidas en el flujo de retorno a través del local son más altas que las que se tienen en un conducto de retorno bien diseñado); además estos túneles son más ruidosos, y en los abiertos a la atmósfera su operación puede depender de condicionantes meteorológicos.

Las ventajas de los túneles con circuito de retorno específico son que ofrecen mayores posibilidades de control de la vena fluida, menor consumo de energía y menor ruido, pero por contra la inversión económica inicial es más alta y en ocasiones puede ser necesario renovar periódicamente el aire del conducto (caso de ensayos de motores o de visualización con humo) e incluso puede ser necesario instalar cambiadores de calor en el interior del conducto para refrigerar el aire si las sesiones de ensayos fueran muy prolongadas.

Los túneles para usos aeronáuticos y muchos túneles para aplicaciones de ingeniería civil suelen tener cámaras de ensayos cortas, con longitudes que suelen ser unas dos o tres veces el tamaño característico transversal de la cámara de ensayos. Esto no es así en aquellos túneles para ensayos de edificaciones donde se desea simular la capa límite terrestre, pues aquí se necesita una cierta distancia para que la capa límite se pueda desarrollar (al menos diez veces la dimensión transversal característica). Para generar la capa límite en el túnel se suelen colocar generadores de torbellinos en la sección de entrada (generalmente obstáculos planos de sección triangular) seguidos de una superficie rugosa, con tamaño de rugosidad controlado, que facilite la generación de la capa límite por crecimiento natural [5, 6]; en la figura 3 se muestra un esquema del túnel de simulación de capa límite atmosférica ACLA16, actualmente en construcción en el campus de Montegancedo de la Universidad Politécnica de Madrid.

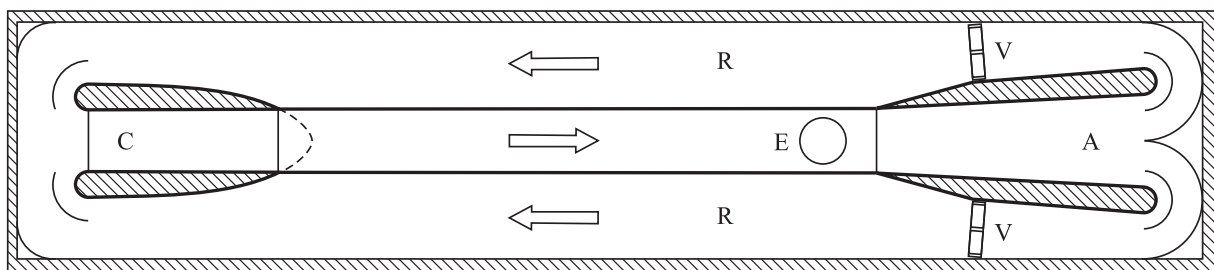


Fig. 3. Planta del túnel aerodinámico de simulación de capa límite atmosférica ACLA16 del Instituto IDR/UPM, situado en el Campus de Montegancedo de la Universidad Politécnica de Madrid. La cámara de ensayos tiene 2.2 m de anchura y longitud total del túnel, incluido el conducto de retorno, es de 40 m. Para la identificación de los distintos componentes véase el texto.

2.- Criterios de diseño

La validez de los ensayos en túnel con un modelo a escala requiere la existencia de semejanza geométrica, semejanza cinemática y semejanza dinámica entre el flujo alrededor del modelo y el flujo alrededor del obstáculo real, lo que en un amplísimo número de aplicaciones se traduce, aparte de que el modelo de ensayo sea una réplica aerodinámica del cuerpo real, en la igualdad de ciertos parámetros adimensionales en ambos flujos, el real y el generado en el túnel. De entre estos parámetros los más relevantes en construcción, donde las velocidades son pequeñas en relación con la del sonido (y por tanto los efectos de compresibilidad despreciables) y los cuerpos a ensayar suelen ser además muy rígidos, son sin duda el número de Reynolds y el número de Jensen [7].

El número de Reynolds, $Re = \rho UL/\mu$, es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción, normalmente expresadas en función de parámetros geométricos del cuerpo (la longitud característica L) y del flujo (densidad, ρ , velocidad, U , y viscosidad dinámica, μ). En una estructura de formas suaves y redondeadas, sin aristas, el valor del número de Reynolds que marca el límite de la transición en la capa límite de régimen laminar a régimen turbulento, el llamado número de Reynolds crítico, depende entre otros factores de la turbulencia de la corriente incidente y de la rugosidad de la superficie de la estructura. Como el número de Reynolds influye en la transición y

ésta en el desprendimiento de la capa límite, en cuerpos fuselados puede haber una dependencia de las cargas aerodinámicas con el valor de este parámetro. Tal dependencia puede plantear errores de interpretación al ensayar modelos a escala de cuerpos fuselados o redondeados, pues pudiera ser que siendo el régimen turbulento en la capa límite del obstáculo real, en los ensayos el número de Reynolds fuera inferior al crítico, de modo que la capa límite fuera en todas partes laminar, con lo que se tendrían, de haber desprendimiento, configuraciones fluidas muy dispares.

Si el fluido de trabajo es el mismo tanto en el flujo alrededor del prototipo como en el flujo alrededor del modelo, para conservar el número de Reynolds hay que conservar el valor del producto UL , de modo que si la escala del modelo es, por ejemplo, 1/100, la velocidad en los ensayos con el modelo tendría que ser cien veces mayor que en la realidad, y en este caso pudiera ser que el régimen del flujo alrededor del modelo no fuera el mismo que sobre el obstáculo real (pues a altas velocidades sí son importantes los efectos de compresibilidad del aire, que se miden con el número de Mach, $M = U/a$, cociente entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido en el mismo). Así pues, resulta evidente que manteniendo constantes las propiedades del fluido de trabajo, al ensayar con modelos a escala es imposible conservar a la vez el valor de ambos parámetros, números de Reynolds y de Mach.

La consecuencia inmediata de lo expuesto es que si no se actúa sobre las propiedades del fluido en la aerodinámica de las edificaciones resulta muy difícil, si no imposible, reproducir el valor del número de Reynolds, lo que afortunadamente es irrelevante si se trata de aerodinámica no aeronáutica, pues enseña la experiencia que cuando los cuerpos expuestos al viento no son fuselados ni redondeados, los coeficientes adimensionales de fuerzas y momentos son independientes del valor del número de Reynolds una vez que este parámetro ha superado el valor crítico. La razón de este comportamiento es que en obstáculos con aristas o con bordes poco redondeados la capa límite se desprende en las aristas de barlovento del obstáculo para números de Reynolds moderadamente pequeños, situación que no cambia al aumentar la velocidad.

El número de Jensen, $Je = L/z_0$, es la relación entre la longitud característica del modelo, L , y la longitud de rugosidad del terreno, z_0 , y con su conservación se pretende que la turbulencia del flujo en el túnel aerodinámico tenga la misma forma que la del flujo en el viento natural. Este requisito se cumple con una aproximación razonable en los túneles aerodinámicos con simulación de capa límite terrestre, donde se intenta que las estructuras y el tamaño típicos de los torbellinos presentes en el viento natural estén representados en el túnel aerodinámico a la misma escala que la empleada en la estructura. El número de Jensen puede ser importante si su valor es pequeño, pero en la mayoría de los obstáculos la variación de los resultados con el número de Jensen deja de ser significativa cuando este número es moderadamente grande, $Je > 2000$, a partir del cual los resultados son ya prácticamente independientes de este parámetro. También hay que tener en cuenta a la hora de planificar un ensayo en túnel que posiblemente en la realidad el número de Jensen varíe a lo largo del tiempo, pues según crezca la vegetación o se levanten o modifiquen otras edificaciones próximas a la estructura en consideración variará la longitud de rugosidad z_0 y en consecuencia el valor del número de Jensen. Esta falta de definición respecto a las condiciones reales que la estructura deberá encarar en el futuro puede aconsejar, en ocasiones, realizar los ensayos considerando el caso más desfavorable susceptible de ser normalizado, tal puede ser el de corriente incidente con un perfil de velocidades muy uniforme (correspondiente a terreno despejado y sin obstáculos corriente arriba de la estructura), y con un nivel de turbulencia moderadamente bajo.

No son éstos los únicos condicionantes a considerar; si la estructura a ensayar es suficientemente flexible el viento puede excitar su movimiento, apareciendo en consecuencia un problema dinámico de inestabilidades aeroelásticas que dan lugar a otros criterios de semejanza relativos al movimiento del cuerpo que también es preciso satisfacer [7,8].

Los túneles aerodinámicos de baja velocidad para aplicaciones de aerodinámica civil suelen ser instrumentos voluminosos, que requieren mucho espacio en un laboratorio o incluso un edificio dedicado. Esto es así por los requisitos de la instalación relativos tanto al número de Reynolds

como a la potencia requerida. En efecto, cualquiera que sea el caso interesa que el número de Reynolds sea lo más alto posible, por encima de cien mil y preferiblemente por encima de un millón. Teniendo en cuenta la definición del número de Reynolds, $Re = \rho UL/\mu$, aumentar el valor de este parámetro significa aumentar el valor de la velocidad en la cámara de ensayos, U , aumentar el valor de la longitud característica de los modelos a ensayar, L , o de ambos.

A la hora de fijar los valores nominales de estas magnitudes hay otros condicionantes a tener en cuenta. El valor de L está limitado por la sección de la cámara de ensayos, pues el modelo no puede bloquear excesivamente el conducto. Un valor máximo típico del coeficiente de bloqueo (la relación entre el área frontal del modelo y el área frontal de la sección de ensayo) puede ser 0,1, lo que significa que la cámara de ensayos habría de tener una sección con un área al menos un orden de magnitud superior a L^2 . Así pues, como la potencia requerida es proporcional a L^2U^3 , resulta evidente que es más ventajoso incrementar el valor del número de Reynolds aumentando el tamaño de la cámara de ensayos (aumentando en consecuencia el tamaño del modelo) que aumentando la velocidad en la misma.

Hay otra razón que también aconseja que la cámara de ensayos sea grande, sobre todo en los túneles para simulación de capa límite atmosférica: si se pretende que la relación entre el tamaño del modelo y el espesor de la capa límite del túnel guarde una cierta proporción con la realidad, la escala del modelo fija la de la capa límite, y como el espesor de la capa límite terrestre es grande (quinientos metros o más), la consecuencia es que o la cámara de ensayos es grande o se elige una escala muy pequeña para el modelo, pero esta segunda opción, aparte de los problemas asociados a un número de Reynolds bajo, complica mucho la construcción e instrumentación de los modelos de ensayos.

Además, si los requisitos de ensayo lo permiten, diseñar un túnel aerodinámico de grandes dimensiones que funcione a baja velocidad, presenta otras ventajas adicionales, pues al ser la velocidad pequeña también lo serán las cargas aerodinámicas sobre las diversas partes del conducto, lo que permite abaratar su construcción, ya que al estar poco solicitado se podrán emplear materiales más baratos en su fabricación. Entre las desventajas de la baja velocidad hay que señalar que una velocidad del aire excesivamente pequeña empeora la relación señal/ruido de las medidas.

Los elementos que conforman el conducto de un túnel de viento están casi siempre ordenados según la secuencia clásica de contracción, cámara de ensayos, adaptador, ventiladores y difusor (y circuito de retorno si lo hubiera, figuras 2 y 3).

La contracción tiene como finalidad acelerar la corriente de aire y que ésta llegue a la cámara de ensayos con un perfil de velocidades uniforme, baja turbulencia y capa límite delgada. La contracción puede ser bidimensional (se contrae únicamente en uno de los planos de simetría del túnel), lo que simplifica enormemente el proceso de construcción, o tridimensional (se contrae en los dos planos de simetría), lo que permite un control mayor sobre el crecimiento de la capa límite.

La cámara de ensayos, si es cerrada, suele ser de área constante o levemente creciente para compensar el crecimiento de la capa límite de las paredes, de sección cuadrada o rectangular. La cámara de ensayos puede tener las esquinas biseladas, para minimizar interferencias entre capas límites, y debe tener ventanas y puertas para permitir la instalación y el desmontaje de los modelos en su interior. Generalmente es preciso adaptar el conducto desde la sección de salida de la cámara de ensayos a la sección de entrada a los ventiladores, pues ambas secciones no suelen coincidir ni en área ni en forma. El adaptador se diseña como un difusor, de modo que el ángulo de divergencia de las paredes ha de ser pequeño (menor de 7°) para evitar el desprendimiento de la corriente. Si esta limitación en el ángulo de expansión diera lugar a longitudes del adaptador intolerables o incompatibles con otros requisitos del diseño, hay que acudir a adaptadores multiconducto en los que se cumpla individualmente en cada uno de ellos la limitación antes citada.

El difusor tiene como finalidad decelerar la corriente de modo que ésta descargue al ambiente con

una velocidad lo más baja posible. Las consideraciones de diseño, respecto al posible desprendimiento de la capa límite, son análogas a las realizadas para el adaptador. Ante una situación de falta de espacio se puede suprimir el difusor a costa de penalizar el rendimiento del túnel y de aumentar el ruido aerodinámico durante su funcionamiento.

El ventilador puede ser único, aunque en ciertos casos utilizar una matriz de ventiladores tiene ciertas ventajas económicas, sobre todo instalaciones cuyo mayor condicionante sea un coste de fabricación pequeño (este es el criterio seguido en los túneles diseñados en IDR/UPM).

Finalmente, si hay circuito de retorno, su diseño se ajusta a los mismos criterios que los usados para el diseño de un difusor en los tramos rectos, y en los codos se suelen colocar álabes guía (con fin de prevenir el desprendimiento de la corriente) sobre cuya forma y disposición existe abundante información [9]. En cualquier caso el proceso de diseño requiere un estudio detallado de cada una de las partes del conducto para asegurar que la vena fluida cumpla los requisitos de uniformidad y nivel de turbulencia requeridos, y que las pérdidas de carga en el conducto sean admisibles.

3.- Los túneles para ensayos aerodinámicos de IDR/UPM

Las instalaciones de ensayos aerodinámicos de la Universidad Politécnica de Madrid aparecen encuadradas en el Instituto Universitario de Microgravedad “Ignacio Da Riva” (IDR/UPM), y están repartidas entre el campus de la Ciudad Universitaria, en la E.T.S.I. Aeronáuticos (tabla 1), y el campus de Montegancedo, en el Centro de Investigación y Tecnología Aeroespacial de la UPM ubicado en el Parque Tecnológico de Montegancedo (tabla 2). En la denominación de las instalaciones la primera letra, A o S, indica si el flujo en la cámara de ensayos es aspirado o soplado, según los ventiladores estén corriente abajo o corriente arriba de dicha cámara, después se indica el número de ventiladores, añadiéndose una C si éstos son centrífugos, y otras claves si fueran necesarias.

Los túneles aerodinámicos disponibles en la actualidad o en fase de construcción, han sido diseñados dentro de IDR/UPM, y constituyen en la actualidad el conjunto de instalaciones de ensayos aerodinámicos donde se realizan la práctica totalidad de los ensayos de esta naturaleza que se efectúan en España.

Túnel	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	<i>c</i> [m]	<i>l</i> [m]	V_{max} [m/s]	Aplicaciones
A9	1.50	1.80	3.00	15.0	28.0	Cargas estáticas y dinámicas
S4	0.90	0.90	2.00	12.0	26.0	Calibración de anemómetros
S1C	0.15	0.80	1.20	9.6	30.0	Cargas estáticas y dinámicas
A4C	0.20	1.80	1.80	7.5	35.0	Cargas estáticas y dinámicas

Tabla 1. Características de los túneles aerodinámicos del Instituto IDR/UPM en funcionamiento en la E.T.S.I. Aeronáuticos (Ciudad Universitaria de Madrid). Anchura, *a*, altura, *b*, y longitud, *c*, de la cámara de ensayos; longitud total del túnel, *l*; velocidad máxima en la cámara de ensayos, V_{max} .

Túnel	<i>a</i> [m]	<i>b</i> [m]	<i>c</i> [m]	<i>l</i> [m]	V_{max} [m/s]	Aplicaciones
A16cla	2.20	2.20	20.00	40.0	30.0	Cargas estáticas y dinámicas
A6	0.50	2.90	3.20	14.5	36.0	Cargas estáticas y dinámicas
S4/2	0.90	0.90	2.00	12.0	26.0	Calibración de anemómetros
S4/3	0.90	0.90	2.00	12.0	26.0	Calibración de anemómetros

Tabla 2. Características de los túneles aerodinámicos del Instituto IDR/UPM en construcción en el Campus de Montegancedo. Anchura, *a*, altura, *b*, y longitud, *c*, de la cámara de ensayos; longitud total del túnel, *l*; velocidad máxima en la cámara de ensayos, V_{max} . La clave “cla” indica que es un túnel de simulación de “capa límite atmosférica”, y las claves “/2” y “/3” que son las réplicas segunda y tercera del túnel S4 ya existente.

De todas las instalaciones de ensayos ya existentes las más empleadas para servicios a la industria son los túneles A9 y S4. El túnel A9 (figura 4) es de corriente aspirada, cámara de ensayos cerrada y circuito fluido abierto (tipo Eiffel). La contracción (1) del túnel A9 es

bidimensional: la corriente sólo se contrae en uno de los planos de simetría del túnel, de forma que el techo y el suelo de la contracción son paralelos al techo y al suelo del laboratorio. La contracción tiene una sección de entrada de 4,8 m de ancho y 1,8 m de alto, con una longitud de 5,25 m. La cámara de ensayos (2) tiene 3 m de longitud y una sección de 1,8 m de alto y 1,5 m de ancho; a la cámara de ensayos se accede desde dos plataformas, una a cada lado del túnel, mediante sendas puertas. Corriente abajo de la cámara de ensayos está el adaptador a la sección de ventiladores (3), cuya longitud es de 6 m. El túnel A9 está impulsado por nueve ventiladores SODECA serie HTC 90, de ocho palas, con una potencia nominal de 7.5 kW y un diámetro interior de 0,9 m cada uno (4). Los ventiladores, de velocidad regulable, están dispuestos según una matriz de 3×3 y descargan directamente al local. Debido a la falta de espacio el túnel A9 no tiene difusor corriente abajo de los ventiladores, y el retorno de la corriente tiene lugar a través del recinto del laboratorio donde está ubicado el túnel.

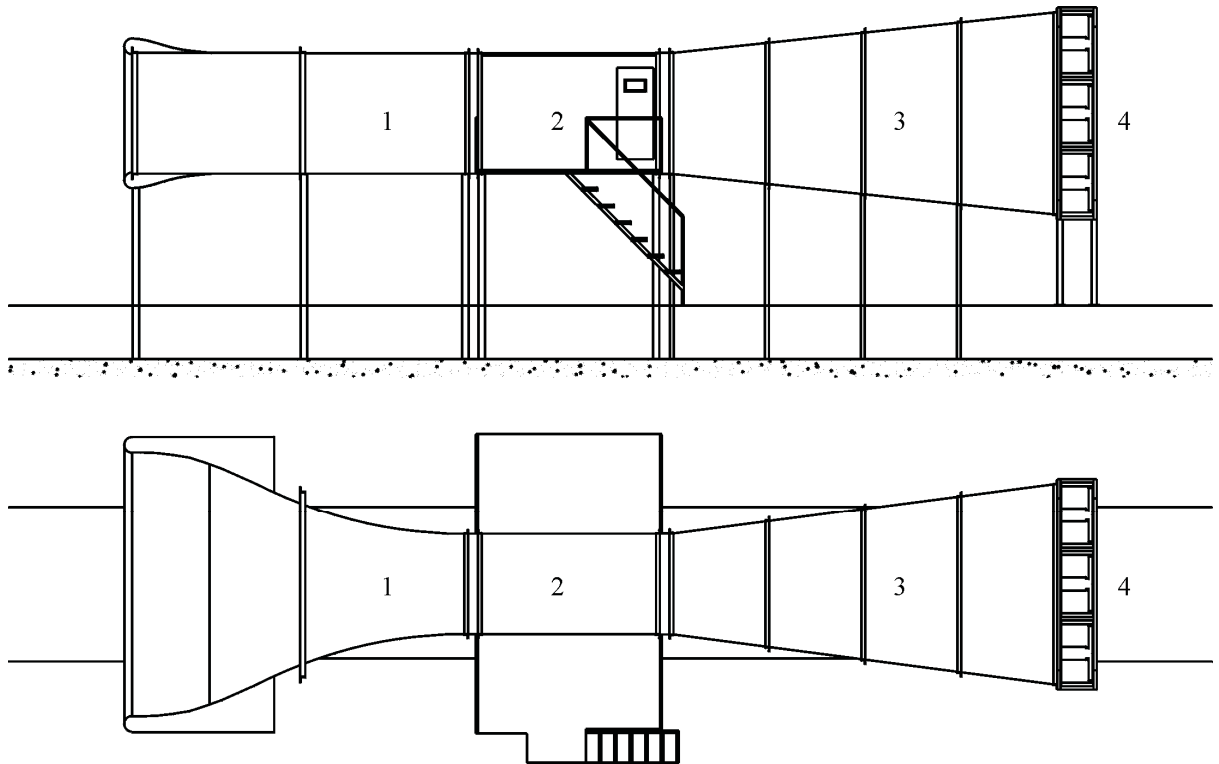


Fig. 4. Esquema del túnel A9 del Instituto IDR/UPM. En el sentido de la corriente los elementos son: contracción (1), cámara de ensayos (2) y difusor (3) y ventiladores (4).

El túnel S4 es de corriente soplada, cámara de ensayos cerrada y circuito abierto. El túnel S4 ha sido diseñado para cumplir los requisitos específicos de calibración de anemómetros industriales, de acuerdo con las especificaciones de la red europea MEASNET, superando largamente las mil horas de funcionamiento al año. El túnel S4 (figura 5) está impulsado por cuatro ventiladores análogos a los del túnel A9, dispuestos en una matriz de 2×2. Cada ventilador descarga en su cámara de tranquilización, de 1,2 m de longitud, que finaliza en un panel de abeja que actúa como elemento enderezador de corriente. Corriente abajo de los enderezadores hay varios juegos de rejillas cuya finalidad es uniformizar el perfil de velocidades y la turbulencia de la corriente incidente. Tras los elementos uniformizadores la corriente entra en la contracción, cuyas secciones de entrada y de salida son cuadradas, la primera de 2 m de lado y la segunda de 0,9 m de lado (la relación de contracción es de 4,9/1). Esta contracción, cuya longitud es de 1,6 m, es tridimensional, con dos planos de contracción y, al igual que la cámara de ensayos y el difusor, está montada sobre ruedas que discurren por raíles para facilitar las tareas de operación y mantenimiento del túnel. La cámara de ensayos es de sección cuadrada, de 0,9 m de lado, con una longitud de 1,2 m. El difusor final tiene una longitud de 1,6 m y está dividido internamente en dieciséis conductos (de otra forma su longitud tendría que ser mucho mayor para no superar la limitación del ángulo de apertura del conducto).

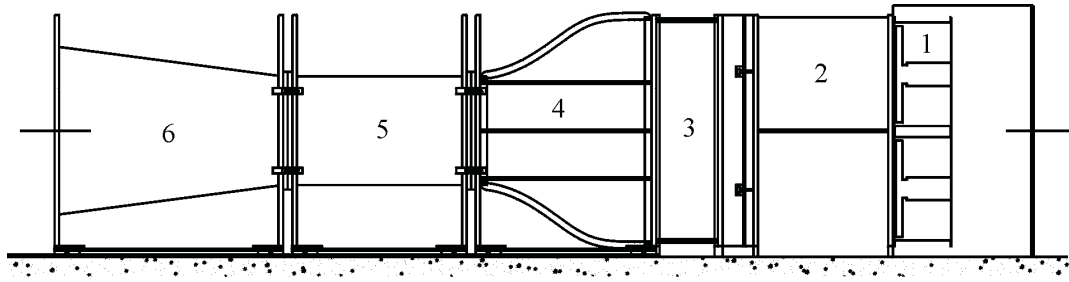


Fig. 4. Esquema del túnel S4 del Instituto IDR/UPM. En el sentido de la corriente los elementos son: ventiladores (1), cámaras de tranquilización (2), enderezadores y uniformizadores de corriente (3), contracción (4), cámara de ensayos (5) y difusor de salida (6).

4.- Técnicas de ensayo

En relación con las técnicas de ensayo en túnel, los procedimientos empleados varían ampliamente dependiendo de los objetivos particulares y los recursos disponibles, si bien hay ciertos tipos característicos de ensayos. Unos de estos tipos se refiere a los ensayos de modelos topográficos, empleados para determinar las condiciones del flujo sobre porciones amplias de terrenos complejos (figura 6). Las escalas típicas en este tipo de ensayos están alrededor de 1/2000, debiéndose tener en cuenta que si la escala elegida es muy pequeña, los números de Reynolds asociados a los ensayos en túnel serán muy bajos, lo que puede ser causa de una distorsión significativa de la modelización. En estos ensayos el interés suele estar en la medida del campo de velocidades sobre el terreno y no en las distribuciones de presión, empleándose habitualmente anemometría de hilo caliente para las medidas. A esta categoría de ensayos pertenecen también los ensayos en túnel encaminados a determinar las características aerodinámicas de estelas de cuerpos de muy diversa naturaleza.

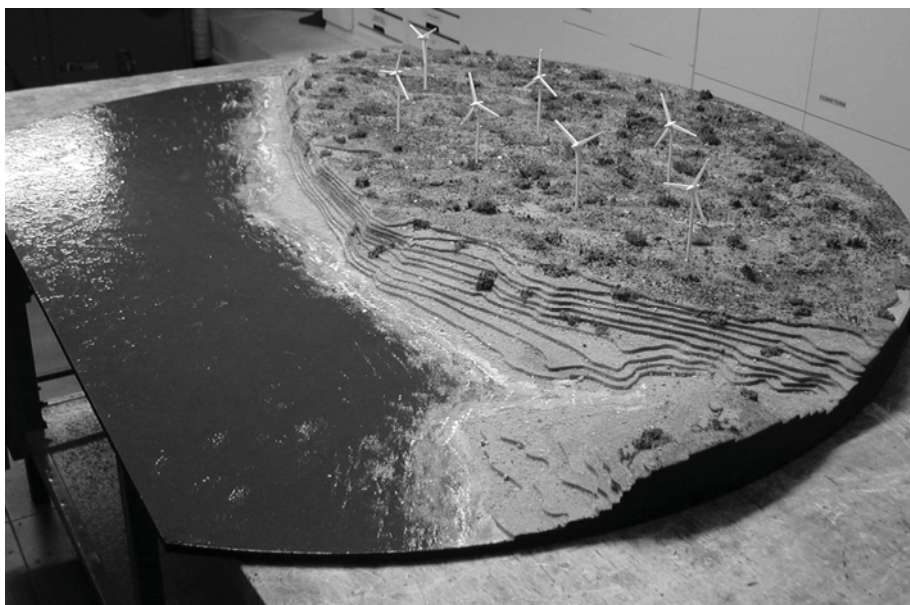


Fig. 6. Modelo de parque eólico.

Otro grupo típico de ensayos, posiblemente el más habitual en los túneles aerodinámicos para aplicaciones civiles, está centrado en la medida de presiones locales empleando modelos a escala rígidos instrumentados con tomas de presión. Las escalas típicas suelen ser próximas a la 1/100. Las presiones se miden conectando, por medio de tubos flexibles, las tomas de presión dispuestas sobre el modelo en los lugares donde se desea conocer la presión con los transductores de presión (figura 7).

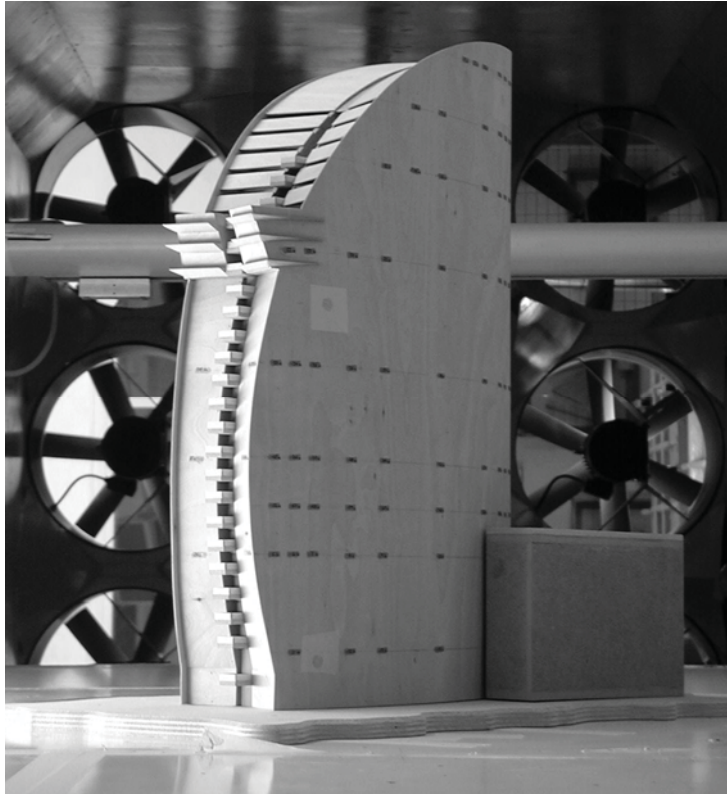


Fig.7. Modelo del edificio Hotel Vela de Barcelona.

En otros casos, lo que se pretende conocer es la medida directa de la resultante de las cargas de viento. En este tipo de ensayos, en los que una escala típica puede ser 1/100, el modelo, rígido, se fija a una balanza que mide la carga total que actúa sobre el modelo (las componentes de la fuerza y del momento aerodinámico según el triedro de referencia de la balanza, figura 8), empleándose para ello balanzas de extensímetros.

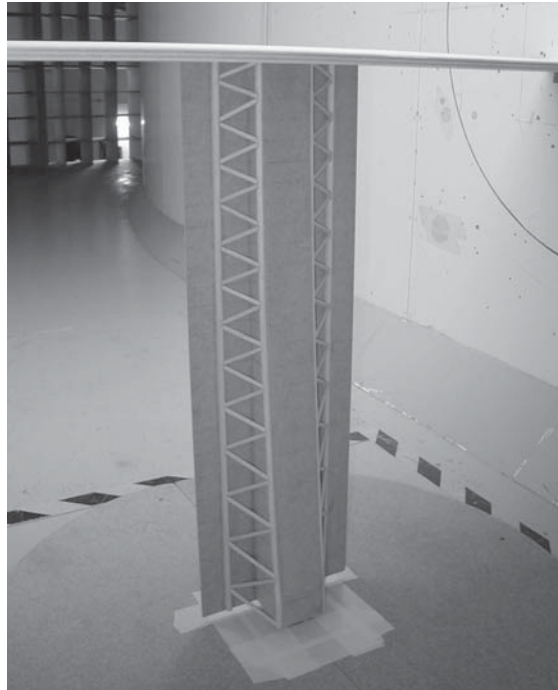


Fig. 8. Modelo de tablero de puente unido a la balanza del túnel A9.

Por último, otro tipo de ensayos es el relativo a los ensayos aeroelásticos de edificios y estructuras. Las escalas típicas en este caso son del orden de 1/100. En los ensayos aeroelásticos los movimientos del modelo deben ser afines a los movimientos de la estructura real, y las frecuencias naturales y el amortiguamiento estructural deben ser también convenientemente escalados. La construcción de los modelos aeroelásticos (réplica estructural) es a menudo compleja y lenta debido a la necesidad de que en el modelo se reproduzcan con precisión los muchos modos significativos que pueden contribuir al comportamiento vibratorio inducido por el viento. Los ensayos aeroelásticos suelen ser muy costosos por las razones expuestas, si bien en ocasiones puede ser suficiente con ensayar un modelo rígido sobre apoyos elásticos, lo que abarata notablemente los costes de fabricación del modelo y por tanto del ensayo (figura 9).

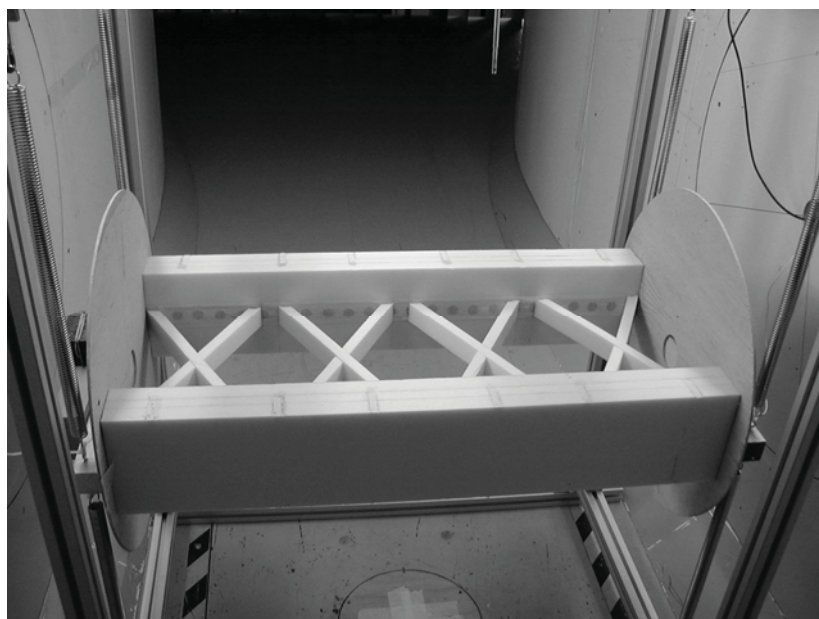


Fig. 6. Modelo seccional de elemento de puente para ensayos aeroelásticos.

En las tablas 3 y 4 se resumen, agrupados por categorías de ensayo, los trabajos efectuados en IDR/UPM desde enero de 2001.

Hay que añadir finalmente que además de los trabajos que se hacen para la industria, en IDR/UPM se dedica una parte del esfuerzo en el desarrollo de trabajos, inicialmente internos, con el fin de generar conocimientos en ciertas áreas deficitarias de la aerodinámica civil. Estos trabajos suelen desembocar tradicionalmente en tesis doctorales o en otros trabajos de capacitación (diploma de estudios avanzados), que posteriormente se traducen en publicaciones en revistas especializadas de ámbito internacional. Este enfoque de las actividades de aerodinámica experimental, aunque de instauración relativamente reciente, ha proporcionado ya notables resultados, algunos de los cuales han sido propuestos como soluciones tecnológicas en algunas construcciones. Los trabajos en este ámbito tuvieron su inicio con el estudio de la formación de torbellinos cónicos en cubiertas y tejados, y las formas de evitar la acción dañina de tales torbellinos mediante la colocación de parapetos u otros dispositivos que atenúen las cargas de succión cerca de las esquinas y aleros [10-15]. A esta categoría pertenecen también los trabajos relativos al control activo de las acciones del viento en edificaciones [16] y los relacionados con las cargas de viento sobre puentes en construcción [17,18] y, más recientemente, los trabajos centrados en las inestabilidades aeroelásticas de galope [19-21].

También se han desarrollado varios trabajos sobre el modelado del proceso de medida en anemómetros sónicos, necesario para el empleo de éstos en campos como el de la energía eólica, que han dado lugar a diversas publicaciones [22-27].

2000	<p>Cubierta de la ampliación del Museo Reina Sofía de Madrid, ESTEYCO. Cubierta del edificio de la sede social de ENDESA, PONDIO Ingenieros. Cubierta del Velódromo de Dos Hermanas (Sevilla), Escrig y Sánchez Arq.. Edificio Tropicarium, CESMA Ingenieros. Edificios del campus de Leioa (Universidad del País Vasco), GOP. Estación de Ferrocarril (A.V.E.) de Zaragoza, CESMA Ingenieros. Estadio Municipal de Chapín de Jerez de la Frontera, CESMA Ingenieros. Palacio de Ferias de Málaga, ESTEYCO.</p>
2001	<p>Cubierta de geometría variable plaza de toros, LANIK. Polar de un perfil de pala de aerogenerador, GAMESA. Torre de control del aeropuerto de La Rioja, GOP. Torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, GOP.</p>
2002	<p>Edificio Torre del Gas de Barcelona, Prominmo. Edificio Torre Espacio de Madrid, Torre Espacio. Módulos de paneles solares, BP Solar. Nueva cubierta del estadio Santiago Bernabeu, OTEP Internacional. Pérgola fotovoltaica del Fórum de Barcelona, ESTEYCO. Presiones sobre una agrupación de paneles solares, BP Solar. Torre de control del Aeropuerto de Barcelona, GOP.</p>
2003	<p>Cubierta del edificio Palacio del Agua de Orihuela, CAUCE S.A.. Cubiertas del edificio Hotel de las Libertades, Ferrovial Agromán, S.A. Edificio Torre Mutua, OTEP Internacional. Polar de un perfil de sección elíptica, E.T.S.I. Industriales de la UPC (Tarrasa). Torre de Control y Centro de Control del Área Terminal de Galicia, GOP. Torres de control de plataforma del Aeropuerto de Barajas, INECO.</p>
2004	<p>Fanales de torres de control, GOP. Modelo de tren Talgo, Talgo. Nuevas cubiertas del edificio Hotel de las Libertades, Ferrovial Agromán, S.A. Polar de un perfil de aerogenerador con un 18% de espesor, Gamesa Eólica, S.A.. Torre de Control del Aeropuerto de Ciudad Real, GOP.</p>
2005	<p>Complejo Deportivo Multifuncional "Caja Mágica", FCC. Edificio Administrativo de Usos Múltiples del Gobierno de Cantabria, GESAICAN. Edificio de la Ciudad de las Comunicaciones de Telefónica. ESTRUMAHER. Nuevo estadio del R.C.D. Español de Barcelona, FCC.</p>
2006	<p>Colectores solares parabólicos, SENER. Conjunto de Edificaciones Buenavista, FIAGA. Cubierta de la estación de ferrocarril del Aeropuerto de Málaga, G.O.P.. Cubierta móvil del Centro Acuático Madrid, FHECOR I.C. Edificio terminal del Aeropuerto de Tenerife Norte, INECO. Hotel Vela, de Barcelona, UTE Vela. Modelo de radomo estación de radar, Isdefe. Modelo del edificio Santa Cruz, de Tenerife, Intemac. Modelo del Hotel Cruiser de Torremolinos, ARUP. Pabellón de España de la Exposición de Zaragoza, CENER. Parasoles de fachada del edificio Woermann, Ferrovial. Terminal del aeropuerto de Fuerteventura, Ferrovial.</p>
2007	<p>Cubierta lenticular de la estación de ferrocarril del Aeropuerto de Málaga, G.O.P.. Edificios Porta-Firal, de Barcelona, NB35. Terminal del Aeropuerto de Santiago, INITEC</p>

Tabla 3. Trabajos de medida de presiones sobre modelos efectuados en el túnel A9 del Instituto IDR/UPM desde enero de 2000 hasta marzo de 2007.

Velocidades en entornos geográficos, estelas y otros

2000	Nuevo puerto de El Ferrol, ETSIN/UPM. Ruedo de la plaza de toros de las Ventas de Madrid, Comunidad de Madrid. Pacios cubiertos de la ampliación del Museo Reina Sofía, A. Medem y b720, UTE.
2002	Barreras cortavientos en puertos, Puertos del Estado.
2003	Entorno de un parque eólico, Estación Biológica de Doñana (CSIC).
2005	Wind around a mock-up of Grand Manan Coast, Gamesa S.A..
2006	Estelas de chimeneas y edificios, Gamesa Eólica, S.A..

Cargas aerodinámicas globales

2000	Modelo de pérgola, CESMA Ingenieros.
2003	Aerodinámica de velas barcos de alta competición, Real Federación Española de Vela. Cargas aerodinámicas sobre heliostatos fotovoltaicos, SOLUCAR.
2005	Componentes del viaducto de Esqueiro, Torroja Ingeniería S.L.. Modelo de radar (Lanza Madeira 3P), INDRA, S.A.. Modelo de radar (Lanza Naval N), INDRA, S.A.. Modelo de radar tipo Lanza N inclinado, INDRA, S.A.. Viaducto del río Ulla, Torroja Ingeniería S.L..
2006	Cargas aerodinámicas sobre modelos de tren Talgo, Talgo. Modelo de pala de generador de geometría variable, Esdras Automática. Viaductos de Covas y Martixe, Estructuras y Montaje.

Ensayos aeroelásticos

2006	Ensayos aeroelásticos de un modelo seccional del arco de puente, OHL. Estudio aeroelástico de un modelo seccional del puente de la Bahía de Cádiz, CFC S.L.
------	--

Tabla 4. Trabajos de medida de velocidades en entornos geográficos y estelas, medida de cargas aerodinámicas globales con balanza y ensayos aeroelásticos efectuados en el túnel A9 del Instituto IDR/UPM desde enero de 2000 hasta marzo de 2007.

Bibliografía

1. EUROMART Study Group, EUROMART Study Report. Annexes, Specialised Printing Services Ltd., Loughton, Essex, U.K., 1988.
2. Sanz, A., Perales, J.M., Meseguer, J., Laverón, A. & Bezdenejnykh, N., Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte I: 1960-1993, Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica, núm. 358, pp. 27-35, 2000.
3. Sanz, A., Perales, J.M., Meseguer, J., Laverón, A. & Bezdenejnykh, N., Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte II: 1994-, Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica, núm. 360, pp. 1-8, 2000.
4. Meseguer, J. & Sanz-Andrés, A., Aerodinámica básica, E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2005.
5. Dyrbye, C. & Hansen, S.O., Wind Effects on Structures, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1997.
6. Farell, C. & Iyengar, A.K.S., Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 79, pp. 11-35, 1999.
7. Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J.M. & Pindado, S., Aerodinámica civil. Cargas de viento en edificaciones, McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U., Madrid, España, 2001.
8. Alonso, G., Barrero, A. & Meseguer, J., Fenómenos aeroelásticos en estructuras, I Jornada Nacional de la Investigación en la Edificación, Madrid, Mayo de 2007.
9. Blevins, R.D., Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1984.
11. Meseguer, J., Fairbanks, B., Montero, E. & Pindado, S., La nueva torre de control del aeropuerto de Tenerife-Norte, Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica, No. 2/2002, pp. 13-20, 2002.

12. Meseguer, J., Pindado, S., Sanz, A. & Perales, J.M., Apéndice I: Medida de las cargas del viento sobre la cubierta, en "Cubiertas para instalaciones deportivas: Velódromo de Dos Hermanas", F. Escrig & J. Sánchez, Eds., ISBN 84-88988-49-4, Star Books Structural Architecture, Sevilla, pp. 103-114, 2003.
13. Pindado, S. & Meseguer, J., Wind tunnel study on the influence of different parapets on the roof pressure distribution of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 91, pp. 1133-1139, 2003.
14. Pindado, S., Meseguer, J., Martínez, A. & Franchini, S., Wind tunnel analysis on the influence of cantilever parapets on the wind loads of curved roofs, en "Advances in Fluid Mechanics V", V.A. Mendes, M. Rahman & C.A. Brebbia Eds., WIT Press, Wessex, pp. 405-413, 2004.
15. Franchini, S., Pindado, S., Meseguer, J. & Sanz-Andrés, A., A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 639-650, 2005.
16. Meseguer, J. Montero, E. & Fairbanks, B., Control activo de las cargas de viento en las edificaciones, *Cercha*, núm. 75, pp. 74-83, 2004.
17. Pindado, S., Meseguer, J., Perales, J.M., Sanz-Andrés, A. & Martínez, A., Wind-induced loads over double cantilever bridges under construction, en "Proceedings (on CD) of the First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management", IABMAS 02, Barcelona, 2002, 1-9, 2002.
18. Pindado, S., Meseguer, J. & Franchini, S., The influence of the section shape of box-girder decks on the steady aerodynamic yawing moment of double cantilever bridges under construction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 547-555, 2005.
19. Alonso, G., J. Meseguer J. & Pérez-Grande, I., Galloping instabilities of two-dimensional triangular cross-section bodies, *Experiments in Fluids*, Vol. 38, pp. 789-795, 2005.
20. Alonso, G. & J. Meseguer J., A parametric study of the galloping instability of two-dimensional triangular cross-section bodies, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 94, pp. 241-253, 2006.
21. Alonso, G., Meseguer, J. & Pérez-Grande, I., Galloping stability of triangular cross-sectional bodies: a systematic approach, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, en prensa, 2007.
22. Cuerva, A., Sanz-Andrés, A., Benzdenejnykh, N. & Perales, J.M., Assessment of Performances of Ultrasonic Anemometers as one Step Ahead in Wind Measurements of Energy Production of a Wind Turbine. ed. R. Watson. pp. 418-421, 1998. European Wind Energy Conference EWEC 97. IWEA. Dublin.
23. Cuerva, A., Sanz-Andrés, A., On the sonic anemometer measurement theory, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 88, pp. 25-55, 2000.
24. Cuerva, A., Sanz-Andrés A., Sonic anemometry of planetary atmospheres, *Journal of Geophys. Research*, Vol. 108, pp. 10-1-10-7, 2003.
25. Cuerva, A., Sanz-Andrés, A., Navarro, J., On multiple-path sonic anemometer measurement theory, *Experiments in Fluids*, Vol. 34, pp. 345-357, 2003.
26. Cuerva, A., Sanz-Andrés A., Lopez, O., Singularities and undefinitions in the calibration functions of sonic anemometers, *Journal of Atmos. Ocean Technology*, Vol. 2, pp. 1868-1875, 2004.
27. Cuerva, A., Sanz-Andrés, A. & Franchini, S., 2005, The role of ultrasonic anemometry in wind engineering, *Proceedings (on CD) of the 4th European & African Conference on Wind Engineering (EACWE-4)*, 11-15 July (2005), Prague.