



Federación
Iberoamericana
de Ingeniería
Mecánica



8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

INSTALACIONES DE AERODINÁMICA EXPERIMENTAL PARA INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Meseguer*, Angel Sanz-Andrés, Sebastián Franchini, Santiago Pindado

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

*correo electrónico: j.meseguer@upm.es

RESUMEN

Los túneles para ensayos aerodinámicos (túneles de viento en su traducción literal del inglés), son instalaciones ampliamente utilizadas para determinar las acciones del viento sobre cuerpos, sean éstos aeronáuticos o no. En cada caso los requisitos de diseño son muy distintos, y debido sin duda a lo más relajado de las condiciones de ensayo en el caso de cuerpos no aeronáuticos (aerodinámica civil), existen muchas más instalaciones para ensayos de aerodinámica civil que aeronáutica.

Las instalaciones de ensayos aerodinámicos de la Universidad Politécnica de Madrid, ubicadas en IDR/UPM, constituyen un centro de referencia para la industria española, tanto para ensayos estáticos (cargas de viento sobre edificaciones) como dinámicos (estudios aeroelásticos de cuerpos no fuselados), con más de sesenta ensayos realizados en los últimos cinco años (<http://www.idr.upm.es>). En esta comunicación se presentan las ideas básicas que han determinado el diseño y construcción de los túneles aerodinámicos de la UPM (en la actualidad hay cinco en servicio) y se describen algunas de estas instalaciones, empleadas en trabajos para la industria y para las administraciones públicas y en programas internos de investigación y desarrollo, tal es el caso del estudio de torbellinos cónicos en cubiertas de edificios bajos o de las inestabilidades de galope y de calle de torbellinos.

PALABRAS CLAVE: Aerodinámica, ensayos en túnel, túnel aerodinámico, cargas de viento, aeroelasticidad.

INTRODUCCIÓN

En su esquema más sencillo un túnel aerodinámico es un conducto por el que se hace circular un flujo de aire de propiedades conocidas (uniformidad de la velocidad y turbulencia en la sección de referencia), en cuyo interior se coloca el cuerpo sobre el que se desea conocer la acción ejercida por el viento. 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. Todo ello hace que exista una gran diversidad en los túneles aerodinámicos, pudiéndose encontrar túneles repartidos en amplios rangos de números de Mach de funcionamiento, de tamaños de cámaras de ensayo y de formas de los conductos [1, 2]. Atendiendo al área frontal de la cámara de ensayos, los valores típicos de las secciones pueden variar varios órdenes de magnitud, desde valores típicos de 0.01 m^2 de los túneles supersónicos hasta casi 1000 m^2 de algunos grandes túneles subsónicos.

Respecto a la forma del conducto, en una descripción en extremo simplificada, 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, o bien se toma el aire directamente de la atmósfera y se descarga posteriormente a ésta.

Ciñendo el análisis únicamente a los túneles subsónicos, la cámara de ensayos puede ser de sección abierta, es decir, sin paredes laterales, o de sección cerrada, con paredes laterales. Aunque esta pareja de alternativas -con o sin conducto de retorno, cámara de ensayos cerrada o abierta- 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.

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; además estos túneles son más ruidosos. 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 instalar cambiadores de calor en el interior del conducto para refrigerar el aire si las sesiones de ensayos fueran muy prolongadas. En el caso de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), excepto en un caso (un túnel de uso docente desarrollado para la Universidad de León) los túneles contruidos hasta la fecha son todos de circuito fluido abierto, sirviendo los propios los recintos en donde están ubicados como circuitos de retorno.

La historia de las instalaciones de ensayos aerodinámicos de la UPM es en gran medida la historia de Ignacio Da Riva (1930-1991), profesor encargado de Mecánica de Fluidos en la E.T.S.I. Aeronáuticos desde el año 1958 hasta 1965, y Catedrático de Aerodinámica desde 1965 hasta su fallecimiento en febrero de 1991 [3]. Desde 1961 Ignacio da Riva se ocupó del montaje del Laboratorio de Aerodinámica y Mecánica de Fluidos de la Escuela, y bajo su dirección se diseñó e instaló el primer túnel aerodinámico de la ETSIA (Fig. 1)

El primer túnel medía unos 21 m de longitud y era de corriente aspirada en circuito abierto (Tipo Eiffel) y cámara de ensayos cerrada [4]. Tal como se aprecia en la Fig. 1, el túnel tenía una contracción previa a la cámara de ensayos, con una longitud de 4 m y una sección de entrada de 2.5 m de alto y 3.8 m de ancho. La contracción descargaba en la cámara de ensayos, que tenía una longitud de 1.2 m y una sección de 0.8 m de alto y 1.2 m de ancho, con paredes laterales abatibles para permitir el montaje y desmontaje de las maquetas. Debajo de la cámara de ensayos estaba la balanza que permitía medir sustentación, resistencia y momento de cabeceo.

Este primer túnel fue modificado en 1981 con el propósito de dotarlo con una cámara de ensayos de mayores dimensiones y al mismo tiempo aumentar la velocidad de la vena fluida. La nueva versión era de forma semejante a la del túnel inicial, pues lo que se hizo fue agrandar la sección de la cámara de ensayos conservando en lo posible los elementos aprovechables del primer túnel (la contracción y el difusor) tras las modificaciones apropiadas. La nueva cámara de ensayos del túnel tenía una sección de 0.96 m de alto y 1.4 m de ancho y una longitud de 4.5 m y en la misma era posible alcanzar velocidades próximas a 30 m/s [4].

Debido a las obras de remodelación del Laboratorio de Aerodinámica, entre finales de 1993 y marzo de 1994, hubo que dismantelar todas las instalaciones de ensayos aerodinámicos de grandes dimensiones del Laboratorio. Finalizadas las obras se inició el proceso de diseño y construcción de las nuevas, que salvo un túnel provisional denominado A4P, en funcionamiento desde principios de 1995 hasta principios de 1997, son las que actualmente se utilizan para cubrir las necesidades de ensayos aerodinámicos [5].

En los apartados siguientes se describen en primer lugar los criterios de diseño empleados para desarrollar las instalaciones de ensayos, después se describen someramente las más significativas y finalmente se comentan algunos de los trabajos de especial relevancia realizados últimamente.



Fig. 1. Vista del primer túnel aerodinámico de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de Madrid.

CRITERIOS DE DISEÑO

Como es bien sabido, 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 cuerpo real, lo que en un amplísimo número de aplicaciones se traduce, aparte de que el modelo de ensayo sea una réplica aerodinámica fiel del cuerpo real, en la igualdad de ciertos parámetros adimensionales en ambos flujos, el real y el generado en el túnel [1, 2, 7, 8, 9]. De entre estos parámetros los más relevantes son sin duda el número de Reynolds y el número de Mach. A la hora de definir las instalaciones de ensayos de IDR/UPM la primera decisión a tomar fue la relativa al campo de aplicación de tales instalaciones, que debían tener por una parte usos docentes y por otra parte ofrecer la posibilidad de ensayos a las industrias interesadas. Habida cuenta del panorama aeronáutico en Europa, y en España en particular, y de la escasa disponibilidad de recursos económicos, se decidió orientar las nuevas instalaciones hacia aplicaciones de aerodinámica civil, diseñando túneles de baja velocidad en los que, consecuentemente, el número de Mach resulta ser un parámetro irrelevante.

Así pues, en las instalaciones para aerodinámica no aeronáutica, donde las velocidades son pequeñas en relación con la del sonido y los cuerpos a ensayar suelen ser, salvo excepciones, muy rígidos, el parámetro de interés es sin duda el número de Reynolds, $Re = \rho UL/\mu$, la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción expresadas en términos de parámetros geométricos del cuerpo (la longitud característica L) y del flujo (densidad, ρ , velocidad, U , y viscosidad dinámica, μ). En un cuerpo de formas suaves y redondeadas la transición en la capa límite de régimen laminar a régimen turbulento se produce una vez sobrepasado el llamado número de Reynolds crítico. 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 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 alrededor del modelo, para conservar el número de Reynolds hay que conservar el valor del producto UL , de modo que la velocidad en los ensayos habría de aumentar en proporción inversa a la escala del modelo, y en este caso pudiera ser que el régimen del flujo alrededor del modelo no fuera el mismo que sobre el obstáculo real (pues las velocidades necesarias en el ensayos podrían ser comparables a la velocidad del sonido en el aire). Resulta pues 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 los números de Reynolds y de Mach.

La consecuencia inmediata de lo expuesto es que si no se actúa sobre las propiedades del fluido resulta muy difícil, si no imposible, reproducir el valor del número de Reynolds, lo que afortunadamente es irrelevante en muchas aplicaciones, sobre todo 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.

Al diseñar un túnel aerodinámico de baja velocidad interesa en cualquier caso que el número de Reynolds sea lo más alto posible, y 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. El valor de L está limitado por el área frontal de 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.

Este ha sido, en general, el criterio seguido al diseñar las distintas instalaciones de ensayos aerodinámicos de IDR/UPM. Este criterio resulta reforzado además cuando se tiene en cuenta que al ser la velocidad pequeña también lo son las cargas aerodinámicas sobre las diversas partes del túnel, lo que permite abaratar su construcción. 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 (de hecho es este último condicionante el que fija la velocidad de ensayo mínima).

En los túneles de simulación de capa límite atmosférica también hay que considerar el número de Jensen, $J_e = L/z_0$, que es la relación entre la longitud característica del modelo, L , y la longitud de rugosidad del terreno, z_0 . 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, $J_e > 2000$, a partir del cual los resultados son ya prácticamente independientes de este parámetro.

También hay que tener en cuenta 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 . 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: 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.

La simulación de la capa límite atmosférica también aconseja que la cámara de ensayos sea grande, pues 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. 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, 10, 11].

Teniendo en cuenta los requisitos expuestos, los criterios de diseño de los túneles aerodinámicos existentes en la actualidad o en desarrollo en IDR/UPM, además de los relativos a la uniformidad de la vena fluida y al nivel de turbulencia en la cámara de ensayos, han sido básicamente dos: conseguir el mayor tamaño de la cámara de ensayos compatible con las limitaciones geométricas del lugar donde se ubica la instalación, y asegurar un modo de operación sencillo que permita un fácil manejo de las instalaciones. A consecuencia de la aplicación de estos criterios las instalaciones suelen tener ciertas características comunes: suelen estar equipadas con matrices de ventiladores industriales en vez de un único ventilador (lo que simplifica las tareas de mantenimiento y reparación, pues un túnel puede seguir en servicio aunque falle uno o varios ventiladores), y no tienen conductos de retorno específicos, aunque en algunas el recinto donde están instaladas está adaptado para cumplir esta función. Todo ello se traduce en una cierta penalización en el consumo de energía eléctrica, pero esto no penaliza demasiado los costes de operación cuando se tienen en cuenta los otros costes implicados, principalmente los de personal.

LAS INSTALACIONES ACTUALES

Las instalaciones de ensayos aerodinámicos de la IDR/UPM, y están repartidas entre el campus de la Ciudad Universitaria, en la E.T.S.I. Aeronáuticos, y en el Parque Tecnológico de la U.P.M. situado el campus de Montegancedo (tabla 1). 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.

Estas instalaciones, en servicio las situadas en la Ciudad Universitaria de madridy a punto de entrar en servicio las del campus de Montegancedo, han sido diseñadas y construidas en 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.

Tabla 1. Túneles aerodinámicos de IDR/UPM en funcionamiento en la E.T.S.I. Aeronáuticos y en el Parque Tecnológico de Montegancedo (P.T.M.): anchura, a , altura, b , y longitud, c , de la cámara de ensayos, longitud total del túnel, l , y velocidad máxima en la cámara de ensayos, V_{\max} .

Ubicación	Túnel	a [m]	b [m]	c [m]	l [m]	V_{\max} [m/s]	Aplicaciones
E.T.S.I. Aeronáuticos	A9	1.50	1.80	3.00	15.0	28.0	Cargas aerodinámicas
	S4	0.90	0.90	2.00	12.0	26.0	Calibración
	S1C	0.15	0.80	1.20	9.6	30.0	Cargas aerodinámicas
	A4C	0.20	1.80	1.80	7.5	40.0	Cargas aerodinámicas
P.T.M.	A16CLA*	2.20	2.20	20.00	40.0	30.0	Cargas aerodinámicas
	A6	0.50	2.90	3.20	14.5	36.0	Cargas aerodinámicas
	S4/2	0.90	0.90	2.00	12.0	26.0	Calibración
	S4/3	0.90	0.90	2.00	12.0	26.0	Calibración

(*) CLA: capa límite atmosférica

El túnel A9 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, mientras que las paredes verticales de la contracción describen una curva suave que adapta la sección de entrada a la cámara de ensayos, Fig. 2.

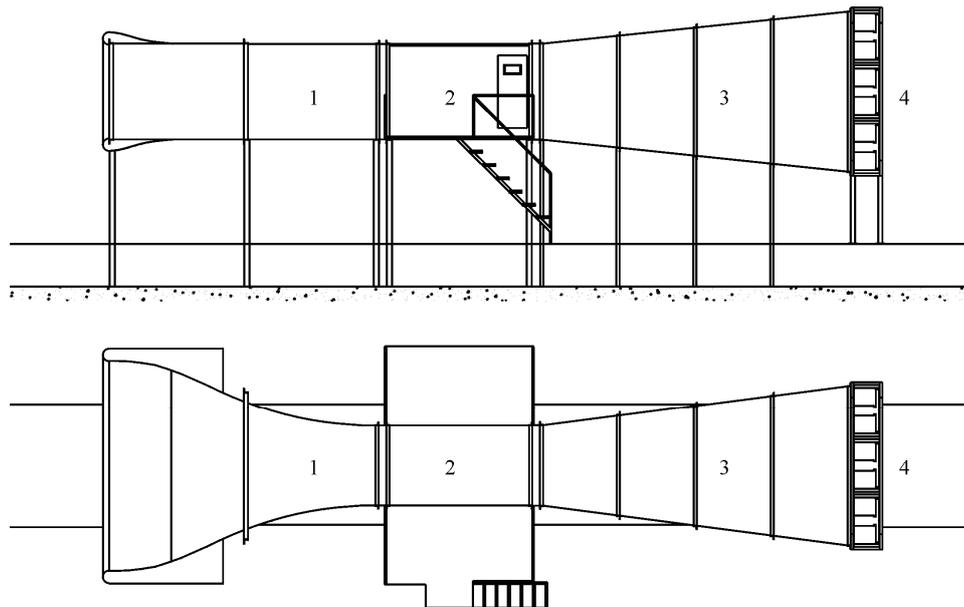


Fig.2. Vista lateral y planta del túnel A9.

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. En el techo de la cámara, además del sistema de iluminación y los tubos de Pitot que miden la velocidad de referencia, hay una cámara de vídeo que permite al operador observar la ejecución de los ensayos a través del monitor situado en la sala de control. 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 3x3 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, además el túnel está situado a una altura del orden de 2,5 m sobre el suelo, encima de otras instalaciones de ensayo (el túnel S4 y un canal hidrodinámico para visualización).

El túnel aerodinámico A4C también es de corriente aspirada, cámara de ensayos cerrada y circuito abierto. El túnel ha sido diseñado para cumplir los requisitos de ensayos bidimensionales de perfiles de ala. Según se puede apreciar en la Fig. 3, en el sentido de la corriente los elementos del túnel A4C son: contracción (1), cámara de ensayos (2), difusor (3) y ventiladores (4). El túnel A4C está impulsado por cuatro ventiladores centrífugos dispuesto en dos torres con dos ventiladores cada una. Los ventiladores descargan en el recinto donde se encuentra el túnel (5), que actúa como conducto de retorno (para ello el contorno exterior del túnel está convenientemente carenado). Como en el túnel A9 la contracción es bidimensional, con un único plano de contracción (techo y suelo son paralelos). La cámara de ensayos es de sección rectangular, de 0.2 m de ancho y 1.8 m de alto, con una longitud de 1,2 m. El difusor de adaptación a los ventiladores está dividido internamente en dos conductos, pues de otra forma su longitud tendría que ser mucho mayor para no superar la limitación del ángulo de apertura del conducto.

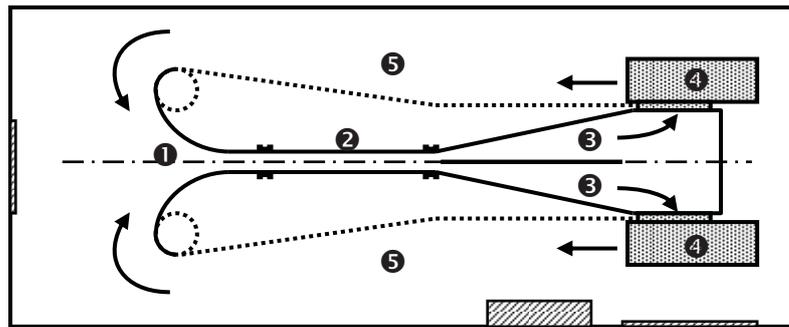


Fig. 3. Esquema de la planta del túnel A4C.

El túnel S1C consta de un ventilador centrífugo que descarga en una cámara de tranquilización, contracción, cámara de ensayos y difusor (Fig. 4). Este túnel se emplea principalmente para actividades docentes y programas propios de investigación, ha servido también como modelo para el túnel desarrollado para la Universidad de León y como banco de pruebas para el desarrollo del túnel A4C, que a su vez ha sido modelo del túnel A6 en construcción en el campus de Montegancedo.

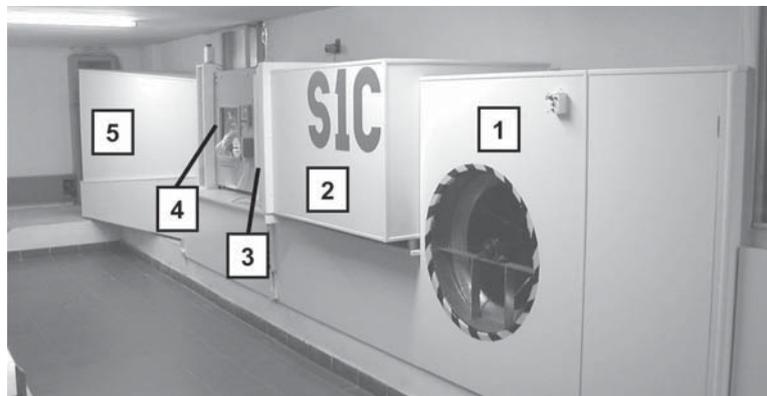


Fig. 4. Fotografía del túnel S1C: ventilador (1), cámara de tranquilización (2), contracción (3), cámara de ensayos (4) y difusor de salida (5)

Aparte de otros túneles menores para usos docentes y de investigación y desarrollo, las instalaciones de la Ciudad Universitaria se completan con el túnel S4, que 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, y es en la actualidad el túnel más utilizado en IDR/UPM, superando largamente las mil horas de funcionamiento al año, razón por la que se están construyendo dos réplicas del mismo, los túneles S4/2 y S4/3 (el túnel aerodinámico S4 está descrito en otra comunicación en este Congreso [12]).

El mayor túnel de IDR/UPM es el denominado A16CLA, cuya forma en planta esquemática se muestra en la Fig. 5. También A16cla es un túnel sin circuito de retorno específico: el aire pasa a través del conducto, organizado en la secuencia tradicional de sección de contracción (C), cámara de ensayos (E), difusor de adaptación a la sección de ventiladores (A), ventiladores (V) y retorno a través del local (R). Como se observa la longitud de la cámara de ensayos es grande, pues si se desea simular la capa límite terrestre se necesita una cierta distancia para que la capa límite se pueda desarrollar (al menos diez veces la dimensión transversal característica). Como es bien conocido, 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 [8, 9].

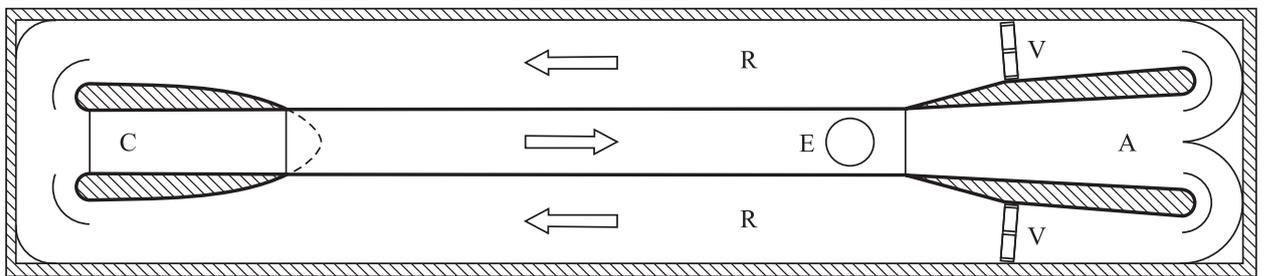


Fig. 5. Planta del túnel aerodinámico de simulación de capa límite atmosférica A16cla de IDR/UPM, situado en el Campus de Montegancedo de la Universidad Politécnica de Madrid. La cámara de ensayos tiene 2.2 m de anchura y longitud total del túnel, incluido el conducto de retorno, es de 40 m. Para la identificación de los distintos componentes véase el texto.

Además de su uso docente, las instalaciones descritas se emplean principalmente para ensayos aerodinámicos bajo demanda de la industria. A grandes rasgos éstos se pueden catalogar en cuatro tipos: ensayos de modelos topográficos, empleados para determinar las condiciones del flujo sobre porciones amplias de terrenos complejos (Fig. 6); las escalas típicas en este tipo de ensayos están alrededor de 1/2000, y el interés suele estar en la medida del campo de velocidades sobre el terreno, empleándose habitualmente anemometría de hilo caliente. Otro grupo típico de ensayos, posiblemente el más habitual, está centrado en la medida de presiones locales con modelos rígidos a escala instrumentados con tomas de presión; las escalas típicas suelen ser próximas a 1/100. En un tercer tipo lo que se pretende conocer es la medida directa de la resultante de las cargas de viento, y para ello el modelo, rígido, se fija a una balanza de extensímetros que mide la carga total que actúa sobre el mismo. 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, si bien en ocasiones puede ser suficiente con ensayar un modelo rígido sobre apoyos elásticos [13, 14]. En la Fig.7 se indica el número de trabajos realizados para la industria en la última década, sobre los cuales se puede encontrar información en www.idr.upm.es.

Respecto a la actividad de I+D en los últimos tres años, hay que decir que en IDR/UPM se llevan a cabo programas internos de I+D subvencionados, gracias a que se dedica parte de la financiación que se obtiene de las actividades de ensayos en túnel y de calibración de anemómetros para empresas a este fin. Así se han financiado los estudios relativos a formación de torbellinos cónicos en cubiertas [15, 16] así como inestabilidades de galope y de calle de torbellinos [13, 14], y diversas tesis doctorales, incluyendo la modelación de la anemometría de sensores ultrasónicos.

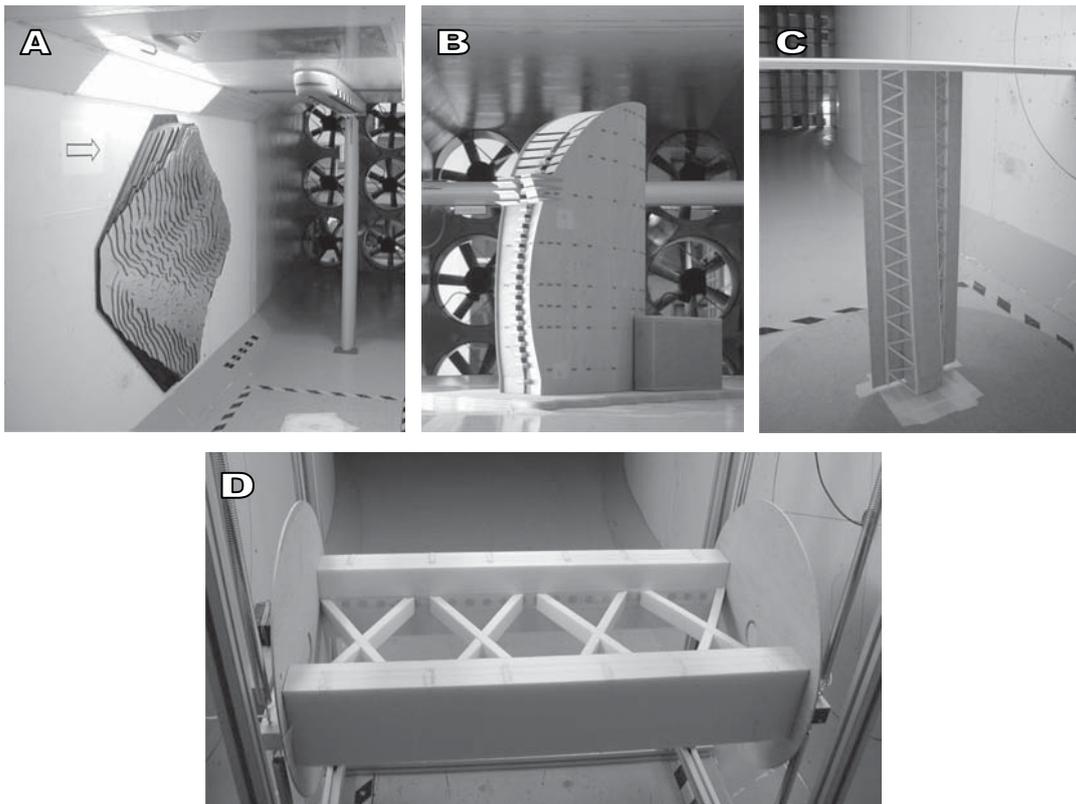


Fig. 6. Distintos modelos en la cámara de ensayos del túnel A9: entorno de parque eólico (a), modelo del edificio Hotel Vela de Barcelona (b), tablero de puente unido a la balanza (c) y modelo seccional de elemento de puente para ensayos aeroelásticos (d).

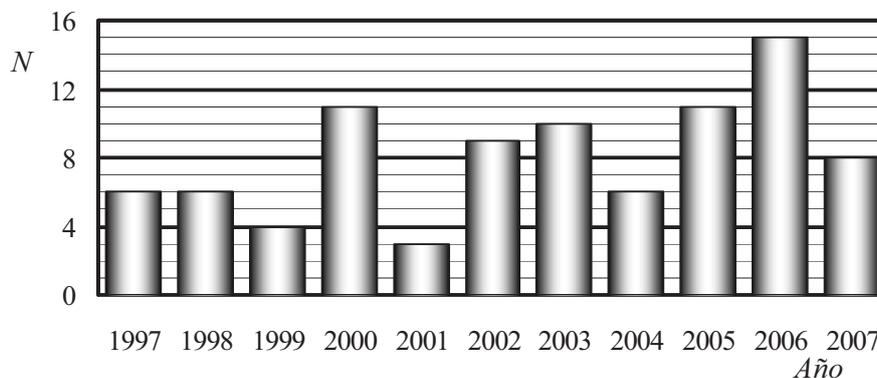


Fig. 7. Trabajos para la industria realizados en las instalaciones de ensayos aerodinámicos de IDR/UPM desde 1997.

REFERENCIAS

1. 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.
2. Meseguer, J. & Sanz-Andrés, A., Aerodinámica básica, E.T.S.I. Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2005.
3. Sanz-Andrés, A. & Meseguer, J., Three decades of space activities at IDR/UPM, Paper IAC-06- E4.4.03, 57th International Astronautical Congress, October 2006, Valencia Spain (2006).

4. 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.
5. 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.
6. Barlow, J.B., Rae, W.H. & Pope, A., Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1999.
7. Simiu, E. & Scanlan R. H., Wind Effects on Structures. Fundamentals and Applications to Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1996.
8. Dyrbye, C. & Hansen, S.O., Wind Effects on Structures, John Wiley & Sons, Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1997.
9. Farrell, 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.
10. Alonso, G., Barrero-Gil, A. & Meseguer, J., Fenómenos aeroelásticos en estructuras, I Jornada Nacional de la Investigación en la Edificación, Madrid, Mayo de 2007.
11. Alonso, G., Barrero-Gil, A. & Meseguer, J., Inestabilidades aeroelásticas de baja frecuencia en estructuras, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco, Octubre de 2007.
12. Meseguer Ruiz, E., Sanz Andrés, A., Martínez Muelas, A., Vega, E., Bezdenejnykh, N.A. & García Romero, R., Actividades de calibración de anemómetros en la Universidad Politécnica de Madrid, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco, Octubre de 2007.
13. 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.
14. Alonso, G., Barrero Gil, A. & Meseguer, J., Inestabilidades aeroelásticas de baja frecuencia en estructuras, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco, Octubre de 2007.
15. 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.
16. 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.