

TÚNELES AERODINÁMICOS PARA APLICACIONES DE INGENIERÍA CIVIL

JOSÉ MESEGUER. Doctor Ingeniero Aeronáutico

Catedrático de Aerodinámica en la E.T.S.I. Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y Director del Instituto Universitario "Ignacio Da Riva" de dicha Universidad (IDR/UPM).

ÁNGEL SANZ. Doctor Ingeniero Aeronáutico

Catedrático de Aerodinámica en la E.T.S.I. Aeronáuticos de la UPM y miembro de IDR/UPM

JOSÉ M. PERALES. Doctor Ingeniero Aeronáutico

Profesor Titular de Aerodinámica en la E.T.S.I. Aeronáuticos de la UPM y miembro de IDR/UPM

SANTIAGO PINDADO. Ingeniero Aeronáutico

Miembro del Laboratorio de Aerodinámica de IDR/UPM.

RESUMEN: Existen muchas situaciones en las que en el proceso de diseño de una edificación, aplicando las normas de cálculo de las acciones del viento, no se pueden predecir con la precisión necesaria las cargas aerodinámicas sobre la estructura. En tales circunstancias de incertidumbre, el proceso de diseño deberá avanzar bien asumiendo los riesgos que supone el desconocimiento de las cargas del viento, bien aplicando factores de seguridad exagerados que den lugar a un diseño en extremo conservador (y, casi con toda seguridad, más caro), o bien intentando determinar con más precisión las cargas aerodinámicas, para lo que habrá que acudir, normalmente, a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos.

PALABRAS CLAVE: CARGAS DE VIENTO, AERODINÁMICA, ESTRUCTURAS, SEMEJANZA DINÁMICA

ABSTRACT: There are situations when applying wind load calculation standards, within the design process of a building, where it is impossible to predict the aerodynamic loads on a structure with due precision. Under these circumstances the design process then has to proceed by either accepting the risks imposed by an unknown wind load, by applying exaggerated safety factors which lead to extremely conservative designs (and almost certainly more expensive designs) or, alternatively, by attempting to calculate the aerodynamic loads with more precision. In this latter case the normal procedure is to test scale models in aerodynamic tunnels.

KEYWORDS: WIND LOADS, AERODYNAMICS, STRUCTURES, DYNAMIC SIMILARITY

INTRODUCCIÓN

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos especializada en el cálculo de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza. Como disciplina la aerodinámica abarca a su vez una amplia variedad de aspectos, lo que aconseja el establecimiento de divisiones, de modo que, atendiendo por ejemplo a la geometría de los obstáculos, se puede hablar de una aerodinámica aeronáutica con sus propias subdivisiones de flujo incompresible, flujo compresible subsónico, transónico, supersónico e hipersónico y de una aerodinámica de cuerpos no aeronáuticos, a la que por economía de lenguaje denominaremos aerodinámica civil, en contraposición al hecho de que el gran motor de la rama aero-

náutica de la aerodinámica es el desarrollo de aplicaciones de uso militar, aplicaciones que normalmente revierten después en las aeronaves de utilización civil. Como es natural la frontera entre ambas ramas de la aerodinámica está poco definida, y los conceptos físicos que se manejan en una y otra vertiente de este área del conocimiento científico y tecnológico son análogos.

Existe, sin embargo, un rasgo distintivo que delimita claramente las dos ramas, y éste es, como se ha dicho, la geometría del obstáculo expuesto a la acción del viento. En la aerodinámica aeronáutica los cuerpos en consideración son obstáculos fuselados, pensados para perturbar poco la corriente que fluye a su alrededor, diseñados con el criterio de que la capa límite permanezca adherida al cuerpo, evitando en lo

posible su desprendimiento (referencia 1). Esto hace factible que, bajo ciertas hipótesis restrictivas adicionales, se puedan formular modelos matemáticos que permiten predecir con una aproximación razonable las interacciones entre el obstáculo y la corriente que lo rodea. La solución de estos modelos puede ser abordable analíticamente (en raras ocasiones) o numéricamente, aunque al final casi siempre haya que recurrir a la experimentación (en una primera etapa utilizando modelos a escala en túneles aerodinámicos y posteriormente mediante ensayos en vuelo) para conocer con la precisión requerida las cargas producidas por el viento.

En el otro extremo, la aerodinámica civil se caracteriza porque los obstáculos objeto de estudio no son cuerpos fuselados, sino cuerpos romos y en general con aristas, como así ocurre en las casas, puentes, torres, en muchos vehículos terrestres y en muchos vehículos marinos, y en un largo etcétera.

El rasgo distintivo del flujo alrededor de este otro tipo de obstáculos es que en los mismos la corriente suele estar desprendida en una porción extensa de las superficies del cuerpo, lo que se traduce en una dificultad extrema, primero para plantear modelos matemáticos razonablemente sencillos que recojan en su formulación la tremenda complejidad del fenómeno del desprendimiento de las capas límites y de las estelas que aparecen a sotavento de los obstáculos, y segundo para resolver estos modelos, sea analítica o numéricamente. Por ello, en la aerodinámica civil se ha de recurrir casi siempre a la experiencia y, cuando ésta falla o es escasa, a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos para poder predecir

las cargas que ejercerá la corriente sobre el obstáculo real.

La aerodinámica civil es pues una disciplina que descansa fundamentalmente en el trabajo experimental que a lo largo de años ha concentrado, y sigue concentrando, el esfuerzo de un elevado número de investigadores repartidos por todo el planeta. Fruto de este esfuerzo es la acumulación de un extenso bagaje de conocimientos prácticos sobre el modo de interacción del viento sobre obstáculos de las más variadas geometrías. Hoy en día existe un número significativo de manuales y monografías (véanse, por ejemplo, las referencias 2 a 10), así como revistas especializadas, en los que se puede encontrar abundante información relacionada con las cargas del viento sobre obstáculos no aeronáuticos (aunque la literatura publicada en relación con los obstáculos fuselados es mucho más extensa) y existen, por supuesto, algunos modelos matemáticos (basados en los conocimientos experimentales) que describen la acción del viento sobre obstáculos propios de la ingeniería civil, y normas para el cálculo de las acciones del

viento, que al ser marcadamente conservadoras al fijar los niveles de las cargas aerodinámicas, permiten diseñar con tranquilidad en la mayoría de las ocasiones, sin necesidad de entrar en mayores detalles sobre las particularidades del flujo alrededor del obstáculo en consideración (referencias 11 a 14).

A lo anterior hay que añadir el hecho de que, por razones obvias, las normas de cálculo de las acciones del viento van siempre por detrás de los desarrollos tecnológicos y de la imaginación, de la creatividad y de la osadía de los diseñadores y los proyectistas. En la industria de la construcción es una realidad que la mejora de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados, la adopción de nuevas técnicas de construcción y la incorporación de nuevos materiales en las edificaciones, sobre todo en los revestimientos exteriores, permite que las edificaciones sean cada día más audaces, con formas que en poco o en nada se asemejan a las formas básicas recogidas en las normas de cálculo de las acciones del viento. Por esta razón hay cada vez más construcciones en las que debido al empleo de materiales livianos, soportados por estructuras cada vez más elásticas, las cargas del viento (estáticas y dinámicas) juegan un papel cada día más importante. De este modo el viento, un factor apenas tenido en cuenta en la construcción tradicional en España, se ha convertido en un factor determinante a la hora de evaluar las cargas de diseño sobre bastantes construcciones actuales.

La aerodinámica es una disciplina joven, pues sus hitos más relevantes se concentran en el último siglo. En este tiempo la vertiente aeronáutica ha experimentado un avance espectacular, mientras que la vertiente no aeronáutica de la aerodinámica ha seguido un desarrollo más pausado, con logros aparentemente más modestos a pesar de que sus beneficios son casi siempre mucho más próximos a la vida cotidiana. Puede llamar la atención que todavía hoy en día muchas de las investigaciones para determinar las acciones del viento sobre estructuras se planteen después de que haya ocurrido una catástrofe y no antes de iniciar su construcción, y no parece que la introducción de nuevas herramientas de cálculo y de nuevas tecnologías en la construcción haya disminuido apreciablemente la tasa de fallos. Ello quizás es debido a la inexistencia de una cultura de prevención contra las acciones del viento, a pesar de que raro es el año en el que los medios de comunicación no informan sobre catástrofes producidas por el viento, algunas muy cercanas.

Muchas construcciones se han convertido en un elemento identificador del área geográfica donde están ubicadas, existiendo una tendencia a diseñar edificaciones cada vez más audaces y ambiciosas en sus formas exteriores, para reforzar su carácter emblemático. Debido a este carácter singular de muchas de las edificaciones, de formas muy alejadas de las formas sencillas de los obstáculos más comunes que se recogen en las normas de cálculo, resulta complicado estimar con fiabilidad las cargas aerodinámicas sobre las mismas, por lo que con frecuencia se ha de acudir a ensayos con modelos a

La aerodinámica civil se caracteriza porque los obstáculos objeto de estudio no son cuerpos fuselados, sino cuerpos romos y en general con aristas, como así ocurre en las casas, puentes, torres, en muchos vehículos terrestres y en muchos vehículos marinos, y en un largo etcétera

escala en túnel aerodinámico para dimensionar correctamente las cargas producidas por el viento (referencia 15).

VALIDEZ DE LOS ENSAYOS EN TÚNEL AERODINÁMICO

De acuerdo con los principios del análisis dimensional y de la semejanza habituales en mecánica de fluidos, la realización de un ensayo en túnel aerodinámico con un modelo a escala de la estructura real requiere la existencia de semejanza geométrica, semejanza cinemática y semejanza dinámica entre el flujo alrededor del modelo y el movimiento del aire alrededor del obstáculo real.

La semejanza geométrica implica que en el modelo de ensayos, que incluye tanto la estructura objeto de estudio como su entorno cercano, si ha lugar, se deberán reproducir fielmente a escala todos aquellos detalles de la realidad que sean aerodinámicamente significativos. La semejanza geométrica no quiere decir que el modelo de ensayo haya de ser una maqueta escrupulosamente a escala del obstáculo real, lo que es en muchas ocasiones físicamente imposible, habida cuenta de las escalas que se manejan, sino que en el modelo de ensayos estén reproducidos con realismo los elementos del conjunto que sean aerodinámicamente relevantes.

La semejanza cinemática requiere que en los flujos a comparar las líneas de corriente sean semejantes. Obviamente un requisito previo para que las líneas de corriente sean semejantes es que las condiciones de la corriente incidente sean también semejantes, lo que significa que al estar los obstáculos objeto de interés en aerodinámica civil en la capa límite terrestre, al ensayar con modelos a escala también habría que reproducir de forma apropiada una capa límite semejante. Esto significa que tanto el perfil de velocidad media de la corriente incidente como las características de la turbulencia deberían ser semejantes en la corriente incidente real y en el flujo que incide sobre el modelo (aunque esta condición requiere matizaciones, y puede ser relajada en gran medida, como se comenta posteriormente).

La semejanza dinámica exige que la distribución de fuerzas en los dos flujos, real y a escala, sea tal que en puntos homólogos las fuerzas de tipos idénticos (de presión, de rozamiento, etc.) sean paralelas y la relación entre sus módulos constante. Además la relación debe ser la misma para los distintos tipos de fuerzas presentes. Así pues, en el caso de flujos dinámicamente semejantes deberá existir una relación sencilla y de fácil cálculo entre las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre contornos semejantes, de modo que midiendo estas fuerzas sobre el modelo (presión, sustentación, resistencia aerodinámica, ...) se podrá predecir la intensidad de las cargas aerodinámicas sobre la estructura real.

La semejanza dinámica exige que la distribución de fuerzas en los dos flujos, real y a escala, sea tal que en puntos homólogos las fuerzas de tipos idénticos (de presión, de rozamiento, etc.) sean paralelas y la relación entre sus módulos constante

Analizando las variables físicas que intervienen en el flujo alrededor de un obstáculo, el análisis dimensional permite definir distintos grupos adimensionales que expresan relaciones entre fuerzas u otro tipo de relaciones (cinemáticas y geométricas). Estos grupos adimensionales, denominados en mecánica de fluidos con el calificativo algo equívoco de "números" permiten definir las distintas leyes de modelizado que rigen en los ensayos con modelos a escala.

En general, una ley de modelizado describe una condición de equivalencia o de proporcionalidad entre el prototipo (la estructura real) y el modelo de ensayo, fijando además las condiciones de ensayo del modelo y el procedimiento para la interpretación y aplicación de los resultados obtenidos en el ensayo a la estructura real. Formalmente las leyes de modelizado se formulan considerando el número adecuado de parámetros adimensionales relevantes (obtenidos a partir de consideraciones físicas, o a partir de la formulación matemática, a través de un sistema de ecuaciones que proporcione una descripción adecuada de los fenómenos aerodinámicos en consideración). En las aplicaciones de la aerodinámica civil el número de parámetros a considerar es tan grande que es imposible satisfacer todos ellos simultáneamente, por lo que, habitualmente, al modelizar no se tienen en cuenta los parámetros cuya importancia es menor para la explicación del caso en estudio, reteniendo únicamente aquellos que son realmente significativos.

Teniendo en cuenta lo dicho respecto a las condiciones a satisfacer para asegurar la existencia de semejanza dinámica, resulta claro que, en primer lugar, los modelos a ensayar deben ser geoméricamente semejantes (en el sentido aerodinámico antes definido) a la estructura real, de acuerdo con una cierta escala de longitudes. El flujo de fluido alrededor del modelo debe ser también semejante al flujo alrededor del prototipo, lo que se consigue cuando las fuerzas que actúan sobre una masa de aire están en la misma relación sobre el modelo que en la escala real. Existe una amplia variedad de fuerzas que pueden actuar sobre una partícula fluida (inerciales, de presión, viscosas, gravitatorias, etcétera), aunque su importancia relativa varía mucho dependiendo de los casos. En el caso que nos ocupa, los parámetros adimensionales más significativos son:

El número de Euler, que es la relación de las fuerzas de presión a las fuerzas de inercia. En la práctica en vez del número de Euler se suele emplear el doble del número de Euler, el llamado coeficiente de presión, c_p , definido como

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

donde p es la presión en el punto considerado, p_∞ y U_∞ la presión estática y la velocidad del fluido corriente arriba, lejos del obstáculo, y ρ la densidad del fluido.

El número de Mach, M_∞ , es la relación de la raíz cuadrada de las fuerzas de inercia a la raíz cuadrada de las fuerzas que tienen su origen en la compresibilidad del fluido, lo que se puede expresar como el cociente entre la velocidad de la corriente incidente, U_∞ , y la velocidad del sonido en ésta, a_∞ , es decir: $M_\infty = U_\infty/a_\infty$. Es de gran importancia en los flujos de elevada velocidad, donde las variaciones de densidad debidas a la presión dinámica son significativas, pero irrelevante en aerodinámica civil (aunque se ha de tener en cuenta al considerar el número de Reynolds).

El parámetro más significativo es, sin duda, el número de Reynolds, que es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción, normalmente expresadas en función de parámetros geométricos (la longitud característica del obstáculo, l) y del flujo apropiados (densidad, ρ , velocidad, U_∞ , y viscosidad dinámica, μ , del fluido),

$$R_e = \frac{\rho U_\infty l}{\mu}$$

Un número de Reynolds pequeño significa que las fuerzas de viscosidad son grandes comparadas con las fuerzas de aceleración convectiva que actúan sobre el fluido, lo que implica que cualquier aceleración de una partícula fluida será amortiguada rápidamente, y por lo tanto el flujo es laminar. Lo contrario ocurre cuando el número de Reynolds es grande: la turbulencia generada en el fluido apenas es amortiguada y el flujo permanece siempre turbulento (este segundo es el caso normal en aerodinámica civil, donde el valor del número de Reynolds es casi siempre superior al millón).

En una estructura de formas suaves y redondeadas, sin aristas, el valor del número de Reynolds crítico (es decir, el límite entre el rango subcrítico, capa límite laminar, y el supercrítico, capa límite turbulenta) depende de la turbulencia de la corriente incidente y de la rugosidad de la superficie de la estructura. El carácter laminar o turbulento de la capa límite condiciona el desprendimiento de la corriente y por tanto las cargas aerodinámicas sobre el cuerpo.

Para conservar el número de Reynolds, si el fluido de trabajo es el mismo tanto en el flujo alrededor del prototipo como en el flujo alrededor del modelo, habrá que conservar el valor del producto $U_\infty l$, 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, con lo cual el valor del número de Mach de los ensayos aumentaría en la misma proporción, y en este caso el régimen del flujo dejaría de ser, con toda seguridad, incompresible.

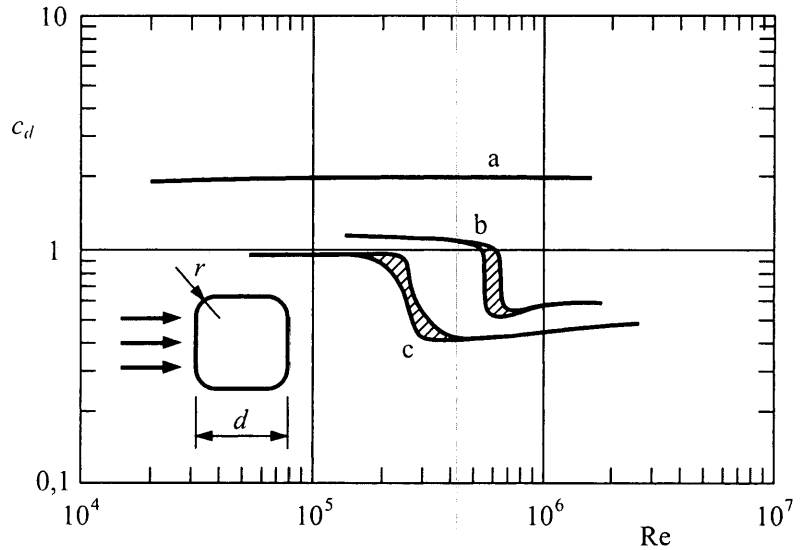


Figura 1. Variación con el número de Reynolds, Re , del coeficiente de resistencia, c_d , de cuerpos bidimensionales de sección cuadrada de lado d con las esquinas redondeadas con acuerdos cilíndricos de radio r :
 a) $r/d = 0,021$;
 b) $r/d = 0,167$;
 c) $r/d = 0,333$.

Así pues, a la vista de las expresiones del número de Mach y del número de Reynolds, resulta evidente que manteniendo constantes las propiedades del fluido de trabajo es imposible, al ensayar con modelos a escala, conservar a la vez el valor de ambos parámetros, número de Mach y número de Reynolds.

Esto puede ser crucial en el caso de obstáculos aeronáuticos, pues la dependencia de las cargas aerodinámicas del valor del número de Reynolds puede plantear errores de interpretación al ensayar modelos a escala de cuerpos fuselados o redondeados, ya que pudiera ser que siendo el régimen supercrítico en el caso del obstáculo real, en los ensayos el número de Reynolds fuera subcrítico.

Las condiciones de ensayo relativas a estos parámetros adimensionales, Re y M_∞ , se pueden relajar considerablemente en el caso de cuerpos con aristas (situación normal en la mayoría de las estructuras que se consideran en aerodinámica civil), pues enseña la experiencia que cuando los cuerpos expuestos al viento no son fuselados ni redondeados los coeficientes adimensionales de fuerzas y momentos son casi independientes del valor del número de Reynolds una vez que este parámetro ha superado un cierto valor (el número de Reynolds crítico). La razón de este comportamiento es que en obstáculos con aristas o con bordes muy poco redondeados la capa límite se desprende en éstos para velocidades moderadamente pequeñas, situación que no cambia al aumentar la velocidad. Este comportamiento queda ilustrado en la figura 1, donde se muestran las curvas de variación con el número de Reynolds de los coeficientes de resistencia de cuerpos de sección rectangular con las esquinas más o menos redondeadas. Nótese que el coeficiente de resistencia aerodinámica es independiente del número de Reynolds si los bordes son afilados (radio de acuerdo pequeño), pero depende fuertemente de este parámetro.

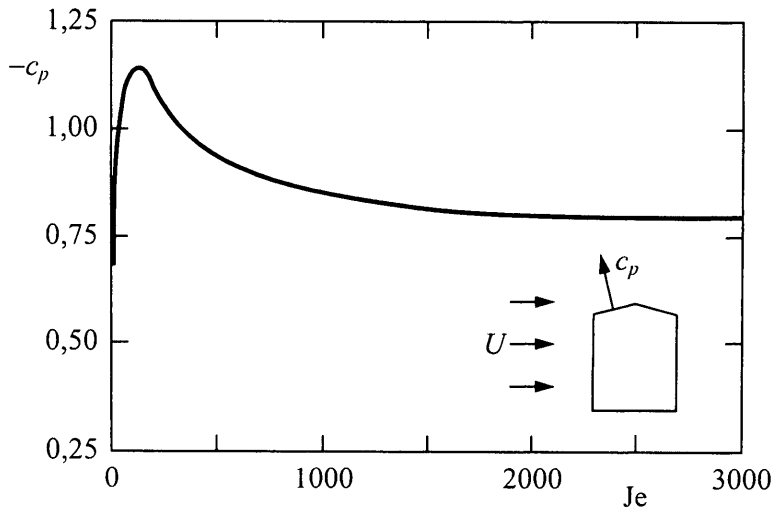


Figura 2.
Variación con el número de Jensen del coeficiente de presión en un punto de un obstáculo típico (de referencia 3).

tro adimensional en el caso contrario. Así pues, en la mayoría de las aplicaciones de la aerodinámica civil la igualdad de números de Reynolds es una condición de ensayo innecesaria (e imposible de conseguir), bastando con comprobar que el número de Reynolds de los ensayos está por encima del valor crítico

Otro parámetro que en algunos casos puede ser de interés reproducir es el llamado número de Jensen: $Je = L/z_0$, que define 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. Si se cumple la ley de modelización de Jensen, las estructuras turbulencia presentes en el movimiento turbulento, y por lo tanto el espectro del viento natural, estarán simuladas con precisión razonable en el túnel aerodinámico. No obstante, las fluctuaciones turbulentas de baja frecuencia, que se escalan con la altura de la capa límite, no estarán representadas automáticamente imponiendo la igualdad de números de Jensen, siendo precisas puntualizaciones adicionales (para más detalles el lector puede consultar, por ejemplo, la referencia 3). La importancia de que el número de Jensen en los ensayos en túnel sea igual al número de Jensen en el flujo alrededor de la estructura real se pone de manifiesto en la figura 2, donde se muestra la variación con este parámetro del coeficiente de presión en un punto representativo de un obstáculo civil típico (una casa). Debe notarse, sin embargo, que 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 indefinición respecto a las condiciones reales que la estructura deberá encarar en el futuro puede aconsejar, en un gran número de ocasiones, realizar los ensayos considerando el caso más desfavorable susceptible de ser normalizado, que suele 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 el nivel de turbulencia que produce las máximas cargas de presión (en torno al 4%).

Junto a los parámetros citados, en algunos casos habrá que tener en cuenta también el número de Strouhal, St , parámetro que señala la influencia de los movimientos no estacionarios. En los movimientos periódicos se define como $St = nL/U_\infty$, donde n es la frecuencia característica. Además, en el caso de estructuras con posibilidad de que sufran oscilaciones excitadas por el viento, además de los parámetros de semejanza relativos a los ensayos en túnel de estructuras estacionarias, hay otros parámetros de semejanza característicos del movimiento oscilatorio que también habrá que tener en cuenta. En particular la masa de la estructura, el coeficiente de amortiguamiento y las propiedades elásticas de la estructura, que son características determinantes de su respuesta frente al viento y que por tanto deberían ser consideradas en los parámetros de semejanza. La semejanza de masas impone en particular que la relación entre la densidad del aire y la densidad de la estructura sea análoga en el prototipo y en el modelo de ensayo, la semejanza del coeficiente de amortiguamiento requiere que este parámetro sea idéntico en la realidad y en el modelo, y la semejanza de las propiedades elásticas demanda la igualdad del llamado número de Cauchy,

$$C_o = \frac{E_{ef}}{(\rho U_\infty^2)}$$

donde E_{ef} es el módulo de Young de la estructura.

A la vista de lo expuesto, resulta imposible reproducir en un ensayo en túnel aerodinámico con un modelo a escala todos los parámetros que refleja la física del fenómeno en estudio, lo cual no suele ser grave, pues en la mayoría de los casos la importancia relativa de muchos de estos parámetros es secundaria. En la mayoría de las aplicaciones los efectos

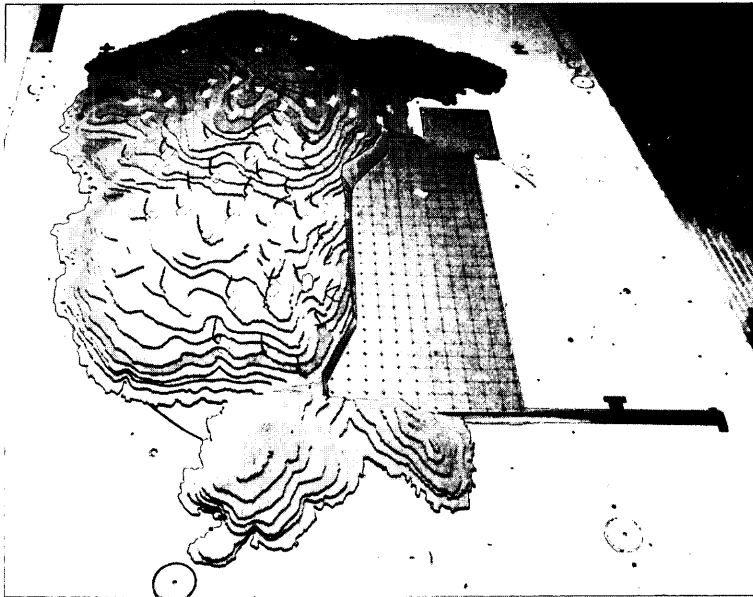
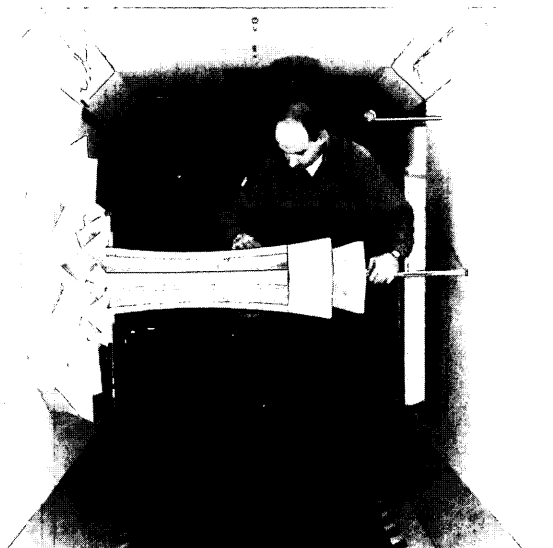


Figura 3. Modelo de ensayos a escala 1/2000 del nuevo puerto de Ferrol en la cámara de ensayos del túnel A9 de IDR/UPM.

Figura 4. Modelo de ensayos de la torre de control del aeropuerto de Málaga durante la fase de instalación en la cámara de ensayos del túnel A9 de IDR/UPM.

aeroelásticos no son determinantes, al igual que los no estacionarios, y la ambigüedad existente respecto a las condiciones reales de la corriente incidente aconseja obviar cualquier consideración respecto al número de Jensen (ensayando, como se ha dicho, para la configuración más desfavorable). Si es así, la igualdad de los valores de los coeficientes de presión sobre el modelo y en la realidad queda asegurada con la igualdad de los números de Reynolds, y ya se ha dicho también que en las estructuras típicas de la aerodinámica civil basta con asegurar que el valor del número de Reynolds está por encima del valor crítico (en torno a cien mil), pues se sabe que sobrepasado este límite las cargas aerodinámicas son muy independientes del valor de este parámetro.



TÉCNICAS DE ENSAYO EN TÚNEL AERODINÁMICO

Los procedimientos empleados en los estudios sobre modelos en túneles aerodinámicos varían ampliamente dependiendo de los objetivos particulares y los recursos disponibles. No obstante, hay ciertos tipos característicos de ensayos, como se explica en los párrafos siguientes.

Un primer tipo son los ensayos de modelos topográficos, empleados para determinar las condiciones del viento en flujos sobre terrenos complejos (figura 3). Las escalas típicas en este tipo de ensayos oscilan entre 1/2000 y 1/5000. Si la escala elegida es muy pequeña, del orden de 1/5000 o incluso menos, los números de Reynolds asociados a los ensayos en túnel serán muy bajos. La capa límite atmosférica simulada con números de Reynolds tan bajos puede presentar una distorsión significativa de la modelización, haciendo que sea difícil interpretar los resultados obtenidos de los ensayos. A veces se aumenta la rugosidad de la superficie del modelo deliberadamente para obtener una simulación mejorada de la capa límite y evitar las llamadas superficies aerodinámicamente lisas.

En el siguiente tipo se pueden considerar los ensayos de medida de presiones locales empleando modelos a escala rígidos instrumentados con tomas de presión. Las escalas típicas suelen estar entre 1/75 y 1/500. Las presiones medias y fluctuantes se miden conectando las tomas de presión dispuestas sobre el modelo con transductores de presión por medio de tubos flexibles (figura 4). Este tipo de ensayo es, con mucho, el más demandado a los laboratorios con capacidad de hacer ensayos en túnel aerodinámico.

Medida directa de la resultante de las cargas de viento. Las escalas típicas están entre 1/75 y 1/500. El modelo, o la parte del mismo sobre la que se quiere conocer la carga aerodinámica global, se fija a una balanza que mide la carga total que actúa sobre el elemento. Existen balanzas de alta frecuencia (piezoeléctricas) especialmente diseñadas que pueden emplearse para medir la carga de viento total fluctuante sin distorsiones significativas producidas por las vibraciones naturales del modelo. Los modelos empleados en estos ensayos deben tener una frecuencia natural más alta que las frecuencias más significativas de la carga de viento.

Ensayos aeroelásticos empleando modelos a escala dinámica de edificios. Las escalas típicas son del orden de 1/100 a 1/300. 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 semejantes. 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. En ocasiones puede ser suficiente con ensayar un modelo rígido sobre apoyos elásticos. Estos en-

TABLA 1. ENSAYOS PARA LA MEDIDA DE CARGAS DEL VIENTO REALIZADOS EN EL TÚNEL A9 DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID EN EL PERÍODO 1997-2000

Año	Modelo	Cliente
1997	Colectores solares Modelo básico de automóvil utilitario Modelo básico de automóvil S4 Elementos señalizadores para líneas eléctricas Nueva torre de control del aeropuerto de Barajas Cubierta de Estadio Olímpico para Sevilla Ventilación de los túneles de la variante M-111	Abengoa S.A. SENER, Ingeniería y Sistemas SENER, Ingeniería y Sistemas Sevillana de Electricidad GOP, Oficina de Proyectos AYESA PISTA BARAJAS, U.T.E.
1998	Cubierta del estadio del Real Betis Balompié Modelo básico de automóvil S5 Modelo bidimensional de cubierta para el estadio de Atletismo de Sevilla Nueva torre de control del aeropuerto de Málaga Plaza de Toros de las Ventas de Madrid Fenómenos dinámicos en puentes	AG Asociados SENER, Ingeniería y Sistemas AYESA GOP, Oficina de Proyectos Comunidad de Madrid D.G. Inf. Transp. Ferroviario
1999	Barreras cortavientos para minas Plataforma de ensayo de motores, aeropuerto de Barajas Nuevo edificio terminal del aeropuerto de Barajas Modelo del nuevo puerto de El Ferrol	INTECSA FCC INECO ETSN/UPM
2000	Edificios del campus de Leioa (Univ. del País Vasco) Modelo de pérgola Cubierta del Velódromo de Dos Hermanas (Sevilla) Edificio Tropicarium Cubierta de la Estación de FF.CC. (L.A.V.) de Zaragoza Cubierta del Estadio Municipal de Chapín de Jerez de la Frontera Cubierta de la ampliación del Museo Reina Sofia de Madrid Cubierta de la nueva sede social de ENDESA Palacio de ferias de Málaga Sistema PARPADO de recubrimiento de plazas de toros	GOP, Oficina de Proyectos CESMA Ingenieros Escrig y Sánchez, Arquitectos CESMA Ingenieros PONDIO Ing./ CESMA Ing. CESMA Ingenieros ESTEYCO PONDIO Ingenieros ESTEYCO LANIK

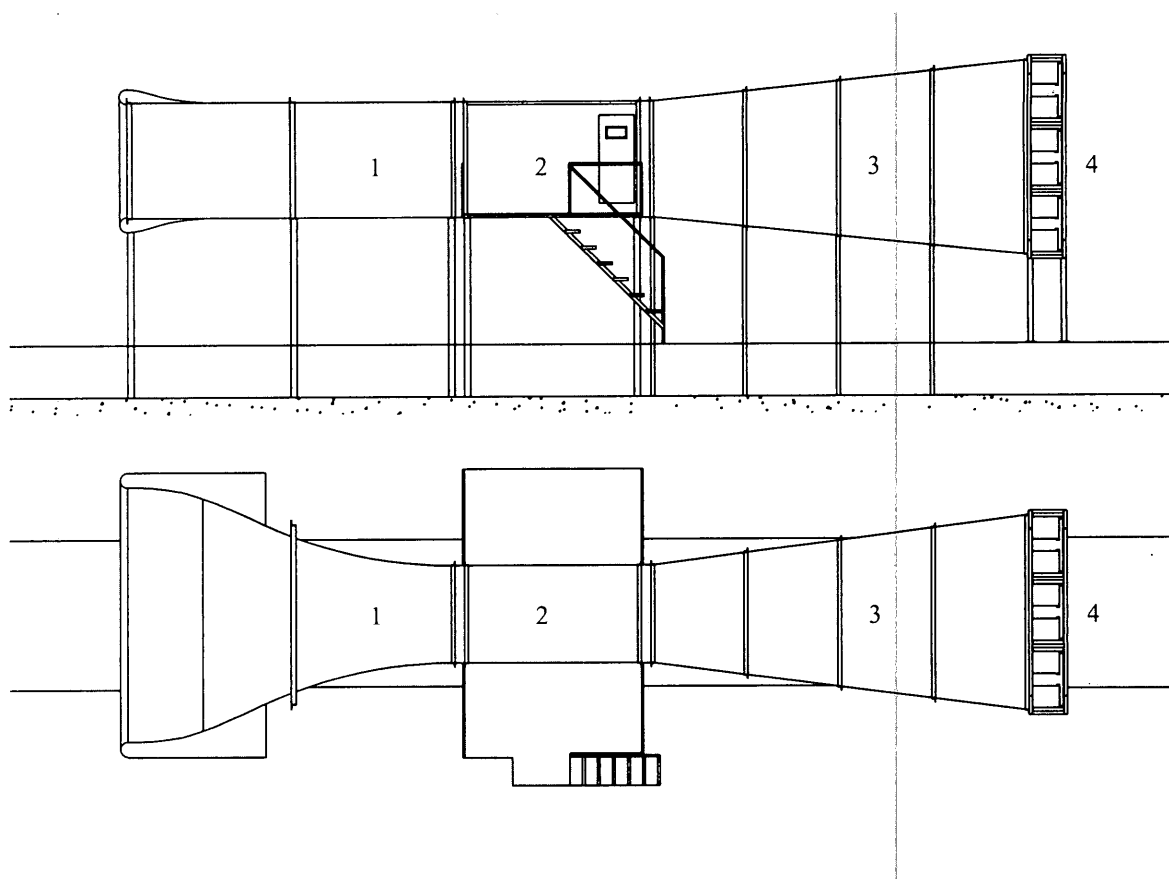
sayos suelen ser mucho más caros que los descritos en párrafos anteriores.

EL TÚNEL AERODINÁMICO A9 DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

A la vista de los argumentos expuestos en los párrafos anteriores, y teniendo en cuenta la multiplicidad de aplicaciones de los túneles aerodinámicos, se entiende que la mayoría de los mismos estén construidos para un cierto uso específico, lo que suele condicionar muchos aspectos del diseño. Se com-

prende que un túnel para aplicaciones de aerodinámica no aeronáutica, que funciona en régimen incompresible, ha de tener unos requisitos muy distintos a los de un túnel supersónico, o que las necesidades de un ensayo de calibración 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 (referencia 16). Atendiendo al primer concepto (número de Mach) los túneles podrán ser de régimen subsónico (y dentro de éste incompresible o compresible), de régimen

Figura 5.
Planta y alzado
del túnel
aerodinámico
A9: 1)
contracción, 2)
cámara de
ensayos, 3)
adaptador, y 4)
ventiladores.



transónico, de régimen supersónico o de 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 muchos órdenes de magnitud, desde valores típicos de 0,01 m² de los túneles supersónicos hasta 100 m² de algunos grandes túneles subsónicos.

En relación con la geometría global del conducto, los túneles aerodinámicos pueden ser, según tengan o no conducto de retorno, de circuito fluido cerrado (con un circuito de retorno específico) o circuito fluido abierto (el aire retorna a través del local donde está el túnel –tipo Eiffel– o bien se toma directamente de la atmósfera y se descarga posteriormente a ésta). Respecto a la cámara de ensayos, ésta puede ser de sección abierta, es decir, sin paredes laterales (como ocurre con los túneles del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA), o de sección cerrada (como es el caso de todos los túneles diseñados en la Universidad Politécnica de Madrid, y el de la mayoría de los túneles actuales)

Respecto a las aplicaciones, un túnel es, como ya se ha dicho, 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. En el caso de los túneles aerodinámicos de la Universidad Politécnica de Madrid, con una experiencia de más de 30 años en estas actividades (referencias 17 y 18), estas instalaciones han sido empleadas en un amplio espectro de ensayos aerodinámicos: medida de las cargas del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza (aeronaves, vehículos terrestres y marinos, casas, puentes, estadios deportivos, edificaciones singulares, etc.), aplicaciones agrícolas (barreras cortavientos para protección de cultivos, estelas de edificios y montes), ventilación natural de casas y factorías industriales, apantallamientos, etc., etc (véase también la tabla 1).

El túnel para ensayos de aerodinámica civil actualmente en servicio en la Universidad Politécnica de Madrid es el denominado túnel A9 (corriente aspirada, nueve ventiladores), que es de cámara de ensayos cerrada y circuito fluido abierto (tipo Eiffel). Los elementos que componen este túnel, tal como se indica en la figura 5, son la contracción de entrada, la cámara de ensayos, el difusor que actúa como adaptador a la sección de ventiladores y los ventiladores.

La contracción 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. 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 tiene 3 m de longitud y una sección de 1,8 m de alto y 1,5 m de ancho (la relación de contracción es pues de 3,2/1); 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 junto a otra cámara situada corriente arriba de la sección de entrada permiten al operador observar la ejecución de los ensayos a través de monitores situados en la sala de control.

Corriente abajo de la cámara de ensayos está el adaptador a la sección de ventiladores, cuya longitud es de 6 m. El túnel A9 está impulsado por nueve ventiladores SO-DECA serie HTC 90, de ocho palas, con una potencia no-

minal de 10 kW y un diámetro interior de 0,9 m cada uno. Los ventiladores, de velocidad regulable, están dispuestos según una matriz de 3x3 y descargan directamente al local. La velocidad máxima en la cámara de ensayos del túnel A9 puede superar los 30 m/s, lo que arroja valores del número de Reynolds del orden del millón para las longitudes características habituales de los modelos (valor por encima del número de Reynolds crítico). 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.

Para la medida de las cargas globales sobre los modelos se dispone de tres balanzas extensométricas, dos de tres componentes y una de seis componentes. Se dispone también de varias cápsulas manométricas (tres de ellas integradas en lectores secuenciales de presión con 48 tomas de presión cada uno), anemometría de hilo caliente, desplazadores de sondas de tres ejes de alta precisión (que permiten barrer toda la cámara de ensayos), cámara de vídeo de alta velocidad (hasta 2000 imágenes/segundo), cámara termográfica, etc. Todas las cadenas de medida están automatizadas y calibradas con patrones estándar. ■

BIBLIOGRAFÍA

–[1] Bertin, J.J. & Smith, M.L., 1989, *Aerodynamics for Engineers*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
 –[2] Blevins, R.D., 1984, *Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., New York.
 –[3] Dyrbye, C. & Hansen, S.O., 1997, *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
 –[4] Kolou_ek, V., Pirner, M., Fischer, O. & Naprstek, J., 1984, *Wind Effects on Civil Engineering Structures*, Elsevier, Amsterdam.
 –[5] Lawson, T.V., 1980, *Wind Effects on Buildings*, Vol. 1, *Design Applications*; Vol. 2, *Statistics and Meteorology*, Applied Science Publishers Ltd., London.
 –[6] Liu, H., 1991, *Wind Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
 –[7] Melaragno, M., 1982, *Wind in Architectural and Environmental Design*, Van Nostrand Reinhold Co., New York.
 –[8] Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J.M. & Pindado, S., 2001, *Aerodinámica Civil. Car-*

gas de viento en las edificaciones, McGraw-Hill, Madrid.
 –[9] Sachs, P., 1972, *Wind Forces in Engineering*, Pergamon Press, Oxford.
 –[10] Simiu, E. & Scanlan R.H., 1996, *Wind Effects on Structures. Fundamentals and Applications to Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
 –[11] ECCS, 1978, *Recommendations for the Calculation of Wind Effects on Buildings and Structures. Technical Committee T12: Wind Effects*, European Convention for Constructional Steelwork (E.C.C.S.), Brussels.
 –[12] Eurocódigo 1, 1998, *Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones en estructuras. Acciones del viento. UNE-ENV 1991-2-4*, AENOR, Madrid.
 –[13] IAP-1996, *Instrucciones sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Parte 3.2.3.2.1. Viento*, Serie Normativas, Instrucciones de Construcción. Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, Madrid.
 –[14] ROM 0.4-95, *Recomendaciones para obras marítimas, Acciones Climáticas II:*

Viento, Puertos del Estado, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.
 –[15] Dobyryn, C.M., Robertson, L.E. & See, S.T., 1982, "When a designer should consider having wind tunnel tests conducted to estimate structural loads", en *Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*, T.A. Reinhold (editor), págs. 3-7, Cambridge University Press, Cambridge.
 –[16] Barlow, J.B., Rae, W.H. & Pope, A., 1999, *Low-speed wind tunnel testing*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
 –[17] Sanz, A., Perales, J.M., Meseguer, J., Laverón, A. & Bezdenejnykh, N., 2000a, "Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte I: 1960-1993", *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, número 358, págs. 27-35.
 –[18] Sanz, A., Perales, J.M., Meseguer, J., Laverón, A. & Bezdenejnykh, N., 2000b, "Las instalaciones de aerodinámica experimental de la E.T.S.I. Aeronáuticos. Parte II: 1994.", *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, número 360, págs. 1-8.