

# El túnel aerodinámico ACLA-16 de la Universidad Politécnica de Madrid

**J. Meseguer, A. Sanz-Andrés, A. Barrero-Gil, S. Franchini, A. Martínez, S. Pindado y E. Vega**  
IDR/UPM E.T.S.I. Aeronáuticos,  
Universidad Politécnica de  
Madrid

## INTRODUCCIÓN

Cuando en 1994, a consecuencia de la remodelación general del edificio principal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos (ETSIA), fue preciso dismantelar las primitivas instalaciones de ensayos aerodinámicos existentes en el Laboratorio de Aerodinámica de la E.T.S.I. Aeronáuticos (la mayoría de las cuales fueron construidas bajo la dirección del Profesor Ignacio Da Riva [1]), se decidió que tras la remodelación del Laboratorio el diseño de las nuevas instalaciones debería estar orientado a dotar a la Escuela de las instalaciones de ensayos precisas para satisfacer las necesidades de ensayos aerodinámicos de las empresas nacionales. Con este objetivo en mente, y habida cuenta de los diferentes requisitos que se exigen a las instalaciones para ensayos aeronáuticos y a las dedicadas a ensayos no aeronáuticos, se decidió que con los presupuestos y disponibilidades existente las instalaciones de ensayos aerodinámicos de la E.T.S.I.A. debían estar orientadas hacia lo que se conoce como aerodinámica civil, de modo que se optó por el desarrollo de túneles aerodinámicos de baja velocidad, con calidades de vena fluida no tan exigentes como las requeridas en los túneles de uso aeronáutico.

En razón de aquella decisión, hacia 1995 se acometió la construcción de los tres primeros túneles del parque de instalaciones de ensayos aerodinámicos de la Universidad Politécnica de Madrid [2], instalaciones que quedaron

integradas en una nueva unidad: el Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" de la Universidad Politécnica de Madrid, IDR/UPM, creado por el Consejo de Gobierno de la Comunidad de Madrid, el 20 de Marzo de 1997 (Decreto 46/1997, B.O.C.M. de 31 de Marzo de 1997), adscrito a la E.T.S.I. Aeronáuticos. Estas primeras instalaciones, un túnel aerodinámico de uso general, túnel A9, otro dedicado a la calibración de anemómetros, túnel S4, y un tercero para usos de visualización (el fluido de trabajo en este tercer túnel es agua y fue construido en colaboración con la E.U.I.T. Aeronáutica), fueron ubicadas en el remodelado Laboratorio de Aerodinámica. Con el tiempo estas instalaciones han sido completadas con otros dos túneles con cámaras de ensayos bidimensionales (S1C y A4C). En general todas las instalaciones de ensayos aerodinámicos de IDR/UPM en la E.T.S.I.A. son ampliamente utilizadas en trabajos para la industria, bien para la medida de cargas de viento estáticas en edificios y estructuras singulares o la medida de la respuesta aer-elástica de puentes (véase la Fig. 1), bien en tareas de calibración de anemómetros (con más de diez mil anemómetros calibrados hasta la fecha), o bien en tareas de I+D+i financiadas por las administraciones públicas o con fondos propios [3-19].

Más recientemente han sido desarrolladas las nuevas instalaciones de ensayos de la U.P.M. en el Parque Tecnológico de Montegancedo, en los locales que IDR/UPM tiene asignados en el Centro de Investigación y Desarrollo

Aeroespacial (CIDA) de la E.T.S.I. Aeronáuticos. En Montegancedo hay, por el momento, otros cuatro túneles: dos semejantes al túnel S4 de la Ciudad Universitaria (para actividades de calibración de anemómetros), un tercer túnel de ráfagas diseñado específicamente para satisfacer ciertos requisitos de ensayos de algunas empresas fabricantes de vehículos ferroviarios, y un túnel de simulación de capa límite atmosférica con una precámara de ensayos extraordinariamente larga para colocar en la misma los elementos de rugosidad y de generación de turbulencia apropiados para reproducir los perfiles de velocidad y de turbulencia deseados. Hay además un quinto túnel en construcción, con cámara de ensayos bidimensional de mayor tamaño que los ya existentes S1C y A4C en la E.T.S.I.A., cuyo uso previsto es el análisis de fenómenos de pérdida dinámica en perfiles.

Además de los túneles señalados se han construido otros túneles menores que por sus reducidas dimensiones no precisan de un lugar fijo (cuatro túneles más) y también se ha diseñado, construido e instalado en la Universidad de León un túnel semejante al túnel S1C (pero equipado con conducto de retorno), e igualmente otro para la Universidad de Málaga (si bien en este último la participación de IDR/UPM ha quedado limitada al diseño aerodinámico del conducto, asesoría durante el diseño mecánico y construcción del túnel, así como en las pruebas de homologación y posterior formación del personal de la Universidad de Málaga). Por último, en el ámbito internacional cabe señalar la colaboración con la Facultad Regional de Haedo de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina para el diseño, construcción e instrumentación del túnel aerodinámico de dicha facultad.

En lo que sigue se describe el túnel de simulación de capa límite atmosférica, denominado ACLA16 (Aspirado de Capa Límite Atmosférica, con 16 ventiladores), que forma parte de las instalaciones de ensayos aerodinámicos del Campus de Montegancedo.

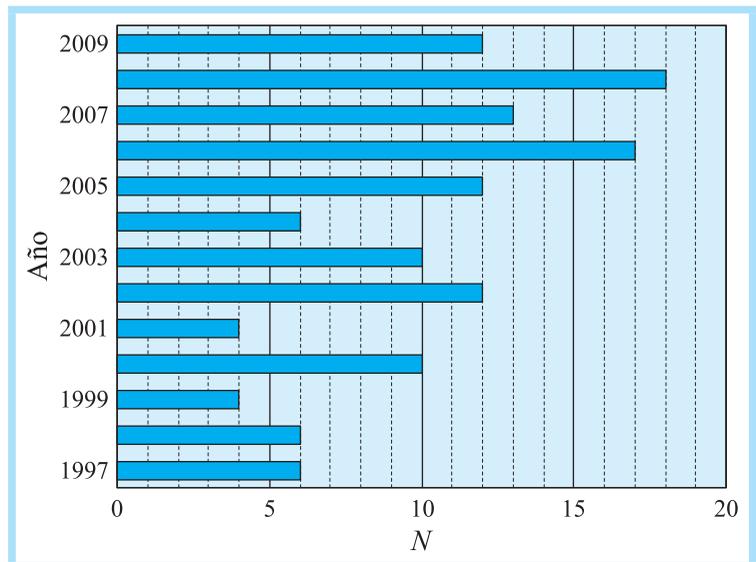


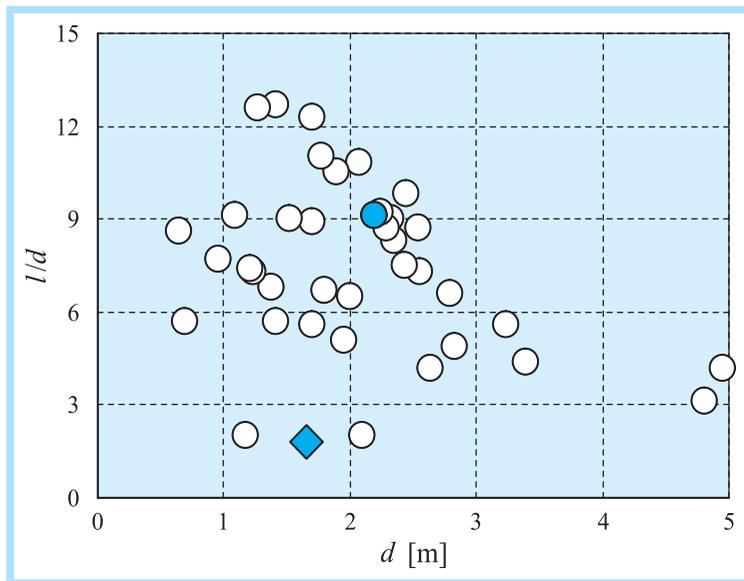
FIGURA 1.

Ensayos aerodinámicos realizados en el túnel A9 desde su entrada en servicio en el año 1997; de los ciento treinta ensayos realizados hasta la fecha para industrias e instituciones nacionales y extranjeras, el 16% ha sido de instalaciones deportivas, el 20% de edificaciones e instalaciones aeroportuarias, las edificaciones singulares significan el 22%, los ensayos estáticos y aeroelásticos de puentes el 15%, las instalaciones relacionadas con las energías renovables el 16%, y el 11% restante han sido vehículos ferroviarios, barreras cortavientos y otros cuerpos singulares de difícil clasificación.

## ENTORNO DEL NUEVO TÚNEL ACLA16

Salvo en el caso de pequeños túneles comerciales para aplicaciones docentes, es poco probable que existan en el mundo dos túneles iguales, y ello es debido a que cada túnel se diseña para unas aplicaciones específicas, bajo condiciones económicas también específicas, y sujeto a restricciones geométricas y de operación que suelen diferir de un caso a otro. En consonancia con esta situación, no hay un criterio de diseño único, aunque sí cierto consenso sobre cómo ha de estar organizada una instalación para ensayos aerodinámicos, y aun así este consenso admite múltiples variedades [20, 21].

En el caso de los túneles aerodinámicos para simulación de capa límite atmosférica (conocidos en inglés con las siglas BLWT, Boundary Layer Wind Tunnel) se precisa una cámara de ensayos razonablemente larga para poder situar, corriente arriba del modelo a medir, los elementos precisos



**FIGURA 2.**

Variación con el radio hidráulico de la cámara de ensayos,  $d$ , del cociente  $l/d$  entre la longitud de la cámara,  $l$ , y el radio hidráulico  $d$ , de diferentes túneles aerodinámicos declarados como aptos para ensayos de simulación de capa límite terrestre. El círculo de color representa el túnel ACLA16 y el rombo el túnel A9 (este último ha sido incluido únicamente como elemento de comparación).

para generar los perfiles de velocidad y turbulencia deseados en la sección de ensayos (Fig. 2), y de esta condición se deriva que la cámara de ensayos ha de ser cerrada. A partir de este punto las opciones son múltiples: corriente aspirada o soplada, circuito de retorno abierto o cerrado, área de ensayos con paredes rígidas o deformables, empleo de un único ventilador o de varios, control o no de temperatura, y un largo etcétera cuyas ramificaciones se multiplican todavía más si en el diseño se considera también la instrumentación a emplear.

En lo que respecta a IDR/UPM, generalmente los criterios de diseño seguidos en la construcción de las diferentes instalaciones de ensayos aerodinámicos han estado orientados más a facilitar la operación de estas instalaciones que a conseguir rendimientos aerodinámicos altos. La razón de esta decisión es que un túnel aerodinámico, aun siendo el elemento primordial, es tan sólo un eslabón más en la cadena de medida, y en ésta no es precisamente el túnel el elemento con mayor con-

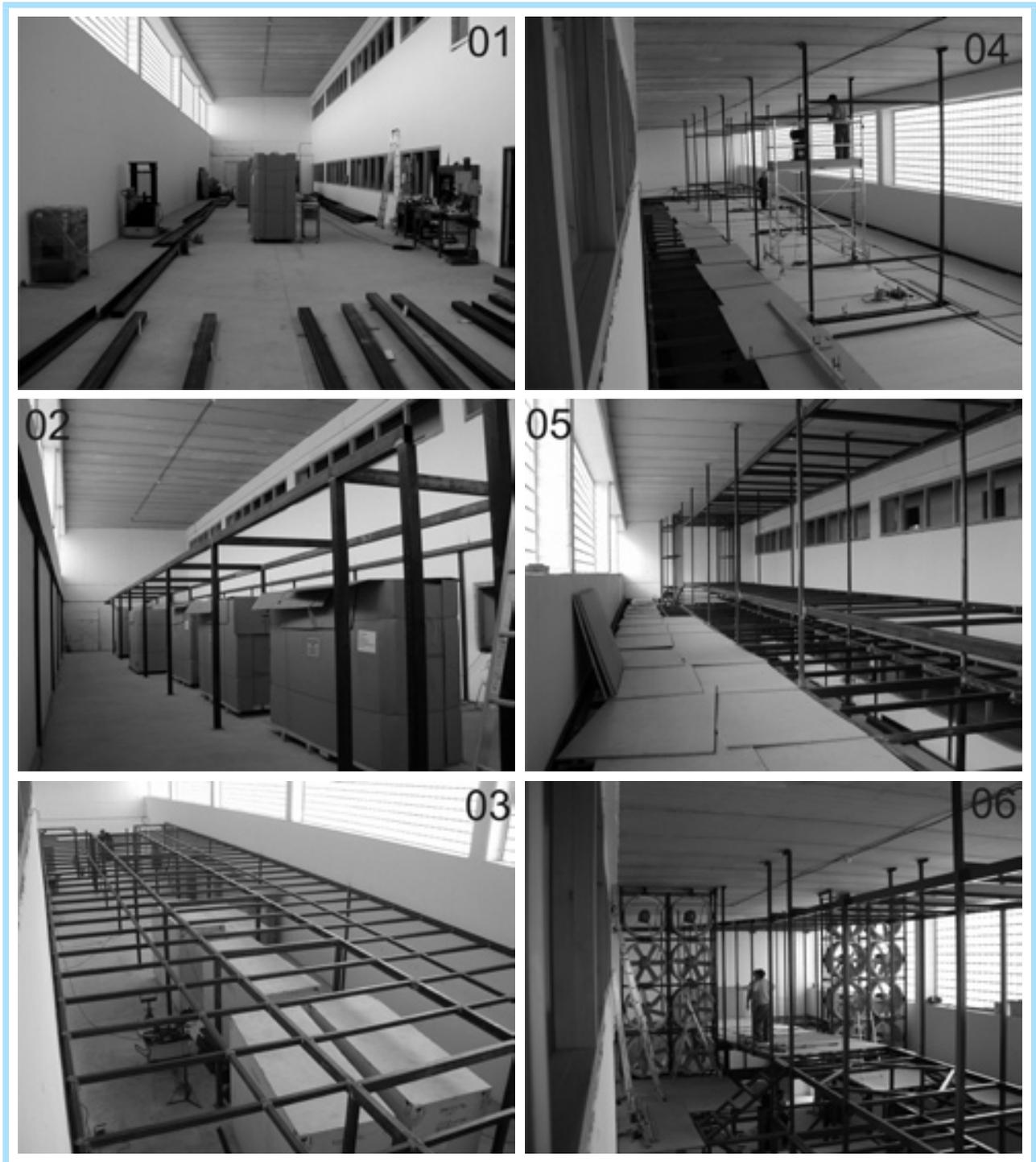
tribución al coste del ensayo. Un túnel aerodinámico para ensayos de cuerpos singulares no aeronáuticos, como son las construcciones propias de la ingeniería civil y la arquitectura, incluso con una carga de trabajo alta suele estar gran parte del tiempo parado, pues habitualmente consume mucho más tiempo la construcción e instrumentación de modelos y decorados, su colocación en el túnel, así como los procesos posteriores de análisis de resultados y elaboración de informes, que la fase de medida propiamente dicha. Se entiende pues que con esta óptica se tienda a diseñar túneles en los que el rendimiento energético queda relevado a un lugar secundario, o cuanto menos no dominante, primándose por contra la sencillez y facilidad de operación del túnel, criterio que conduce a instalaciones con cámaras de ensayos grandes y de fácil acceso, con sistemas de montaje y desmontaje de modelos que permitan realizar estas operaciones en poco tiempo y con poca mano de obra.

El túnel ACLA16 está situado en el sótano principal del edificio CIDA (Centro de Investigación y Desarrollo Aeroespacial) de la E.T.S.I. Aeronáuticos, en el Campus de Montegancedo (Parque Tecnológico de la UPM). El sótano de este edificio, un paralelepípedo de 40,1 m de longitud, unos 7,7 m de ancho y 7,3 m de alto, está dividido horizontalmente en dos recintos, ocupando el túnel ACLA-16 el superior, cuya altura es de 4,3 m (Fig. 3-01). El túnel es de cámara de ensayos cerrada, y sin conducto retorno específico, de manera que el aire retorna desde los ventiladores a la sección de entrada a través del local donde está instalado el conducto principal (Fig. 4).

La cara superior de la superficie de separación de los dos recintos del sótano está a 3,0 m de altura sobre el suelo del sótano, y queda definida por una estructura regular de pilares y un entramado horizontal de vigas y travesaños; hay dos filas de pilares agrupados en pares, dispuesto longitudinalmente cada 4 m (en cada par los pilares están separados transversalmente 2,33 m entre ejes). Los pilares soportan dos

vigas longitudinales que discurren paralelamente a perfiles en L atornillados a las paredes laterales del sótano, como se puede apreciar en las figuras 3-02 y 3-03. Sobre este conjunto se ex-

tiende un entramado de travesaños de la longitud adecuada equiespaciados 1 m entre sí (Fig. 3-03), que a su vez soportan los elementos que constituyen la superficie de separación.



**FIGURA 3.**

Fotografías del túnel ACLA16 durante las etapas iniciales de su construcción. 01) sótano diáfano, 02) inicio de la construcción de la plataforma que soporta al túnel ACLA16, 03) entramado de vigas de la plataforma, 04) pórticos de la cámara de ensayos del túnel, 05) estructura de la cámara de ensayos y de la contracción de entrada, 06) bancadas de los motores y difusor.

## DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL TÚNEL

Sobre la plataforma, anclados a la misma y al techo del recinto, están los pórticos que definen la geometría del conducto del túnel ACLA16, que en general coinciden con los pilares que soportan la plataforma (Fig. 3-04). Así pues, el conducto está formado estructuralmente por un conjunto de pórticos que se extienden longitudinalmente desde la sección de entrada hasta los ventiladores. Tales pórticos están separados 4 m entre sí, aunque en algunos elementos del túnel existen otros intermedios para asegurar la rigidez del conjunto o conformar el armazón que da forma al elemento en consideración, tal es el caso de la sección de entrada (Fig. 3-05), o del difusor, primero de conducto único y después bifurcado, que conduce a los ventiladores (Figs. 3-06 y 4). En cada parte del túnel los pórticos están unidos entre sí por vigas longitudinales que definen las esquinas del conducto.

La contracción tiene una longitud de 6 m desde la entrada al conducto interno, Por razones de espacio la contracción es bidimensional (sólo se contrae la corriente verticalmente, de modo que techo y suelo convergen desde la sección de entrada hasta su posición relativa en la cámara de ensayos, mientras que las paredes verticales permanecen paralelas en esta parte del conducto (véase la Fig. 5-11). Para el diseño de la contracción se ha utilizado la generalización del método de Thwaites para contracciones axilsimétricas,

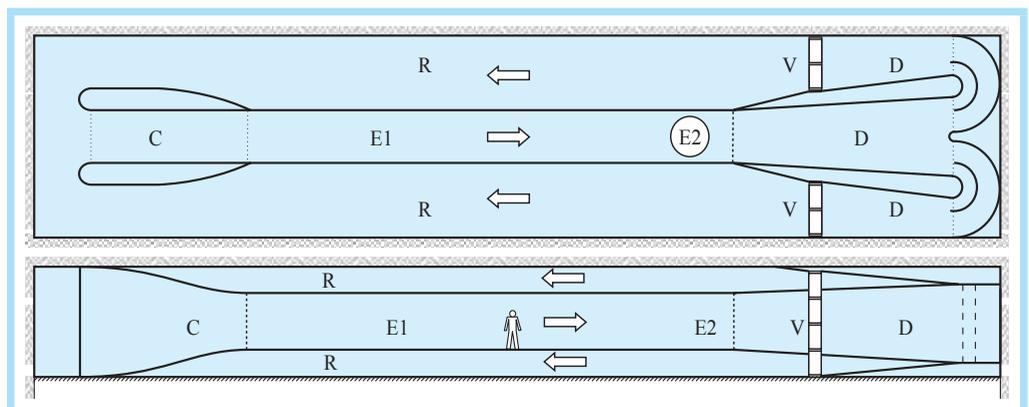
de acuerdo con la adaptación al caso de contracciones bidimensionales desarrollado por Nanjunda Swamy [22].

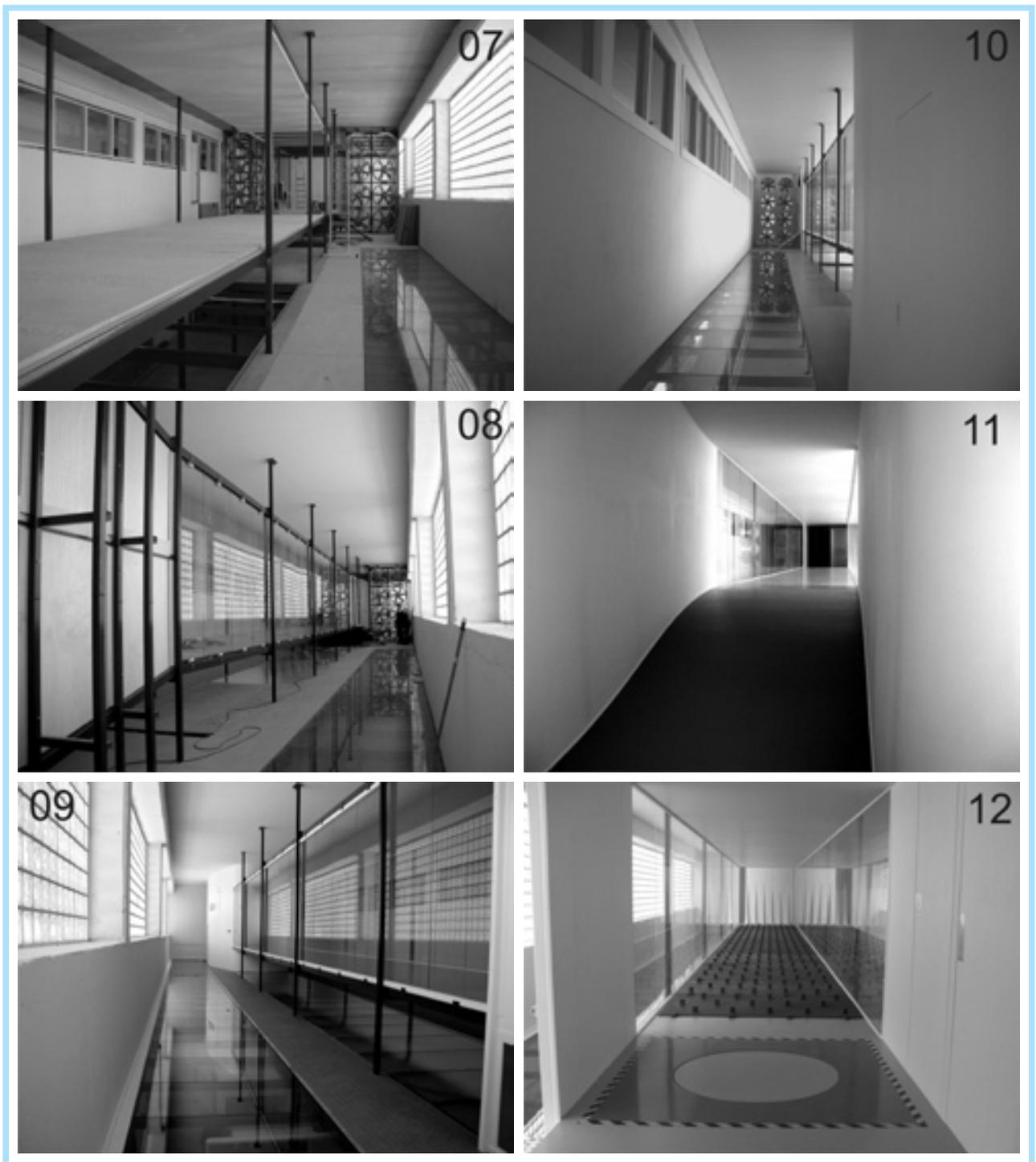
La cámara de ensayos es de sección cuadrada, de 2,2 m de lado, tiene una longitud total de 20 m y está dividida en dos partes, una primera donde se sitúan los elementos de generación de turbulencia y de rugosidad superficial necesarios para reproducir un determinado perfil de velocidad y turbulencia [23, 24], análogo al de la capa límite terrestre en consonancia con las escalas del ensayo (Figs. 4 y 5-12). Las paredes laterales de la precámara E1 son de cristal (Figs. 5-08, 5-09 y 5-10). Tras la precámara de acondicionamiento de flujo está la sección de medida, equipada con una mesa giratoria enrasada con el suelo del túnel (Fig. 5-12) cuya posición angular es controlada por un motor eléctrico mandado por un ordenador. Cada modelo llega al túnel con su plataforma giratoria circular que encaja en el hueco correspondiente del suelo del túnel, incorporando además toda la instrumentación de medida, de tratamiento de señales y de almacenamiento de datos, de modo que basta con realizar la conexión mecánica al sistema de giro y la neumática a los sensores que miden las presiones de referencia para iniciar el ensayo.

En las figuras 5-07 a 5-10 se muestran varias vistas del túnel ACLA16 donde se puede observar el aspecto superior de la plataforma, nótese, en particular, que la plataforma donde descansa el túnel tiene áreas de pavimento transparente, áreas de pavimento translúcido y áreas de pavimento opa-

**FIGURA 4.**

Esquemas de la planta y el alzado del túnel aerodinámico de simulación de capa límite atmosférica ACLA16 de IDR/UPM; C) contracción, E1) precámara de ensayos para acondicionamiento de la vena fluida, E2) cámara de ensayos, D) difusor, V) ventiladores y R) retorno.





**FIGURA 5.**

Fotografías del túnel ACLA16 durante las últimas etapas de su construcción. 07) colocación de suelo y techo de la cámara de ensayos, 08) paredes acristaladas de la cámara de ensayos, 09) carena externa de la sección de entrada y cámara de ensayos, 10) carena externa de la sección de entrada, cámara de ensayos y una de las torres de ventiladores, 11) contracción e interior de la cámara de ensayos, 12) interior de la cámara de ensayos del túnel con generadores de turbulencia en la entrada y elementos de rugosidad.

co; esto es consecuencia de un requisito de diseño impuesto inicialmente para que el túnel sea visible desde el recinto

inferior, y además, como los ventanales del sótano quedan en la parte alta de la pared exterior, que la iluminación

natural llegue también a la parte inferior del sótano.

El difusor arranca tras la cámara de ensayos, primeramente con un tramo único cuyas superficies horizontales y laterales son levemente divergentes. Este primer tramo tiene unos 9 m de longitud y acaba en una bifurcación que conduce al flujo hacia los dos difusores laterales. En la bifurcación techo y suelo son paralelos entre sí; las paredes verticales son circulares, existiendo en cada rama del conducto bifurcado un álabe deflector a fin de evitar el desprendimiento de la capa límite tras el giro de la corriente (Fig. 4). Tras la bifurcación los conductos resultantes vuelven a ser otra vez de superficies divergentes hasta llegar a la sección de ventiladores.

Al igual que en la mayoría de los túneles existentes en IDR/UPM, los ventiladores empleados en el túnel ACLA16 son HTC-90-10HP de SODECA, de modo que la potencia eléctrica es de unos 120 kW, con velocidad regulable y hélices de seis palas de poliamida. Los ventiladores están dispuestos en dos grupos, cada uno con dos torres de cuatro ventiladores, y descargan al local del túnel, por donde retorna el flujo hasta la sección de entrada.

## AGRADECIMIENTOS

Las instalaciones de ensayos aerodinámicos de IDR/UPM, y en particular el túnel ACLA16, son el resultado de un esfuerzo colectivo cuya magnitud supera largamente la suma de diez mil horas de trabajo. Excepto en unas pocas tareas (tal ha sido la pintura de las estructuras metálicas y de las paredes de los recintos), todos los trabajos de diseño, fabricación, instrumentación y puesta a punto han sido llevados a cabo por personal del IDR/UPM y de la E.T.S.I.A. La lista de personas es muy extensa, pero en la misma sin duda ocupan un lugar destacado aquellos que con sus manos han construido los túneles, partiendo de un sótano vacío, un montón gigantesco de barras de hierro y unos planos muchas veces susti-

tuidos por unos dibujos a mano alzada: Pedro López, Manuel Ortega, Carlos Pascual, José María (Javi) Pascual, y Rafael García, y junto a ellos José Luis Espino, Donato Franco, Gustavo Alonso, Álvaro Cuerva, Encarnación Mesequer, Isabel Pérez Grande, Oscar López García, Fermín Navarro, Patricia Pérez Troyano, Nikolai A. Bezdenejnykh, Julián Nevado, Sergio Ávila, Andrea Ruótoló, Jorge Fernández y Juan Martín.

Gran parte de las instalaciones de ensayos aerodinámicos desarrolladas en IDR/UPM han sido financiadas con cargo al proyecto titulado "Instalaciones para ensayos aerodinámicos del Instituto Universitario de Microgravedad Ignacio Da Riva", expediente número PCT200200-2003-48, dentro de la convocatoria de Ayudas del Plan Nacional de I+D+i (2004-2007) para proyectos de I+D realizados en parques científicos y tecnológicos (Resolución de 2 de junio de 2005, B.O.E. de 24 de junio de 2004).

## REFERENCIAS

- [1] SANZ, A., PERALES, J. M., MESEGUER, J., LAVERÓN, A. & BEZDENEJNYKH, N. A.: "Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte I: 1960-1993". *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, N° 358 (1/2000), pp. 27-35 (2000).
- [2] SANZ, A., PERALES, J. M., MESEGUER, J., LAVERÓN, A. & BEZDENEJNYKH, N. A.: "Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte II: 1994-". *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, N° 360 (3/2000), pp. 2-8 (2000).
- [3] 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).
- [4] 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).

- [5] 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).
- [6] MESEGUER, J., FRANCHINI, S., PÉREZ-GRANDE, I. & SANZ, J. L.: "On the aerodynamics of leading-edge high-lift devices of avian wings". *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G - Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 219, pp. 63-68 (2005).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] ALONSO, G., MESEGUER, J. & PÉREZ-GRANDE, I.: "Galloping stability of triangular cross-sectional bodies: a systematic approach". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 928-940 (2007).
- [10] BARRERO-GIL, A., ALONSO, G., MESEGUER J. & ASTIZ, M. A.: "Ensayos en túnel de viento de un modelo aeroelástico del arco del puente sobre el río Tajo 'Arcos de Alconétar'". *Hormigón y Acero*, Nº 245, pp: 33-40 (2007).
- [11] MESEGUER, J., ALONSO, G., SANZ-ANDRÉS A. & PÉREZ-GRANDE, I.: "On the circulation and the position of the forward stagnation point on airfoils". *International Journal of Mechanical Engineering Education*, Vol. 35, pp. 65-75 (2007).
- [12] BARRERO-GIL, A., ALONSO, G. & MESEGUER, J.: "Ensayos aeroelásticos de un modelo de puente de arco sobre el río Tajo". *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, CMNE-2007, XXVIII-CILAMCE*, Junio 13-15, Oporto (2007).
- [13] BARCALA, M. A. & MESEGUER J.: "An experimental study of the influence of parapets on the aerodynamic loads under cross wind on a two-dimensional model of train vehicle on a bridge". *Proc. Instn. Mech. Engrs, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 221, pp. 487-494 (2007).
- [14] MESEGUER, J., SANZ-ANDRÉS, A., PÉREZ-GRANDE, I., FRANCHINI, S., SANZ, J. L., ORTEGA, F. & CHIAPPE, L. M.: "On the use of turbulence generators as high-lift devices in the flight at low Reynolds numbers". *Proc. IMechE, Part G: J. Aerospace Engineering*, Vol. 222, pp. 1007-1013 (2008).
- [15] MESEGUER, J., SANZ-ANDRÉS, A., PÉREZ-GRANDE, I., FRANCHINI, S., SANZ, J. L., ORTEGA, F. & CHIAPPE, L.: "Control de capa límite en el vuelo a bajos números de Reynolds". *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, Nº 387, pp: 15-24 (2008).
- [16] MESEGUER, J., SANZ, J. L., CHIAPPE, L. M., ORTEGA, F., SANZ-ANDRÉS, A., PÉREZ-GRANDE, I. & FRANCHINI, S.: "Influencia de la cola en el vuelo del ave primitiva *Archaeopteryx*". *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, Nº 394, pp: 30-36 (2009).
- [17] MESEGUER, J., ÁVILA SÁNCHEZ, S., LÓPEZ GARCÍA, O., DÍEZ ARROYO, C., FERNÁNDEZ SANZ, A. & MARTÍNEZ ACEVEDO, J. C.: "Sobre el uso de parapetos sólidos para atenuar los efectos del viento transversal en la circulación de vehículos ferroviarios". *Via libre ferroviaria*, octubre, pp: 1-22 (2009).
- [18] PINDADO, S., MESEGUER, J., FRANCHINI, S. & BARRERO, A.: *On the reduction of the wind-load on buildings and other civil structures by using cantilever parapets*. 4<sup>th</sup> International Building Physics Conference, 15-18 June, Istanbul, Turkey (2009).
- [19] ALONSO, G., VALERO, E. & MESEGUER, J.: "An analysis on the dependence on cross section geometry of galloping stability of two-dimensional bodies having either biconvex or rhomboidal cross sections" *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 28, pp. 328-334 (2009).
- [20] MESEGUER, J. & SANZ-ANDRÉS, A.: *Aerodinámica básica*. Publicaciones de la E.T.S.I. Aeronáuticos (2005).
- [21] MESEGUER, J. & SANZ-ANDRÉS, A.: *Aerodinámica del vuelo: aves y aeronaves*. Cuadernos Aena, 9, Aena, Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (2007).
- [22] NANJUNDA SWAMY, Y. S.: "On the design of a two-dimensional contracting channel". *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 8, No. 6, pp. 500-501 (1961).
- [23] DYRBYE, C. & HANSEN, S. O.: *Wind Effects on Structures*. John Wiley & Sons, Inc., New York, (1997).
- [24] 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).