

HA

HORMIGÓN y ACERO

Revista trimestral de **ACHE** Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural

www.e-ache.com

ISSN: 0439-5689 | enero - marzo 2009 | Volumen 60 - nº 251



Teatros del Canal | Madrid

Análisis de acciones de viento en edificios singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona

Wind action analysis in outstanding buildings. Case study of Hotel Vela at Barcelona

Miguel Ortega Cornejo⁽¹⁾, Luis M. Lacoma Aller⁽²⁾ y David M. Holman⁽³⁾

Recibido | Received: 26-05-2008
Aceptado | Accepted: 21-07-2008

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 que se proyecten 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-AE-88), definía fuerzas equivalentes de viento muy por debajo de otras normativas más modernas como el propio Código Técnico, la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-98, o los Eurocódigos.

En el presente artículo se analizan las diferentes normativas de acciones de viento, particularizándolas al Hotel Vela de Barcelona, edificio proyectado por el Taller de Arquitectura de Ricardo Bofill, del cual IDEAM ha realizado el proyecto de la estructura, incidiendo en la importancia en el cálculo del coeficiente de arrastre.

Para edificios singulares como el Hotel Vela, la aplicación de las normativas para el cálculo del coeficiente de arrastre o de forma puede dar lugar a un sobredimensionamiento o infradimensionamiento de las acciones del viento, por lo que a menudo es frecuente apoyar su cálculo de manera experimental mediante ensayos en túnel aerodinámico.

Una muy reciente alternativa al ensayo en túnel de viento es la modelización por ordenador de las acciones del viento mediante modelos de partículas, que permiten obtener con gran precisión los coeficientes de arrastre, así como las presiones y succiones máximas en la estructura.

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

Abstract

The architecture's development in the design of singular buildings, with the domain of the knowledge of the structures' response and the advance of the constructive process, are permitting the design of more complex buildings with special sections and shapes that require a detailed analysis concerned to the response against the wind forces.

Until the recent publication of the new Spanish Technical Code for Buildings (CTE-2006), the Spanish current regulation of wind action on Buildings (NBE-AE-88), defined equivalent wind forces below the values of other more modern codes like the own Spanish Technical Code for Buildings, the Spanish Instruction of Actions for Road Bridges IAP-98 or the Eurocodes.

⁽¹⁾ Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Jefe de Proyectos. IDEAM S.A. (Madrid, España)

⁽²⁾ Dr. Investigador y desarrollador XFlow TM. Next Limit Technologies (Madrid, España)

⁽³⁾ Manager XFlow TM. Next Limit Technologies (Madrid, España)

Persona de contacto / Corresponding author: miguel.ortega@ideam.es

This article analyzes the different wind action codes, particularizing to Barcelona's "Hotel Vela", building designed by Ricardo's Bofill "Taller de Arquitectura", for which IDEAM has realized the structural project, incising in the importance of the calculus of the force coefficients.

For singular buildings like "Hotel Vela", the direct application of the codes for the calculation of the pressure coefficient could give way to an over dimensioning or infra dimensioning of the wind forces, that's why it is frequently to support it's analysis experimentally by means of a wind tunnel test.

A very recent alternative to the wind tunnel test is the computer modelling of the wind forces by means of particles models, which permit to obtain with great precision the force coefficients, as well as the maximum pressures and suctions in the structure.

Key words: Wind actions, Eurocodes, Spanish Technical Code for Buildings, pressure coefficients, wind tunnel, computer particle models.

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 trabajo se va a realizar un análisis normativo de las acciones del viento, partiendo de la normativa española vigente, para compararla con los Eurocódigos.

En primer lugar 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].

Posteriormente se analizarán las normativas españolas sobre acciones de viento en la edificación (Ref. [3] y [4]), y las compararemos 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].

Finalmente 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 encuentra en la bocana del puerto de Barcelona frente al mar.

1.1 Acciones de viento según la IAP-98

La "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera" IAP-98 [1] aborda las acciones de viento en el capítulo 3.2.3.2.1 como una carga estática equivalente definida como:

$$F = C_D \cdot A \left(1/2 \cdot \rho \cdot V_C^2 \right) \quad (1)$$

Donde F es la fuerza de empuje horizontal del viento en (N), C_D es el coeficiente de arrastre del elemento consi-

derado (adimensional), A es el área total del elemento expuesta al viento, proyectada sobre un plano perpendicular a este (m^2), y la expresión $1/2 \cdot \rho \cdot V_C^2$ es la presión básica de cálculo en N/m^2 , en la cual ρ es la masa específica del aire ($1,25 \text{ kg}/m^3$), y V_C es la velocidad de cálculo en m/s .

Para conocer por tanto la fuerza del viento sobre un objeto es necesario conocer la velocidad de cálculo de viento, la superficie expuesta y el coeficiente de arrastre del elemento a analizar.

La IAP define la velocidad de cálculo V_C como el producto de la velocidad de referencia V_{ref} por los coeficientes de topografía C_t , de riesgo C_r , de altura C_z y de ráfaga C_g :

$$V_C = C_t \cdot C_r \cdot C_z \cdot C_g \cdot V_{ref} \quad (2)$$

Donde:

– C_t es el factor de topografía, de valor 1,0 salvo en valles donde se pueda producir encauzamiento del aire, cuyo valor vale 1,1.

– C_r es el factor de riesgo.

$$C_r = \sqrt{0,562 \cdot \left\{ 1 - 0,2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\}} \quad (3)$$

Para un periodo de retorno de 100 años $C_r = 1,038$.

– C_z es el factor de altura.

$$C_z = k_z \cdot \ln(z/z_0) \text{ si } z \geq z_0 \quad (4)$$

O bien

$$C_z = k_z \cdot \ln(z_{\min}/z_0) \text{ si } z < z_{\min} \quad (5)$$

– C_g es el factor de ráfaga, de valor:

$$C_g = \sqrt{\left\{ 1 + \frac{7 \cdot k_z}{C_z \cdot C_t} \right\}} \quad (6)$$

El coeficiente k_z , la rugosidad z_0 , y la altura mínima a considerar $z_{\min}$, se definen en la Tabla 1 de la IAP-98, y son iguales a los indicados en el "Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4:

Acciones de Viento" UNE-ENV 1991-2-4 [2]. Estos parámetros dependen del entorno donde se localice el elemento de estudio, y se diferencian 4 tipos:

- Tipo I: orilla del mar o de un lago con al menos 5 km de superficie libre en el lado de barlovento, o una zona rural plana sin obstáculos de ningún tipo.
- Tipo II: zonal rural con algunos obstáculos aislados, como árboles o pequeñas construcciones.
- Tipo III: zona suburbana, forestal, o industrial.
- Tipo IV: zona urbana con al menos el 15 % de la superficie edificada, con altura media de edificios por encima de 15 m.

Tabla 1. Tabla 1 de la IAP-98 con parámetros k_z , z_0 y z_{min}

Tipo de entorno	k_z	z_0 (m)	z_{min} (m)
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,22	0,30	8
IV	0,24	1,00	16

1.2. Acciones de viento según la UNE-ENV 1991-2-4

El "Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 2-4: Acciones de Viento" UNE-ENV 1991-2-4 de 1995 [2] define la fuerza global del viento actuando sobre una estructura en su capítulo 6, como:

$$F_w = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_d \cdot c_f \cdot A_{ref} \quad (7)$$

Donde:

- F_w es la fuerza global de empuje horizontal del viento.
- q_{ref} es la presión media de la velocidad de referencia del viento.
- $c_e(z)$ es el coeficiente de exposición que tiene en cuenta el terreno y la altura sobre el nivel del suelo z .
- c_d es el coeficiente dinámico que tiene en cuenta la amplificación dinámica. Normalmente se suele tomar igual a 1.
- c_f es el coeficiente de fuerza o de arrastre (equivale al coeficiente de arrastre C_D de la IAP-98 [1])
- A_{ref} es la proyección de la estructura sobre un plano normal al viento (equivale al área expuesta al viento A de la IAP-98 [1])

Aunque la expresión (7) es formalmente diferente a la (1) empleada por la IAP-98 [1] para obtener la fuerza del viento, conlleva a resultados idénticos, como veremos más adelante.

La presión media de la velocidad de referencia del viento q_{ref} se define como:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref}^2 \quad (8)$$

Con

$$v_{ref} = c_{DIR} \cdot c_{TEM} \cdot c_{ALT} \cdot v_{ref,0} \quad (9)$$

Donde

- v_{ref} es la velocidad del viento de referencia.
- c_{DIR} es el factor de dirección. Normalmente se toma igual a 1,0.
- c_{TEM} es el factor temporal (estacional) que también se toma igual a 1,0.
- c_{ALT} es el factor de altitud que también se toma igual a 1,0.
- $v_{ref,0}$ es el valor básico de la velocidad de referencia, definida en el Anexo A de la UNE-ENV 1991-2-4 [2].

El valor de la velocidad de referencia del viento $v_{ref}(p)$ con una probabilidad de ser excedida p distinta de 0,02, se define como:

$$v_{ref}(p) = v_{ref} \cdot \left(\frac{1 - K_1 \cdot \ln[-\ln(1-p)]}{1 - K_1 \cdot \ln[-\ln(0,98)]} \right)^n \quad (10)$$

Donde K_1 es un parámetro de forma, que se toma igual a 0,20, y n se toma igual a 0,50 según indica la UNE-ENV 1991-2-4 [2].

El factor $\left(\frac{1 - K_1 \cdot \ln[-\ln(1-p)]}{1 - K_1 \cdot \ln[-\ln(0,98)]} \right)^n$ de la ecuación (10) lo

llamaremos c_{prob} , el cual es exactamente igual al factor de riesgo C_r (3) de la IAP-98 [1], así para un periodo de retorno T de 100 años, $p=1/T=0,01$, y $v_{ref}(0,01)=1,038 \cdot v_{ref}$.

El coeficiente de exposición $c_e(z)$ tiene en cuenta los efectos que la rugosidad del terreno, la topografía y la altura sobre el nivel del suelo z , provocan sobre la velocidad media del viento y la turbulencia.

Así:

$$c_e(z_e) = c_r^2(z) \cdot c_t^2(z) \cdot \left[1 + \frac{7 \cdot k_T}{c_r(z) \cdot c_t(z)} \right] \quad (11)$$

Donde:

- $c_r(z)$ es el coeficiente de rugosidad, que equivale al factor de altura C_z de la IAP-98 [1], al ser la ecuación (12) igual a la (4), y la (13) igual a la (5)

$$c_r = k_T \cdot \ln(z / z_0) \text{ si } z \geq z_0 \quad (12)$$

$$\text{O bien } c_r = k_T \cdot \ln(z_{min} / z_0) \text{ si } z < z_{min} \quad (13)$$

– k_T es el factor del terreno, que equivale al coeficiente k_z de la IAP-98 [1]. Las categorías del terreno (Tipos I al IV), así como sus parámetros dependientes, definidos en el apartado 8.3 de la UNE-ENV 1991-2-4 [2], son iguales a los definidos en la tabla 1 de la IAP-98 [1].

– $c_t(z)$ es el coeficiente topográfico, que equivale al factor de topografía C_t de la IAP-98 [1]. Este valor se suele tomar igual a 1, siempre que no se produzca el encauzamiento del viento. El apartado 8.4 de la UNE-ENV 1991-2-4 [2] propone el cálculo de dicho coeficiente en casos especiales.

El factor $\left[1 + \frac{7 \cdot k_T}{c_r(z) \cdot c_t(z)}\right]$ de la ecuación (11) equivale al

factor de ráfaga al cuadrado C_g^2 definido en la IAP-98 [1], por lo que el coeficiente de exposición $c_e(z)$ definido por la UNE-ENV 1991-2-4 [2], equivale al producto de los cuadrados de los factores de altura C_z , de topografía C_t y de ráfaga C_g de la IAP-98 [1].

Con todo esto, la ecuación (11) que define el coeficiente de exposición desarrollada queda de la forma siguiente:

$$c_e(z_e) = k_T^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \quad (14)$$

Sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (7) se obtiene desarrollada la ecuación de la fuerza equivalente de viento:

$$F_w = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref,0}^2 \right) \cdot (c_{prob}^2) \cdot \left(k_T^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right) \cdot c_f \cdot A_{ref} \quad (15)$$

Si hacemos lo mismo con la ecuación (1) de la IAP-98 [1], y la desarrollamos, obtendremos la ecuación (16), que es idéntica a la (15).

$$F = (1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2) \cdot (C_f^2) \cdot \left(k_T^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right) \cdot C_D \cdot A \quad (16)$$

Como ya anticipamos, puede constatarse que la formulación de las acciones de viento en la IAP-98 [1] y en la UNE-ENV 1991-2-4 [2] son idénticas.

1.3. Acciones de viento según la NBE-AE-88

La “Normativa Básica de Edificación: Acciones en Edificación” NBE-AE-88 [3] del año 1988, es una copia de la normativa del Ministerio de Vivienda MV-101 del año 1962, y ha sido la normativa vigente sobre acciones en edificación en España hasta la reciente aparición del nuevo Código Técnico de la Edificación CTE-2006 [4].

En lo referente a las acciones de viento, se trata de una normativa muy antigua, con valores de las presiones dinámicas del viento muy por debajo de las de cualquier normativa más moderna, como se demuestra más adelante.

Así la NBE-AE-88 [3], define la presión de viento sobre un elemento como:

$$p = c \cdot w \quad (17)$$

Donde c es el coeficiente eólico, equivalente al coeficiente de arrastre C_D de IAP-98[1], o al coeficiente de fuerza c_f de la UNE-ENV 1991-2-4 [2], y w es la presión dinámica del viento, definida en la tabla 5.1 del apartado 5.2.

Tabla 2. Tabla 5.1 de la NBE-AE-88

PRESIÓN DINÁMICA DEL VIENTO w				
Altura de coronación del edificio sobre el terreno en m, cuando la situación topográfica es:		Velocidad del viento v		Presión dinámica w
Normal	Expuesta	m/s	km/h	kg/m ²
De 0 a 10	-	28	102	50
De 11 a 30	-	34	125	75
De 31 a 100	De 0 a 30	40	144	100
De 31 a 100	De 0 a 30	40	144	100
Mayor de 100	De 31 a 100	45	161	125
-	Mayor de 100	49	176	150

1.4. Acciones de viento según el nuevo CTE-2006

El nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE): “Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación”, Libro 2 de 2006 [4], sustituye y deroga a la antigua NBE-AE-88 [3], y basa su formulación en el nuevo Eurocódigo 1 de acciones EN 1991-1-4 de Abril de 2005 [5], como se verá más adelante.

El CTE-2006 [4] define las acciones de viento en el apartado 3.3, y en el anexo D, como una fuerza equivalente:

$$F = A \cdot q_e = A \cdot q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (18)$$

Donde:

- F es la fuerza de empuje horizontal del viento.
- A es el área total del elemento expuesta al viento proyectada sobre un plano perpendicular a este.
- q_e es la presión estática del viento, que equivale a $q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$
- q_b es la presión dinámica del viento igual a $1/2 \cdot \rho \cdot v_b^2$ (equivalente a $1/2 \cdot \rho \cdot v_{ref,0}^2$ de [2] ó a $1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2$ de [1]), con v_b la velocidad básica del viento.
- c_p es el coeficiente eólico o de presión del elemento considerado (equivalente al coeficiente de arrastre C_D de IAP-98[1], o al coeficiente de fuerza c_f de la UNE-ENV 1991-2-4 [2]).

– c_e es el coeficiente de exposición (equivalente al coeficiente $c_e(z)$ de la UNE-ENV 1991-2-4 [2]), de valor:

$$c_e = F \cdot (F + 7 \cdot k) \quad (19)$$

$$\text{Con } F = k \cdot \ln \left(\frac{\max(z, Z)}{L} \right) \quad (20)$$

Si desarrollamos la ecuación (19) tendremos que:

$$c_e = k^2 \cdot \left(\ln^2 \left(\frac{\max(z, Z)}{L} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{\max(z, Z)}{L} \right) \right) \quad (21)$$

Se puede comprobar cómo el coeficiente de exposición c_e (ecuación 21) del CTE-2006 [4], es idéntico al definido en la UNE-ENV 1991-2-4 [2] (ecuación 14), ya que hay una equivalencia entre los parámetros siguientes de [4] y de [2] respectivamente: k con k_T , Z con z_{min} y L con z .

Estos parámetros quedan definidos en la tabla D.2 del CTE-2006 [4] en función del grado de aspereza del entorno (tipo de entorno).

Tabla 3. Tabla D.2 del CTE-2006 [4]

Grado de aspereza del entorno	k	L (m)	Z (m)
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,15	0,003	1,0
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III Zona rural accidentada con algunos obstáculos aislados como pequeños árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	0,22	0,30	5,0
V Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios de altura	0,24	1,00	10,0

Más adelante se analizará de manera crítica el origen de estos parámetros, especialmente el parámetro k .

El anexo D.1 del CTE-2006 [4], indica que para comprobaciones de los estados límites de servicio, la velocidad básica del viento v_b debe multiplicarse por el coeficiente (que llamaremos c_{prob}) definido en la tabla D.1 en función del periodo de retorno del elemento de estudio.

Así, sucede como en la ecuación (10) de la UNE-EN-1991-2-4 [2], y la velocidad básica en función del periodo de retorno queda como:

$$v_b(T) = v_b \cdot c_{prob} \quad (22)$$

Tabla 4. Tabla D.1 del CTE-2006

Periodo de retorno T (años)	1	2	5	10	20	50	200
Coeficiente (c_{prob})	0,41	0,78	0,85	0,90	0,95	1,00	1,08

Como puede comprobarse, los datos tabulados por el CTE-2006 [4], coinciden con los obtenidos mediante la ecuación (3) del factor de riesgo C_r de la IAP-98, y los de la ecuación (10) de la UNE-EN-1991-2-4 [2].

Si se desarrolla la ecuación (18) del CTE-2006 [4] de una manera análoga a como se ha hecho con la IAP-98[1] (ecuación 16) y la UNE-EN-1991-2-4 [2] (ecuación 15), llegamos a una expresión (ecuación 23) formalmente idéntica a las anteriormente citadas.

$$F = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \right) \cdot (c_{prob}^2) \cdot \left(k^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{L} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{L} \right) \right] \right) \cdot c_p \cdot A \quad (23)$$

1.5. Acciones de viento según la EN 1991-1-4

La nueva versión del Eurocódigo 1 “Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1-4: General Actions- Wind Actions” EN 1991-1-4 April 2005 [5], modifica ligeramente la formulación de la versión previa (UNE-ENV 1991-2-4 [2]), y define la fuerza global del viento actuando sobre una estructura, como:

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (24)$$

Donde:

– F_w es la fuerza global de empuje horizontal del viento.

– El factor estructural $c_s \cdot c_d$ tiene en cuenta el efecto sobre las acciones del viento de la no simultaneidad entre las presiones punta del viento en una superficie (c_s) junto al efecto de las vibraciones en la estructura debida a fenómenos de turbulencia (c_d).

El apartado 6.1 de la EN 1991-1-4 [5], define los criterios para el cálculo de estos parámetros, que en casos normales pueden tomarse iguales a 1.

– $q_p(z_e)$ es la presión de la velocidad punta del viento a la altura z_e .

– c_f es el coeficiente de fuerza o de arrastre.

– A_{ref} es la proyección de la estructura sobre un plano normal al viento.

La presión punta de la velocidad del viento $q_p(z)$ se define como:

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot l_v(z)\right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)\right) = c_e(z) \cdot q_b \quad (25)$$

Donde:

– q_b es la presión de la velocidad básica del viento.

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (26)$$

– v_m es la velocidad media del viento, obtenida mediante la ecuación:

$$v_m = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (27)$$

Donde:

– $c_o(z)$ es el factor de topografía, que se toma igual a 1 siempre que no se produzca el encauzamiento del viento. El apartado 4.3.3 de la EN 1991-1-4 [5] propone el cálculo de dicho coeficiente en casos especiales.

– $c_r(z)$ es el factor de rugosidad (igual al definido en la UNE-ENV 1991-2-4 [2])

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad \text{si } z \geq z_0 \quad (28)$$

$$\text{O bien } c_r(z) = k_r \cdot \ln(z_{\min}/z_0) \quad \text{si } z < z_{\min} \quad (29)$$

– k_r es el factor del terreno, y depende de la longitud de la rugosidad z_0 .

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0,07} \quad (30)$$

– v_b es la velocidad básica del viento.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (31)$$

Donde

– c_{dir} es el factor de dirección. Normalmente se toma igual a 1,0.

– c_{season} es el factor temporal (estacional) que también se toma igual a 1,0.

– $v_{b,0}$ es el valor fundamental de la velocidad básica del viento, definida en el Anexo Nacional.

El valor de la velocidad básica del viento $v_b(p)$ con una probabilidad de ser excedida p distinta de 0,02, como ya sucedía con la ecuación (10) de la UNE-ENV 1991-2-4 [2], se define como:

$$v_b(p) = v_b \cdot c_{prob} = v_b \cdot \left(\frac{1 - K \cdot \ln[-\ln(1-p)]}{1 - K \cdot \ln[-\ln(0,98)]}\right)^n \quad (32)$$

Donde K es un parámetro de forma, que se toma igual a 0,20, y n se toma igual a 0,50 según indica la EN 1991-1-4 [5].

– $l_v(z)$ es la intensidad de la turbulencia a la altura z , y se define como:

$$l_v(z) = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{o bien } l_v(z) = l_v(z_{\min}) \quad \text{si } z < z_{\min} \quad (33)$$

Con k_t el factor de turbulencia que se suele tomar igual a 1.

– $c_e(z)$ es el coeficiente de exposición, que desarrollado como se indica en la ecuación (34), considerando como ya se ha expuesto que $c_o(z)$, c_{dir} , c_{season} y k_1 son iguales a 1, queda como:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{\left[1 + 7 \cdot l_v(z)\right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)\right)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2} = \left(k_r^2 \cdot \ln^2\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right) \quad (34)$$

Si desarrollamos la ecuación (24) de una manera análoga a como ya se ha hecho con el resto de normativas obtenemos la ecuación (35) de la fuerza equivalente de viento según la EN 1991-1-4 [5].

$$F_w = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2\right) \cdot (c_{prob}^2) \cdot \left(k_r^2 \cdot \ln^2\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right) \cdot c_f \cdot A_{ref} \quad (35)$$

Las categorías del terreno (Tipos 0 al IV), así como los parámetros dependientes, k_r , z_0 y $z_{\min}$, definidos por la EN 1991-1-4 [5] en la tabla 4.1 de su apartado 4.3.2, se reproducen en la Tabla 5.

Tabla 5. Tabla 4.1 de la EN 1991-1-4 [5]

Categorías del terreno	* k_r	z_0 (m)	$z_{\min}$ (m)
0 Borde del mar o zonas costeras expuestas a mar abierto	0,1560	0,003	1,0
I Lagos o áreas llanas sin vegetación ni obstáculos	0,1697	0,01	1,0
II Áreas con vegetación baja como hierba y obstáculos aislados (árboles, edificios) con separaciones de al menos 20 veces la altura del obstáculo	0,19	0,05	2,0
III Áreas cubiertas con vegetación regular o con edificios o con obstáculos aislados con separaciones de un máximo de 20 veces la altura del obstáculo (pueblos, terreno suburbano, o bosques)	0,2153	0,30	5,0
IV Áreas en las cuales al menos el 15% de la superficie está cubierta por edificios y su altura media excede de los 15 m.	0,2343	1,00	10,0

1.6. Acciones de viento según la ROM 0.4-95

Dado que el Hotel Vela se sitúa en la bocana del puerto de Barcelona, en terreno ganado directamente al mar en ampliaciones previas del puerto de Barcelona, se ha tenido en cuenta la normativa de acciones para obras marítimas. Así las "Recomendaciones Para Obras Marítimas. Acciones Climáticas II: Viento". ROM 0.4-95 [6], define la fuerza global del viento actuando sobre una estructura, como:

$$Rv = C_f \cdot q_{v,t}(z) \cdot A_e = C_f \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot V_{v,t}^2(z) \right) \cdot A_e \quad (36)$$

Donde:

- Rv es la fuerza resultante de presión del viento.
- C_f es el factor de forma o el coeficiente eólico o de fuerza del elemento considerado (equivalente al coeficiente de arrastre C_D de IAP-98[1]).
- $q_{v,t}(z)$ es la presión dinámica del viento para la velocidad de proyecto igual a $1/2 \cdot \rho \cdot V_{v,t}^2(z)$, con $V_{v,t}(z)$ la velocidad del viento de proyecto.
- A_e es el área del elemento expuesta al viento proyectada sobre un plano perpendicular a este.

El valor de la velocidad del viento de proyecto $V_{v,t}(z)]_{T,\alpha}$ se define como:

$$V_{v,t}(z)]_{T,\alpha} = V_b]_{T,\alpha} \cdot F_A \cdot F_T \cdot F_R \quad (37)$$

Donde:

- F_A es el factor de altura y rugosidad superficial.
- F_T es el factor topográfico.
- F_R es el factor de ráfaga máxima.

– $V_b]_{T,\alpha}$ es la velocidad básica del viento en la dirección α asociada a un periodo de retorno T , de valor:

$$V_b]_{T,\alpha} = V_b]_{50 \text{ años}} \cdot K_T \cdot K_\alpha \quad (38)$$

Donde:

– $V_b]_{50 \text{ años}}$ es la velocidad básica del viento en el litoral español asociada a un periodo de retorno de 50 años, definida en la Tabla 3.2.1.4.1 de la ROM 0.4-95 [6], y reproducida más adelante en la figura 5 del presente artículo.

– K_T es el coeficiente para el cálculo de la velocidad básica del viento para otro periodo de retorno diferente de 50 años. La ROM 0.4-95 [6], lo define como:

$$K_T = \frac{V_b]_{T,\alpha}}{V_b]_{50 \text{ años}}} = \left(\frac{1 - 0,2 \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]}{1 - 0,2 \ln \left[-\ln(0,98) \right]} \right)^{0,5} \quad (39)$$

Podemos comprobar cómo este coeficiente equivale a todos los coeficientes de probabilidad o de riesgo empleados en el resto de normativas analizadas con anterioridad.

– K_α es el coeficiente direccional para el cálculo de la velocidad básica del viento. La ROM 0.4-95 [6], lo define en su anexo I mediante una serie de gráficos y tablas que dependen de la zona donde se localice la estructura.

En la figura 1 se reproduce el gráfico correspondiente a la zona de Barcelona. Como puede apreciarse el valor de K_α varía entre 0,95 y 0,60, en función de la dirección del viento. Para posteriores cálculos tomaremos del lado de la seguridad el máximo valor del coeficiente K_α igual a 0,95 que corresponde con el viento de dirección norte.

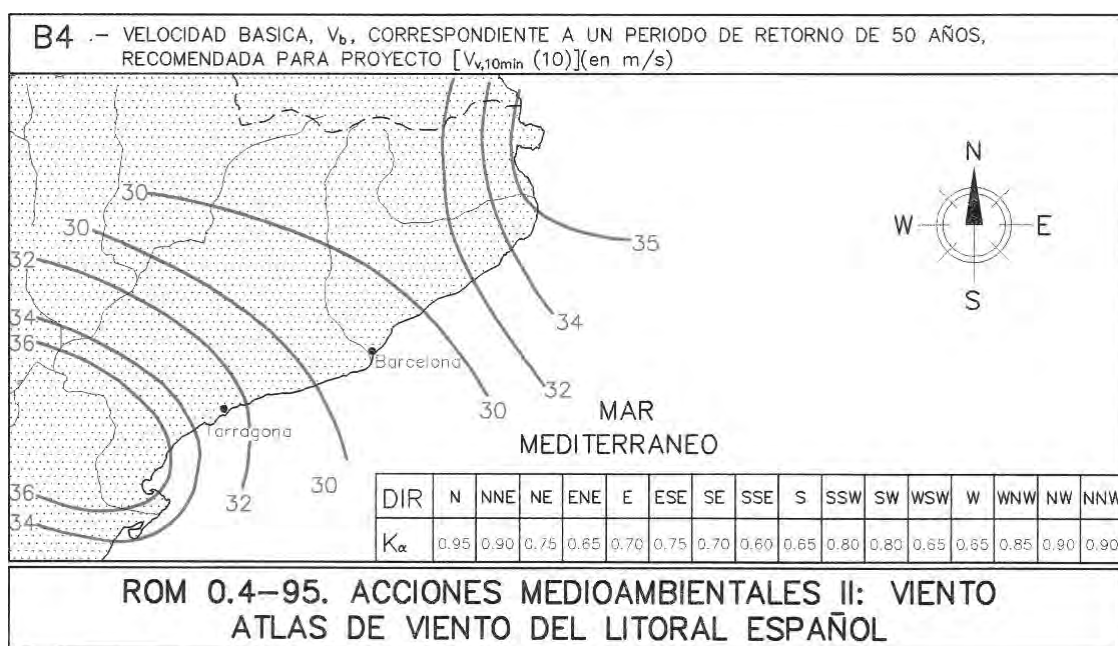
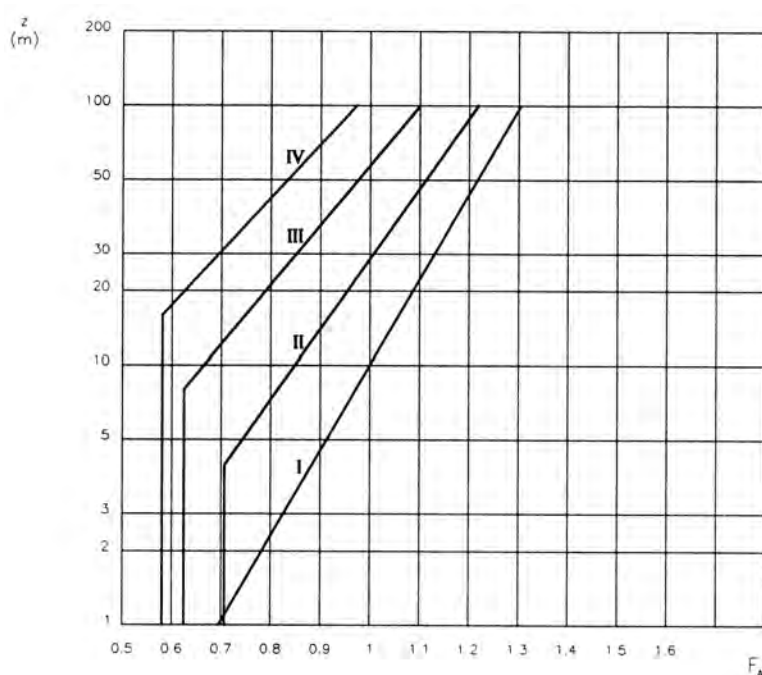


Figura 1. Gráfico con el coeficiente K_α para la zona de Barcelona.

Tabla 6. Tabla 2.1.4.1.1 de la ROM 0.4-95 [6] con los tipos de superficies

Tipo de superficie	z_0 (m)	Altura del nivel cero efectivo sobre la superficie (m)
I Mar abierto y campo abierto llano sin obstáculos (p.e. zonas costeras llanas, desiertos,...)	0,005	0,0
II Campo abierto, llano u ondulado, con obstáculos dispersos (p.e. praderas páramos,...) (nivel general de obstáculos de 5 m)	0,05	4,00
III Superficies boscosas, campo con obstáculos abundantes y pequeñas zonas urbanas (nivel general de obstáculos alrededor de 10 m)	0,30	9,00
IV Superficies con grandes y frecuentes obstáculos y grandes ciudades (nivel general de obstáculos alrededor de 15 m o más)	1,00	15,00

**Figura 2.** Gráfico 2.1.4.1.2 de la ROM 0.4-95 [6], con la definición del factor de altura F_A en función del tipo de superficie.**Tabla 7.** Parámetros deducidos del gráfico 2.1.4.1.2 con la definición del factor de altura F_A .

Tipo de superficie	K	z_0 (m)	z_{min} (m)
I	0,132	0,005	0,0
II	0,16	0,05	4,00
III	0,19	0,30	9,00
IV	0,21	1,00	15,00

– La ROM 0.4-95 [6] define el factor de altura y rugosidad superficial F_A en el gráfico 2.1.4.1.2 (Fig. 2) del apartado 2.1.4.1 en función

de la categoría del terreno donde esté situada la estructura objeto del estudio (Tabla 6).

Como puede comprobarse el gráfico de la figura 2 define de manera logarítmica el factor de altura F_A , que se ajusta a las ecuaciones siguientes:

$$F_A = k \cdot \ln(z / z_0) \text{ si } z \geq z_0 \quad (40)$$

$$\text{O bien } F_A = k \cdot \ln(z_{min} / z_0) \text{ si } z < z_{min} \quad (41)$$

El coeficiente k (definido así por los autores del artículo), se obtiene del ajuste de las ecuaciones anteriores al gráfico de la Figura 2, con los resultados indicados en la Tabla 7. Esta definición del coeficiente de altura F_A , (ecs. 40 y 41) coincide en su formulación con la del coeficiente de altura C_z de la IAP-98 [1] (ecs. 4 y 5), aunque sus parámetros cambien en función del tipo de terreno.

– El factor de topografía F_T se puede tomar en los casos normales igual a 1 como sucede con el resto de normativas analizadas. Para los casos en los que los efectos de la topografía local sea significativa, la ROM 0.4-95 [6] define en el apartado 2.1.4.2 en los gráficos de la tabla 2.1.4.2.1 el valor del coeficiente de topografía F_T .

– El factor de ráfaga máxima F_R permite la obtención de la velocidad máxima del viento asociada a una duración o intervalo del viento de 3, 5, 15 segundos, ó 10 minutos. La ROM 0.4-95 [6] define dicho factor en su tabla 2.1.4.3.1, (ver tabla 8) en función del tipo de superficie (tabla 6).

En posteriores cálculos tomaremos del lado de la seguridad los valores del factor de

		CATEGORIA DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL															
		I				II				III				IV			
DURACION	z (m)	3s	5s	15s	1min	3s	5s	15s	1min	3s	5s	15s	1min	3s	5s	15s	1min
	3	1.52	1.50	1.45	1.37	1.76	1.73	1.65	1.54	1.98	1.94	1.84	1.69	2.24	2.18	2.06	1.87
	5	1.48	1.46	1.41	1.34	1.73	1.70	1.62	1.51	1.98	1.94	1.84	1.69	2.24	2.18	2.06	1.87
	10	1.44	1.42	1.38	1.31	1.63	1.60	1.54	1.44	1.96	1.91	1.82	1.67	2.24	2.18	2.06	1.87
	15	1.42	1.40	1.36	1.29	1.59	1.56	1.50	1.41	1.86	1.82	1.73	1.60	2.24	2.18	2.06	1.87
	20	1.40	1.38	1.34	1.28	1.56	1.53	1.48	1.39	1.80	1.76	1.68	1.56	2.12	2.07	1.96	1.79
	30	1.38	1.37	1.33	1.27	1.52	1.50	1.45	1.37	1.73	1.70	1.62	1.51	1.99	1.94	1.84	1.69
	40	1.37	1.36	1.32	1.26	1.50	1.48	1.43	1.35	1.68	1.65	1.58	1.48	1.91	1.87	1.78	1.64
	50	1.36	1.35	1.31	1.25	1.48	1.46	1.41	1.34	1.65	1.63	1.56	1.46	1.86	1.82	1.73	1.60
	60	1.36	1.34	1.30	1.25	1.47	1.45	1.40	1.33	1.63	1.60	1.54	1.44	1.82	1.78	1.70	1.57
	80	1.35	1.33	1.29	1.24	1.45	1.43	1.39	1.32	1.60	1.57	1.51	1.42	1.76	1.73	1.65	1.54
	100	1.34	1.32	1.29	1.24	1.44	1.42	1.38	1.31	1.58	1.55	1.49	1.40	1.73	1.70	1.62	1.51

Figura3. Tabla 2.1.4.3.1 de la ROM 0.4-95 [6], con la definición del factor de ráfaga F_R .

ráfaga para 3 segundos, aunque la ROM 0.4-95 [6] indica para estructuras cuya dimensión mayor sea menor de 50 m el empleo de un factor de ráfaga para 5 segundos, mientras que si la dimensión mayor supera los 50 m, como sería el caso real analizado, aconseja el empleo de un factor de ráfaga para 15 segundos.

Si desarrollamos la ecuación (36) de una manera similar a como se ha hecho con las normativas descritas con anterioridad, se obtiene la ecuación (42) de la define la fuerza global del viento actuando sobre una estructura según la ROM 0.4-95 [6].

$$Rv = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_b)_{50 \text{ años}} \cdot K_\alpha \right)^2 \cdot (K_T)^2 \cdot (F_A \cdot F_T \cdot F_R)^2 \cdot C_f \cdot A_e \quad (42)$$

Esta ecuación es formalmente muy similar a las de las normativas anteriormente analizadas, con la única dife-

rencia que el coeficiente de exposición queda definido como el producto de los cuadrados del factor de altura, el factor de topografía, y el factor de ráfaga:

$$(F_A \cdot F_T \cdot F_R)^2 \quad (43)$$

2. COMPARACIÓN DE LAS ACCIONES DEL VIENTO EN LAS DIFERENTES NORMAS

2.1. Similitudes entre normativas

Como ya se ha descrito, la fuerza equivalente del viento actuando sobre una estructura se obtiene mediante el producto de la presión de referencia del viento, el coeficiente de riesgo al cuadrado, el coeficiente de exposición, el coeficiente de arrastre, y el área expuesta al viento. En la Tabla 8, se detallan estos factores en las diferentes normativas analizadas.

Tabla 8. Equivalencia de factores entre normativas

	Presión de referencia del viento	Coef. de riesgo al cuadrado	Coeficiente de exposición	Coef. de arrastre	Área expuesta al viento
IAP-98 [1] (ec. 16)	$(1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2)$	(C_r^2)	$C_i^2 \cdot C_z^2 \cdot C_g^2 = \left(k_z^2 \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	C_D	A
UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2] (ec. 15)	$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref,0}^2 \right)$	$(c_{prob}^2)^*$	$c_e(z) = \left(k_z^2 \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	c_f	A_{ref}
CTE-2006 [4] (ec. 23)	$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \right)$	$(c_{prob}^2)^*$	$c_e = \left(k^2 \left[\ln^2 \left(\frac{z}{L} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{L} \right) \right] \right)$	c_p	A
EN 1991-1-4. 2005 [5] (ec. 35)	$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2 \right)$	(c_{prob}^2)	$c_e(z) = \left(k_r^2 \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	c_f	A_{ref}
ROM 0.4-95 [6] (ec. 42)	$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_b)_{50 \text{ años}} \cdot K_\alpha \right)^2$	(K_T^2)	$F_A^2 \cdot F_T^2 \cdot F_R^2$	C_f	A_e

Tabla 9. Equivalencia de variables entre normativas

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}	$c_o(z)$	$c_r(z)$	c_f
ROM 0.4-95 [6]	$v_{b 50años}$	K_T	-	k^*	z	z_0	z_{min}	F_T	F_A	C_f

* definido así por los autores (ecuaciones 10, 22, 40 y 41)

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 9.

El cálculo del coeficiente de riesgo es idéntico, como ya se ha expuesto, en todas las normativas, y su valor depende del periodo de retorno T (ecuaciones 3, 10, 32, tabla 4, y ecuación 39 respectivamente).

2.2. Diferencias entre normativas

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 8, y en algunos de los parámetros de la tabla 9.

2.2.1. Velocidad de referencia (o velocidad básica).

La presión de referencia (o básica) del viento depende de la velocidad de referencia (o velocidad básica) al cuadrado. Cada normativa define la velocidad de referencia en un gráfico en función de la localización geográfica en España.

Así la IAP-98 [1] define en la figura 3 de su apartado 3.2.3.2.1 el mapa con la velocidad de referencia del viento (v_{ref}). Para Barcelona el valor de v_{ref} es de 28 m/s (Fig. 4).

La UNE-ENV 1991-2-4.1995 [2] define en la figura 7.2 del apartado 7.4 el mapa eólico europeo, con valores sólo indicativos, dejando en manos de las autoridades



Figura 4. Figura 3 de IAP-98 [1] con velocidades de referencia del viento v_{ref} .



Figura 5. Fig. 7.2 de la UNE-ENV1991-2-4.1995 [2] con valores indicativos de la velocidad básica del viento $v_{ref,0}$.

nacionales la definición final de la velocidad de referencia. Para Barcelona el valor indicado es de $v_{ref,0}=27$ m/s.(Fig. 5)

El CTE-2006 [4] define en la figura D.1 del anexo D el mapa con el valor básico de la velocidad del viento (v_b). Para Barcelona el valor de v_b es de 29 m/s. (Fig. 6)

En cambio, la última versión del Eurocódigo de acciones de viento, EN 1991-1-4.2005 [5], deja en manos de las autoridades nacionales la definición de la velocidad de referencia, y no indica ningún mapa con datos referentes a la velocidad básica de referencia del viento. Para futuros cálculos con esta normativa emplearemos el mismo valor que en del CTE-2006 [4], $v_{b,0}=29$ m/s.

Análogamente la ROM 0.4-95 [6] define en su figura 3.2.1.4.1 (Fig. 7) el valor de la velocidad básica del viento en el litoral español asociada a un periodo de retorno de 50 años $v_{b|50\text{años}}$, que para Barcelona es de 30 m/s.

2.2.2. 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 9).

Como ya se ha descrito, tanto la IAP-98 [1], como la UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2] definen 4 categorías de terreno, con idénticos parámetros. En la Tabla 10 se resumen estos parámetros.

De una forma similar, el CTE-2006 [4] y la EN-1991-1-4.2005 [5], definen 5 categorías de terreno para el cálculo de los parámetros del coeficiente de exposición. En la Tabla 11 se detallan dichos parámetros.

Como puede comprobarse del análisis de las tablas 10 y 11, las tres últimas categorías de terreno, definidas

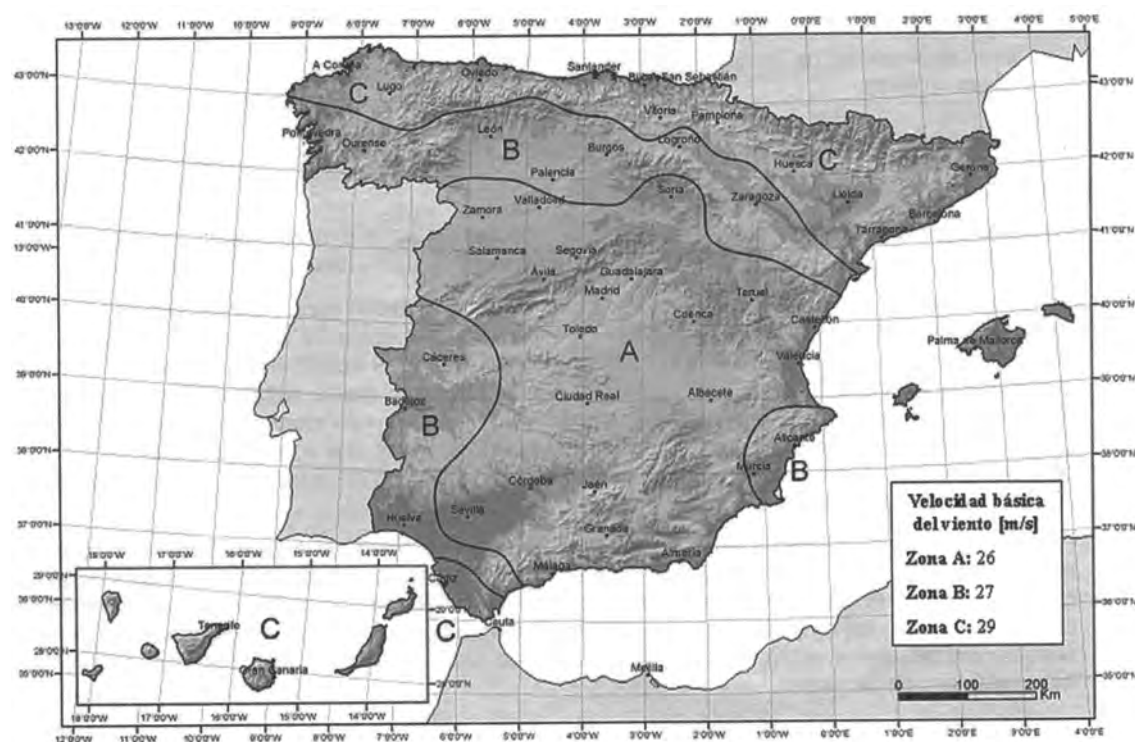


Figura 6. Figura D.1. del CTE-2006 [4] con el valor básico de la velocidad del viento v_b .

Tabla 10. Parámetros para el cálculo del coeficiente de exposición según IAP-98 [1] y UNE-ENV-1991-2-4.1995 [2]

Tipo de entorno	IAP-98 [1]	UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2]	k_z ó k_T	z_0 (m)	z_{min} (m)
Borde del mar	I	I	0,17	0,01	2
Zona rural con obstáculos aislados	II	II	0,19	0,05	4
Zona urbana, industrial o forestal	III	III	0,22	0,30	8
Centro de grandes ciudades	IV	IV	0,24	1,00	16

Tabla 11. Parámetros para el cálculo del coeficiente de exposición según CTE-2006 [4] y EN-1991-1-4.2005 [5]

Tipo de entorno	CTE-2006 [4]	EN 1991-1-4 2005 [5]	k [4]	k_r [5]	L [4] ó z_0 [5] (m)	Z [4] ó z_{min} [5] (m)
Borde del mar	I	0	0,15	0,1560	0,003	1,0
Terreno rural llano	II	I	0,17	0,1697	0,01	1,0
Zona rural con obstáculos aislados	III	II	0,19	0,19	0,05	2,0
Zona urbana, industrial o forestal	IV	III	0,22	0,2153	0,30	5,0
Centro de grandes ciudades	V	IV	0,24	0,2343	1,00	10,0

como “zona rural con obstáculos aislados”, “zona urbana, industrial o forestal”, y “centros de grandes ciudades”, coinciden prácticamente en sus parámetros para el cálculo del coeficiente de exposición, aunque cada normativa defina cada categoría con un número romano diferente.

La principal diferencia entre la IAP-98 [1] y la versión previa del Eurocódigo de acciones de viento UNE-ENV-1991-2-4.1995 [2], con el nuevo Código Técnico de la Edificación CTE-2006 [4], y la nueva versión del Eurocódigo de acciones de viento EN-1991-1-4.2005 [5], es la aparición de una nueva categoría de terreno en estas dos últimas frente a las dos primeras.

Así aparece la categoría de “terreno rural llano” en [4] y [5], que tiene sin embargo los mismos parámetros que la categoría de terreno “borde del mar” en las normativas precedentes [1] y [2].

Con este cambio los parámetros de la categoría de “borde del mar” en el CTE-2006 [4], y en la EN-1991-1-4.2005 [5] son nuevos (Tabla 11).

Como se ha descrito con anterioridad, el parámetro k_r de la actual versión del Eurocódigo EN-1991-1-4.2005 [5], se define mediante la ecuación [30] $k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07}$ (en la tabla 11 están los valores numéricos para cada tipo de entorno), mientras que el CTE-2006 [4] ajusta el valor del coeficiente k (factor del terreno), a la formulación del Eurocódigo de k_r pero redondeando al segundo decimal.

El problema del redondeo del factor del terreno (k) realizado por el CTE-2006 [4] surge en el entorno “Borde del mar”, donde se ha redondeado a la baja en lugar de realizarlo al alza, por lo que frente a un coeficiente $k_r=0,1567$ (EN-1991-1-4.2005 [5]), el CTE-2006 [4] lo ha simplificado erróneamente a $k=0,15$.

Este hecho da lugar a una paradoja, ya que si se plasma en un gráfico el coeficiente de exposición calculado con

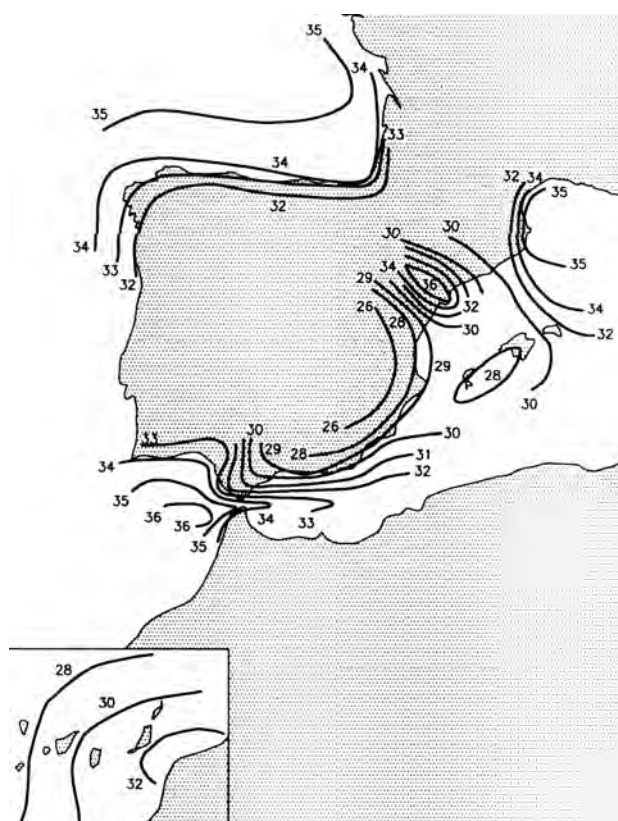


Figura 7. Figura 3.2.1.4.1 de la ROM 0.4-95 [6] con el valor de la velocidad básica del viento para un periodo de retorno de 50 años $V_{b|50años}$.

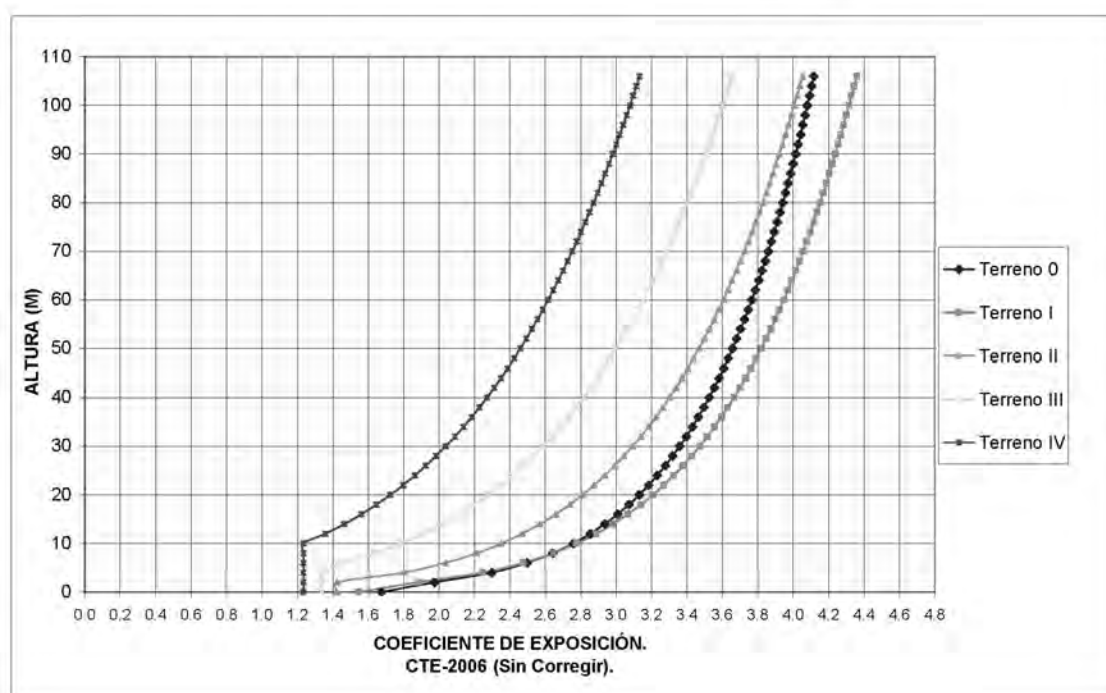


Figura 8. Coeficientes de exposición calculados según el CTE-2006, sin corregir el coeficiente k.

el coeficiente k tal y como lo define el CTE-2006 [4] (tabla 11), se puede observar cómo el tipo de entorno 0 "Borde del mar" que debería ser el más desfavorable, está por debajo del entorno I "Terreno rural llano" (Figura 8).

Ahora bien, si se representa el coeficiente de exposición haciendo que el factor del terreno "k" del CTE-2006 [4] sea idéntico al coeficiente " k_r " del Eurocódigo (EN-1991-1-4-2005 [5]), se puede observar en la Figura 9 cómo el error anterior queda corregido.

Luego, para aplicar correctamente el cálculo del coeficiente de exposición mediante el empleo del Código Técnico de Edificación CTE-2006[4], es necesario corregir el factor del terreno "k" a los valores del coeficiente " k_r " del Eurocódigo EN-1991-1-4-2005 [5]. De esta manera la tabla D.2 del CTE-2006 [4], quedaría como se indica en la Tabla 12.

El cálculo del coeficiente de exposición según la ROM 0.4-95 [6] difiere en su formulación respecto de las normativas anteriormente expuestas, y se define como el

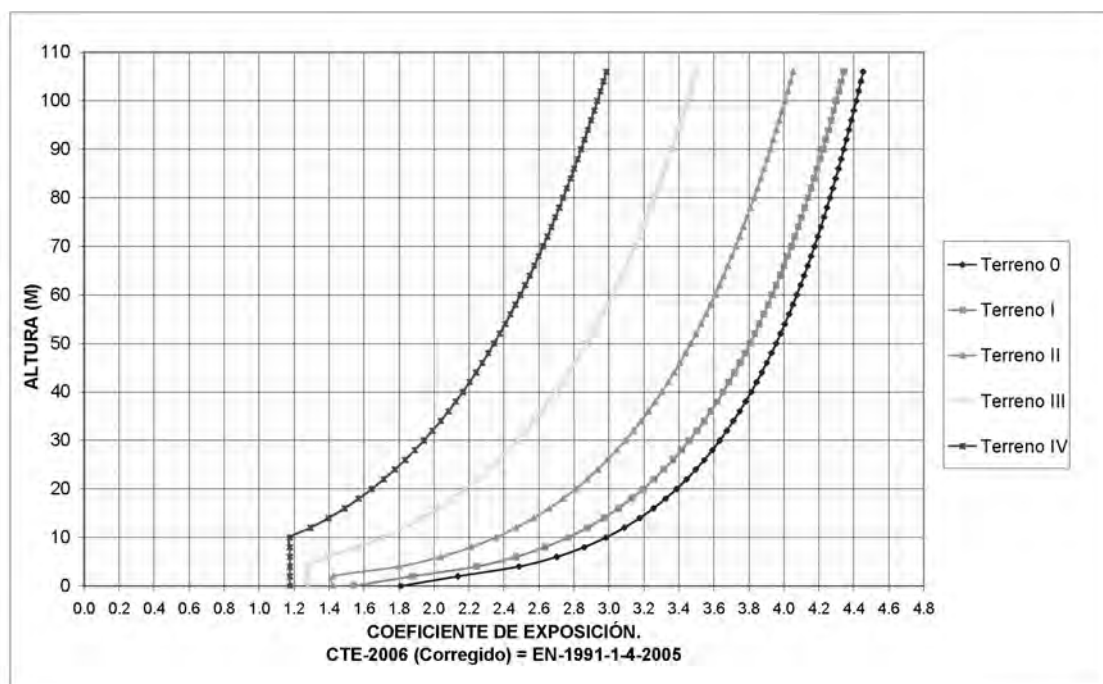


Figura 9. Coeficientes de exposición según el CTE-2006 con el coeficiente k corregido según el coeficiente k_r del Eurocódigo EN-1991-1-4-2005.

Tabla 12. Parámetros para el cálculo del coeficiente de exposición según CTE-2006 [4] con el coeficiente k corregido

Grado de aspereza del entorno	k	L (m)	Z (m)
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	0,1560	0,003	1,0
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,1697	0,01	1,0
III Zona rural accidentada con algunos obstáculos aislados como pequeños árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	0,2153	0,30	5,0
V Centro de negocios de grandes ciudades, con profusión de edificios de altura	0,2343	1,00	10,0

producto de los cuadrados del factor de altura, el factor de topografía, y el factor de ráfaga ($F_A \cdot F_T \cdot F_R$)².

Para el cálculo del factor de altura la ROM 0.4-95 [6] define las mismas categorías del terreno que la IAP-98 [1], y la versión anterior del Eurocódigo (UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2]), aunque con parámetros diferentes de los anteriormente resumidos en la tabla 10.

Los parámetros de la ROM 0.4-95[6] para el cálculo del factor de altura F_A son los siguientes (Tabla 13).

Una vez realizadas todas estas aclaraciones referentes a las similitudes y diferencias a la hora del cálculo del coeficiente de exposición con todas las normativas, se representan sus resultados en la Figura 10 en función de la altura, para el tipo de entorno más desfavorable “Borde del mar” con las 5 normativas indicadas en las tablas 8 y 9.

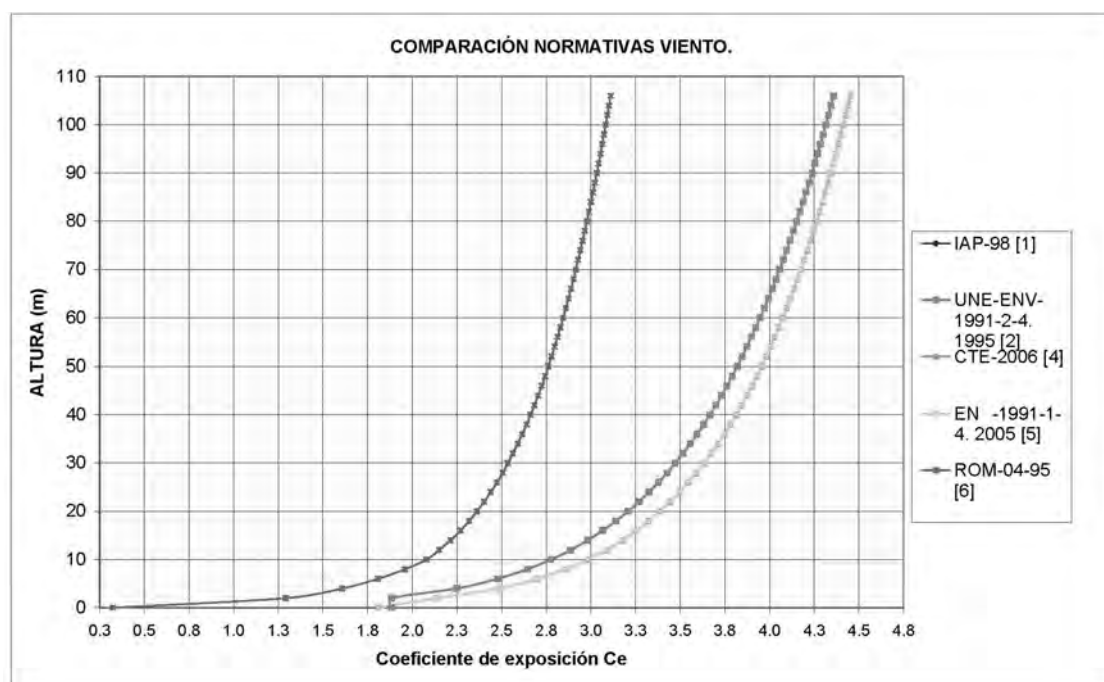
Como puede comprobarse en la figura 10, los resultados del coeficiente de exposición del CTE-2006[4] y de la versión actual del Eurocódigo EN-1991-1-4-2005 [5],

Tabla 13. Parámetros deducidos del gráfico 2.1.4.1.2 con la definición del factor de altura F_A

Tipo de entorno	K	z_o (m)	z_{min} (m)
I Borde del mar	0,132	0,005	0,0
II Zona rural con obstáculos aislados	0,16	0,05	4,00
III Zona urbana, industrial o forestal	0,19	0,30	9,00
IV Centro de grandes ciudades	0,21	1,00	15,00

una vez que se ha corregido el coeficiente k del CTE como ya se ha descrito anteriormente, son idénticos y producen los resultados más desfavorables.

El cálculo mediante la IAP-98 [1], y la versión anterior del Eurocódigo (UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2]), produce así mismo los mismos resultados aunque de valor lige-

**Figura 10.** Coeficiente de exposición para el borde del mar según las diferentes normas.

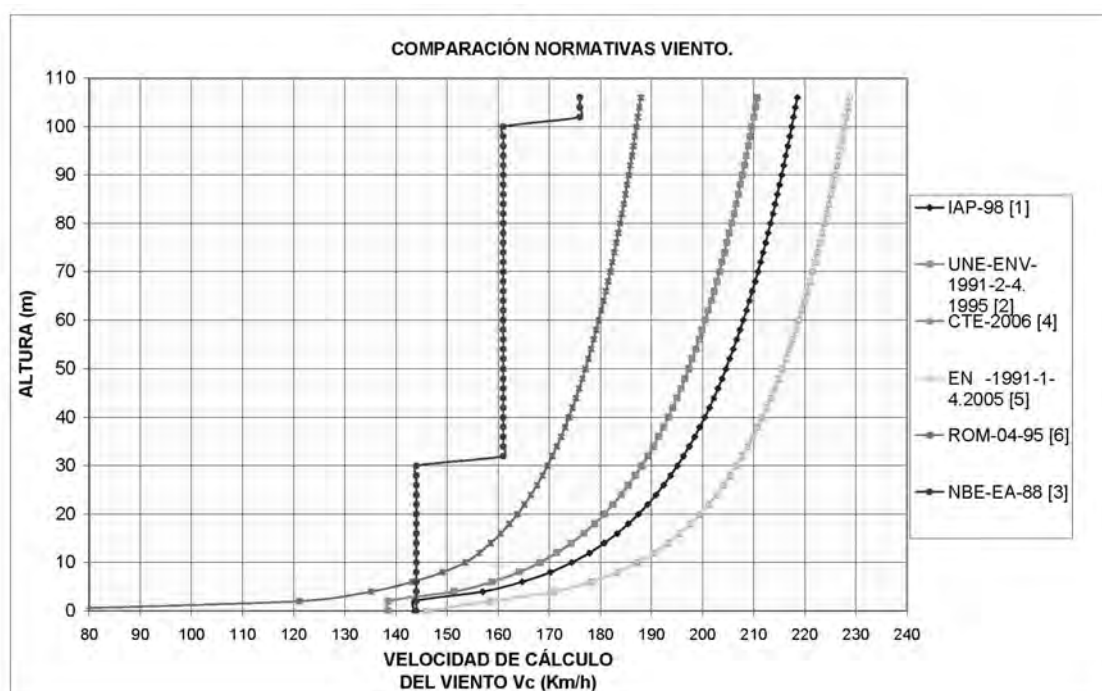


Figura 11. Velocidad de cálculo del viento V_c para el borde del mar (Barcelona) según las diferentes normas.

ramente inferiores a los de las dos normas anteriores. Este hecho sucede solamente para la categoría de terreno “Borde del mar”, como ya se ha descrito, mientras que para las categorías del terreno definidas como “zona rural con obstáculos aislados”, “zona urbana, industrial o forestal”, y “centros de grandes ciudades”, las cuatro normas ([1], [2], [4], y [5]) obtienen 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 muy por debajo de estas cuatro normas, como se puede comprobar en la figura 10.

2.2.3. 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.

$$V_c = V_{ref} \cdot c_{prob} \cdot \sqrt{c_e} \quad (44)$$

Así para el Hotel Vela en la bocana del puerto de Barcelona, tendremos la figura 11 donde se 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.

En la figura 11 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-AE-88 [3].

Se puede apreciar cómo los valores de la velocidad de cálculo del CTE-2006[4] y de la versión actual del Eurocódigo EN-1991-1-4-2005 [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 anterior del Eurocódigo (UNE-ENV 1991-2-4, 1995 [2]), y la ROM 0.4-95 [6].

En la Figura 11 se aprecia cómo la antigua normativa de acciones en la edificación NBE-AE-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-AE-88 [3], mientras que en el nuevo CTE-2006 [4], este valor llegaría a 227,8 km/h.

2.2.4. 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 (producto de los tres primeros factores indicados en la tabla 8), o lo que es lo mismo, la presión producida por la velocidad de cálculo del viento:

$$(1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2) \cdot c_{prob}^2 \cdot c_e = (1/2 \cdot \rho \cdot V_c^2) \quad (45)$$

La Figura 12 detalla los resultados de la presión dinámica del viento en función de la altura en la zona de estudio, Barcelona, frente al mar.

Las diferencias que ocurrirían con la velocidad de cálculo en el gráfico 4, aumentan con la presión dinámica de

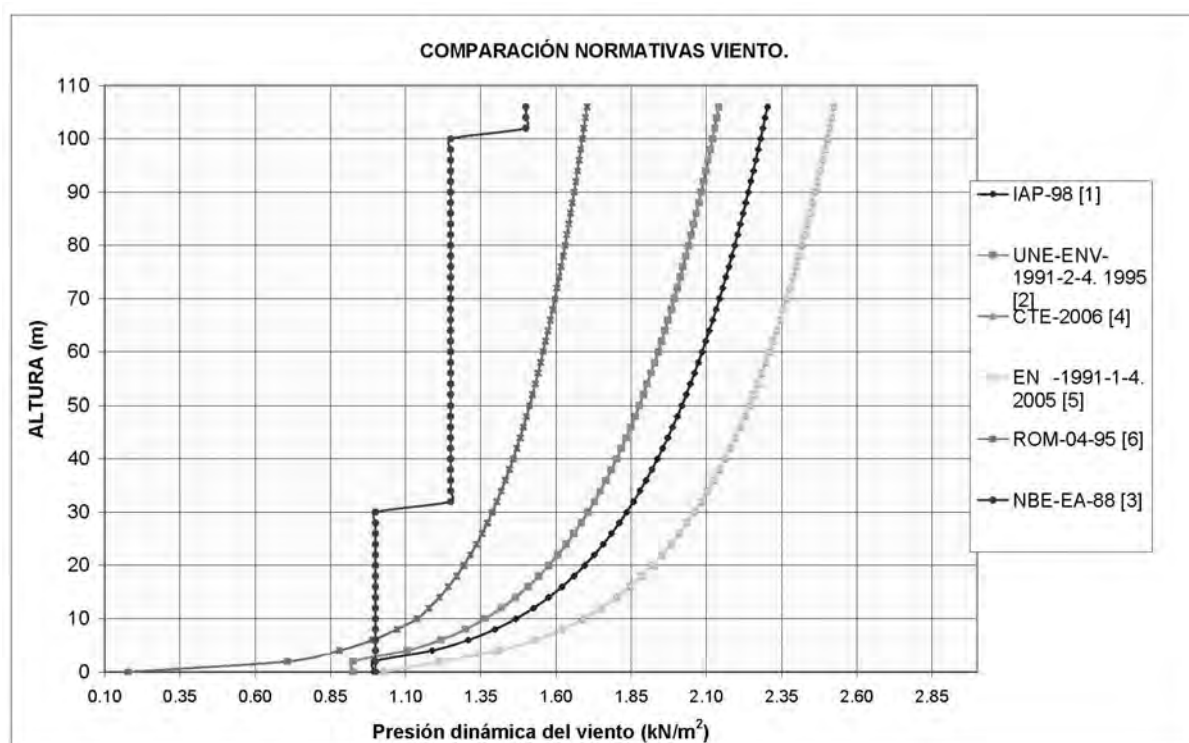


Figura 12. Presión dinámica del viento para el borde del mar (Barcelona) según las normativas.

la figura 12 al depender del cuadrado de la velocidad de cálculo.

En la Tabla 14, se comparan los resultados de la figura 12 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.

Como puede comprobarse de los resultados obtenidos en la figura 12 y la tabla 14, las fuerzas del viento calculadas con la antigua normativa de acciones en la edificación NBE-AE-88 [3], lleva a resultados muy del lado de la inseguridad tal y como ya se anticipó al resumir las acciones del viento, 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].

Así mismo puede comprobarse cómo los resultados obtenidos mediante la ROM 0.4-95 [6] siguen lejos de los indicados por el nuevo CTE-2006 [4], en el entorno del 67 %.

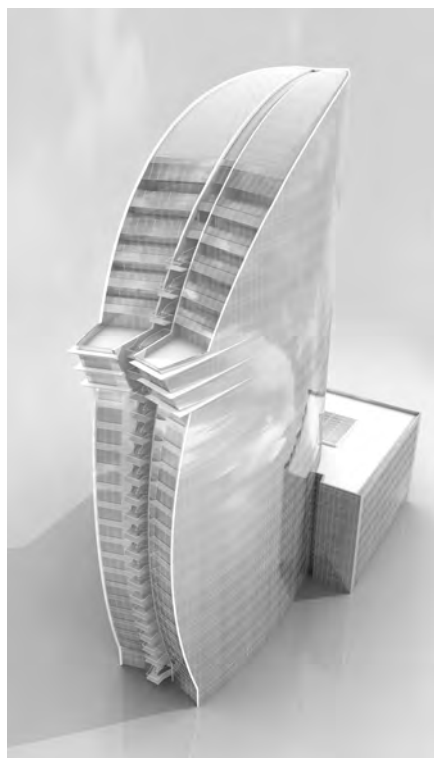
3. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FUERZA O DE ARRASTRE DEL HOTEL VELA DE BARCELONA

La fuerza equivalente del viento sobre una estructura se obtiene, como ya se ha descrito, mediante el producto de la presión dinámica del viento, definida en el apartado anterior, por el coeficiente de fuerza o de arrastre del elemento de estudio, y por el área expuesta al viento.

El coeficiente de fuerza o de arrastre de un edificio con una geometría singular como es el Hotel Vela de Barcelona, es el factor más complicado de calcular.

Tabla 14. 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-AE-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 %



Figuras 13a y 13b. Fotomontaje, y vista del Hotel Vela en construcción.

3.1. Descripción geométrica del Hotel Vela

El Hotel Vela se compone de tres edificios con geometrías claramente definidas. Un edificio bajo, el Podium, con sólo dos niveles, donde se ubican las zonas comunes con los salones, los 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 del Hotel.

La Torre es un edificio con forma de vela, de ahí el nombre del hotel, tiene 26 plantas y una altura máxima

de 100 m. sobre la cota de rasante, y el Atrio es un edificio de 7 plantas con forma de paralelepípedo adosado a la parte trasera de la Torre (Figs. 13a, y 13b).

Los edificios del Atrio y la Torre se destinan desde la P-1 hacia arriba a alojar las habitaciones del Hotel, situado frente al mar en la bocana del puerto de Barcelona.

Las plantas del edificio principal, la Torre, tienen forma de ojo, con sus dos extremos truncados por cortes oblicuos (Fig. 14). En altura, las plantas aumentan ligeramente

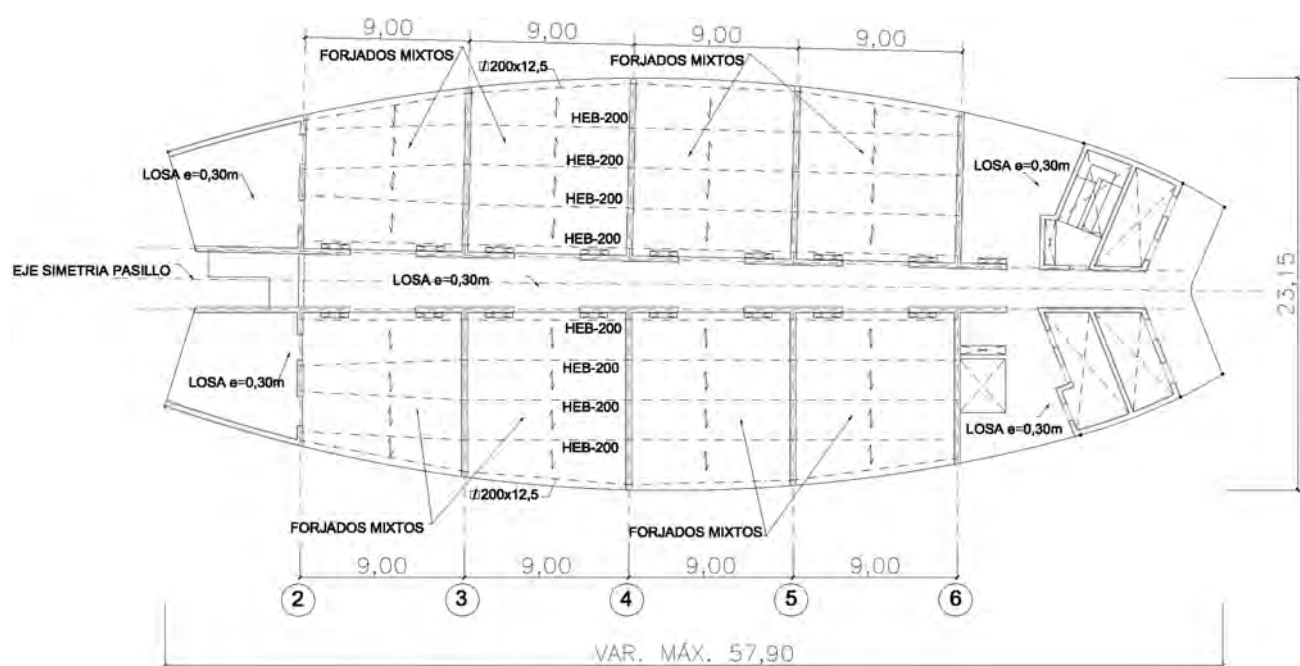


Figura 14. Planta tipo de la Torre del Hotel Vela.

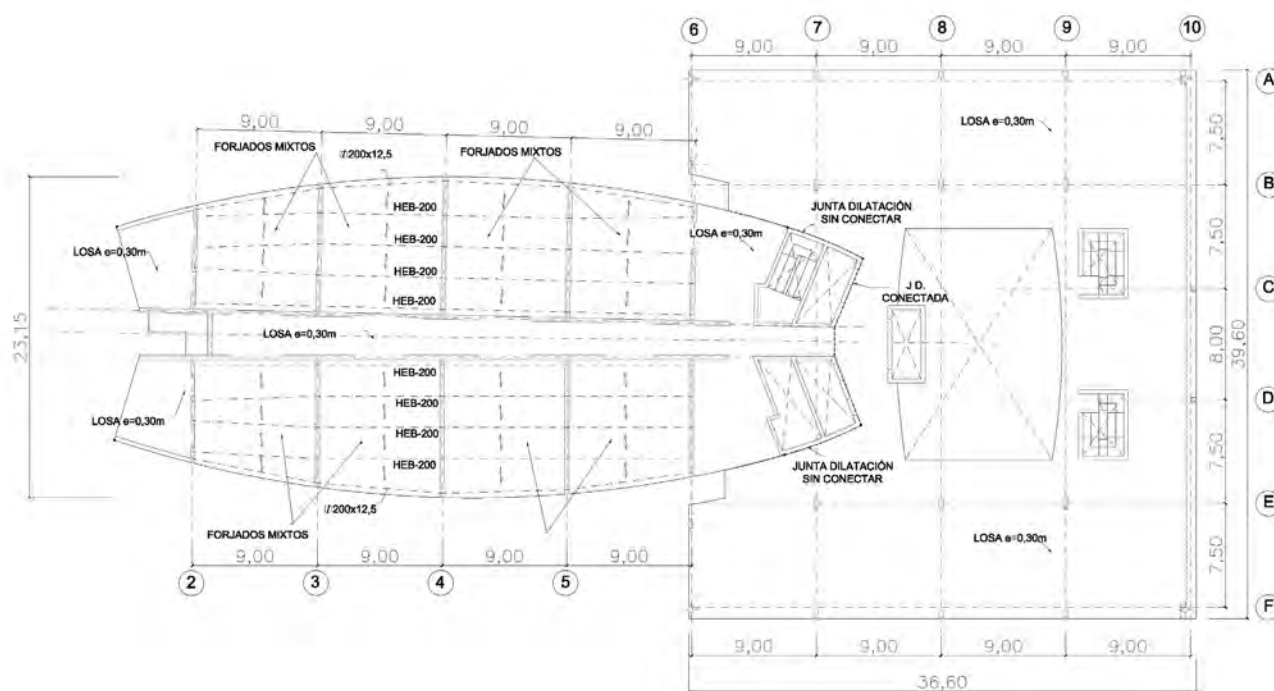


Figura 15. Planta tipo entre P-1 y P-7 con los edificios Torre y Atrio del Hotel Vela.

mente 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 las figuras 13 a y 13 b. 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 (Figs. 13 a y 13 b).

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 14 se aprecia una planta tipo de la Torre, y en la Figura 15 se detalla una planta tipo con los edificios de la Torre y el Atrio.

El viento incidiendo transversalmente a la Torre, haciendo flectar a la Vela en la dirección del menor brazo (aprox. 23,15 m), se convierte a priori en la hipótesis crítica en el análisis de las acciones de viento.

La estructura vertical resistente frente a cargas gravitatorias de la Torre y las acciones del viento, la componen una serie de pantallas 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 supe-

rior (Fig. 14). 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. 15).

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, es necesario realizarla mediante pilotes. La cimentación se ha proyectado mediante el empleo de 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. (Fig. 16)

Esta cimentación obliga a optimizar las acciones del viento para no encarecer en exceso el edificio, por lo que el análisis de los coeficientes de arrastre se convierte en una cuestión fundamental.

3.2. Análisis del coeficiente de arrastre del Hotel Vela mediante el empleo de las normativas

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

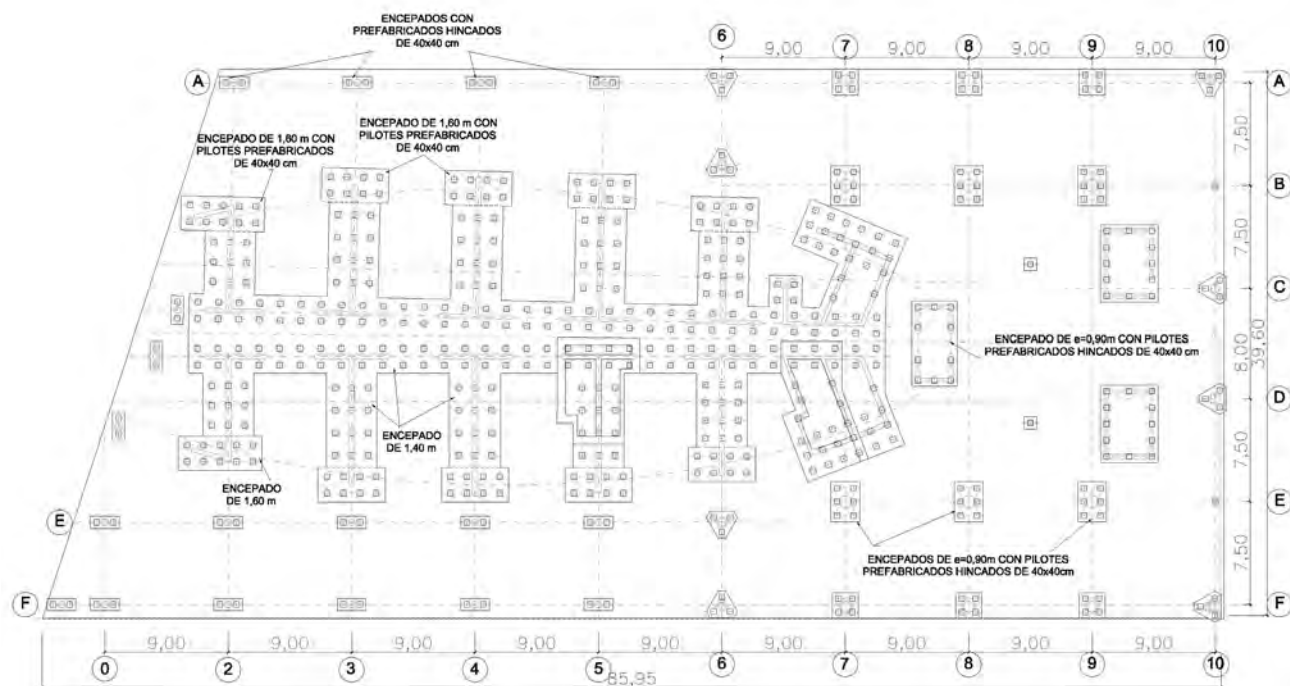


Figura 16. Planta de la cimentación de los edificios Torre y Atrio con pilotes prefabricados hincados.

Tabla 15. sumen de resultados de los coeficientes de arrastre para secciones rectangulares y altura infinita, o la altura real de aproximadamente 100 m

Normativa	Coefficiente de arrastre	B/D = 2,50, y esbeltez infinita ($\lambda = \infty$)	B/D = 2,50, y esbeltez real ($\lambda = 1,72$)
IAP-98 [1]	C_d	2,20	—
UNE-ENV 1991-2-4. 1995 [2] = EN 1991-1-4. 2005 [5]	C_f	2,225	1,40
ROM 0.4-95 [6]	C_f	2,25	1,61
CECM N° 52 [7]	C_f	2,0	1,23

sencillas tipificadas. La dificultad aparece si se trata de un edificio con formas singulares no contempladas directamente por las normativas, como es el caso del Hotel Vela. 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, 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.

Como una primera aproximación se asimió la Torre del Hotel Vela a un edificio con forma de prisma de base

Tabla 16. Coeficientes de arrastre para prismas de sección elíptica en función de la esbeltez

Normativa	Esbeltez $\lambda = \infty$	Esbeltez Finita
ROM 0.4-95 [6]	$C_f = 1,50$	$C_f (\lambda = 1,72) = 0,87$
CECM N°52 [7]	$C_f = 1,50$	$C_f (\lambda < 10) = 1,00$

rectangular de 57,90 m de largo (B) y 23,15 m de ancho (D) (Fig. 17), considerando una esbeltez infinita o la esbeltez real del edificio (definida como la altura entre el frente opuesto al viento, $\lambda = H/B$), según las diferentes normativas. En la tabla 15 se detallan los resultados para estos casos.

En una segunda aproximación se asimió la geometría de la Torre a un prisma de base elíptica, con el eje mayor igual al doble del eje menor (Fig. 17) con el viento soplando en la dirección del eje menor, analizando también el caso de altura infinita o la altura real del edificio. En la Tabla 16 se detallan los resultados de esta

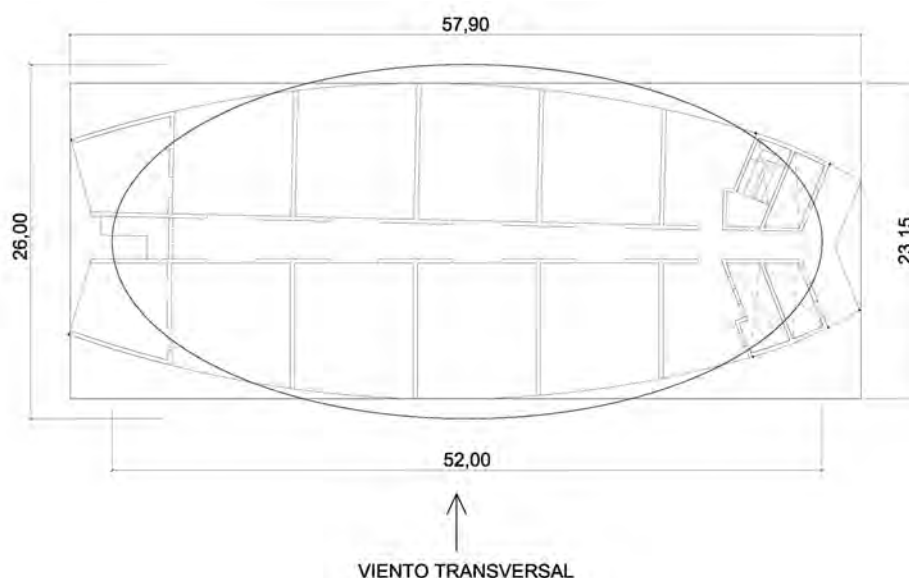


Figura 17. Simplificación de una planta a una sección rectangular y a una elíptica.

aproximación, que como es lógico son menores que los tipificados para el caso de sección rectangular.

Como puede comprobarse, hay una diferencia sensible en el coeficiente de arrastre al considerar altura finita y tener en cuenta la esbeltez real del edificio, tanto en el caso de sección rectangular (reducción del coeficiente de arrastre a un 63,0% del de altura infinita según el Eurocódigo (EN 1991-1-4. 2005 [5]), a un 71,55% según la ROM 0.4-95 [6], o a un 61,50% según el CECM N°52 [7]), como en el caso de sección de planta elíptica (reducción del coeficiente de arrastre a un 58,0% del de altura infinita según la ROM 0.4-95 [6], o a un 66,66% según el CECM N°52 [7]).

Si a los resultados tan dispares de las simplificaciones realizadas, se añade que el Hotel es un edificio con sección en planta variable con la altura, debido a la forma de la Vela, se puede concluir que existirá todavía una mayor incertidumbre en los coeficientes de arrastre reales del edificio, y salvo que se considere el caso a priori más desfavorable de un coeficiente de arrastre del orden de 2,25 para el viento transversal a la Vela, se podría estar del lado de la inseguridad en el cálculo de las acciones del viento poniendo en riesgo la estructura y las fachadas.

Dado que las acciones de viento son fundamentales para el dimensionamiento de la estructura, las cimentaciones pilotadas y la fachada de un edificio como el



Figuras 18, 19, y 20. Vista frontal, lateral y trasera de la maqueta realizada del Hotel Vela para el ensayo del túnel de viento (1).

(1) Figuras 18 a 20 cortesía de S. Pindado y J. Meseguer del Laboratorio de aerodinámica IDR/UPM, ETSI Aeronáuticos de Madrid.



Figuras 21 y 22. Vista interior del cableado para la toma de datos, y vista de la maqueta en el interior del túnel de viento de la E.T.S.I. Aeronáuticos de Madrid (2).

Hotel Vela, es necesario realizar el cálculo de los coeficientes de arrastre reales mediante otros procedimientos más precisos.

3.3. Obtención del coeficiente de arrastre del Hotel Vela de manera experimental mediante un ensayo en túnel de viento.

En el caso de edificios singulares bien por su altura, bien por su geometría en planta, o por ambos factores, como es nuestro caso, puede ser necesario realizar el cálculo de los coeficientes de arrastre mediante otros procedimientos como su obtención de manera

experimental mediante la realización de un ensayo en túnel de viento a escala reducida.

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 [8] es la obtención de la distribución de presiones en las fachadas del edificio,

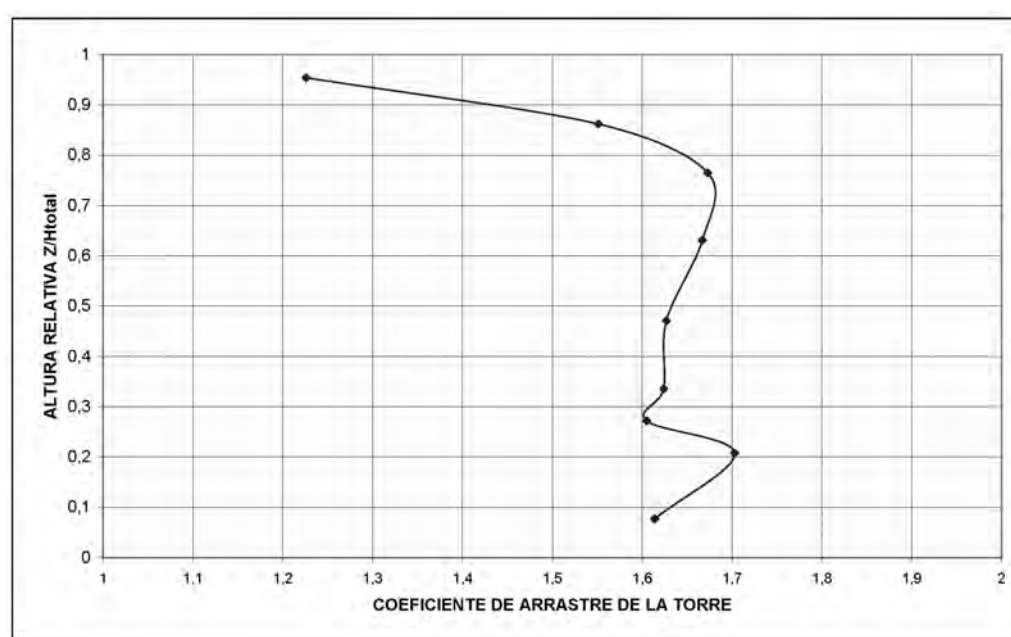


Figura 23. Coeficiente de arrastre de la Torre con viento transversal a la Vela.

(2) Figuras 21 y 22 cortesía de S. Pindado y J. Meseguer del Laboratorio de aerodinámica IDR/UPM, ETSI Aeronáuticos de Madrid.

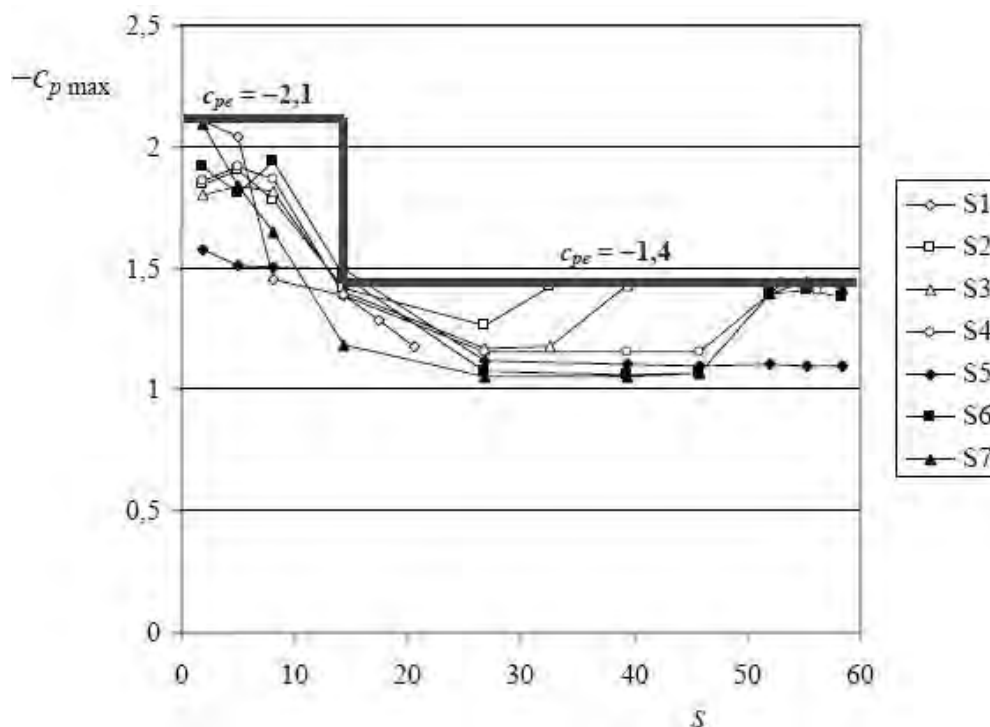


Figura 24. Succiones máximas en fachada en función de la sección instrumentada.

así como la obtención de las cargas globales del viento, deduciendo los coeficientes de arrastre del edificio. Para ello la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos de Madrid realizó un modelo a escala 1/125 de los edificios de la Torre y el Atrio del Hotel Vela (Figs. 18, 19, y 20).

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 (Fig. 18, 19, 20, y 21).

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. 22).

En la Figura 23 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. En el gráfico se detallan los coeficientes de arrastre obtenidos en la Torre (sin considerar el Atrio por falta de sensores) en las nueve alineaciones en las que se colocaron sensores de presión en la maqueta (Fig. 19).

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 1,60 y 1,70.

Además de la obtención de los coeficientes de arrastre para el cálculo global de las fuerzas actuando sobre el edificio, es necesario conocer los coeficientes de presión máximos para el dimensionamiento de los cerramientos de la fachada.

Los resultados de los coeficientes de presión externos (c_{pe}) en la Torre, obtenidos en el ensayo en túnel aerodinámico variando 360 ° la dirección del viento se definen en las figuras 24 y 25. La presión máxima negativa (succión) se representa en la figura 24 para 7 de las secciones instrumentadas definidas en la Figura 25.

La carga aerodinámica (ec. 46) que hay que emplear en el cálculo de las fachadas se define como el producto entre la presión dinámica del viento (ec. 45), el área del elemento expuesta, y por la suma algebraica de las pre-

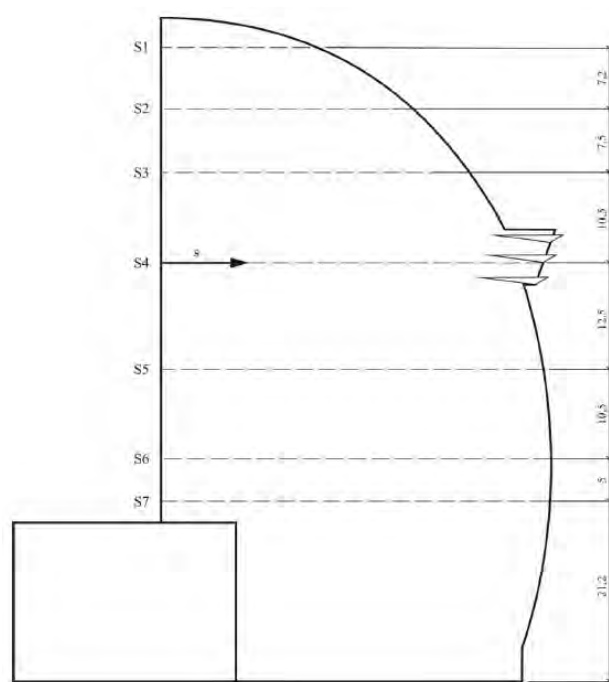


Figura 25. Secciones instrumentadas.



Figura 26. Ejemplo de modelo de ordenador del flujo de aire en torno a un paracaídas. Interacción Fluido-Estructura.

siones exteriores (c_{pe} , obtenida del ensayo en túnel aerodinámico) más las presión atmosférica local en el interior del edificio (c_{pi}). El Eurocódigo 1 [5] acota el valor de c_{pi} entre +0,80, y -0,50, en función del porcentaje de aperturas de la fachada, y de su orientación a la dirección del viento, aunque siempre es aconsejable emplear el valor de +0,80 que es conservador para el caso de máximas succiones.

$$F = (1 / 2 \cdot \rho \cdot V_c^2) \cdot (c_{pe} - c_{pi}) \cdot A \quad (46)$$

Con esto se obtendrán presiones características sobre las fachadas de entre 2,90 y 2,20 veces la presión dinámica del viento, lo que supone en Barcelona frente al mar una presión característica máxima de aproximadamente $2,5 \text{ KN/m}^2 \cdot 2,90 = 7,25 \text{ KN/m}^2$ para el dimensionamiento de la fachada a la altura máxima en la peor situación del edificio.

Como puede comprobarse, estos valores son importantes y para un edificio singular como el Hotel Vela sin un análisis detallado mediante túnel aerodinámico la estimación a priori de las succiones máximas probablemente hubiese producido el infradimensionamiento de las fachadas con los problemas que ello podría ocasionar durante la vida útil del edificio.

4. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ARRASTRE DEL HOTEL VELA MEDIANTE EL EMPLEO DE UN SOFTWARE BASADO EN PARTÍCULAS PARA LA SIMULACIÓN DE FLUIDOS

4.1. Breve descripción del software Xflow basado en partículas para la modelización de fluidos por ordenador

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.

El software puede emplearse para analizar la respuesta de sistemas de sólidos rígidos interactuando entre sí en determinado entorno geométrico y bajo un campo de fuerzas impuesto, siendo capaz de resolver el comportamiento de estructuras deformables, pudiendo estas experimentar grandes deformaciones e interactuar bajo sollicitaciones externas.

Por otra parte, la herramienta es capaz de analizar el comportamiento de medios fluidos, tanto en presencia de fronteras rígidas como en presencia de estructuras deformables. Cuando en un determinado problema, tanto el medio sólido como el medio fluido interactúan entre sí, el sistema es capaz de modelar la respuesta física y la interacción entre ambos medios de forma totalmente acoplada.

A modo de ejemplo, la figura 26 muestra el flujo de aire en torno a un paracaídas, en el que la tela es modelada con elementos de tipo membrana, y las cuerdas son modeladas con elementos barra. El cálculo del despliegue del paracaídas es realizado simultáneamente al cálculo del flujo de aire. El fluido es afectado por el movimiento del sólido deformable, y el sólido deformable responde a las acciones del fluido de forma simultánea.

De esta forma, Xflow es una herramienta que posibilita el estudio de la mecánica de los sólidos y los fluidos, con la posibilidad de simular el flujo de gases y líquidos, el transporte y el flujo de masa y energía, el modelado de cuerpos móviles, sistemas multi-fase, problemas acústicos y el análisis de la interacción entre fluido y estructura a través del modelado computacional.

Mediante el empleo de Xflow, se puede básicamente construir un 'prototipo virtual' de un determinado entorno, sistema o dispositivo a analizar, y simular comportamientos físicos del mundo real.

Esta tecnología es una herramienta poderosa, especialmente en la fase de diseño, donde el análisis preliminar puede ahorrar mucho tiempo y costes.

La diferencia radical entre Xflow y otras tecnologías para el análisis de fluidos, radica en su revolucionario sistema de partículas que evita el costoso procedimiento de mallado. Por otra parte, mientras las herramientas tradicionales para el cálculo de fluidos se centran en dar respuesta a los valores medios o a problemas estacionarios, Xflow está especialmente diseñado para resolver problemas dinámicos.

Hay pocas herramientas disponibles capaces de tratar con fronteras móviles y la mayoría requieren interpolación y remallado de forma continua, incrementando el coste computacional e introduciendo nuevas fuentes de error en la solución. La mayor parte de las tecnologías disponibles para el modelado computacional de fluidos se basan en la tradicional malla, y por tanto, presentan dificultades a la hora de modelar problemas con fronteras móviles o con presencia de geometrías complicadas. Construir esta malla de forma precisa es fundamental para obtener una solución correcta, y la malla computacional pasa de ser un ingrediente auxiliar a ser un elemento clave en el proceso de modelado, de cuya calidad dependerá directamente la calidad de la solución. Como nota final, destacaremos que la creación de esta malla suele llevarse el 80% del tiempo de ingeniería necesario para hacer un análisis CFD (Computacional de Fluidos Dinámicos).

La tecnología para el modelado de fluidos basada en partículas de Xflow ofrece numerosas posibilidades a la hora de resolver problemas previamente irresolubles con códigos comercialmente disponibles, permitiendo el análisis de sistemas dinámicos, o con presencia de fronteras móviles y el análisis de la interacción fluido-estructura.

En cuanto al modelado de la turbulencia, la mayoría de las herramientas actualmente disponibles aboga por una solución de tipo RANS ("Reynolds Averaged Navier-Stokes") en el que todas las fluctuaciones en el campo son modeladas. Esta aproximación presenta diversos inconvenientes, ya que la turbulencia a escala global depende en gran medida de las fronteras y de sus condiciones, siendo su comportamiento muy específico. De este modo, los modelos RANS suelen depender de numerosas constantes que deben ser ajustadas de forma empírica, factor que complica sustancialmente el análisis. En las herramientas tradicionales, esta elección se debe fundamentalmente al 'ahorro' computacional que supone el calcular directamente valores medios, filtrando toda posible dependencia de la solución con el tiempo.

Por otra parte, la solución adoptada en Xflow pasa por un modelado de la turbulencia de tipo LES ("Large Eddy Simulation"), en el que sólo se introduce un modelo para las fluctuaciones debidas a las estructuras que quedan por debajo de la resolución de partícula.

Este tipo de aproximación es algo más costoso, pero al modelar exclusivamente el fenómeno de forma local, el modelo se vuelve prácticamente universal, eliminando de esta forma la necesidad de acudir a ajustes de carácter empírico.

De este modo, la tecnología de partículas disponible en Xflow requiere exclusivamente de los parámetros físicos que caracterizan el problema en el mundo real, y no introduce ningún tipo de parámetro adicional de calibración.

4.2. Resultados del cálculo de los coeficientes de arrastre del Hotel Vela mediante modelos de partículas

Se han realizado dos simulaciones diferentes, en la primera simulación por ordenador del Hotel Vela se ha reproducido unas condiciones similares a las del ensayo en túnel aerodinámico realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de Madrid, 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 (Fig. 27).

La figura 27 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. En la imagen podemos observar pequeños remolinos en la estela. La cara expuesta del edificio muestra un perfil de presiones constante, mientras la cara posterior sufre fluctuaciones temporales.

La figura 28 muestra la formación de la estela en los instantes iniciales y el campo de presiones sobre el edificio.

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 la figura 29a en función de la altura del edificio. En la figu-

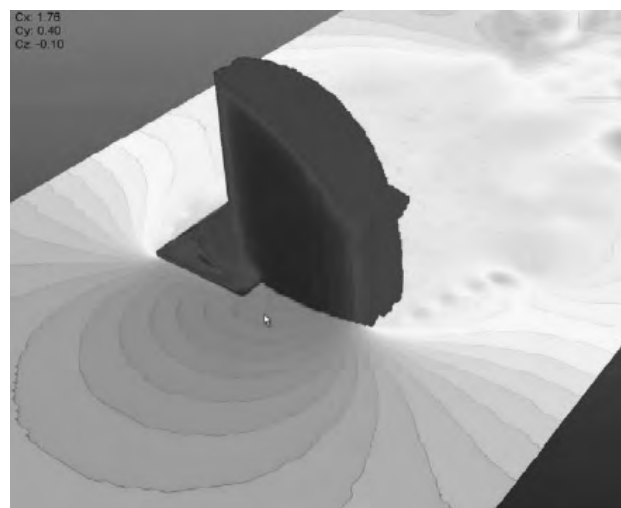


Figura 27. Campo de presiones en el primer análisis.

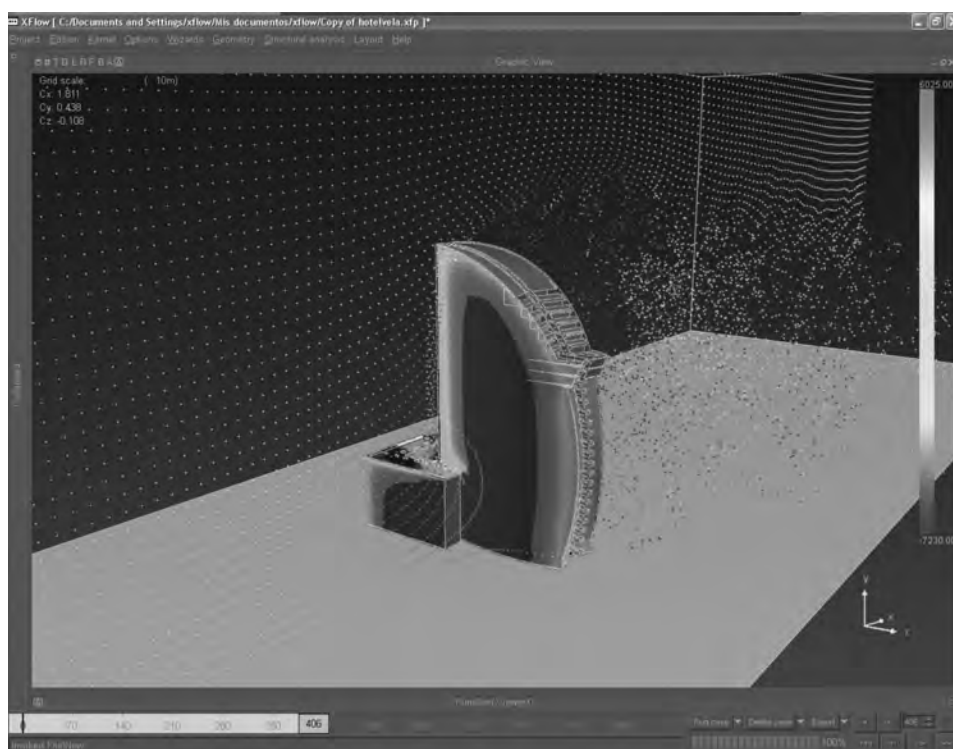
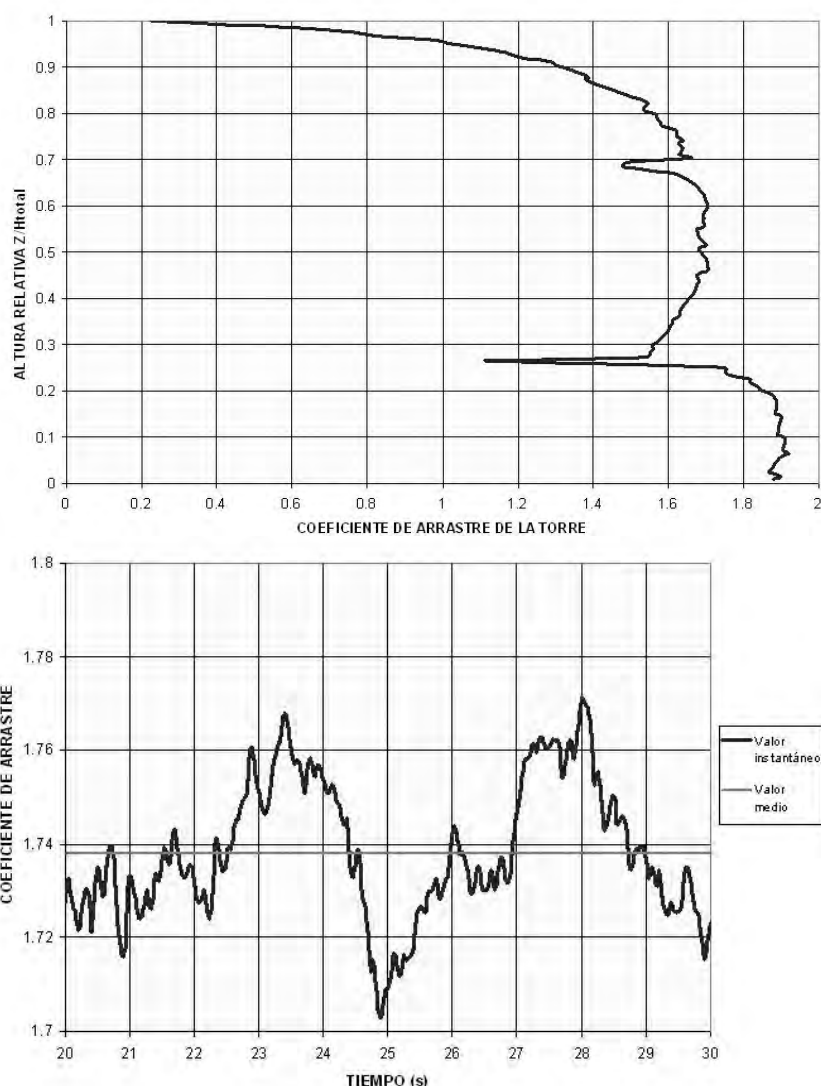


Figura 28. Campo de presiones sobre el edificio.

ra 29b 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.

Como se puede apreciar en la figura 29a, 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 medidos experimentalmente en el ensayo reducido del túnel aerodinámico (Fig. 23), 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. En la figura 19 se aprecia además cómo no se dispuso ningún captador en las caras laterales del Atrio, por lo cual el coeficiente de arrastre de la parte inferior del edificio, obtenido en el ensayo de túnel de viento no puede tener la misma precisión que el modelo computacional.

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.



Figuras 29a y 29b. 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.

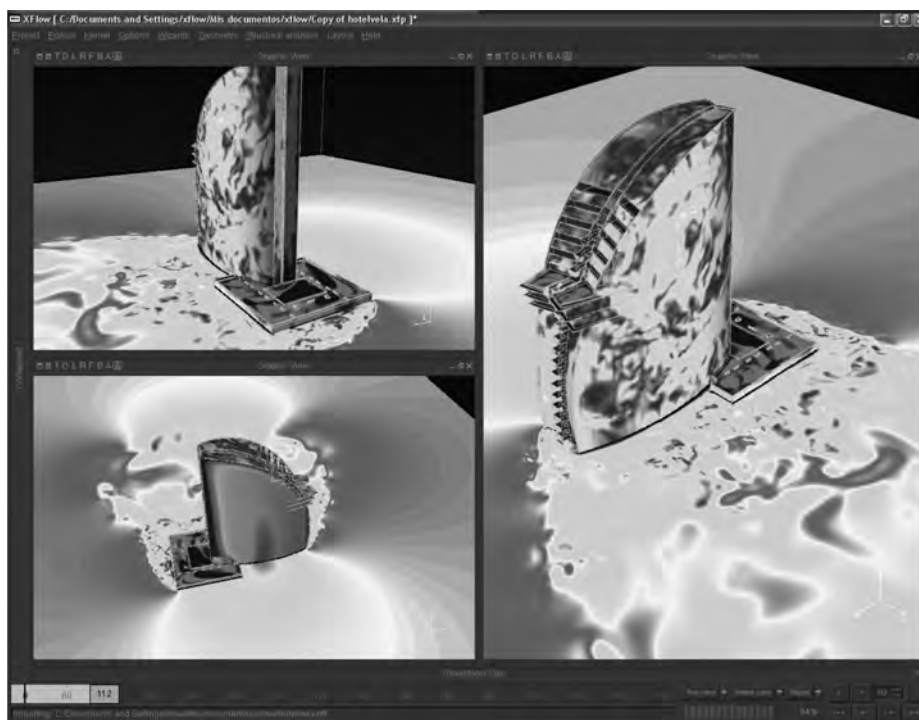
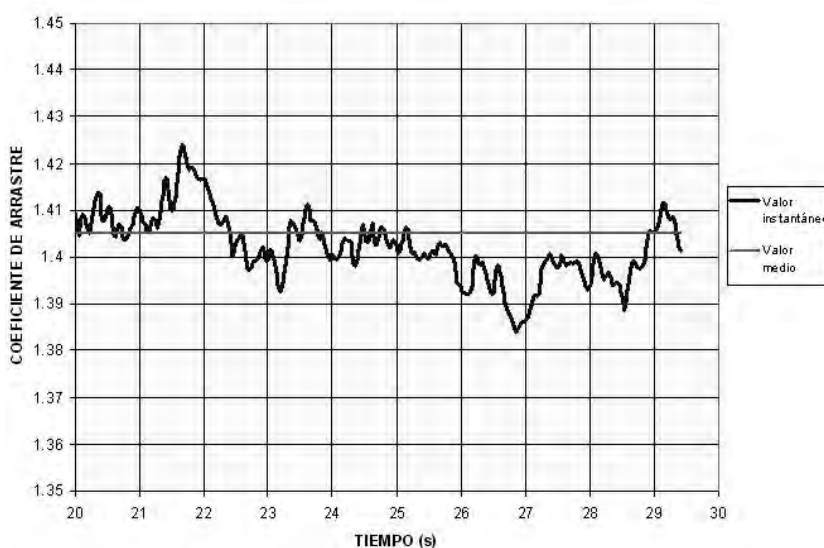
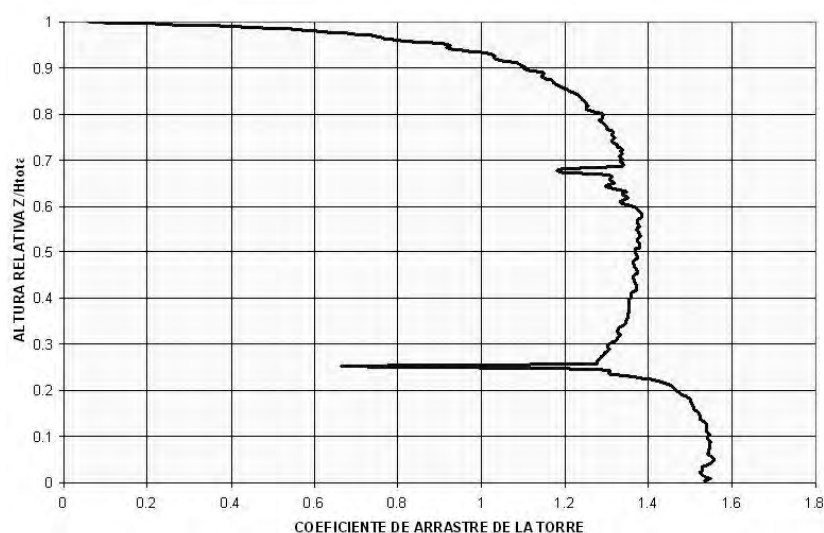


Figura 30. Campo de velocidades en el fluido y proyección sobre el edificio.



Figuras 31a y 31b. 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.

En este nuevo análisis por ordenador se modelizó el viento con el perfil logarítmico definido según el CTE-2006 [4] descrito anteriormente. Como podemos comprobar en la figura 30, los campos (tanto de velocidades como de presiones) se ven menos afectados por la presencia de las paredes del modelo.

Las figuras 31a y 31b 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.

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.

4.3. Ventajas de los modelos de partículas frente al resto de procedimientos para el análisis de las acciones del viento

Como ya se ha descrito, la obtención del coeficiente de arrastre de un edi-

ficio se convierte en el parámetro fundamental a la hora de aplicar las acciones de viento para el cálculo de la estructura.

La aplicación directa de las normativas con los coeficientes de arrastre tabulados, puede resultar válido para edificios normales con geometrías sencillas, pero en muchas ocasiones es necesario recurrir a otros procedimientos más precisos como el ensayo en túnel aerodinámico, o el análisis mediante modelos de ordenador.

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

$\left(Re = \frac{\rho V_{\infty} \cdot L}{\mu} \right)$ y el número de Mach $\left(M_{\infty} = \frac{V_{\infty}}{a_{\infty}} \right)$ que esta-

mos 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 del modelo y las condiciones de entrada del flujo. Si por ejemplo estamos interesados en estudiar el flujo de aire en torno a un edificio, podemos fácilmente introducir también la geometría del terreno y los edificios colindantes o imponer un perfil de viento determinado. Esto es obviamente más complicado en un túnel de viento.

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. Ver referencia [9].

En los dos ensayos 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. (Figs. 23, 29a y 31a).

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 manera 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.

5. CONCLUSIONES

El nuevo Código Técnico de la Edificación [4] 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-AE-88 [3]).

Para el estudio realizado del Hotel Vela de Barcelona, los esfuerzos de flexión y cortantes en la base del edificio serían de casi el doble empleando el nuevo CTE [4], o el Eurocódigo [5], frente a la versión previa de la NBE-AE-88 [3].

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 seguridad. 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.

6. PRINCIPALES PARTICIPANTES EN EL PROYECTO DEL HOTEL VELA DE BARCELONA

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

Promotor y Constructor: UTE VELA-BCN: FCC Construcción S.A.- OHL- COMSA- SACRESA

Proyecto de la Estructura y Apoyo Técnico a la Dirección de Obra: IDEAM S.A.

Ensayo en túnel de viento: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de Madrid.

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

7. REFERENCIAS

[1] Ministerio de Fomento. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. IAP-98. 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] Ministerio de Vivienda. *Código Técnico de la Edificación (CTE) Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación. Libro 2*. 2006.
- [5] EN 1991-1-4 *Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General Actions- Wind actions*. April 2005.
- [6] Puertos del Estado. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. *Recomendaciones para Obras Marítimas. Acciones Climáticas II: Viento. ROM 0.4-95*. 1995.
- [7] European Convention for Constructional Steelwork. *Recommandations pour le calcul des effets du vent sur les constructions*. CECM, N° 52, 1987.
- [8] 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. Febrero de 2007.
- [9] Meseguer, J; Sanz, A; Perales, JM; Pindado, S. *Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones*. Mc Graw Hill. Madrid 2001.