

# ANÁLISIS DE VIENTO EN EDIFICIOS SINGULARES. APLICACIÓN AL CASO DEL HOTEL VELA DE BARCELONA

**Miguel ORTEGA CORNEJO**

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

miguel.ortega@ideam.es

## Resumen

El desarrollo de la arquitectura en el diseño de edificios singulares, junto con el dominio del conocimiento del funcionamiento de las estructuras y el avance en las técnicas constructivas, están permitiendo el proyecto de edificios cada vez más complejos con secciones y formas especiales, que requieren un análisis detallado en cuanto a su respuesta frente a las acciones del viento. Hasta la reciente aparición del nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE-2006), la normativa vigente en España referente a las acciones del viento en edificios (NBE-EA-88), definía fuerzas equivalentes de viento muy por debajo de otras normativas más modernas, como el propio Código Técnico, la IAP-98, la ROM 04-95 o los Eurocódigos (EN 1991-1-4).

En el presente artículo se analizan las similitudes y diferencias entre las diferentes normativas de acciones de viento, particularizándolas al Hotel Vela de Barcelona, edificio proyectado por Ricardo Bofill, del que IDEAM ha realizado el proyecto de la estructura, incidiendo en la importancia de la correcta evaluación de los coeficientes de arrastre.

**Palabras Clave:** Acciones de Viento, Eurocódigos, Código Técnico de la Edificación, coeficientes de arrastre, túnel de viento, modelos de partículas.

## 1. Introducción

### 1.1 Marco normativo de las acciones de viento

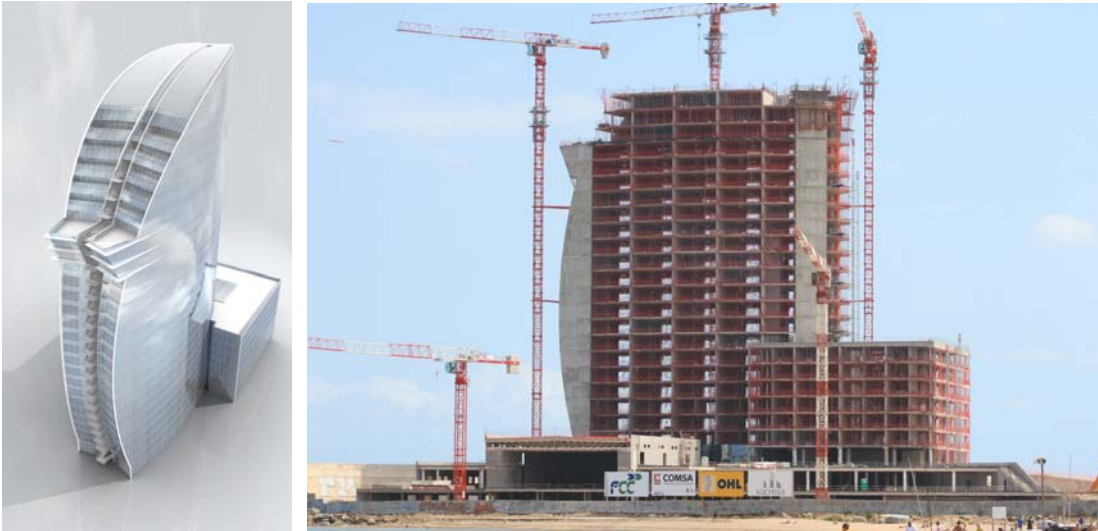
Las diferentes normativas de acciones en estructuras definen la acción del viento como una carga estática equivalente, que depende de la velocidad de referencia del viento al cuadrado, de una serie de coeficientes de exposición, de la superficie expuesta y del coeficiente de arrastre del elemento objeto de estudio. En este artículo se realiza un resumen del análisis normativo de las acciones del viento, partiendo de la normativa española vigente, para compararla con los Eurocódigos.

Se van a analizar las acciones del viento definidas en la "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera" [1], redactada en el año 1998, que basa su formulación en el "Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones de Viento", UNE-ENV 1991-2-4 de mayo de 1995 [2], así como en las normativas españolas sobre acciones de viento en la edificación (Ref. [3] y [4]), comparándolas con la última versión, en versión ya EN, del nuevo Eurocódigo 1 de acciones, EN 1991-1-4 "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General Actions- Wind actions" April 2005 [5]. Del mismo modo se analizarán las acciones del viento definidas en las "Recomendaciones para Obras Marítimas. Acciones Climáticas II: Viento" ROM 0.4-95 [6], ya que el Hotel Vela, edificio sobre el que se particularizará el análisis, se sitúa en la bocana del puerto de Barcelona frente al mar.

### 1.2 La estructura del Hotel Vela

La estructura del Hotel Vela en Barcelona es objeto de otra comunicación en esta Asamblea, centrándonos en esta ponencia en el análisis de las diferentes normativas de acciones de viento y su particularización al caso del Hotel Vela. En este apartado se realiza pues una breve descripción del edificio, ya que en la ref. [7] se detalla con más profundidad.

El Hotel se compone de tres edificios con geometrías claramente definidas. El Podium, con sólo dos niveles, donde se ubican las zonas comunes con los salones, bares, restaurantes, las cocinas, el gimnasio, el spa y las salas para congresos, sobre el que se elevan los edificios principales, el Atrio y la Torre. La Torre es un edificio con forma de Vela, que da nombre al Hotel, tiene 26 plantas y una altura máxima de 100 m. sobre la cota de rasante. El Atrio es un edificio de 7 plantas con forma de paralelepípedo adosado a la parte trasera de la Torre (Figs. 1a, y 1b).



Figs. 1a, y 1b: Fotomontaje, de los edificios principales Torre y Atrio, y vista del edificio en construcción

Las plantas del edificio principal, la Torre, tienen forma de ojo, con sus dos extremos truncados por cortes oblicuos (Fig. 2). En altura, las plantas aumentan ligeramente de longitud desde la P-1 hasta la P-10, mientras que desde la P-10 hasta la cubierta se van reduciendo logrando la forma de Vela como puede verse en la vista de la sección transversal (Fig. 1c). Al nivel de las plantas 18, 19, y 20 sale un voladizo a modo de mirador frente al mar rompiendo la forma curva de la Vela.

En la dirección longitudinal la dimensión mayor de la planta 10 de la Torre es aproximadamente de 57,90 m, mientras que en la dimensión menor el ancho de 23,15 m es siempre constante. En la figura 2 se detalla una planta tipo con los edificios de la Torre y el Atrio.

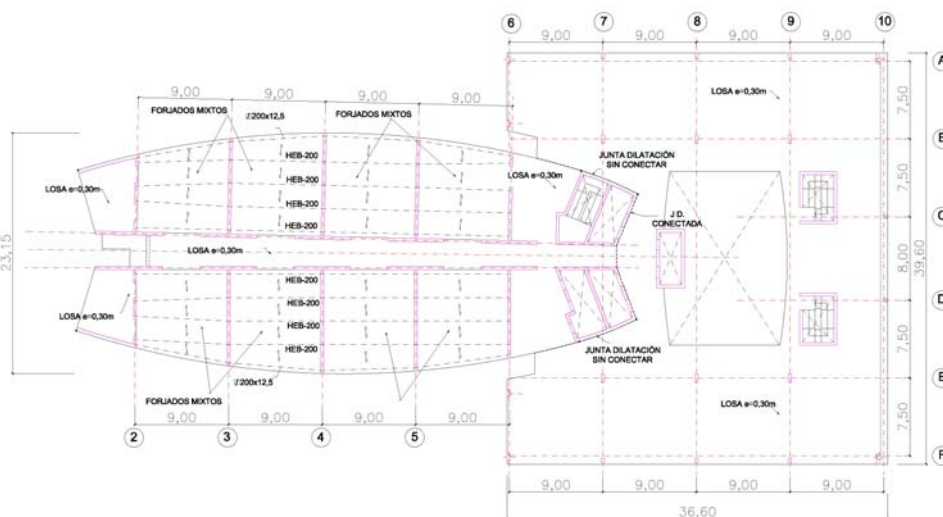


Fig. 2: Planta tipo entre P-1 y P-7 con los edificios Torre y Atrio del Hotel Vela

La estructura vertical resistente de la Torre frente a las acciones gravitatorias y las acciones del viento, la componen una serie de pantallas verticales de hormigón de 30 cm de espesor dispuestas cada 9 m en la dirección perpendicular al pasillo central, junto con las pantallas del pasillo central dispuestas en la dirección longitudinal del edificio, y los núcleos de ascensores y escaleras situadas en el extremo trasero del edificio.

Los forjados de la Torre son losas macizas de hormigón armado de 30 cm de espesor en los módulos extremos, así como en el pasillo central que arriostra las pantallas del pasillo. En la zona central de la Torre, a cada lado del pasillo,

los forjados de los 4 vanos con luces de 9 m se proyectaron inicialmente mediante unas vigas mixtas HEB200 dispuestas en la dirección longitudinal del edificio y conectadas al forjado superior constituido por una chapa nervada colaborante junto con el hormigón superior (Fig. 2). Finalmente, durante la fase de ejecución del edificio, los promotores plantearon el cambio a forjados con prelasas prefabricadas y losa superior "in situ".

El edificio Atrio, más convencional por su altura, geometría y tipología, se compone de forjados con losas de hormigón armado de 30 cm de espesor, y pilares creando una cuadrícula principal de 9x7,5 m. (Fig. 2)

Al estar situado el edificio en la bocana del puerto de Barcelona, en terreno ganado al mar, la cimentación de los edificios principales, Torre y Atrio, fue necesario realizarla mediante pilotes prefabricados hincados de hormigón pretensado, de aproximadamente 45 m de longitud y sección de 40x40 cm. La Torre se cimenta mediante 398 pilotes bajo las pantallas principales, más 36 pilotes en los pilares perimetrales que sólo soportan dos plantas de carga, mientras que los pilares y núcleos de pantallas del Atrio se cimentan mediante 120 pilotes. El coste de la cimentación obligó a optimizar las acciones del viento para no encarecer en exceso el edificio, por lo que el análisis de los coeficientes de arrastre del Hotel se convirtió en una cuestión fundamental.

## 2. Comparación de las acciones del viento en las diferentes normas

### 2.1 Similitudes y diferencias entre normativas

La fuerza equivalente del viento actuando sobre una estructura se obtiene en general en las normativas de acciones de viento (referencias [1], [2], y [4] a [6]) mediante el producto de la presión de referencia del viento, el coeficiente de riesgo al cuadrado, el coeficiente de exposición, el coeficiente de forma o de arrastre, y el área expuesta al viento. En la tabla 1, se resumen los resultados del desarrollo de la formulación de cada normativa, y en la referencia [8] se describe con más detalle la formulación específica de cada norma y el desarrollo matemático hasta llegar a estas expresiones con formato común.

Tabla 1: Equivalencia de factores entre normativas

Normativa	Presión de referencia del viento	Coef. de riesgo al cuadrado	Coeficiente de exposición	Coef. de arrastre	Área expuesta al viento
IAP-98 [1]	$(1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2)$	$(C_r^2)$	$c_e \cdot C_s \cdot C_{te} = \left( k^2 \cdot \left[ \ln^2 \left( \frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	$C_D$	$A$
UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2]	$\left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref,0}^2 \right)$	$(c_{prob}^2)$	$c_e(z) = \left( k^2 \cdot \left[ \ln^2 \left( \frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	$c_f$	$A_{ref}$
CTE-2006 [4]	$\left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \right)$	$(c_{prob}^2)$	$c_e = \left( k^2 \cdot \left[ \ln^2 \left( \frac{z}{L} \right) + 7 \cdot \ln \left( \frac{z}{L} \right) \right] \right)$	$c_p$	$A$
EN 1991-1-4. 2005 [5]	$\left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 \right)$	$(c_{prob}^2)$	$c_e(z) = \left( k^2 \cdot \left[ \ln^2 \left( \frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	$c_f$	$A_{ref}$
ROM 0.4-95 [6]	$\left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_b)_{50años} \cdot K_\alpha \right)^2$	$(K_T^2)$	$F_A^2 \cdot F_T^2 \cdot F_R^2$	$C_f$	$A_e$

Como puede comprobarse todas las normativas, salvo pequeñas diferencias en el cálculo del coeficiente de exposición de la ROM 0.4-95 [6], llegan al mismo resultado de la formulación de la fuerza equivalente del viento utilizando formulaciones intermedias más o menos directas. La equivalencia entre los parámetros de unas y otras normas se detallan en la tabla 2. Aunque la formulación de la fuerza equivalente del viento es idéntica en las normas analizadas, hay una serie de diferencias entre las normativas a la hora del cálculo de algunos de los factores expuestos en la tabla 1, y en algunos de los parámetros de la tabla 2. En la referencia [8] se realiza un estudio detallado de las similitudes y diferencias en cada uno de los principales parámetros que definen la fuerza equivalente del viento, como son la

velocidad de referencia del viento, y los diferentes parámetros que intervienen en el cálculo del coeficiente de exposición.

Tabla 2: Equivalencia de variables entre normativas

	$V_{ref}$	$C_r$	-	$k_z$	$Z$	$Z_0$	$Z_{min}$	$C_t$	$C_z$	$C_D$
IAP-98 [1]	$V_{ref}$	$C_r$	-	$k_z$	$Z$	$Z_0$	$Z_{min}$	$C_t$	$C_z$	$C_D$
UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2]	$V_{ref,0}$	$C_{prob}^*$	$C_e(Z)$	$k_T$	$Z$	$Z_0$	$Z_{min}$	$C_t(Z)$	$C_r(Z)$	$C_f$
CTE-2006 [4]	$V_b$	$C_{prob}^*$	$C_e$	$k$	$Z$	$L$	$Z$	-	$F$	$C_p$
EN 1991-1-4. 2005 [5]	$V_{b,0}$	$C_{prob}$	$C_e(Z)$	$k_r$	$Z$	$Z_0$	$Z_{min}$	$C_0(Z)$	$C_r(Z)$	$C_f$
ROM 0.4-95 [6]	$V_{b 50años}$	$K_T$	-	$k^*$	$Z$	$Z_0$	$Z_{min}$	$F_T$	$F_A$	$C_f$

## 2.2 Coeficiente de exposición

El coeficiente de exposición, tercer factor en el cálculo de la fuerza equivalente del viento, depende de 4 parámetros: el factor del terreno (definido como  $k_z$ ,  $k_T$ ,  $k$ ,  $k_r$ , o  $k$ ), la rugosidad (definida como  $z_0$ , ó  $L$ ), la altura mínima (definida como  $z_{min}$ , ó  $Z$ ), y la altura  $z$  (tabla 1).

Los resultados del coeficiente de exposición para el Hotel Vela analizando las normativas [1], [2], y [4] a [6] se representan en el gráfico 1 en función de la altura, para el tipo de entorno más desfavorable "Borde del mar". Como puede comprobarse en el gráfico 1, los resultados del coeficiente de exposición del CTE-2006[4] y de la versión actual del Eurocódigo [5], son idénticos y producen los resultados más desfavorables.

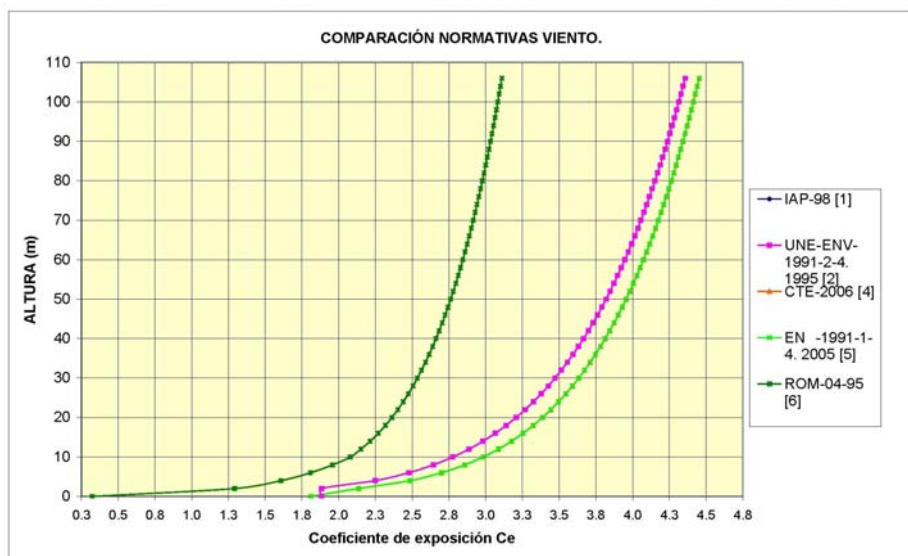


Gráfico 1: Coeficiente de exposición para el borde del mar según las diferentes normas

El cálculo mediante la IAP-98 [1], y la versión previa del Eurocódigo [2], obtienen los mismos resultados aunque de valor ligeramente inferiores a los de las dos normas anteriores. Este hecho sucede solamente para la categoría de terreno "Borde del mar", que es el caso que nos ocupa, mientras que para el resto de categorías ("zona rural con obstáculos aislados", "zona urbana, industrial o forestal", y "centros de grandes ciudades"), las cuatro normas ([1], [2], [4], y [5]) llegan a los mismos resultados en el cálculo del coeficiente de exposición. El coeficiente de exposición calculado con la ROM 0.4-95 [6] da lugar a valores por debajo de las cuatro normas previamente citadas (gráfico 1).

## 2.3 Velocidad de cálculo

Si definimos la velocidad de cálculo como el producto de tres factores; la velocidad básica o de referencia en la zona de estudio, el coeficiente de riesgo, y la raíz cuadrada del coeficiente de exposición, podremos comparar cada normativa.

$$V_c = V_{ref} \cdot c_{prob} \cdot \sqrt{c_e} \quad (1)$$

Así para el Hotel Vela, el gráfico 2 representa la velocidad de cálculo del viento en función de la altura. En todos los casos se ha considerado un periodo de retorno de 100 años, al tratarse de un edificio de especial relevancia.

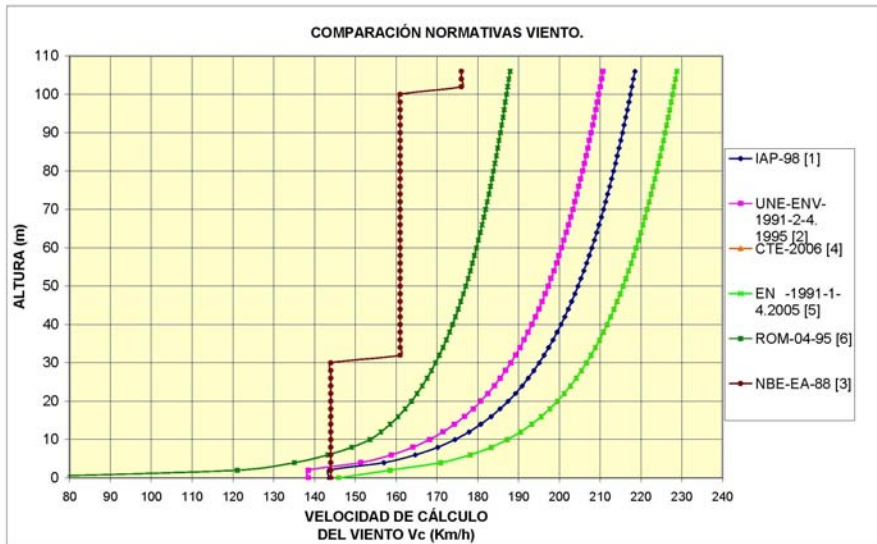


Gráfico 2: Velocidad de cálculo del viento  $V_c$  para el borde del mar (Barcelona) según las diferentes normas

En el gráfico 2 se ha añadido a los valores calculados con las normativas [1], [2], [4], [5], y [6], el indicado por la antigua normativa de acciones en la edificación NBE-EA-88 [3]. Se puede apreciar cómo los valores de la velocidad de cálculo del CTE-2006[4] y de la versión actual del Eurocódigo [5], están superpuestos ya que todos sus parámetros son idénticos y producen los resultados más desfavorables. Tras estas normas se sitúan en orden decreciente la IAP-98[1], la versión previa del Eurocódigo [2], y la ROM 0.4-95 [6].

En el gráfico 2 se aprecia cómo la antigua normativa de acciones en la edificación NBE-EA-88 [3] obtiene valores de la velocidad de cálculo muy por debajo de todas, en especial muy por debajo del nuevo CTE-2006 [4]. A modo de ejemplo a una altura de 100 m sobre el nivel del mar, la velocidad de cálculo del viento sería de 161 km/h según la NBE-EA-88 [3], mientras que en el nuevo CTE-2006 [4], este valor llegaría a 227,8 km/h.

## 2.4 Presión dinámica del viento

De una manera análoga a lo realizado con la velocidad de cálculo, podemos definir la presión dinámica como el producto entre la presión de referencia, por el coeficiente de riesgo al cuadrado, y por el coeficiente de exposición, o lo que es lo mismo, la presión producida por la velocidad de cálculo del viento:

$$(1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2) \cdot c_{prob}^2 \cdot c_e = (1/2 \cdot \rho \cdot V_c^2) \quad (2)$$

El gráfico 3 detalla los resultados de la presión dinámica del viento en función de la altura en la zona de estudio.

Las diferencias que ocurrían con la velocidad de cálculo en el gráfico 2, aumentan con la presión dinámica del gráfico 3 al depender del cuadrado de la velocidad de cálculo.

En la tabla 3, se comparan los resultados del gráfico 3 integrando la presión dinámica para una altura de 100 m, y una anchura unitaria de un metro expuesto al viento (sin consideración todavía de ningún coeficiente de arrastre). Se representa la fuerza total del viento, y el momento flector en la base, así como la comparación en porcentaje frente al resultado mayor.

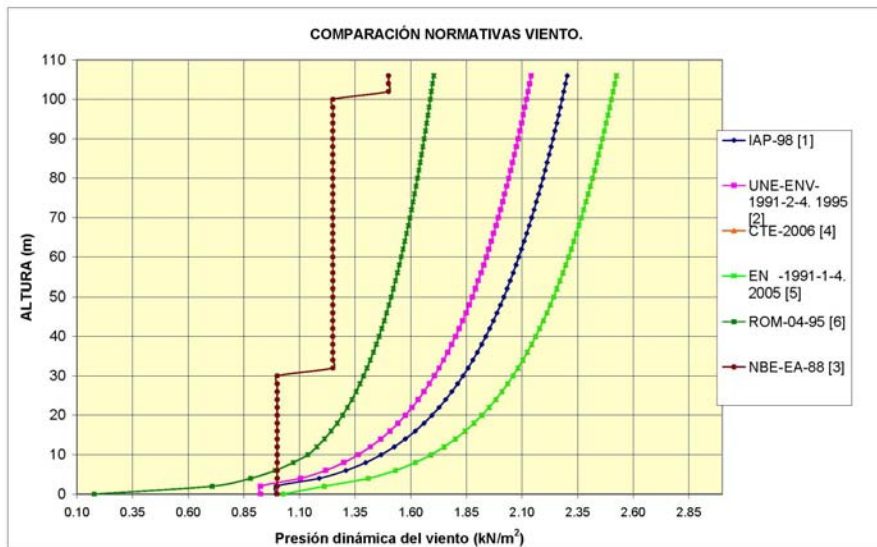


Gráfico 3: Presión dinámica del viento para el borde del mar (Barcelona) según las normativas

Como puede comprobarse de los resultados obtenidos en el gráfico 3 y la tabla 3, las fuerzas del viento calculadas con la antigua normativa de acciones en la edificación NBE-EA-88 [3], lleva a resultados muy del lado de la inseguridad entre el 50 y el 55% de los obtenidos con el nuevo Código Técnico de Edificación [4], que coinciden con la última versión del Eurocódigo de acciones de viento EN 1991-1-4. 2005 [5].

Tabla 3: Resumen de resultados de fuerzas y momentos del viento en la base de un edificio de 100 m de altura y anchura unitaria

Normativa	Fuerza (KN / %)	Momento (KN·m / %)
IAP-98 [1]	192,7 KN / 89,7 %	10468,9 KN·m / 90,4 %
UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2]	179,2 KN / 83,4 %	9734,5 KN·m / 84,0 %
NBE-EA-88 [3]	117,2 KN / 54,6 %	6130,0 KN·m / 52,9 %
CTE-2006 [4]	214,8 KN / 100 %	11584,6 KN·m / 100 %
EN 1991-1-4. 2005 [5]	214,8 KN / 100 %	11584,6 KN·m / 100 %
ROM 0.4-95 [6]	143,8 KN / 66,9 %	7811,2 KN·m / 67,4 %

### 3. Cálculo del coeficiente de arrastre o de forma del Hotel Vela de Barcelona

La obtención del coeficiente de arrastre aplicando los parámetros tabulados en las diferentes normativas es el procedimiento más rápido y sencillo para poder calcular las acciones del viento, siempre y cuando la geometría del edificio se pueda asimilar a las formas geométricas sencillas tipificadas. La dificultad aparece si se trata de un edificio con formas singulares no contempladas directamente por las normativas, como es el caso. La simplificación de asimilar una forma compleja a formas tipificadas sencillas puede hacer que se obtengan coeficientes de arrastre mayores que los reales, con lo cual se estaría del lado de la seguridad, pero encareciendo innecesariamente la estructura y la cimentación, mientras que si la simplificación concluye con coeficientes de arrastre menores que los reales se estará del lado de la inseguridad infradimensionando la estructura y la fachada frente a las acciones del viento.

Con una sección en planta con forma de ojo cortada en los extremos por planos oblicuos (Fig. 2), podríamos asimilar la planta, bien a un rectángulo, hipótesis a priori conservadora, o bien a una elipse, hipótesis que probablemente esté del lado de la inseguridad. Los resultados, por tanto, parece que deberían estar entre estas dos hipótesis de partida. En la referencia [8] se pueden encontrar las primeras aproximaciones al coeficiente de arrastre mediante la asimilación a estas formas geométricas usuales.

### 3.1 Obtención del coeficiente de arrastre del Hotel Vela mediante ensayo en túnel aerodinámico

Ante la incertidumbre en la evaluación de los coeficientes de arrastre del edificio, y su posible sobre o infra-dimensionamiento, la UTE VELA BCN a petición de IDEAM y del Taller de Arquitectura de Ricardo Bofill, encargaron el estudio de los coeficientes de arrastre del edificio mediante un ensayo en túnel de viento a escala reducida al Instituto Universitario "Ignacio da Riva" de la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid.

La finalidad del ensayo realizado [9] es la obtención de la distribución de presiones en las fachadas del edificio, así como la obtención de las cargas globales del viento, deduciendo los coeficientes de arrastre del edificio. Para ello se realizó un modelo a escala 1/125 de los edificios de la Torre y el Atrio del Hotel Vela (Figs. 3 a y 3b). El modelo se instrumentó con ciento setenta y nueve tomas de presión distribuidas entre las fachadas laterales de la Torre y en la cara trasera del Atrio. Para la realización de los ensayos el modelo a escala reducida se fijó sobre la plataforma giratoria del túnel aerodinámico para poder así medir la presión en las tomas instrumentadas variando el ángulo de incidencia del viento, girando cada 15 ° la plataforma giratoria (Fig. 3b).



Figs. 3a y 3b: Vistas de la maqueta en el interior del túnel de viento de la E. T.S.I. Aeronáuticos de Madrid

En el gráfico 4 se resumen los resultados obtenidos en el ensayo para la dirección del viento soplando perpendicular a la Vela, que es la dirección crítica del viento que hace flexionar a la Torre con el menor brazo. Como puede apreciarse en el gráfico, salvo en las secciones superiores donde la vela reduce mucho la dimensión de las plantas, el valor medio del coeficiente de arrastre está entre 1,70 y 1,60.



Gráfico 4: Coeficiente de arrastre de la Torre con viento transversal a la Vela

### 3.2 Cálculo de los coeficientes de arrastre mediante el empleo de un software basado en partículas para la simulación de fluidos

NextLimit Technologies ha desarrollado el software Xflow para el análisis de sistemas multi-físicos, el cual es una herramienta capaz de simular el comportamiento físico de diversos medios tanto sólidos como fluidos. En la ref. [8] se puede encontrar una breve descripción de los fundamentos matemáticos en los que se basa dicho software.

#### 3.2.1 Resultados del cálculo de los coeficientes de arrastre del Hotel Vela mediante modelos de partículas

Para contrastar los coeficientes de arrastre obtenidos en primer lugar mediante la asimilación de las geometrías reales a formas tipificadas sencillas, y posteriormente su obtención mediante el ensayo en túnel de viento, se han realizado dos simulaciones diferentes mediante ordenador. En la primera simulación del Hotel Vela se ha reproducido unas condiciones similares a las del ensayo en túnel aerodinámico, mediante la entrada un perfil de viento constante y reproduciendo un ratio entre el área frontal expuesta al viento y la sección del túnel proporcionales a las del ensayo aerodinámico realizado en laboratorio (Fig. 3b).

La figura 4 muestra en un corte horizontal el campo de presiones y su proyección sobre la superficie del edificio para un instante determinado de tiempo en la primera simulación.

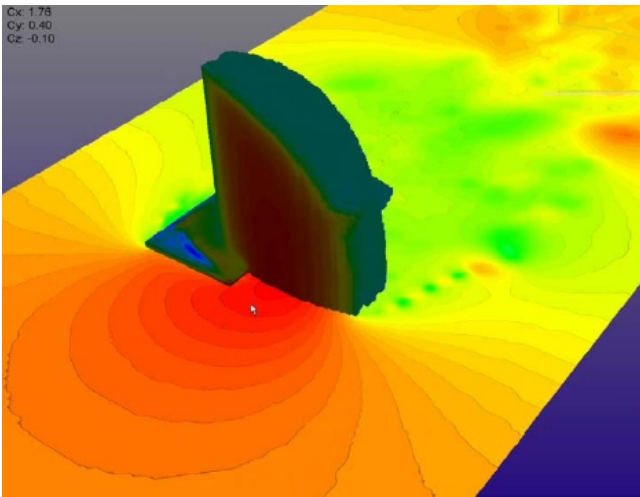


Fig. 4: Campo de presiones en el primer análisis

En este primer análisis con el viento soplando perpendicular al plano de la Torre, el coeficiente de arrastre una vez la estela se estabiliza es el representado en el gráfico 5a en función de la altura del edificio. En el gráfico 5b se puede observar la evolución temporal del coeficiente de arrastre global del edificio, oscilando entre 1,7 y 1,77, con un valor medio de 1,74.

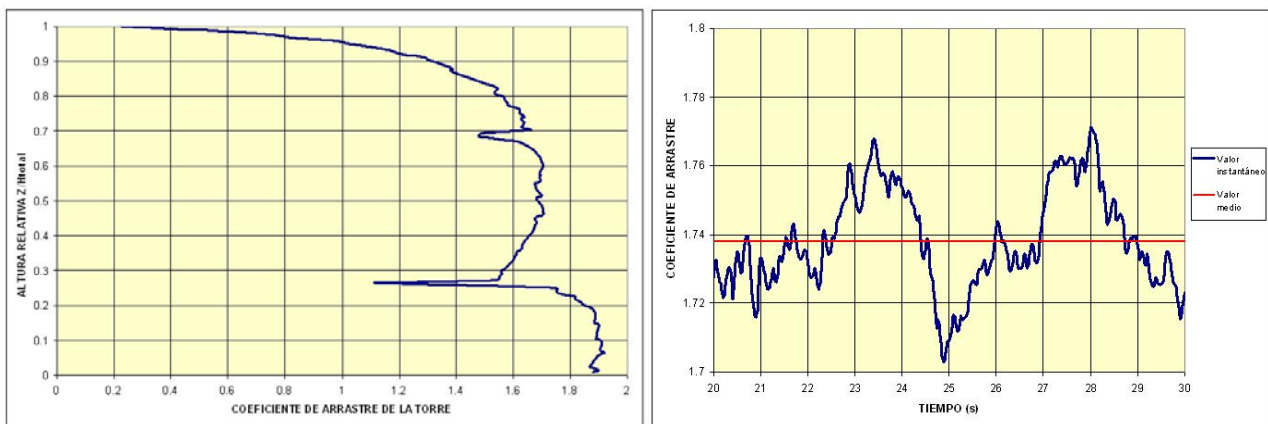


Gráfico 5a y 5b: Coeficiente de arrastre del edificio en función de la altura con viento perpendicular a la Vela, reproduciendo las condiciones del ensayo en el túnel aerodinámico, y oscilación temporal de su valor medio



Como se puede apreciar en la figura del gráfico 5a, el coeficiente de arrastre de la parte inferior del edificio, con Torre más Atrio, presenta un coeficiente de arrastre medio, del orden de 1,90, mayor que la zona superior de la Vela, en el entorno de 1,60, que es más aerodinámica. La forma y los valores medios del coeficiente de arrastre obtenidos por ordenador se asemejan bastante a los medido experimentalmente en el ensayo reducido del túnel aerodinámico (gráfico 4), con la salvedad que el modelo de ordenador presenta un gran número de captadores de presión, lo que conlleva mucha precisión, mientras que en el caso del túnel de viento estos captadores son limitados.

Para el análisis del coeficiente de arrastre real del edificio, se realizó una segunda simulación, en la cual se eliminaba cualquier tipo de restricción lateral al flujo del viento, situación equivalente a la realidad de campo abierto. En este nuevo análisis por ordenador se modelizó el viento con el perfil logarítmico definido según el CTE-2006 [4]. Los gráficos 6a y 6b detallan de una manera análoga a los anteriores el coeficiente de arrastre en función de la altura del edificio, y la oscilación temporal de su valor global, en el caso de campo abierto.

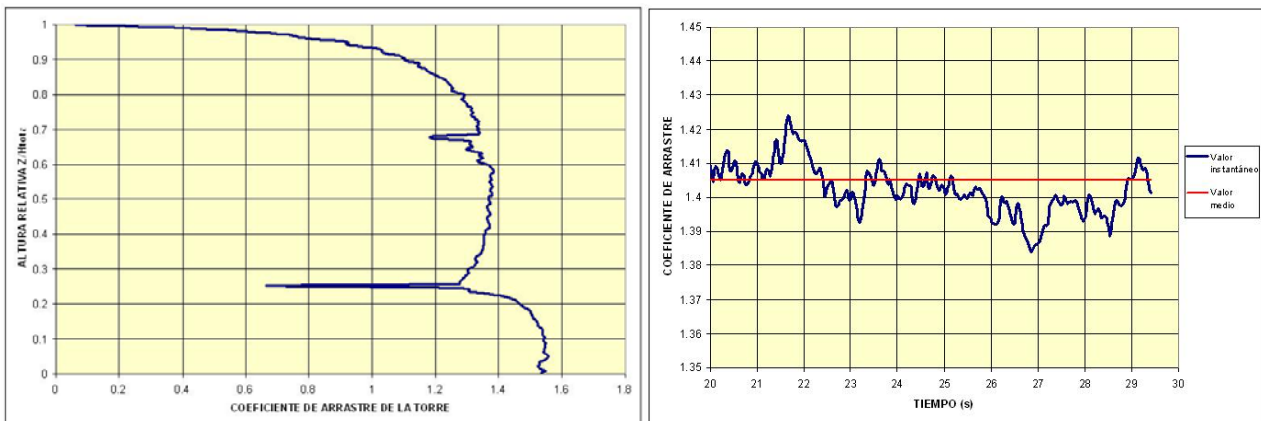


Gráfico 6a y 6b: Coeficiente de arrastre del edificio en función de la altura con viento perpendicular a la Vela, en campo abierto, y oscilación temporal de su valor medio

El resultado de esta segunda simulación, que se asemeja más a la situación real del edificio, muestra una reducción del valor del coeficiente de arrastre medio hasta un valor de 1,405, del orden de un 20% menos que el valor obtenido en la primera simulación con la sección del frente de viento reducida.

### 3.2.2 Ventajas de los modelos de partículas para el análisis de las acciones del viento

Las posibilidades que ofrece una herramienta de análisis computacional como Xflow en comparación con el tradicional túnel aerodinámico son significativas. Por una parte, mientras en el software se trabaja con modelos a tamaño real, en el túnel de viento normalmente se trabaja con modelos a escala, lo que imposibilita reproducir de forma simultánea el número de Reynolds y el número de Mach que estamos interesados en estudiar. Este problema es menor, ya que normalmente a Reynolds suficientemente elevados el comportamiento del flujo no experimenta grandes diferencias.

Por otra parte, en la herramienta computacional se tiene gran libertad a la hora de modelar el entorno, si por ejemplo estamos interesados en estudiar el flujo de aire en torno a un edificio, podemos introducir también la geometría del terreno y los edificios colindantes. Esto es obviamente más complicado en un túnel de viento convencional.

El túnel de viento tiene además una sección de paso limitada, lo que puede producir un efecto de bloqueo. Un valor máximo típico del coeficiente de bloqueo (relación entre el área frontal del modelo y el área de la sección del túnel aerodinámico) puede ser de 0,1 ref. [10]. En los dos modelos analizados mediante Xflow se ha demostrado cómo al reproducir la geometría real del túnel de viento con una sección de paso del aire reducida se obtienen valores de los coeficientes de arrastre más de un 20% mayores que los obtenidos si el ensayo se realiza sin limitaciones en la sección de paso del viento. (Gráficos 4, 5a y 6a)

En cuanto a la posibilidad de efectuar medidas (sin perturbar el flujo), el modelo numérico no tiene la limitación física del ensayo en túnel aerodinámico, ya que admite cientos de miles de sensores de presión sobre la superficie del modelo sin alterar en absoluto la corriente, y además posibilita la opción de analizar el comportamiento en el interior del flujo. De esta forma es posible estudiar la forma de la estela o analizar el impacto medioambiental de la presencia de un nuevo edificio creando mapas de 'confort' en base a determinado criterio.

#### 4. Conclusiones

El nuevo Código Técnico de la Edificación supone un cambio, convergiendo con los Eurocódigos, en la manera de realizar el cálculo de las acciones de viento en los edificios, con resultados en las presiones dinámicas de viento muy superiores en general a los obtenidos en la normativa de acciones en edificación precedente (NBE-EA-88).

El otro parámetro fundamental a la hora del dimensionamiento de la estructura resistente frente a las acciones de viento es el coeficiente de forma o de arrastre. Su obtención para geometrías complejas, aplicando la normativa vigente extrapolando los resultados de geometrías simples, puede en muchos casos suponer un sobredimensionamiento de las acciones de viento, medida antieconómica, o su infradimensionamiento, situación de falta de inseguridad. En estos casos puede ser necesario recurrir a los ensayos en túnel de aerodinámico, cuyos resultados suelen aproximarse bastante a la realidad, o bien realizar algún tipo de análisis mediante modelos de partículas por ordenador como se ha descrito en el artículo. Estos modelos de ordenador suponen una herramienta muy potente, ya que permiten obtener con gran precisión los coeficientes de arrastre, así como las presiones y succiones máximas en la estructura.

#### 5. Principales participantes en el proyecto del Hotel Vela de Barcelona

Proyecto y Dirección de Obra: Ricardo Bofill. Taller de Arquitectura

Proyecto de la Estructura y Asistencia Técnica a la Dirección de Obra :IDEAM

Ensayo en Túnel Aerodinámico del Hotel Vela: Laboratorio de Aerodinámica IDR/UPM ETSI Aeronáuticos de Madrid

Análisis de las acciones del Viento mediante modelos de partículas por ordenador: Nextlimit Technologies. Xflow TM

#### 6. Referencias

- [1] "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". IAP-98. Ministerio de Fomento. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes. Dirección General de Carreteras. 1998.
- [2] UNE-ENV 1991-2-4 "Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones de Viento." Mayo 1995
- [3] Normativa Básica de Edificación: Acciones en Edificación" NBE-AE-88
- [4] Código Técnico de la Edificación (CTE) "Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación". Libro 2. Ministerio de Vivienda. 2006.
- [5] EN 1991-1-4 "Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General Actions- Wind actions" April 2005
- [6] "Recomendaciones para Obras Marítimas. Acciones Climáticas II: Viento". ROM 0.4-95. Puertos del Estado. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.1995
- [7] MATUTE L., ORTEGA M., MILLANES F., "La estructura del Hotel Vela de Barcelona", *IV Congreso ACHE. Valencia. Nov- 2008*
- [8] ORTEGA M., LACOMA L.M., HOLMAN D.M., "Análisis de las acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona". *Hormigón y Acero. Vol 59,nº 250. 2008.*
- [9] PINDADO S., FRANCHINI S., MESEGUER J., "Medida de las cargas de viento en un modelo aerodinámico del Hotel Vela de Barcelona". Laboratorio de Aerodinámica IDR/UPM ETSI Aeronáuticos de Madrid. Feb. 2007
- [10] MESEGUER J., SANZ A., PERALES JM., PINDADO S., "Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones". *Mc Graw Hill. Madrid 2001*