

La acción del viento sobre los edificios altos

José Meseguer

Doctor ingeniero Aeronáutico.

Catedrático de Universidad, IDR/UPM. E.T.S.I.A.E., Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

En este artículo se presenta una breve reseña de los aspectos más relevantes de la problemática relacionada con las acciones del viento sobre edificios de gran altura. Por sus características, el viento que incide en este tipo de construcciones presenta complejos gradientes verticales de velocidad e intensidad de turbulencia. Por otro lado, la respuesta de los revestimientos y las estructuras depende de un gran número de parámetros geométricos, aerodinámicos y estructurales. Se exponen los métodos utilizados en ingeniería para acotar la incertidumbre en la estimación de las acciones resultantes.

Palabras clave

Edificios altos, acciones del viento, túnel aerodinámicos, capa límite atmosférica, aeroelasticidad

Abstract

The article provides a brief summary of the most relevant aspects of wind loading on tall buildings. Due to their characteristics, the wind affecting this type of building presents complex vertical wind speed gradients and turbulence intensity. Furthermore, the response of the cladding and structures depends on a large number of geometric, aerodynamic and structural parameters. The author outlines the methods employed in engineering to restrict uncertainties in the calculation of wind loading.

Keywords

Tall buildings, wind loading, aerodynamic tunnel, atmospheric boundary layer, aeroelasticity



Sebastián Franchini

Doctor ingeniero Aeronáutico.

Profesor titular de Universidad, IDR/UPM. E.T.S.I.A.E., Universidad Politécnica de Madrid

1. Fundamentos

En aerodinámica, los edificios altos son las construcciones esbeltas (aquellas en las que la relación entre el cuadrado de la altura y el área de una sección o planta típica es mucho mayor que la unidad) que además tienen una altura real que es una fracción apreciable del espesor de la capa límite atmosférica, cuyo espesor varía entre 600 m y 1000 m dependiendo del área en consideración. En la capa límite terrestre la velocidad del viento crece con la altura, mientras que la intensidad de la turbulencia decrece, de modo que el viento que incide sobre una construcción, sea alta o baja, no es estacionario ni uniforme.

Si el edificio no es alto, las cargas de viento sobre la estructura y sobre los revestimientos se pueden determinar aplicando la normativa de cargas de viento, donde la variación con la altura de la velocidad y la turbulencia se tiene en cuenta a través de varios coeficientes que afectan a la presión dinámica de cálculo. Si el edificio es alto, esta aproximación no es válida, y en todos los códigos se indican los límites de aplicación de los métodos consignados (un valor representativo de la altura máxima está en torno a 60 m), entendiéndose que, por encima de dichos límites, los valores que resultan de la aplicación de la norma son excesivamente conservadores.

Si la edificación es más alta, para conocer las cargas de viento se ha de acudir a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos, incluso aunque el modelo sea muy rígido. Y si además el edificio fuera flexible, se debería tener en cuenta en los ensayos esta flexibilidad a fin de evitar posibles episodios aeroelásticos, asociados a que el viento real en el entorno del edificio no es uniforme ni estacionario, como se ha dicho.

La no estacionariedad de la corriente incidente puede ser debida a la turbulencia presente en el viento atmosférico, y también puede ser debida a que el cuerpo se encuentre inmerso en la estela producida por otro obstáculo situado corriente arriba. Pero existe todavía otra posibilidad y es que sea el mismo cuerpo el que produzca un comportamiento no estacionario en el fluido (aunque el cuerpo permanezca en reposo), como es el caso del desprendimiento de torbellinos alternados en cuerpos romos (de sección alejada de la de los perfiles aerodinámicos), torbellinos que son arrastrados por la corriente formando la estela turbillonaria conocida como calle de torbellinos de Von Kármán.

Debido al elevado número de parámetros que intervienen en los fenómenos dinámicos originados por el viento atmosférico, que atañen tanto a la causa perturbadora (turbulencia del viento, estela turbillonaria propia o estelas de otros cuerpos) como a las propiedades mecánicas de la edificación, dentro de las inestabilidades aeroelásticas se suelen distinguir diversos tipos, tales como desprendimiento de torbellinos, galope transversal, galope de estela, divergencia torsional, flameo y bataneo, si bien el primero (desprendimiento de torbellinos) no es estrictamente una inestabilidad que conduzca necesariamente al colapso de la estructura. En el caso de edificaciones de gran altura, quizás los fenómenos aeroelásticos más característicos son los asociados al desprendimiento de torbellinos y en menor medida el galope, transversal y de estela, y el bataneo de estela.

A pesar de las dificultades, el conocimiento sobre los fenómenos aeroelásticos en estructuras civiles ha alcanzado cierta madurez, posibilitando que existan recomendaciones de cálculo de acciones dinámicas del viento en muchas normas de viento (Kwon & Kareem, 2013; Steenbergen y otros, 2012), donde se proponen procedimientos de evaluación de la respuesta dinámica de estructuras ante los diversos casos de cargas aerodinámicas no estacionarias.

A la hora de afrontar los problemas aeroelásticos en las edificaciones, las posibilidades de actuar están ciertamente acotadas, ya que en muchas edificaciones además de los requisitos relativos a la propia integridad de la es-

tructura (evitar su colapso), el diseño está fuertemente condicionado por aspectos económicos y estéticos. Con todo, el problema de la respuesta frente al viento adquiere cada vez más protagonismo, y rara es la construcción de cierta importancia en la que este aspecto no es tenido en cuenta, siendo obligatorio en muchos casos demostrar qué diseño de la estructura frente a las acciones estáticas y dinámicas del viento es el adecuado.

Las vibraciones inducidas por el viento suelen ser, en general, combinaciones de los distintos tipos de acciones aerodinámicas descritas, y siempre en la interacción aeroelástica de una estructura con la turbulencia del viento atmosférico desempeña un papel importante. Como la energía de la turbulencia atmosférica es mayor en el rango de frecuencias bajas, los acoplamientos aeroelásticos sólo son posibles cuando la primera frecuencia propia de la edificación es baja, y además cuando el amortiguamiento de la construcción es pequeño.

Pero incluso en el caso de que no aparezcan inestabilidades aeroelásticas de ningún tipo, determinar la distribución de cargas de viento sobre una edificación inmersa en la capa límite terrestre no es un caso que se contemple en las normas de cálculo si la edificación es alta, debiéndose entonces acudir, como se ha dicho, a ensayos en túnel aerodinámico.

El uso de ensayos de túneles aerodinámicos descansa en el llamado principio de semejanza, que es ampliamente utilizado para obtener información acerca de las cargas de viento sobre un cuerpo real mediante ensayos con modelos a escala (Meseguer y otros, 2013). En términos generales, semejanza significa que todos los detalles geométricos que son de importancia aerodinámica deben ser reproducidos en el modelo a escala, y que los valores de algunos parámetros adimensionales característicos han de ser los mismos tanto en el flujo alrededor del modelo ensayado como en la realidad.

Los parámetros relevantes se determinan usando el conocido teorema π de Buckingham, que establece que si un problema depende de n variables, y estas variables contienen m dimensiones primarias (por ejemplo, masa, longitud y tiempo), el problema queda caracterizado por n

– m grupos adimensionales que expresan relaciones entre fuerzas u otro tipo de relaciones (cinemáticas y geométricas). Estos grupos adimensionales, denominados números, permiten definir las distintas leyes de modelado a emplear en los ensayos aerodinámicos con modelos a escala, y definen las condiciones de equivalencia o de proporcionalidad entre las cargas de viento sobre el prototipo (la estructura real) y sobre el modelo de ensayo, fijando además las condiciones de ensayo del modelo y el procedimiento para la interpretación de los resultados y su aplicación a la estructura real.

Formalmente, las leyes de modelado 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 apropiada 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 modelar 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.

Asegurar la existencia de semejanza dinámica requiere que, en primer lugar, los modelos a ensayar y las correspondientes estructuras reales sean geoméricamente semejantes (en el sentido aerodinámico antes definido), de acuerdo con una cierta escala de longitudes. El flujo de fluido alrededor del modelo debe ser también semejante al flujo alrededor del cuerpo real, 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 la importancia relativa de unas frente a otras puede variar mucho dependiendo de los casos.

En el caso de los edificios, los criterios de semejanza se satisfacen si además de la semejanza geométrica se cumple la igualdad de los números de Reynolds y de Jensen correspondientes a los ensayos y a la realidad.

El número de Reynolds, $Re = U_x C / \nu$, es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción, normalmente expresadas en función de parámetros geométricos (la longitud característica C) y del flujo (velocidad, U_x , y viscosidad cinemática, ν). Para conservarlo, si el fluido de trabajo es el mismo en ambos flujos, hay que mantener el valor del producto $U_x C$, lo cual suele ser imposible en el caso de las edificaciones, pues si la escala del modelo fuera, por ejemplo, 1/100, la velocidad en los ensayos con el modelo tendría que ser cien veces mayor que en la realidad. Afortunadamente, si se trata de cuerpos no fuselados y con aristas, como suelen ser los edificios, las condiciones de ensayo relativas al número de Reynolds se pueden relajar considerablemente, pues en cuerpos con aristas enseña la experiencia que los coeficientes aerodinámicos de fuerzas y momentos resultan ser prácticamente independientes del valor del número de Reynolds, una vez que este parámetro ha superado un cierto valor crítico. La razón de este comportamiento es que, en obstáculos con aristas o con bordes muy poco redondeados, la capa límite se desprende en las aristas de barlovento para velocidades moderadamente pequeñas, situación que no cambia al aumentar la velocidad.

Con el número de Jensen, $Je = C/z_0$, se define la relación entre una longitud característica del modelo, C , 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 viento natural. Para que se cumpla esta otra ley de semejanza se debe simular satisfactoriamente el perfil de velocidades en la parte inferior de la capa límite, en la cual la rugosidad superficial es la escala de longitud dominante. Hay que tener en cuenta, sin embargo, 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 la longitud de rugosidad variará (normalmente crece, y en consecuencia el valor del número de Jensen disminuye).

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 las estructuras estacionarias, hay otros característicos del movimiento oscilatorio que también hay que tener

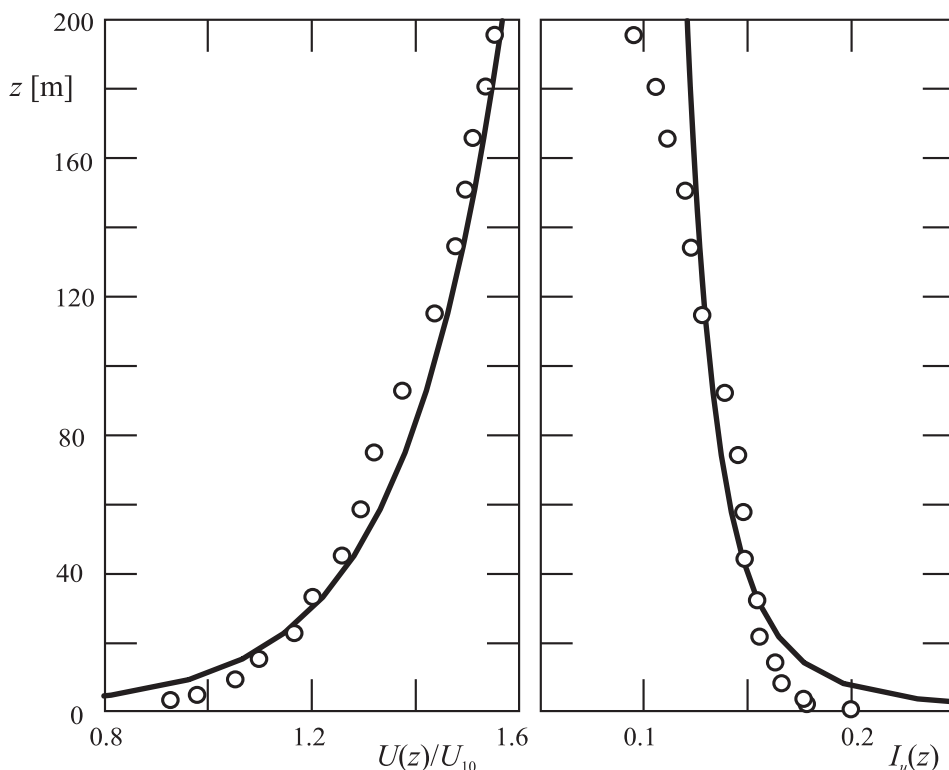


Fig. 1. Variación con la altura sobre el suelo, z , de la velocidad horizontal adimensional en una capa límite terrestre típica, $U(z)/U_{10}$, y de la intensidad de turbulencia, $I_u(z)$, en la cámara de ensayos del túnel ACLA16 de IDR/UPM. U_{10} es la velocidad normalizada a una altura de 10 m

en cuenta. En particular la distribución de masas y de momentos de inercia de la estructura, el coeficiente de amortiguamiento, y las propiedades elásticas.

2. Ensayos en túnel

En razón de lo expuesto es evidente que a la hora de encarar el ensayo en túnel de un edificio surgen diversas disyuntivas, apareciendo en primer lugar en el árbol de decisiones las relativas a la simulación en el túnel de la capa límite terrestre, principalmente la selección del tipo de capa límite a reproducir dependiendo de las particularidades del terreno donde se haya de levantar la edificación. La capa límite en el túnel se simula colocando corriente arriba del modelo de medida los elementos adecuados para alcanzar el perfil deseado, normalmente elementos que modifican verticalmente el área de paso del flujo para lograr el perfil de velocidad y elementos de rugosidad superficial que proporcionan el perfil de turbulencia (figura 1). La definición de estos elementos suele formar parte del conocimiento reservado de cada

institución, pues generalmente está adaptada a cada túnel en particular (figura 2).

Con la opción de capa límite simulada los resultados de los ensayos son los coeficientes de presión adimensionalizados con el valor de una presión dinámica de referencia medida a una cierta altura, con lo que se obtiene directamente ya la dependencia con la altura del campo de presiones sobre las superficies correspondientes a los perfiles de velocidad y turbulencia empleados en los ensayos.

La siguiente decisión atañe a las características aeroelásticas del modelo de ensayos, que puede ser rígido o flexible en función de la rigidez del edificio real. Los modelos rígidos se emplean para la medida de los coeficientes de presión en fachadas y cubiertas, y los flexibles para determinar la respuesta aeroelástica de la edificación en su conjunto. Dentro de esta segunda categoría (modelos flexibles) existe a su vez otra distinción, pudiéndose

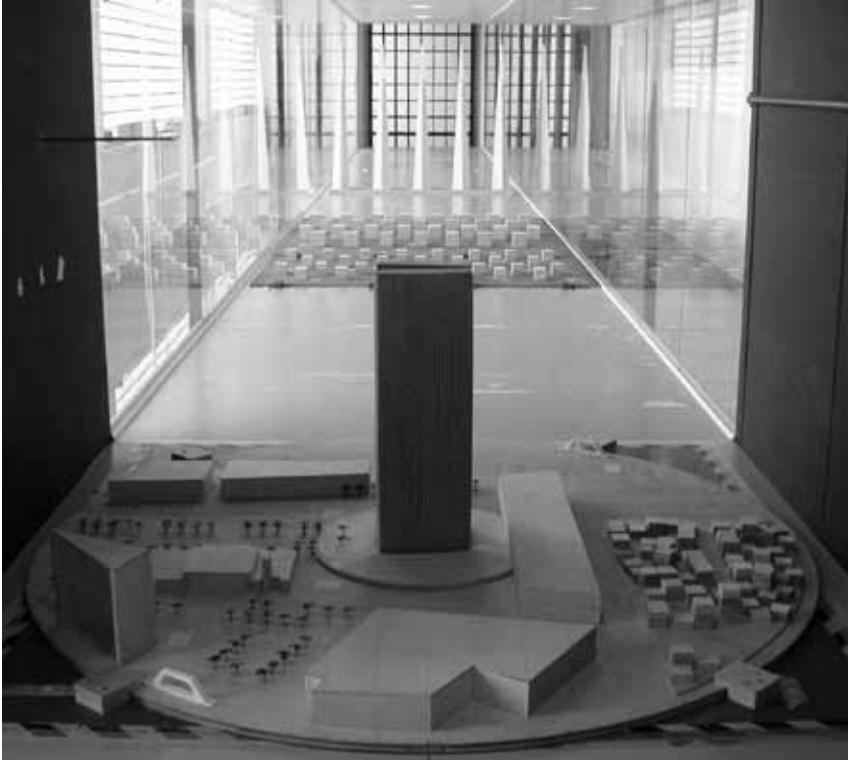


Fig. 2. Vista de un modelo de edificio alto y de su entorno próximo en la cámara de ensayos del túnel ACLA16 de IDR/UPM. En la fotografía se muestran también los elementos previos al modelo para generación y acondicionamiento de la capa límite: cuerpos de sección triangular y rugosidad superficial

optar, con las necesarias gradaciones, entre un modelo realmente aeroelástico en el que se simulen a escala las propiedades mecánicas de las distintas partes de la edificación, con las dificultades que eso implica, o bien, y esta es la opción más empleada, se utiliza un modelo rígido colocado sobre una plataforma elástica en la que mediante muelles, amortiguadores y masas apropiadas se ajustan las escalas de masa, rigidez y amortiguamiento correspondientes (en la figura 3.15 de Meseguer & Sanz (2012) se muestra el esquema de una plataforma elástica que cumpliría los requisitos establecidos).

3. Amortiguamiento de los efectos dinámicos

Cuando se ha de actuar sobre un problema aeroelástico son posibles dos puntos de vista diferentes, estructural o aerodinámico (Tamura, 1998). En el primer caso se puede tratar de rigidizar la estructura (para lograr que la frecuencia de resonancia sea elevada, de modo que la velocidad crítica para cualquier tipo de inestabilidad sea mayor que la velocidad máxima esperada en el lugar considerado), o

bien aumentar el amortiguamiento de la estructura (para disminuir la amplitud de las oscilaciones).

Si lo que se pretende es modificar la respuesta dinámica, puesto que una de las causas de esta respuesta es la formación de estelas de torbellinos coherentes a lo alto de la edificación, la principal idea es actuar sobre el desprendimiento de los torbellinos de manera que las fuerzas aerodinámicas asociadas varíen de unas secciones a otras tanto en magnitud como en frecuencia. Para lograrlo se puede modificar la geometría del cuerpo, añadiendo protuberancias, que alteren la bidimensionalidad del cuerpo, dificultando por tanto la formación de calles de torbellinos uniformes y coherentes a lo largo de la estructura, de forma que el fenómeno sea más aleatorio. Otra posibilidad, más común en edificios altos, es hacer que la forma de la sección del edificio cambie con la altura, pues de este modo cambia también con la altura la frecuencia de los torbellinos (figura 3).

Otra posibilidad para reducir la vibración causada por el viento en estructuras pasa por el empleo de dispositivos atenuadores que, en general, pueden ser de dos tipos: de masas sintonizadas con la frecuencia de vibración de la estructura, o amortiguadores, tanto viscoelásticos como hidráulicos. Los primeros consisten en una gran masa (normalmente hormigón o plomo) situada en lo alto del edificio. La masa suele descansar sobre apoyos hidráulicos que permiten su desplazamiento horizontal, y suele estar conectada a la estructura del edificio mediante actuadores hidráulicos o neumáticos, ajustados para que la masa oscile con la misma frecuencia que la frecuencia natural del edificio, pero en contrafase. Los disipadores viscoelásticos son elementos amortiguadores pasivos que se disponen en puntos seleccionados de la estructura. Este tipo de amortiguadores tiene ya una larga historia, habiéndose utilizado tanto en edificios como en puentes. En Meseguer y otros (2013) se presentan ejemplos de estos tipos de amortiguadores. **ROP**

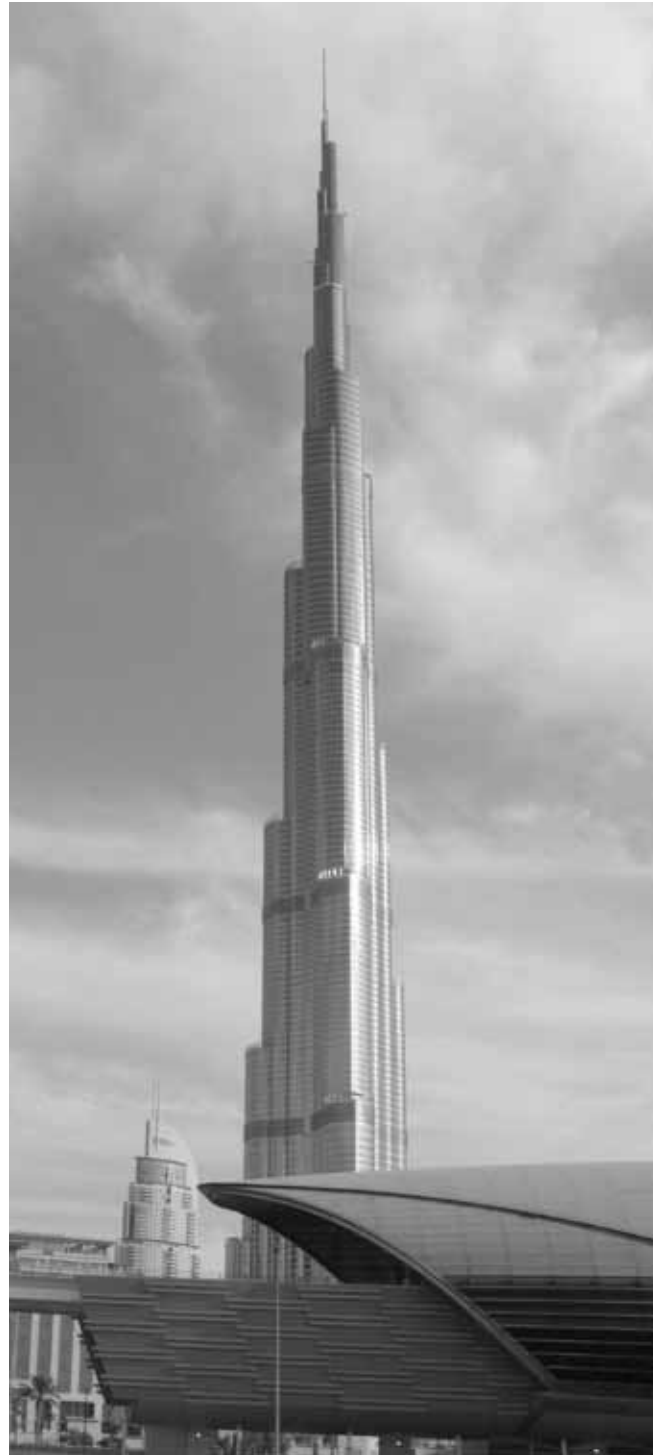


Fig. 3. Fotografía de un edificio alto (Burj Khalifa, Dubái). Obsérvese que la forma y sección de la edificación va cambiando con la altura, para evitar la formación de una estela turbillonaria coherente