

NOVEDADES EN LAS ACCIONES DE VIENTO EN LA REVISIÓN DE LA IAP

Miguel ORTEGA CORNEJO

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

miguel.ortega@ideam.es

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

RESUMEN

La nueva revisión de la IAP-11 adopta la formulación de las acciones de viento del Eurocódigo, y presenta algunas novedades respecto de la hasta la fecha vigente IAP-98.

Aparece un nuevo tipo de entorno, el tipo 0; el coeficiente de exposición engloba los antiguos factores de topografía, de altura y de ráfaga de la IAP-98; se definen nuevos criterios para la consideración del periodo de retorno en situaciones transitorias durante la ejecución; se adopta el mapa de isotacas con la definición de la velocidad básica fundamental del viento del CTE-2006; cambia el coeficiente de fuerza para la componente vertical del viento; se adoptan los criterios de obtención de la acción de viento concomitante con las sobrecargas del Eurocódigo; cambian los factores de simultaneidad de las acciones de viento; y se definen una serie de criterios y verificaciones de los efectos aeroelásticos para puentes de carretera y pasarelas.

PALABRAS CLAVE: Acciones de viento, puentes, coeficiente de exposición, coeficiente de fuerza, fenómenos aeroelásticos, Eurocódigo.

1. Acciones de viento según la IAP-98 [1].

La hasta la fecha vigente "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera" IAP-98 [1], se basaba en la formulación de acciones de viento del Eurocódigo en su versión ENV del año 1995 [2]. Las acciones de viento se definen en el capítulo 3.2.3.2.1 de la IAP-98 [1] como una carga estática equivalente según la expresión siguiente:

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

Donde F es la fuerza de empuje horizontal del viento en (N), C_D es el coeficiente de arrastre del elemento considerado (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-98 [1] 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 sería 1,1.

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

- 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 [1]. Estos parámetros dependen del entorno donde se localice el elemento de estudio.

Tabla 1 Parámetros k_z , z_0 , y z_{\min} de la IAP-98[1]

Tipo de entorno	k_z	z_0 (m)	z_{\min} (m)
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.	0,17	0,01	2
II zonal rural con algunos obstáculos aislados, como árboles o pequeñas construcciones.	0,19	0,05	4
III zona suburbana, forestal, o industrial.	0,22	0,30	8
IV zona urbana con al menos el 15 % de la superficie edificada, con altura media de edificios por encima de 15 m.	0,24	1,00	16

2. Acciones de viento según la versión previa del Eurocódigo (UNE-ENV 1991-2-4 [2]).

La primera versión experimental del Eurocódigo de acciones de viento UNE-ENV 1991-2-4:1995 [2], definía 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 (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) parece formalmente diferente a la (1) empleada por la IAP-98 [1] para obtener la fuerza del viento, conlleva a resultados idénticos.

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

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

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

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 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. Al 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 (ec. 3) de la IAP-98 [1].

El coeficiente de exposición $c_e(z)$ considera 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.

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

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).

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

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

- k_T es el factor del terreno. Las categorías del terreno (Tipos I al IV), así como sus parámetros dependientes, definidos en el apartado 8.3 de 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 se suele tomar igual a 1.

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 , por lo

que el coeficiente de exposición $c_e(z)$ 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) desarrollada quedaría de la forma siguiente:

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

Y sustituyendo la ecuación (14) en la ecuación (7) se obtiene 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).

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

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.

3. Acciones de viento según el Eurocódigo (EN 1991-1-4 [3]).

La versión actual del Eurocódigo 1 de acciones de viento (EN 1991-1-4:2005 [3]) define la fuerza global del viento actuando sobre una estructura, como:

$$F_w = c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (17)$$

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). 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:

$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot l_v(z) \right] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \right) = c_e(z) \cdot q_b \quad (18)$$

Donde:

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

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (19)$$

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

$$v_m = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (20)$$

Donde:

- $c_o(z)$ es el factor de topografía, que se toma igual a 1.

- $c_r(z)$ es el factor de rugosidad.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad \text{si } z \geq z_0 \quad (21)$$

$$\text{O bien } c_r(z) = k_r \cdot \ln(z_{\min}/z_0) \quad \text{si } z < z_{\min} \quad (22)$$

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

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05} \right)^{0,07} \quad (23)$$

- v_b es la velocidad básica del viento.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (24)$$

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.

El valor de la velocidad básica del viento $v_b(p)$ con una probabilidad de ser excedida p distinta de 0,02 se define como:

$$v_b(p) = v_b \cdot c_{prob} = v_b \cdot \left(\frac{1 - K \cdot \ln[-\ln(1-p)]}{1 - K \cdot \ln[-\ln(0,98)]} \right)^n \quad (25)$$

Donde K es un parámetro de forma igual a 0,20, y n es igual a 0,50.

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

$$l_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{si } z \geq z_{\min}, \text{ o bien } l_v(z) = l_v(z_{\min}) \quad \text{si } z < z_{\min} \quad (26)$$

Con k_l 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 (27), considerando que $c_o(z)$, c_{dir} , c_{season} , y k_l son iguales a 1, queda como:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} = \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)\right)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2} = \left(k_r^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right) \quad (27)$$

Si desarrollamos la ecuación (17) obtenemos la ecuación (28) de la fuerza equivalente de viento según el Eurocódigo (EN 1991-1-4 [3]).

$$F_w = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2\right) \cdot (c_{prob}^2) \cdot \left(k_r^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right) \cdot c_f \cdot A_{ref} \quad (28)$$

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 2.

Tabla 2 Parámetros k_r , z_0 , y z_{min} de EN 1991-1-4 [3]

Categorías del terreno	k_r	$z_0(m)$	$z_{min}(m)$
0 Borde del mar o zonas costeras expuestas a mar abierto.	0,156	0,003	1,0
I Lagos o áreas llanas sin vegetación ni obstáculos.	0,170	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.	0,190	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).	0,215	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.	0,234	1,00	10,0

4. Comparación de las acciones del viento en las diferentes normas.

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 3, se detallan estos factores en las diferentes normativas analizadas.

Tabla 3 Equivalencia de factores entre normativas

	Presión de referencia	Coef. de riesgo	Coeficiente de exposición	Coef. fuerza	Área expuesta
IAP-98 [1]	$(1/2 \cdot \rho \cdot V_{ref}^2)$	(C_r^2)	$C_t \cdot C_z \cdot C_s = \left(k_z^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	C_D	A
UNE-ENV 1991-2-4 [2]	$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{ref,0}^2\right)$	$(c_{prob}^2) \cdot *$	$c_e(z) = \left(k_r^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	c_f	A_{ref}
EN 1991-1-4 [3]	$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b,0}^2\right)$	(c_{prob}^2)	$c_e(z) = \left(k_r^2 \cdot \left[\ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \right)$	c_f	A_{ref}

Como puede comprobarse todas las normativas 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 4.

Tabla 4 Equivalencia de variables entre normativas

IAP-98 [1]	V_{ref}	C_r	$C_t^2 \cdot C_z^2 \cdot C_g^2$	k_z	z	z_0	z_{min}	C_t	C_z	C_D
UNE-ENV 1991-2-4 [2]	$V_{ref,0}$	C_{prob}	$C_e(z)$	k_T	z	z_0	z_{min}	$C_t(z)$	$C_r(z)$	C_f
EN 1991-1-4 [3]	$V_{b,0}$	C_{prob}	$C_e(z)$	k_r	z	z_0	z_{min}	$C_o(z)$	$C_r(z)$	C_f

5. Planteamiento de la nueva versión de las acciones de viento en la revisión de la IAP-98.

Desde finales de 2007, IDEAM S.A. está colaborando en UTE con Fhecor Ingenieros Consultores y Torroja Ingeniería con la Dirección Técnica de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, bajo la dirección de Pilar Crespo, Jefa de Área de Estructuras, para la redacción de la nueva IAP-11, y el planteamiento general ha sido la convergencia total con los Eurocódigos, por lo que la nueva reformulación de las acciones de viento adopta íntegramente la formulación del Eurocódigo de acciones de viento (EN 1991-1-4 [3]), que como se ha demostrado apenas cambia en algunos aspectos respecto de la IAP-98[1]. En la parte de acciones de viento, el Catedrático Miguel Ángel Astiz, ha colaborado especialmente en el desarrollo de los efectos aeroelásticos

5.1. Novedades de la IAP-11 respecto de la IAP-98.

5.1.1. Diferentes tipos de entorno

Se incluye el nuevo tipo de entorno tipo 0, para el “borde del mar o zonas costeras expuestas a mar abierto”, con parámetros más desfavorables que el hasta ahora tipo I, y el nuevo entorno tipo I “lagos o áreas llanas sin vegetación ni obstáculos” se hace equivalente al antiguo entorno tipo I (ver tablas 1 y 2).

El coeficiente de exposición (ec. 27) engloba los antiguos factores de topografía, de altura y de ráfaga de la IAP-98 [1]. En función del tipo de entorno finalmente queda según se representa en la figura 1.

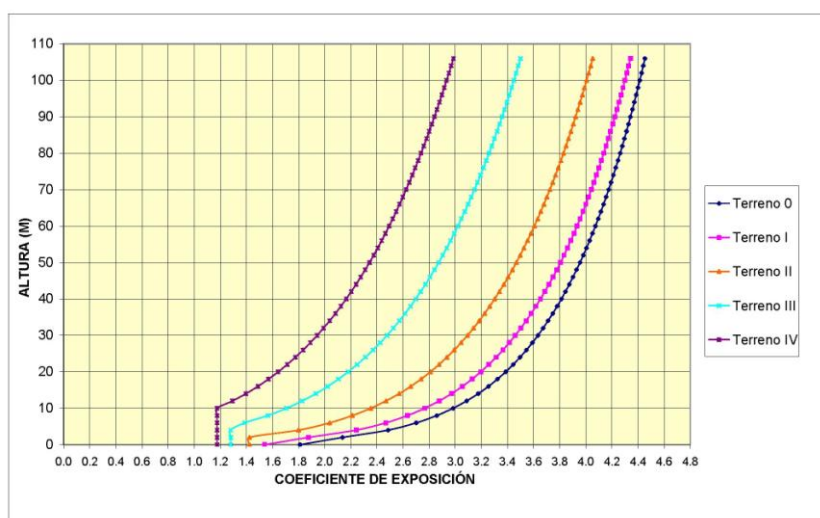


Figura 1. Coeficiente de exposición en función del tipo de entorno.

5.1.2. Periodo de retorno para situaciones transitorias

Se mantienen los 100 años de periodo de retorno para el cálculo de situaciones persistentes, pero para situaciones transitorias se adoptan los criterios del Eurocódigo de acciones durante la ejecución (EN 1991-1-6 [4]) (ver tabla 5).

Tabla 5 Periodos de retorno para situaciones transitorias

Duración de la situación	Periodo de retorno, T [años]
≤ 3 días	2
> 3 días y ≤ 3 meses	5
> 3 meses y ≤ 1 año	10
> 1 año	50

5.1.3. *Mapa de isotacas para obtener la velocidad básica fundamental del viento*

Se adopta el mapa de isotacas de la figura D.1 del CTE-2006 [5] para la definición de la velocidad básica fundamental del viento ($v_{b,0}$) (figura 2).



Figura 2. Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento $v_{b,0}$ (Figura D.1 del Documento Básico SE-AE del Código Técnico de la Edificación).

5.1.4. *Coefficiente de fuerza para la componente vertical del viento.*

Se adopta el coeficiente de fuerza en la dirección vertical $c_{f,z} = \pm 0,9$, en lugar del hasta ahora habitual $\pm 0,5$. Este coeficiente se puede reducir en caso de realizar ensayos específicos en túnel de viento.

5.1.5. *Empuje longitudinal del viento.*

El empuje longitudinal es una fracción del empuje transversal, 25% para los elementos sólidos y 50% para los elementos que presenten huecos, pero se multiplica por un coeficiente reductor, no incluido en EN-1991-1-4 [3], que ya se incluyó en la IAPF-07 [6]. El coeficiente reductor, es el

$$\text{definido por la expresión: } 1 - \left(7 / \left[c_0 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7 \right] \right) \Phi [L/L(z)] \quad (29)$$

Donde:

c_0 es factor de topografía

$$\Phi [L/L(z)] = 0,230 + 0,182 \ln [L/L(z)] \text{ siendo } 0 \leq \Phi [L/L(z)] \leq 1 \quad (30)$$

L longitud sobre la cual actúa el empuje longitudinal [m], igual a la longitud total del puente.

$L(z)$ longitud integral de la turbulencia [m] definida por:

$$L(z) = \begin{cases} 300(z_{min}/200)^\alpha & \text{para } z < z_{min} \\ 300(z/200)^\alpha & \text{para } z_{min} \leq z \leq 200 \\ 300 & \text{para } z > 200 \end{cases} \quad (31)$$

z altura del punto de aplicación del empuje de viento respecto del terreno [m].

z_{min} altura mínima.

α coeficiente definido en la tabla 6.

Tabla 6 Coeficiente α según el tipo de entorno.

Tipo de entorno	0	I	II	III	IV
α	0,38	0,44	0,52	0,61	0,67

5.1.6. Criterios para la obtención de la acción de viento concomitante con las sobrecargas.

La IAP-98[1] reducía la presión básica de viento en un 50% cuando se consideraba el viento compatible con las sobrecargas, de manera adicional al coeficiente de combinación correspondiente. Esto no era sino una forma indirecta de igualar el resultado de aplicar la IAP-98 [1] a los resultados de la versión previa del Eurocódigo (UNE-ENV 1991-2-4 [2] de 1995).

La versión experimental (ENV) del Eurocódigo 0, definía para cada acción variable un coeficiente de combinación específico, así el coeficiente de combinación ψ_0 de las sobrecargas era $\psi_0=0,6$, mientras que el de la acción de viento era $\psi_0=0,3$. En cambio, la IAP-98[1], simplificó el criterio de asignación de coeficientes de combinación ψ_0 , fijando un único coeficiente para todas las acciones variables, tanto sobrecargas como para la acción del viento ($\psi_0=0,6$). Para que el resultado final al aplicar la IAP-98[1], fuera igual que al aplicar el Eurocódigo (UNE-ENV 1991-2-4 [2]) se decidió reducir en un 50% el valor de la presión básica de viento cuando actuase compatible con las sobrecargas, llegando, de una forma algo artificial, a resultados equivalentes a los de UNE-ENV 1991-2-4 [2] ($0,5 \cdot \psi_0 = 0,5 \cdot 0,6 = 0,30$ de IAP-98 [1] equivalía a usar $\psi_0=0,30$ de UNE-ENV 1991-2-4 [2]).

Con el cambio de versión del Eurocódigo, la versión EN 1991-1-4:2005[3], modifica el coeficiente de combinación para las acciones de viento de $\psi_0=0,3$ (ENV) a $\psi_0=0,6$ (EN), lo cual implica multiplicar por dos las acciones de viento compatibles con las sobrecargas respecto de la versión previa experimental del Eurocódigo. Por tanto, el coeficiente reductor de la presión básica de viento definido en la IAP-98[1] no parece tener ya sentido. Por este motivo se ha decidido eliminado en la IAP-11 la reducción del 50% en la presión básica de viento cuando hay concomitancia con las sobrecargas de uso.

El Eurocódigo (EN 1991-1-4:2005 [3]), limita además el valor de combinación de la acción de viento con las sobrecargas $\psi_0 \cdot F_w$ a F_w^* (en puentes de carretera) y a F_w^{**} (en puentes de ferrocarril), con el límite del valor fundamental de la velocidad del viento en $v_{b,0}^* = 23$ m/s y $v_{b,0}^{**} = 25$ m/s respectivamente.

Este límite en realidad no condiciona nunca en puentes de carretera, ya que en el peor de los casos en España $v_{b,0} = 29$ m/s (ver fig. 2), y como $\psi_0 \cdot v_{b,0}^2 = 0,60 \cdot 29^2 = 504,6$ es siempre menor de $v_{b,0}^{*2} = 23^2 = 529$, nunca condiciona. Por este motivo, se ha obviado este límite en la IAP-11.

5.1.7. Factores de simultaneidad ψ para las acciones de viento.

En la línea de lo ya expuesto, en la IAP-11, se han adoptado los factores de simultaneidad ψ del Eurocódigo 0: Bases de diseño (EN-1990 [7]).

Para las situaciones de cálculo persistentes, los coeficientes ψ para puentes de carretera son: $\psi_0=0,60$ ($\psi_0=0,30$ en pasarelas); $\psi_1=0,20$; $\psi_2=0$, mientras que para las situaciones durante la ejecución $\psi_0=0,80$.

5.1.8. Verificaciones de los efectos aeroelásticos en puentes de carretera y pasarelas.

La IAP-11 establece que no es necesario realizar verificaciones especiales de los efectos aeroelásticos, cuando se cumplan simultáneamente las tres condiciones siguientes:

- Luz inferior a 200 m en puentes y a 100 m en pasarelas.
- Luz efectiva (máxima distancia entre puntos de momento flector nulo bajo la acción del peso propio) menor que 30 veces el canto.
- Anchura del tablero superior a 1/10 de la distancia entre puntos de momento transversal nulo bajo la acción del viento transversal.

Aunque no se cumpla alguna de las tres condiciones anteriores, tampoco es necesario comprobar los efectos aeroelásticos en puentes o pasarelas en los que concurren las dos circunstancias siguientes:

- Luz menor de 80 m, y
- Frecuencia fundamental de flexión vertical mayor de 2 Hz.

En el caso que sí sea necesario realizar verificaciones de los posibles efectos aeroelásticos, la IAP-11, establece una serie de verificaciones generales y simplificadas de los efectos de divergencia torsional, desprendimiento de torbellinos, vibraciones divergentes por galope o flameo y por bataneo, basadas todas ellas en las formulaciones del Eurocódigo (EN 1991-1-4 [3]).

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] EN 1991-1-4 “Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento” (versión EN 2005, versión UNE-EN 2007).
- [4] EN 1991-1-6 “Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-6: Acciones durante la ejecución” (versión EN 2005, versión UNE-EN 2010).
- [5] “Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación”. Libro 2. Código Técnico de la Edificación (CTE). Ministerio de Vivienda. 2006.
- [6] “Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril”. IAPF-07. ORDEN FOM 3671/2007 de 24 de Septiembre. BOE 17 diciembre de 2007.
- [7] EN 1990: 2002/prA1:2004. “Eurocódigo. Basis of structural design”.