

Estudio comparativo de aplicación de la norma EN1991-1-4 para el cálculo de la acción del viento en estructuras singulares

Comparative remarks on the wind load provisions in EN1991-1-4 for special structures

José María Terrés-Nicolí^{a,b,*} y Christian Mans^b

^aProfesor, Departamento de Mecánica de Estructuras, Universidad de Granada, Granada, España

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Oritia & Boreas, S.L., Granada, España

Recibido el 25 de julio de 2013; aceptado el 30 de julio de 2014

Resumen

La globalización de la industria de la construcción española ha provocado la necesidad de una mejor comprensión de las diferencias entre las normas y estándares internacionales relativos a la acción del viento. Dado que la ingeniería del viento es una disciplina relativamente joven, la mayoría de las normas internacionales están en continua fase de revisión y mejora, lo que lleva en ocasiones a interpretaciones incorrectas y a los consecuentes errores de aplicación. Este artículo pone de relieve las principales áreas de divergencia de las normas internacionales con respecto al Eurocódigo 2005, así como las diferencias adoptadas por los países europeos en sus anejos nacionales.

Palabras clave: EN1991-1-4; ASCE/SEI 7-10; Acción de viento; Túnel de viento

Abstract

The internationalization of the Spanish construction industry has triggered increased interest on the various building codes including those with regard to wind loading. Wind engineering is a relatively young discipline. Consequently, international codes, commentaries and guides are constantly evolving. This together with specific significant differences between codes sometimes lead the structural engineer to misinterpretation and error. This article presents limited relevant areas in which other international codes differ from the Eurocode 2005. The expected content and capabilities of the national annexes are also explored.

Keywords: EN1991-1-4; ASCE/SEI 7-10; Wind loading; Wind tunnel

1. Introducción

La compleja interacción del viento en sistemas estructurales singulares determina la respuesta estática y dinámica igualmente compleja que ha resultado en una diversa gama de metodologías para la determinación de la carga de viento de diseño. Esto se manifiesta en la falta de armonización entre las normas internacionales en la definición de los parámetros básicos, tales como la velocidad de viento básica o los datos aerodinámicos y estructurales. Las variaciones entre las metodologías adoptadas por la comunidad internacional de la ingeniería del viento provocan en ocasiones confusión y dificultades para la implementación de las normas extranjeras en proyectos inter-

nacionales. Un ejemplo típico es la aplicación de los coeficientes de presión para estructuras en las que la norma no ha sido diseñada, como heliostatos o paneles solares montados en cubiertas de edificios industriales. El desarrollo del Eurocódigo es también un importante primer paso en la unificación de la norma de la acción de viento en estructuras, de manera que es la referencia preferida en el desarrollo de futuras normas internacionales. Este artículo se fundamenta en numerosas experiencias en proyectos singulares alrededor del mundo. En él se discutirán los principios básicos de la derivación de la última edición de la norma europea EN1991-1-4:2005: *Acciones en estructuras – Parte 1-4: Acciones generales – Acciones del viento* [1], proporcionando un estudio comparativo de las normas estadounidense ASCE/SEI 7-10 [2], canadiense NBCC [3] y australiana AS1170.2 [4] en la predicción de la carga de viento de diseño en edificación. Estas últimas son normas pioneras en la materia y siguen siendo una referencia de aplicación.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: terresnicoli@oritiayboreas.com (J.M. Terrés-Nicolí).

El objetivo principal del Eurocódigo en materia de ingeniería del viento es proporcionar uniformidad en el diseño de estructuras terrestres frente a la acción del mismo. Los países de la Unión Europea cuentan con la potestad de determinar directrices específicas dentro su Anejo Nacional (AN) a través de la incorporación de parámetros de determinación nacional (PDN), con la condición de que las recomendaciones del AN no contradigan el documento básico. La norma europea ofrece más de 50 cláusulas electivas a nivel nacional, incluyéndose la especificación de los parámetros básicos, tales como la exposición del sitio, categorías de terreno, parámetros de turbulencia, coeficientes de presión o coeficientes de direccionalidad entre otros. Se considera esta norma como una de las más avanzadas del mundo, basándose en gran medida en la estadounidense y la canadiense (ASCE y NBCC ambas de 1995), las cuales han experimentado cambios significativos en los últimos 10 años. Se espera que próximamente el Ministerio de Fomento emita el correspondiente anexo nacional a la norma conforme a lo establecido en las Directivas Europeas como, por ejemplo, la 2208/57/CE relativa al sistema ferroviario. Este anexo, AN/UNE-EN 1991-1-4, dará pues cumplimiento a la vocación de armonización técnica. No obstante, las distintas normas nacionales de reciente redacción disponibles para el diseño de estructuras que incorporan la consideración de la acción del viento (IAP-11 [5], IAPF [6] o CTE [7]), se redactaron ya adoptando íntegramente los modelos y criterios de los Eurocódigos relativos a la acción del viento reflejando los procedimientos presentados en el Eurocódigo. Las diferencias entre el EN1991-1-4 [1] y el CTE-2006 [7] serán discutidas y valoradas en este artículo.

En términos generales, los procedimientos adoptados en la evaluación de las cargas de viento y las respuestas inducidas por el viento siguen la oficialmente denominada cadena de la carga de viento de Alan G. Davenport en honor al pionero ingeniero canadiense. En ella se establece que la carga de viento es determinada por los efectos combinados del clima meteorológico del viento, la influencia de los efectos del terreno circundante, la aerodinámica de la estructura y su respuesta dinámica y, finalmente, los criterios de referencia para determinar la aceptabilidad de las cargas previstas (fig. 1). Una vista de la lista de referencias de las secciones de la norma europea dará una estimación de la cantidad de líneas de investigación abiertas en el campo de ingeniería de viento, incluyendo el análisis de estructuras a escala real y estudios a escala en el túnel de viento de capa límite.

Este artículo presentará los orígenes de los procedimientos adoptados en la edición actual del Eurocódigo en esta materia. A través de un conocimiento de los fundamentos de la ingeniería

del viento, los ingenieros podrán aplicar correctamente los principios básicos en proyectos internacionales, comprender las limitaciones de las normas e identificar cuándo resultan necesarios los estudios experimentales de proyectos singulares en el túnel de viento de capa límite.

2. Normas referentes a la carga de viento

2.1. Orígenes

Aquellos que han estudiado o trabajado en el campo de la ingeniería del viento tienen una visión adecuada de la turbulencia. Las ráfagas de viento, de carácter turbulento, influyen en la determinación de las cargas de viento así como la respuesta estructural, y son el eje central de la metodología adoptada por todos los estándares de acciones de viento a nivel mundial.

Que la turbulencia del viento desempeña un papel fundamental en la respuesta de las estructuras es algo conocido por los investigadores desde principios del siglo xx. Sin embargo, no fue respaldado teóricamente hasta 1954, cuando Jensen [8] relacionó el perfil velocidad media del viento con la rugosidad de la superficie mediante una expresión simple adimensional basada en el número que lleva su nombre, que permitía simular correctamente la capa límite en un túnel de viento (Ecuación 1).

$$\left[\frac{h}{z_o} \right]_{\text{prototipo}} = \left[\frac{h}{z_o} \right]_{\text{modelo}} \quad (1)$$

Este parámetro adimensional establece un ratio entre la envergadura del objeto h (altura del edificio, de la pila del puente, etc.) y la altura de rugosidad z_o que caracteriza la rugosidad de la superficie y la estructura del flujo en las capas inferiores. Antes de esto, las pruebas de túnel de viento todavía se llevaban a cabo bajo condiciones de flujo uniforme en túneles de viento aeronáuticos y las normas consideraban cargas puramente estáticas. Como apuntó Larose [9], la definición del número de Jensen se convirtió en la partida de nacimiento para el túnel de viento de capa límite así como de la ingeniería del viento.

El desarrollo de los estándares nacionales pasó por un período de cambios rápidos en la década de los 60, en gran parte debido a una serie de artículos publicados por Davenport [10-12] y a su papel en el diseño de las Torres Gemelas (Nueva York), en donde aplicó sus técnicas para el diseño de las mismas. Durante un período de menos de 10 años, casi todas las normas fueron reescritas para incluir la importancia de la turbulencia



Figura 1. Cadena de carga del viento de Davenport (denominada así en asamblea general por unanimidad, IWEC 2011 [13]).

y la respuesta estructural inducida por el viento siguiendo el modelo conceptual de Davenport (fig. 1). Este modelo divide la acción del viento sobre las estructuras en cinco componentes principales en las que se basan la mayoría de los estándares relativos a cargas de viento: Clima viento, efectos locales del terreno, respuesta aerodinámica, respuesta estructural y criterios de diseño. Recientemente, el modelo ha sido denominado por la Asociación Internacional de Ingeniería del Viento (IAWE) como 'Cadena de carga del viento de Alan G. Davenport' en honor de las contribuciones del mismo a la disciplina [13].

El estudio de la ingeniería del viento se ha expandido rápidamente desde los inicios de la década de 1960, y su desarrollo se proyecta, en lugar de en un cambio significativo en el enfoque, hacia la consolidación y mejora de las versiones originales de las normas y el fortalecimiento específico de cada uno de los eslabones de la cadena. El Eurocódigo y la mayoría de las normas internacionales de carga de viento se redactaron teniendo en cuenta estas consideraciones básicas.

Con cada nueva edición el nivel de confianza en los estándares de carga del viento es cada vez más alto, pero también lo es la complejidad de las recomendaciones en su intento de aumentar la exactitud de la norma. Mientras que el modelo básico de las normas continúa siguiendo la cadena de carga del viento, algunas metodologías y presentaciones de entre las principales normas se han ido distanciando en los últimos años, creando un aura de confusión para los ingenieros en el diseño de estructuras.

2.2. Convergencia del Eurocódigo con los estándares internacionales

Como ocurre con los estándares más avanzados de cargas de viento, el Eurocódigo sigue la filosofía de la cadena de carga del viento. El documento EN1991-1-4 [1] contempla varios años de trabajo de muchos países de la comunidad europea e internacional en lo que a ingeniería del viento se refiere, y es el primer intento importante de elaboración de un estándar de acciones de viento universal. Incorpora los datos de las investigaciones más recientes proporcionados por reconocidos laboratorios de ingeniería del viento y es considerado como el que realiza la descripción más exacta de la carga del viento y la respuesta estructural, de manera que está siendo utilizado como referencia para el diseño de normas de países no europeos.

A modo de comparación entre otros países, la tabla 1 resume las principales características de la norma EN1991-1-4 [1] respecto a tres normas internacionales de acciones de viento: la ASCE 7-10 [2] estadounidense, la NBCC 2010 [3] canadiense y la AS/NZS 1170.2:2011 [4] australiana. Estos países propor-

cionan constantemente ediciones actualizadas de las normas de carga de viento reflejando el estado actual de la técnica y la evolución de la industria de la construcción. A pesar de que todos se basan en procedimientos cuasi-estacionarios similares, existen diferencias entre los códigos que pueden conducir a muy diversas predicciones de las cargas de viento para una estructura dada.

2.2.1. Velocidad de referencia del viento (período promedio)

La definición del período promedio es un factor de confusión para la evaluación y comparación de los códigos internacionales de acciones de viento. La conversión entre la magnitud de la velocidad del viento en un período promedio alternativo se lleva a cabo utilizando la aceptada curva de Durst [2] cuya principal equivalencia es:

$$1,06V_{ref}(1hr) = V_{ref}(10 \text{ min}) = 0,84V_{ref}(1 \text{ min}) = 0,67V_{ref}(3s) \quad (2)$$

La razón histórica para la selección de períodos promedios de cada país puede atribuirse por una parte al aparato de medición utilizado para registrar los datos meteorológicos de viento (por ejemplo, hasta la edición de 1995, las velocidades del viento de la ASCE [2] se presentaron como la milla más rápida) y por otra parte debido a las condiciones climáticas de viento de la región. Los eventos de vientos extremos en Europa y de manera similar en Canadá, se generan mayoritariamente mediante sistemas sinópticos, que son eventos meteorológicos estables que pueden ser expresados en términos de un período promedio general, tales como la velocidad media diezminutal de viento en la EN1991-1-4 [1] y la velocidad media horaria de viento en la NBCC [3]. En las regiones más tropicales, como Estados Unidos y Australia, los fuertes vientos también pueden desarrollarse como resultado de la actividad convectiva, como tormentas o sistemas frontales, que son eventos a corto plazo. En este caso, las velocidades del viento están mejor representados por un período promedio más corto, en torno a los tres segundos.

La presentación de una velocidad de ráfaga de viento parece más lógica en el diseño global de la estructura, ya que el perfil es función de la velocidad máxima del viento, y la presión del viento es por tanto función de la correlación de la carga del viento a través de la superficie de la estructura. Tanto la EN1991-1-4 [1] como la NBCC [3] convierten efectivamente la velocidad media del viento en una velocidad de ráfaga equivalente a través de los procedimientos adoptados por la norma antes de determinar las presiones de viento y las fuerzas.

Esta diferencia en la presentación del período promedio requiere que cada norma adopte diferentes procedimientos y dificulta la comparación entre las distintas partes de las normas internacionales. Sin embargo, si los procedimientos entre las normas internacionales son coherentes, la carga de diseño final de la estructura debería ser idéntica en todos, aunque como veremos más adelante en la práctica esto no es del todo cierto.

2.2.2. Factor de exposición (Perfil de velocidad media)

Fuera de la capa límite, el viento no se ve afectado por las tensiones de fricción de la superficie del suelo, y a este se le denomina viento de gradiente. Sin embargo, conforme disminuye

Tabla 1
Parámetros fundamentales entre las principales normas internacionales

Norma	Período promedio	Respuesta inducida por viento	Perfil de viento
EN1991-1-4 [1]	10 min.	10 min.	Log (Variable s/AN)
ASCE 7-10 [2]	3 seg.	1 hora	Power
NBCC 1995 [3]	1 hora	1 hora	Power
AS 1170.2 [4]	3 seg.	10 min.	Log. Modificado

la distancia al suelo, el viento es retardado por la fricción de la superficie y parte de su energía cinética se disipa en forma de turbulencia. El viento de gradiente es relativamente constante, pero la velocidad del viento en la superficie del suelo puede variar significativamente en función de la rugosidad de la misma.

En condiciones de estabilidad neutra, se denomina capa límite interna a la zona donde el perfil de velocidad es influenciado fuertemente por la rugosidad de la superficie del suelo, mientras que en la capa exterior de la capa límite atmosférica las escalas de longitud están mejor aproximadas por el espesor total de la capa límite. Esto ha llevado al desarrollo de dos métodos de representación del perfil de la velocidad media del viento para el diseño, como se representa en la figura 2 para el terreno tipo

campo abierto. El perfil logarítmico aproxima bien la capa límite atmosférica hasta una altura de 100 metros. El perfil potencial describe adecuadamente la velocidad media del viento desde la superficie del suelo hasta la altura de gradiente [10].

El documento EN1991-1-4 [1] recomienda un perfil de velocidad media de viento logarítmico, pero bien podría ser seleccionado un perfil alternativo para el anexo nacional, tal y como ocurre en los anejos nacionales británico y alemán, que definen un perfil potencial. La ASCE [2] y la NBCC [3] también recomiendan perfiles potenciales, mientras que la AS 1170.2 [4] ha adoptado un perfil logarítmico.

Para comparar los perfiles entre las normas, es importante tener en cuenta los tiempos promedios utilizados en el cálculo de la respuesta inducida por el viento, que son distintos del período promedio de la velocidad de referencia del viento. Los perfiles presentados en la figura 2 se desarrollan para velocidades medias horarias por las normas ASCE [2] y NBCC [3] y para velocidades medias diezminutales en la EN1991-1-4 [1] y la AS1170.2 [4].

2.2.3. Método cuasi-estacionario

La energía del viento se puede describir utilizando el espectro de energía del viento en un punto aislado. Mediciones de viento a largo plazo a través de anemómetros muestran la distribución de la energía en un amplio rango de frecuencias. Los picos locales para 4 días y 1 día representan el movimiento de los sistemas de presión de gran escala y los efectos diurnos respectivamente. Además, debido a la turbulencia, se observa un pico de alta frecuencia en torno a 1 minuto. Entre estas dos zonas existe un espacio con apenas variación de energía que se denomina brecha espectral (fig. 3); esta permite el análisis separado e independiente de la componente macro-meteorológica del viento, asociada a las frecuencias más bajas, y la componente micro-meteorológica, asociada a las frecuencias más altas, lo que nos permite separar la turbulencia de la velocidad media del viento. Este aspecto es fundamental para el análisis de la respuesta dinámica de las estructuras dentro del Eurocódigo a través de la aproximación cuasi-estacionaria y el método del factor de carga de ráfaga.

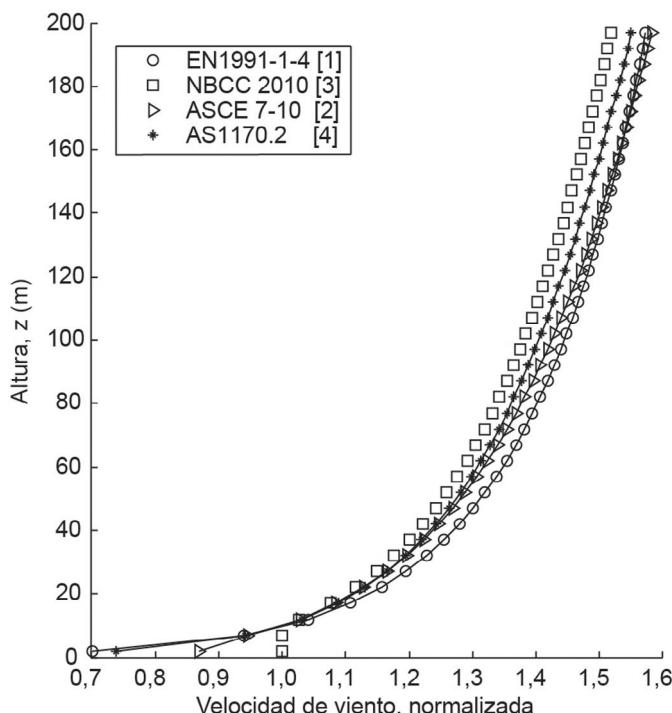


Figura 2. Perfiles de velocidad media de viento según las distintas normas.

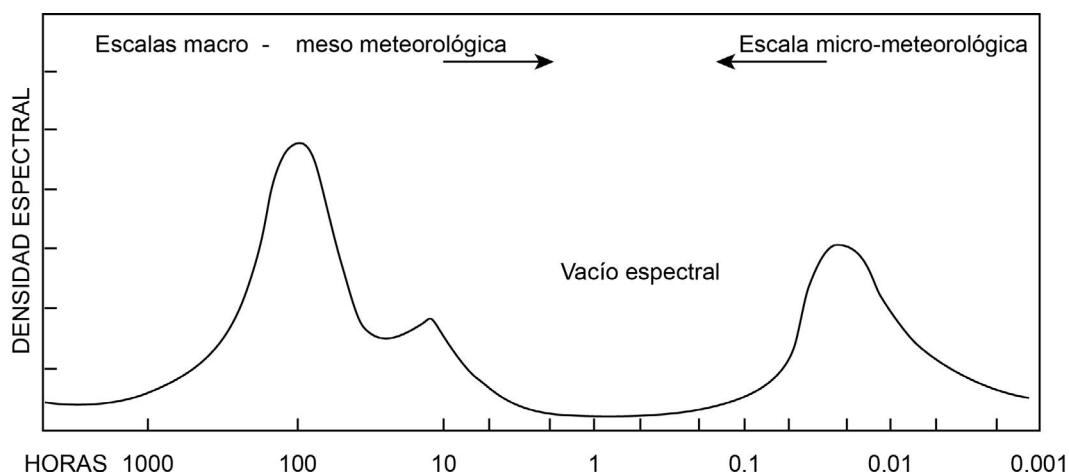


Figura 3. Espectro de viento de Davenport [14].

El método cuasi-estacionario asume que todas las fluctuaciones en la fuerza sobre la estructura se deben a las ráfagas de viento, por lo que no se tiene en cuenta la interacción flujo-estructura o la turbulencia adicional generada por el movimiento de la misma como, por ejemplo, el desprendimiento de vórtices. Este método combina una velocidad de ráfaga extrema con un coeficiente de carga media para definir la carga de diseño. Esta es una hipótesis aceptable para determinar la respuesta de fondo de una estructura de turbulencia por debajo de la frecuencia natural de la misma. La respuesta de resonancia debe ser tratada no obstante por separado.

Como alternativa, el método del factor de carga de ráfaga determina la ráfaga máxima de viento a partir de la velocidad media, obtenido a partir del valor de la raíz media cuadrática, y supone una mejora sobre el método cuasi-estacionario a través de la aplicación de un factor de efecto dinámico, que incluye tanto la ráfaga de viento como las presiones fluctuantes. El método tiene la ventaja de que el producto es un pico de carga, no una velocidad de ráfaga. Si se considera que la estructura no tiene ninguna respuesta dinámica, el factor de pico coincide con el factor de ráfaga.

2.2.4. Cargas en la dirección del viento (coeficiente de respuesta de ráfaga)

En relación a la aerodinámica de edificios altos, la respuesta de vibración es también un factor clave en el diseño frente al viento. La respuesta del edificio consta de componentes en la dirección del viento, en la dirección transversal al viento y en direcciones torsionales. La respuesta en la dirección del viento se deriva de la teoría cuasi-estacionaria, que asume que todas las fluctuaciones de la fuerza provocadas por el viento se deben a las ráfagas de viento. La carga de viento en la dirección transversal se debe al desprendimiento de vórtices, que es la formación alterna de vórtices en las caras laterales del edificio.

Las fuerzas generadas por el desprendimiento de vórtices dependen de la turbulencia del flujo, y pueden ser importantes en estructuras flexibles. La carga de torsión se genera por la aparición de distribuciones superficiales de presión no equilibradas alrededor de las paredes de la torre, debido principalmente a la forma del edificio o a los efectos de interferencia de obstáculos adyacentes. Si el elemento se estudia de manera aislada, la EN1991-1-4 ofrece métodos para estimar la respuesta de viento en las direcciones longitudinal y transversal de la torre. Para configuraciones de torre que presentan la posibilidad de acoplamiento entre los modos principales, o donde hay preocupación por una respuesta torsional significante, se aconseja un estudio en un túnel de viento de capa límite (fig. 4).

La determinación de la respuesta dinámica de estructuras flexibles fue desarrollada por primera vez en el BLWTL (Universidad de Western, Canadá) y se introdujo en el NBCC en la forma de un factor de carga de ráfaga. Desde entonces ha sido adoptado en la mayoría de los principales códigos y normas en todo el mundo para derivar la respuesta en la dirección longitudinal del viento. El método calcula el máximo desplazamiento de punta de acuerdo con el primer modo de vibración de la estructura y la carga estática equivalente de viento que es proporcional a la distribución media de la fuerza de este. La selección de una velocidad de referencia media diezminutal en la EN1991-1-4 [1] permite la conexión entre la velocidad del viento de ráfaga extrema y la coherencia con el método espectral [16]. Siguiendo la teoría cuasi-estacionaria, el espectro de la presión inducida por el viento se basa en la velocidad del viento sin perturbar a la misma altura. La función de admitancia aerodinámica considera la correlación de la turbulencia así como que las fluctuaciones de velocidad no se producen al mismo tiempo sobre toda la cara de barlovento del edificio, por lo que la carga de viento estática equivalente se puede usar entonces para determinar el desplazamiento máximo en cualquier otro

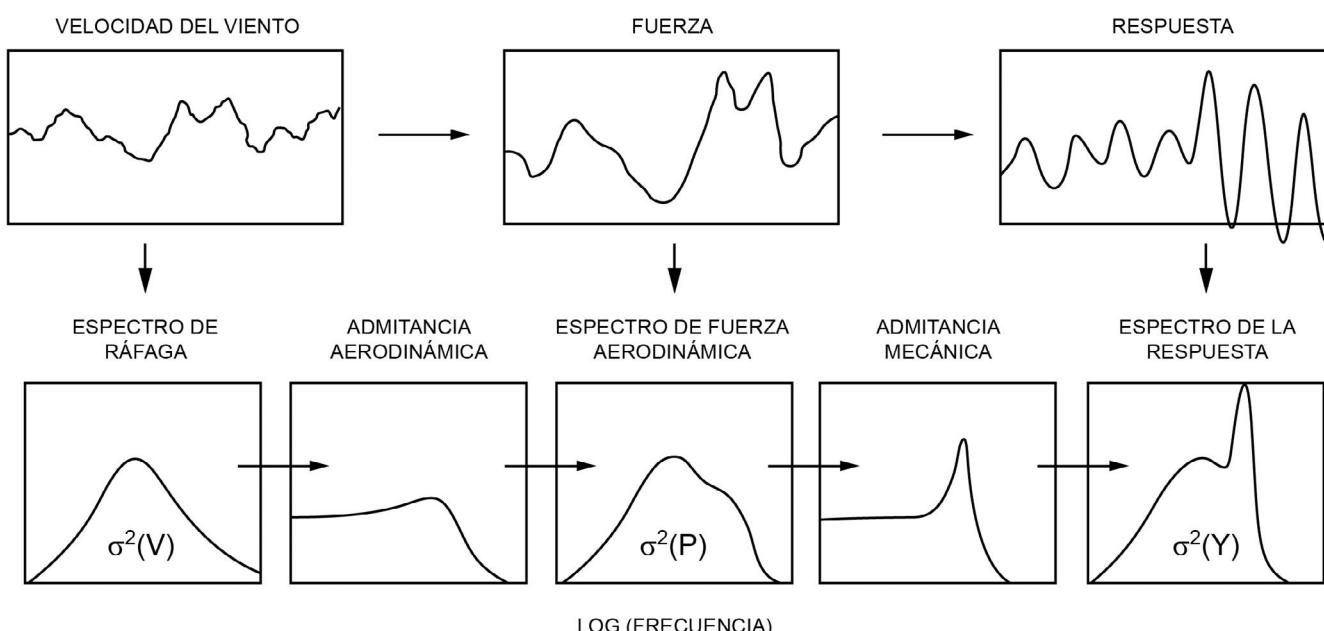


Figura 4. Proceso de obtención de la respuesta a partir de la serie temporal de velocidad (Davenport [15]).

nivel en la estructura. El objetivo del método es satisfacer el efecto de carga máxima considerada, mientras que se reproduzcan adecuadamente los efectos no considerados. En general, esto proporciona una carga resultante que es conservadora, sin embargo, ya que se basa en el desplazamiento de punta, y proporcionará una buena estimación de la respuesta de desplazamiento, pero no puede estimar con fiabilidad otros componentes de la respuesta [17]. Muchos estudios posteriores han seguido a los de Davenport, ajustando la metodología que se presenta ahora en el Eurocódigo y en la mayoría de las normas principales.

La carga de viento estática equivalente que define el Eurocódigo viene dada por:

$$F_w = c_s c_d \sum_{\text{elementos}} c_f q_p(z_e) A_{\text{ref}} \quad (3)$$

En donde:

- c_s tiene en cuenta la no simultaneidad de ocurrencia de los picos de presión sobre la superficie
- c_d tiene en cuenta el efecto de las vibraciones en la estructura debido a la turbulencia
- c_f es el coeficiente de fuerza
- q_p es la presión correspondiente a la velocidad de pico
- z_e es la altura de referencia a la que se aplica la presión q que permite incorporar en esta norma la significativa variable distribución de presiones medias y turbulentas con la altura. Estará íntimamente vinculado a la definición de los valores de q , el coeficiente de fuerza y el área de aplicación A_{ref}
- A_{ref} es el área de referencia a la que se aplica la fuerza dada por c_f e íntimamente vinculado a este

Al producto $c_s c_d$ se le denomina factor estructural y viene determinado por la siguiente expresión:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \quad (4)$$

A partir de mediados del siglo pasado, siguiendo los estudios de Davenport [13] y Jensen [3] entre otros, se estandarizó la descomposición de la respuesta dinámica de pico frente a la acción del viento debido a la turbulencia atmosférica (buffeting o bataneo) en componentes de fondo y resonantes en referencia al espectro de respuesta y combinadas por tanto al cuadrado. Así, B es el factor de respuesta de fondo, que tiene en cuenta la falta de correlación sobre la superficie de la estructura y depende de las dimensiones de la sección del edificio y de la escala integral de la longitud de la turbulencia, $L(z_s)$, siendo z_s la altura de referencia, que en el caso de Eurocódigo es 0,6h. Finalmente, el parámetro $I_v(z_s)$ representa la intensidad de turbulencia en la componente principal del flujo a esa misma altura de referencia. De acuerdo con el Anejo B de la norma:

$$B = \frac{1}{1 + 0,9 \left(\frac{b+h}{L(z_s)} \right)^{0,63}} \quad (5)$$

donde:

- b y h son el ancho (transversal a la dirección del viento) y alto de la estructura, respectivamente. Tiene en cuenta la no simultaneidad de ocurrencia de los picos de presión sobre la superficie
- $L(z_s)$ es la referida escala integral de la turbulencia que hace referencia a la envergadura promedio de las estructuras turbulentas en el flujo a la altura de referencia z_s
- R es el factor de resonancia, que tiene en cuenta la interacción de la turbulencia en resonancia con el modo de vibración de la estructura considerado y depende del decremento logarítmico total del amortiguamiento δ , de la función de densidad espectral de potencia adimensional S_L y de las funciones de admittance aerodinámica R_h y R_b , según el Anejo B de la norma:

$$R = \frac{\pi^2}{2\delta} S_L(z_s, n_{1,x}) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) \quad (6)$$

donde:

- $n_{1,x}$ es la frecuencia natural de la estructura en la dirección x de interés según la dirección del viento
- η_b y η_h son formas adimensionales de b y h (ancho transversal a la dirección del viento y alto de la estructura, respectivamente). Pierden su dimensión mediante la escala integral de turbulencia ($L(z_s)$) e incorporan la frecuencia adimensionalizada modal de la estructura y un coeficiente de ajuste experimental

El espectro de potencia adimensional depende de cada norma. El Eurocódigo opta por la aproximación de Kaimal, pero existen otras aproximaciones como la de Davenport (NBCC [3]) o la de Karman (AS/NZ [4]). La expresión del espectro de Kaimal viene determinada según:

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 f_L(z, n)}{\left(1 + 10,2 f_L(z, n)\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (7)$$

aquí,

- $f_L(z, n)$ es la variable frecuencia adimensionalizada mediante la escala integral de la turbulencia y la velocidad media a la altura z

k_p es el factor de pico, definido como la relación entre el valor máximo fluctuante de la respuesta a su desviación típica:

$$k_p = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (8)$$

en donde v es la frecuencia media de oscilación definida a partir de la frecuencia natural y el ratio cuadrático de la componente resonante (R) respecto de la total ($R + B$). T es el tiempo promedio para la velocidad media del viento, que en este caso del Eurocódigo es 600 s y para otros países viene determinado por la tabla 1.

Las normas que utilizan una velocidad de viento de tres segundos de ráfaga en lugar de una velocidad media del viento con el fin de aplicar la teoría cuasi-estacionaria, requieren que

se introduzca otro factor de conversión para volver a definir la velocidad del viento para un período promedio más largo. Desde 2002, la norma australiana AS1170.2 [4] se ha basado en una ráfaga de velocidad del viento de 3 segundos y un perfil de viento envolvente de pico de ráfaga, incorporando la correlación y los efectos dinámicos de resonancia a través de un factor de respuesta dinámica. En 1995, la ASCE 7-10 [2] estadounidense convirtió la velocidad de referencia de velocidad del viento de la milla más rápida a la velocidad del viento ráfaga de 3 segundos, incorporando un factor de efecto de ráfaga, que es similar al factor de respuesta dinámico utilizado en la norma australiana.

Las metodologías para estimar el pico de viento en la dirección transversal y la carga de torsión se proporcionan en el ASCE 7-10 [2], NBCC [3] y AS1170.2 [4] con un enfoque de carga parcial. Este aplica diferentes proporciones de las presiones en la dirección longitudinal en varios lugares de la torre y en diferentes combinaciones. La torsión se estima en el NBCC [2] y la EN1991-1-4 [1] mediante la aplicación de combinaciones de carga no uniformes.

Aunque existen diferencias en la evaluación de los parámetros de la respuesta del edificio, un estudio detallado por Kwon y Kareem [18] encontró que las cargas totales son ra-

zonablemente consistentes en la dirección del viento, mientras que se observó una mayor variación en la dirección transversal al viento. Se encontró además que una causa importante de la divergencia entre las normas era la definición del perfil de la velocidad del viento adoptada por cada norma (logarítmica o potencial), y la selección de la altura de referencia (0,6 H de la ASCE 7-10 [2] y de la EN1991-1-4 [1] y H para el NBCC [3] y la AS1170.2 [4]).

Los edificios altos son tradicionalmente construidos con una estructura simétrica rectangular, triangular o circular, y se representan en la mayoría de las normas de carga de viento. Estos han sido proyectados últimamente con una serie de formas libres, como lo demuestran las cuatro torres de Madrid, donde cada una muestra un diseño específico. Aparte de la agradable expresión arquitectónica de estas estructuras, las secciones de forma libre ayudan en la aerodinámica de la estructura, lo que reduce considerablemente el riesgo de desprendimiento de vórtices y la respuesta transversal del viento de la torre, que a menudo es un aspecto crítico en el diseño de edificios altos. Las variaciones en la forma de la sección tienden a reducir la coherencia del variable desprendimiento de vórtices distribuido en la altura de la torre, que presenta los espectros de respuesta de viento cruzados de edificios altos de acuerdo a la forma de la sección [19]. Las normas actuales de carga de viento proporcionan estimaciones en la dirección transversal de secciones rectangulares simples o circulares. En la actualidad, la respuesta dinámica de las formas alternativas de sección requiere una prueba en un túnel de viento de capa límite, como lo demuestra un estudio de túnel de viento reciente de Oritia & Boreas (fig. 5).



Figura 5. Modelo de presiones. Torre Nueva Marina, Casablanca (O&B 2012 [21]). AA Architects, MC-2, TYPASA.

2.2.5. Caso de estudio

Se presenta a continuación un ejemplo de cálculo para el edificio estandarizado de acuerdo con cada uno de las cuatro normas nacionales que se están analizando. Se trata de una torre con unos determinados parámetros que ha sido sistemáticamente analizada en túneles de viento de capa límite para comparar y verificar distintas metodologías experimentales, numéricas y analíticas como es el caso que nos ocupa [20]. El edificio tiene 183 metros de alto, 46 metros de ancho y 30 metros de espesor, localizado en terreno urbano (tipo IV según el CTE [7]), con

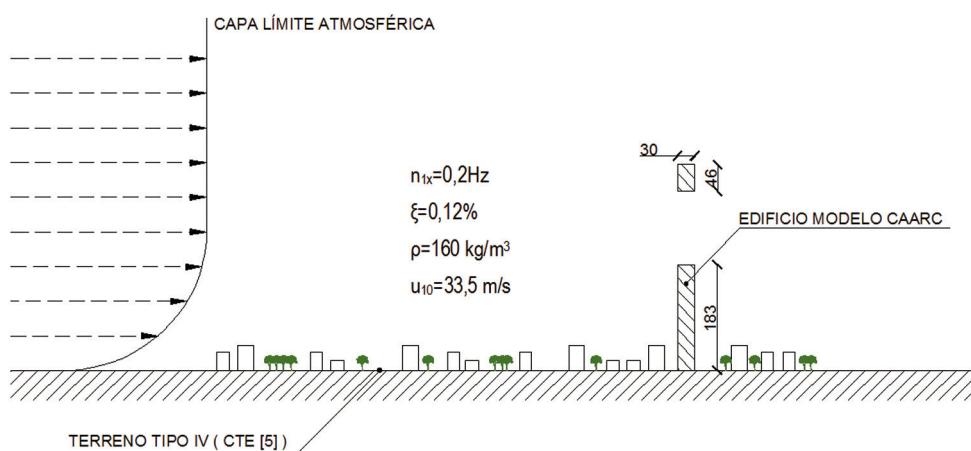


Figura 6. Modelo de edificio estandarizado utilizado para la comparativa en la tabla 2.

Tabla 2

Comparativa de un edificio modelo para los distintos códigos internacionales de referencia

Norma	Cortante (kN)	Momento flector (MN·m)	Cortante (F_x/F_{EN})	Momento flector (BM_x/BM_{EN})
EN1991-1-4:2005 [1]	28600	2850	1,0	1,0
AS1170.2:2011 [4]	21500	2085	0,75	0,73
ASCE 7-10: 2013 [2]	18305	1795	0,64	0,63
NBCC 2010 [3]	19844	1994	0,69	0,70

una velocidad media diezminutal de diseño de 33,5 m/s (fig. 6). Se ha considerado una densidad media de 160 kg/m³ y una frecuencia natural de 0,2 Hz. Las formas modales se han tomado lineales y el amortiguamiento un 0,012% del crítico. Tanto el momento como el cortante en la base son calculados para la respuesta en la dirección del viento para vientos normales a la superficie. Los resultados de las normas ASCE 7-10 [2], NBCC [3] y AS1170.2 [4] se fundamentan en el estudio de Holmes [22] para una geometría similar. La tabla 2 adjunta presenta lo valores en valor absoluto así como comparados con los obtenidos a partir del documento EN1991-1-4 [1] de acuerdo con el procedimiento que se describe en su Anejo B. Estos son referidos mediante el subíndice EN. El coeficiente de fuerza (C_f) se calcula conforme a lo especificado en el apartado 7.6 de la EN 1991-1-4 [1].

Los valores calculados para el cortante y el momento en la base, presentados en la tabla 2, son normalizados por las cargas equivalentes obtenidas según el documento EN1991-1-4 para una mejor apreciación de las diferencias. La tabla sugiere que la metodología adoptada es conservadora con respecto a las otras normas internacionales. Algunos resultados similares han sido observados por [16]. Las evidentes discrepancias pueden ser debidas a diferencias en los perfiles de velocidad media o intensidad de turbulencia adoptados por cada estándar. El coeficiente de fuerza adoptado es también mayor que en otras normas, lo que contribuye al sobredimensionamiento. Otros casos de estudio similares [16] muestran que los resultados proporcionados pueden ser reducidos haciendo una selección de perfiles comunes de velocidad e intensidad de turbulencia así como del coeficiente de fuerza C_f .

2.3. El Eurocódigo y los anejos nacionales

Los anejos nacionales permiten que cada país adapte la norma a sus necesidades específicas. Suele hacerse una distinción entre los principios obligatorios, para los que no se contempla otra alternativa, y las normas de aplicación, en las que existe un margen para que cada país realice su propio desarrollo. Si bien esto ofrece la posibilidad a cada país de ajustar la norma nacional en función de su interés, puede causar confusión en la aplicación por parte de los ingenieros estructurales que trabajan en proyectos de la UE, ya que hay bastante margen previsto en el documento EN1991-1-4 [1] para que cada país elabore efectivamente su propia norma nacional. De hecho, la idea original de armonizar a una norma podría debilitarse, y el gran número de casos de elección nacional podría conducir a situaciones

en las que la carga del viento en un edificio simple erigido en una exposición de campo abierto pudiera diferir bastante entre países de la UE.

El Reino Unido, entre otros, utiliza el anexo nacional para reproducir las recomendaciones de su norma nacional antes de la aplicación del Eurocódigo [23]. Por ejemplo, el documento EN1991-1-4 [1] considera que la capa límite está completamente desarrollada según las condiciones del terreno. En el caso del Reino Unido, al ser una isla, la capa límite atmosférica no se suele desarrollar completamente para pasar del mar abierto a campo abierto, ya que para ello se requiere una distancia de 300 kilómetros. Si bien puede ser razonable suponer que la mayoría de los edificios en Europa continental estarán dentro de una capa límite plenamente desarrollada, no se consideró apropiado para la norma británica, y el anexo nacional BS desarrolla un perfil de velocidad media del viento distinto.

2.3.1. Anejo nacional español – CTE [7]

En España las normas como la IAP-11 [5], la IAPF-07 [6] o el CTE-06 [7] ya adoptan íntegramente los modelos y criterios del Eurocódigo en lo relativo a la acción del viento de forma directa e integrada. El AN en tramitación se presentará para facilitar la armonización técnica generalizada en lo relativo a la acción del viento.

Italia, por ejemplo, en este período optó por la elaboración de un extenso documento como transición entre la antigua norma nacional y el Eurocódigo [24]. El documento es una guía del estado del arte para la evaluación de las acciones del viento y los efectos sobre las estructuras. Otros países como Reino Unido, adelantaron la emisión de su correspondiente AN, NA-BS-EN1991-1-4:2010 [23], en función de las revisiones de las correspondientes normas nacionales.

En España, los ingenieros se basan en el Código Técnico de la Edificación para el cálculo de edificios desde 2006 hasta la fecha. Este código está fundamentalmente dirigido a la construcción industrial de baja altura o vivienda residencial, estructuras normalmente consideradas rígidas en las que la respuesta dinámica frente a la acción del viento no es significativa. Para las estructuras que se espera que experimenten un comportamiento dinámico, el proyectista debe seguir los valores recomendados en el documento EN1991-1-4 [1]. Existen, no obstante, recomendaciones como la E-13 [25] o la Monografía 20/21 [26] que contribuyen a extender el marco de conocimiento para proyectos en altura.

El anexo facilitará la armonización y constituirá una referencia coexistiendo con las referidas normas de cada tecnología. Los parámetros nacionales (PDN) permitirán una mayor eficiencia en el diseño. Así, por ejemplo, en la edificación, la incorporación de un factor de direccionalidad c_{dir} permitiría, en los casos en los que no se desarrollen estudios específicos de la acción del viento, una reducción en la velocidad del viento de cálculo para ciertas direcciones que podría conducir a ahorros significativos para la industria de la construcción sin asumir ningún riesgo adicional para la seguridad de la estructura.

Es preceptivo señalar la conveniencia que tendría un documento que a modo de comentario desarrollara y explicara el uso de este anexo extendiéndolo en lo relativo a tipos estructurales

específicos como puentes, edificios o componentes como elementos de fachada ligera, paneles y pararrayos. Estos elementos locales son cada vez más habituales en las envolventes arquitectónicas por sus cualidades energéticas y formales y resultan especialmente sensibles a la acción del viento. De esta forma un diseño eficaz y seguro del anclaje de los mismos pasa necesariamente por el adecuado tratamiento de la acción del viento. La ingeniería del viento es una disciplina reciente que se desarrolla a mediados de siglo XX y como tal evoluciona rápidamente. Se hace especialmente necesario este amparo normativo y su extensión para adaptarse a las nuevas técnicas utilizadas en la industria de la construcción que permita aportar soluciones competitivas.

2.4. Estudios en el túnel de viento

La aproximación del factor de carga de ráfaga utilizada en el EN1991-1-4 [1] puede ser aplicado de forma conservadora para la mayoría de los casos, pero el procedimiento tiene algunas limitaciones debido a la altura del edificio, las características dinámicas y aerodinámicas y las condiciones de exposición. Por lo general, se recomiendan los estudios de túnel de viento para estructuras que no se pueden estimar adecuadamente a partir de la normativa, ya sea debido a la forma de la estructura, la sensibilidad de la respuesta estructural a la carga de viento, o porque la velocidad del viento no se puede estimar debido a la compleja topografía o significativos edificios que rodean la estructura. No hay una regla general a seguir para decidir cuándo emplear una prueba de túnel de viento, pero todos los códigos recomiendan que la prueba del túnel de viento de capa límite se realice si un edificio cumple con alguna de las siguientes condiciones:

- La altura total supera los 200 metros.
- La construcción está inmersa en una superficie de exposición de tipo urbano.
- La construcción es susceptible a efectos que produzcan comportamientos en la dirección transversal, desprendimiento de vórtices, o inestabilidades debidas al galope o flameo.
- El sitio es propenso a efectos de canalización o bataneo en la estela de obstáculos aledaños.
- La forma del edificio es irregular.

Puesto que casi todas estas condiciones tienen un carácter cualitativo, es decisión del ingeniero el incluir un estudio de viento de la estructura atendiendo a una serie de requisitos que bien pueden ser los siguientes: la flexibilidad de la estructura, las formas modales del modelo tridimensional, la interferencia significativa de los edificios circundantes, la posibilidad de bataneo inducido por viento y climas complejos. Como contrapunto, la mayoría de los laboratorios que disponen de túnel de viento discrepan de la validez de los requisitos del Eurocódigo y el estado de la técnica de la ingeniería del viento ahí reflejado.

El Eurocódigo establece un requisito general en el apartado 1.5, que establece que los cálculos a partir de las pruebas o mediciones deben ser modelados adecuadamente; los detalles adicionales se dejan para el anexo nacional. Este requisito hace

referencia a la adecuada modelización tanto del viento atmosférico y la estructura como de la interacción entre ambos en función de los estados límite en estudio. Es necesario pues que el ingeniero consulte manuales y notas técnicas existentes que estén disponibles para la revisión previa al encargo de un ensayo en túnel de viento. Estos requisitos han estado en vigor desde 1987 [27], por lo que cualquier prueba de túnel de viento que no se haya realizado con las siguientes condiciones no habrá satisfecho las normas internacionales o el estado del arte de la ingeniería del viento.

El objetivo fundamental es la correcta simulación de la capa límite atmosférica y el tratamiento de la turbulencia en el túnel de viento. Esto incluye el perfil básico de velocidad media del viento y de intensidad de la turbulencia, y también la componente espectral. Los estudios que no cumplen con estos requerimientos no deberían ser considerados para su uso. De estos, el más fundamental es que en la capa límite atmosférica natural se modele adecuadamente la variación de la velocidad media del viento con la altura. En segundo lugar, que la turbulencia también se modele correctamente, incluyendo la escala longitudinal de turbulencia, que ha de ser aproximadamente del mismo orden que la escala del modelo de la estructura. La simulación correcta de todos los obstáculos que rodean la estructura en prueba (topografía u otras estructuras) es otro factor a tener en cuenta que puede modificar las características del viento actuante. Estas recomendaciones establecen que el área proyectada del modelo y otras estructuras dentro de la prueba no deben exceder el 5% del área de sección transversal de prueba. Esto, junto a la limitación del flujo alrededor del modelo durante el estudio, es lo que asegura que no se produzca un bloqueo excesivo que lleva a la no semejanza entre los flujos modelo y prototipo. Igualmente existen limitaciones para la modelización de la capa límite atmosférica. Se ha comprobado la dificultad para la correcta modelización de la estructura de la turbulencia a escalas mayores de 1:300. El sistema de medición del túnel de viento debe tener características de respuesta suficiente para captar las condiciones máximas de carga de viento.

Así, en los casos en los que las dimensiones del modelo respecto al túnel queden por encima de la recomendación del 5% como en [28], la simulación numérica validada a partir de unos ensayos que contemplen la geometría, se presenta como una herramienta útil para la investigación de la acción del viento. Hoy en día, los proyectos de estructuras y edificios singulares raramente se abordan exclusivamente mediante simulación numérica debido a la compleja interacción dinámica tridimensional fluido-estructura que gobierna los efectos del viento en el edificio o puente en cuestión. La simulación numérica ofrece igualmente interesantes cualidades para la optimización de elementos como sistemas de fachada ligera, pararrayos o galerías peatonales como muestra la figura 7.

2.4.1. Tendencias futuras

Los modelos numéricos referidos en el apartado anterior están demostrando cada vez más sus capacidades en la simulación de la compleja interacción dinámica de este flujo turbulento alrededor de los dominios tridimensionales en vibración. No obstante, por cuestiones de fiabilidad es aún excepcional

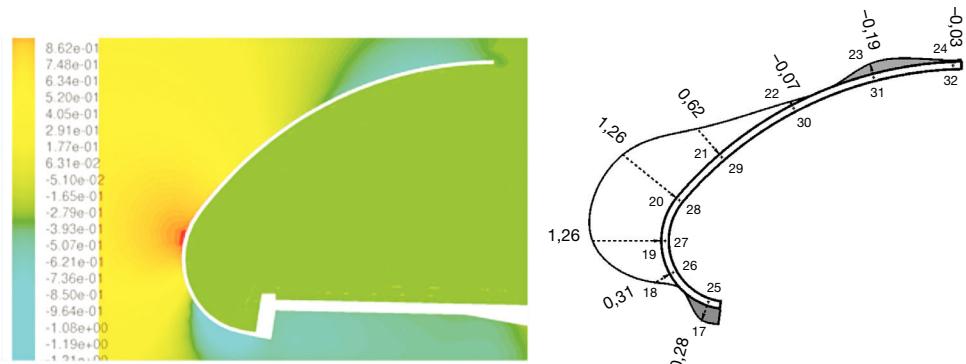


Figura 7. Modelización numérica mediante RANS validada con ensayos de sección para la optimización de la estructura de las barreras-galerías peatonales del Puente del Tercer Milenio, Zaragoza. Arenas y Asociados, Dragados. 2007 [29].

encontrarlos como única vía de análisis en proyectos singulares (puentes de media y gran longitud y edificios de gran altura). Como se ha comentado, cabe destacar su utilidad y creciente aplicación en la extensión a partir de ensayos preliminares de validación en los que se mejoren las condiciones de aquellos y permitan extender el alcance de una forma más eficaz que la experimental [28]. Igualmente, presentan posibilidades significativamente productivas en el estudio de detalle de elementos (fig. 7) a partir de modelos validados [29]. Destaca la evolución de esquemas fundamentados mayoritariamente en volúmenes finitos (FVE) como RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) y su combinación con modelos LES (Large Eddy Simulation) como el DES (Detached Eddy Simulation) que están generando progresos significativos. Igualmente, los modelos basados en partículas y en esquemas de resolución de las ecuaciones de Lattice-Boltzmann permiten obtener resultados de alta calidad que incorporando modelos LES evitan el tedioso proceso del mallado de los anteriores [28]. En esta misma línea, se debe señalar otros modelos sin malla como, por ejemplo, el DVM (Discrete Vortex Method), que ha sido utilizado en puentes con éxito [30].

Mientras que los ensayos en túnel de viento son el método más preciso, una aproximación fundamentada en una densa base de datos de ensayos en túnel puede proporcionar una buena alternativa para realizar estimaciones preliminares de las cargas de viento en edificios altos. Un número de ensayos destacados en túneles de capa límite a lo largo de todo el mundo están engrosando una base de datos de configuraciones aerodinámicas para edificios altos ensayados históricamente. Esto se ha venido aplicando en los últimos años para algunos edificios industriales de baja altura, donde se simplifican geometrías de construcción, a través ciertos organismos como la base de datos del NIST. Para edificios altos existen las bases de datos de la Universidad de Western (WAD) o la del NatHaz, desarrollada en la Universidad de Notre Dame (California), y siendo esta última aceptada por la ASCE7-10 [2] como una alternativa aceptable a la norma para ciertos tipos estructurales. De forma similar están surgiendo iniciativas para rangos y tipos de secciones de puentes. Estas herramientas están disponibles para proporcionar estimaciones adecuadas de momentos en la base y aceleraciones y son una alternativa útil para el diseño preliminar.

Finalmente, en el campo experimental cabe destacar el desarrollo por parte de la Universidad de Western de la instalación WINDEE. Esta instalación pionera cuenta con una cámara de ensayos de 25 m de diámetro en la que se podrán modelizar flujos tridimensionales como tornados, downbursts, etc. El proyecto, de más de 23 millones de dólares, cuenta con 106 turboventiladores que facilitan la simulación adecuada de estos flujos. A nivel nacional, la Universidad de Granada ha apoyado el proyecto SAVE, Simulador Ambiental de Vientos Extremos, en construcción, que contando con 5 secciones de ensayo de hasta 15 m de ancho hibrida características propias de un túnel de viento de capa límite, túnel climático y simulador de tornados. Esta instalación podrá reproducir flujos bidimensionales complejos como low level jets y frentes de tormenta, de interés en algunos tipos estructurales complejos.

3. Conclusiones

Se han señalado los fundamentos que subyacen bajo la normativa técnica en lo que respecta a la consideración de la acción del viento y de forma específica comparada con el Eurocódigo 2005. En particular, se han puesto de manifiesto las diferencias de aplicación respecto a las más significativas como la ASCE7-10 y señalado los errores de interpretación más típicos. De forma particular se analiza la situación en España y en consideración de normas como la de edificación, CTE-2006. Finalmente se destacan las necesidades de desarrollo en áreas específicas y se ponen de manifiesto las fuentes y herramientas a disposición del ingeniero estructuralista actualmente.

Bibliografía

- [1] CEN. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – wind actions. EN 1991-1-4:2005/AC:2010. European Standard (Eurocode), European Committee for Standardization (CEN). 2010.
- [2] ASCE/SEI 7-10. ASCE Standard: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. New York: American Society of Civil Engineers; 2013.
- [3] NRC. National building code of Canada. Ottawa. Associate Committee on the National Building Code, National Research Council. 2010.

- [4] AS/NZS 1170.2:2011 Structural design actions – Part 2: Wind actions. Australian/New Zealand Standard. Joint Technical Committee BD-006. 2011.
- [5] IAP-11 Instrucción sobre las acciones a considerer en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento. Gobierno de España; 2011.
- [6] IAPF-07 Instrucción sobre las acciones a considerer en el proyecto de puentes de ferrocarril. Ministerio de Fomento. Gobierno de España; 2007.
- [7] CTE, Código Técnico de la Edificación. Partes I y II, Ministerio de Vivienda. Gobierno de España; 2006.
- [8] Jensen M. The model law for phenomena in natural wind. Ingenioren (International Edition) 2. 1958;4.
- [9] Larose GL. The Danish connection. Alan G Davenport Symposium. University of Western Ontario; 2002.
- [10] Davenport AG. Rationale for determining design wind velocities. J Struct Div. ASCE, 2475.ST5. 1960;39-68.
- [11] Davenport AG. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Inst Civil Engrs Proc. 1961;19:449-72.
- [12] Davenport AG. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Jour Royal Meteorological Society. 1961;87:194-211.
- [13] Isyumov N, Alan G. Davenport's mark on wind engineering. 13th Int Conf Wind Eng. Holanda; 2011.
- [14] Davenport AG. Relationship of wind structures to wind loading. Symp Wind Effects on Bldgs and Structs. England; 1963.
- [15] Davenport AG. The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence. New York Acad Sci. 1964;116:135-59.
- [16] Hertig JA. Some indirect scientific paternity of Alan G. Davenport. JWEIA. 2003;91:1329-47.
- [17] Holmes JD. Gust loading factor to dynamic response factor (1967-2002). Alan G. Davenport Symposium, Canada; 2002.
- [18] Kwon K, Kareem A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. Engineering Structures. 2013;51:23-35.
- [19] Tamura Y. Wind and tall buildings. 5th European African Conference on Wind Engineering, Italy; 2009.
- [20] Wardlaw RL, Moss GF. A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels, C.A.A.R.C., C.C. 662m Tech. 25, 1970.
- [21] Terrés-Nicolí JM, Mans C, Farquhar S, Ho E. Estudio de los efectos del viento en el edificio Nueva Marina en Casablanca. Oritia & Boreas; TYP01-2012-R01. Granada, 2013.
- [22] Holmes J, Tamura Y, Krishna P. Comparison of wind loads calculated by fifteen different codes and standards, for low, medium and high-rise buildings. 11th Americas Conference on Wind Engineering. San Juan, Puerto Rico, June 22-26, 2009.
- [23] BSI. UK National Annex to Eurocode 1 – Actions on structures. Part 1-4: General actions – Wind actions. NA to BS EN 1991-1-4:2005+A1:2010. British Standards. 2010.
- [24] CNR. Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, National Research Council of Italy. CNR-DT207. 2008.
- [25] Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Recomendaciones y Manuales Técnicos. E-13. Construcción de Edificios Altos. 2008.
- [26] Proyecto de Edificios Altos. Monografía 20/21. ACHE. 2013.
- [27] ASCE Wind tunnel model studies of buildings and structures. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 67. American Society of Civil Engineers. 1987.
- [28] Ortega Cornejo M, Lacoma Aller LM, Holman DM. Análisis de acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona. Hormigón y Acero. 2008;60(251):37-64.
- [29] Terrés-Nicolí JM, King JPC, Kim J. Wind effects for the 3rd Millennium Bridge, Expo 2008, Spain. 12th International Conference on Wind Engineering Cairns, Queensland, Australia.
- [30] Larsen A, Walther J. Discrete vortex simulation of flow around five generic bridge deck sections. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1998;77 & 78:591-602.