

PARTE 3

CARGAS DE VIENTO

3.3.3. DEFINICION NUMERICA DE LA ACCION DINAMICA PRODUCIDA POR LAS FLUCTUACIONES DE LA PRESION DEL VIENTO INCIDENTE.....	154
3.3.3.1. TRATAMIENTO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	154
3.3.3.2. TRATAMIENTO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	155
3.3.3.3. FUERZAS ESTATICAS EQUIVALENTES	156
3.3.4. DEFINICION NUMERICA DE LA ACCION DINAMICA PRODUCIDA POR LAS FLUCTUACIONES DE PRESION ORIGINADAS POR LA FORMACION DE REMOLINOS EN LA ESTELA GENERADA POR LA INTERPOSICION DE UNA ESTRUCTURA AL FLUJO DE VIENTO INCIDENTE	157
3.3.4.1. DESCRIPCION DEL FENOMENO	157
3.3.4.2. FUERZAS ESTATICAS EQUIVALENTES	160
3.3.5. ANALISIS DE FATIGA	162

3.2.1.4.1.	Factor de conversión de la velocidad del viento para periodos de retorno diferentes a 50 años	104
3.2.2.1.1.	Presiones del viento sobre elementos superficiales en diversas situaciones.....	110
3.2.2.3.1.	Esquema general de fuerzas de presión producidas por el viento sobre una estructura.....	125
3.2.2.3.2.	Fuerzas de Rozamiento o Arrastre en estructuras alargadas de planta rectangular	126
3.2.2.8.1.	Esquema de las fuerzas de arrastre producidas por el viento sobre un buque	142
3.2.2.8.2.	Esquema de las fuerzas de arrastre producidas por el viento sobre una estructura flotante prismática.....	145
3.2.2.8.3.	Esquema de las fuerzas de arrastre producidas por el viento sobre una estructura flotante de simetría radial	145
3.3.1.1.	Comparación de la densidad espectral de potencia reducida tipo correspondiente a la componente longitudinal de la velocidad de fluctuación del viento con las frecuencias naturales de oscilación usuales en algunas estructuras tipificadas	147
3.3.2.1.	Modelos estructurales con uno (a) o varios (b) grados de libertad para cálculo dinámico	151
3.3.4.1.1.	Esquemización del fenómeno de los remolinos de Von Karman	159



3.2.1.2.1.	Intervalo de medición o duración de ráfaga a considerar para la determinación de la velocidad del viento de proyecto en función del tipo estructural analizado	99
3.2.1.2.2.	Velocidades de viento límite de operatividad usuales en instalaciones y estructuras portuarias no considerando diferenciación direccional.....	100
3.2.1.4.1.	Velocidad básica escalar del viento en el litoral español, asociada a un periodo de retorno de 50 años [$V_b _{50 \text{ años}}$], (en m/s)	103
3.2.1.4.2.	Velocidad básica escalar del viento en el litoral español para la determinación del valor frecuente de la acción del viento [$V_b _{0.95}$], (en m/s).....	106
3.2.1.5.1.	Coefficientes de seguridad para la obtención de los valores de cálculo de la acción del viento aplicables en la comprobación de Estados Límites Últimos.....	108
3.2.2.1.1.	Presión Dinámica del viento asociada a una velocidad de viento dada.....	109
3.2.2.2.1.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para paredes laterales de construcciones de planta rectangular	112
3.2.2.2.2.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas a dos aguas de construcciones de planta rectangular	113
3.2.2.2.3.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas a un agua de construcciones de planta rectangular.....	114
3.2.2.2.4.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas planas de construcciones de planta rectangular	115
3.2.2.2.5.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas cilíndricas con directriz circular, elíptica o parabólica, de construcciones de planta rectangular	116
3.2.2.2.6.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas múltiples a dos aguas de construcciones de planta rectangular (<i>todos los vanos iguales</i>).....	117
3.2.2.2.7.	Coefficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para cubiertas múltiples en dientes de sierra de construcciones de planta rectangular (<i>todos los vanos iguales</i>).....	118
3.2.2.2.8.	Coefficientes eólicos de presión netos, $C_{p,netr}$, para cubiertas aisladas a dos aguas en construcciones sin paredes laterales permanentes.....	119
3.2.2.2.9.	Coefficientes eólicos de presión netos, $C_{p,netr}$, para cubiertas aisladas a un agua en construcciones sin paredes laterales permanentes	120

3.2.2.2.10.	Coeficientes eólicos de presión netos, $C_{p,net}$, para cubiertas aisladas múltiples a dos aguas en construcciones sin paredes laterales permanentes (<i>todas las crujías iguales</i>)	121
3.2.2.2.11.	Coeficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para paredes laterales en construcciones de planta en L, T e Y	121
3.2.2.2.12.	Coeficientes eólicos de presión interior, C_{pi} , en construcciones no estancas de planta rectangular no compartimentadas interiormente	122
3.2.2.2.13.	Coeficientes eólicos de presión exterior, C_{pe} , para construcciones cilíndricas (<i>para viento actuando perpendicularmente al eje del cilindro</i>)	123
3.2.2.3.1.	Coeficientes eólicos de rozamiento o arrastre para estructuras planas de planta rectangular	127
3.2.2.3.2.	Coeficientes eólicos de fuerza, C_f , para construcciones macizas prismáticas de sección rectangular uniforme y eje vertical (<i>viento actuando en la dirección de los ejes principales</i>)	128
3.2.2.3.3.	Coeficientes eólicos de fuerza, C_f , para diversas construcciones macizas prismáticas de sección uniforme y eje vertical	129
3.2.2.3.4.	Coeficientes eólicos de fuerza (C_{fx} y C_{fy}) para elementos estructurales de caras planas y esbeltez infinita ($\lambda=\infty$) (<i>viento actuando perpendicularmente al eje longitudinal del elemento estructural</i>)	131
3.2.2.3.5.	Coeficientes eólicos de fuerza, C_f , para elementos estructurales de sección circular y esbeltez infinita ($\lambda=\infty$), de superficie lisa o débilmente rugosa (<i>viento actuando perpendicularmente al eje longitudinal del elemento estructural</i>)	132
3.2.2.3.6.	Coeficientes eólicos de fuerza, C_f , para tirantes, cables y cabos de esbeltez infinita ($\lambda=\infty$) (<i>viento actuando perpendicularmente al plano longitudinal del elemento</i>)	133
3.2.2.3.7.	Coeficientes eólicos de fuerza (C_{fx}) para superestructuras de pantanones, plataformas, puentes y duques de alba sobre pilas o pilotes de esbeltez infinita ($\lambda=l/b=\infty$) (<i>viento actuando perpendicularmente al eje longitudinal de la superestructura</i>)	134
3.2.2.4.1.	Coeficientes eólicos de fuerza efectivos para considerar el efecto de opacidad al viento en construcciones formadas por elementos estructurales individuales situados en un plano normal a la dirección del viento	136
3.2.2.5.1.	Factor de sombra, η , en construcciones formadas por elementos estructurales situados en diferentes planos en la dirección de actuación del viento	138
3.2.2.6.1.	Coeficientes eólicos de fuerza efectivos correspondientes a estructuras reticuladas en forma de torre de sección uniforme cuadrada o triangular equilátera, constituidas por elementos estructurales de superficies planas	139
3.2.2.6.2.	Coeficientes eólicos de fuerza efectivos correspondientes a estructuras reticuladas en forma de torre de sección uniforme cuadrada, constituidas por elementos estructurales de sección circular	139
3.2.2.6.3.	Coeficientes eólicos de fuerza efectivos correspondientes a estructuras reticuladas en forma de torre de sección uniforme triangular equilátera, constituidas por elementos estructurales de sección circular	140

3.2.2.8.1.	Valores del coeficiente de excentricidad (K_e) para la determinación del punto de aplicación de la fuerza total de arrastre resultante de la acción del viento sobre un buque	144
3.3.1.1.	Frecuencias propias correspondientes al modo fundamental a flexión de estructuras tipo que presentan un plano de simetría vertical en la dirección de actuación del viento (<i>construcciones verticales y horizontales</i>).....	148
3.3.1.2.	Masa añadida que valora el efecto inercial del agua externa movilizada por una estructura sumergida prismática de sección uniforme, en función de la dirección de la oscilación	150
3.3.2.1.	Valores tipificados de la fracción de amortiguamiento crítico (ζ).....	153
3.3.3.3.1.	Abacos para la obtención de los parámetros r , A , J y S de la fórmula de Vickery (1971) para la determinación del factor dinámico ψ_d en estructuras verticales, no sumergidas parcialmente, con área frontal efectiva rectangular	158
3.3.4.1.1.	Número de Strouhal para diferentes secciones transversales	160
3.3.4.2.1.	Abacos para la obtención de los parámetros incluidos en la fórmula de la presión estática equivalente para el cálculo de los efectos dinámicos producidos por los remolinos de Von Karman	162

3.1. DEFINICION DE CARGA DE VIENTO (Q_{M4})

Se define como Carga de Viento (Q_{M4}) aquella carga de naturaleza variable producida por la actuación directa del viento sobre la estructura resistente o sobre elementos no estructurales que incidan sobre ella, independientemente de que se considere su actuación directamente para el cálculo estructural o como acción exterior para la determinación de otras cargas variables o accidentales (p.e. *Sobrecargas de Equipos e Instalaciones de Manipulación de Mercancías Q_{V2} , o Sobrecargas de Operaciones de Buques Q_{V5}*).

La incidencia de la acción del viento en la valoración de dichas cargas variables o accidentales y las condiciones de actuación aplicables se analizan en los apartados correspondientes a dichas cargas en la ROM 0.2, teniendo en cuenta las hipótesis de combinación de acciones consignadas en la misma Recomendación.

A todos los efectos de la ROM 0.2-90. ACCIONES EN EL PROYECTO DE OBRAS MARITIMAS Y PORTUARIAS, la carga de viento se considera una acción variable medioambiental o climática (Q_M).

3.2. DETERMINACION DE LA ACCION**3.2.1. CRITERIOS DE VALORACION DE LA ACCION DEL VIENTO****3.2.1.1. CRITERIOS GENERALES**

La acción del viento, a pesar de tener el carácter de carga dinámica frecuencial⁽³⁰⁾, podrá asimilarse en la mayor parte de los casos a una carga estática horizontal determinada según los criterios que se exponen en este apartado.

Para aquellos casos en que la respuesta dinámica de la estructura se prevea apreciable, o cuando se trate de estructuras con formas complejas en las que el viento es la carga preponderante, el comportamiento real de las mismas puede diferir notablemente del previsto en el análisis estático. En estos casos, para la determinación de las cargas de viento y sus efectos sobre las estructuras será necesario utilizar métodos específicos de análisis dinámico o estudios experimentales en túnel de viento, introduciendo el viento a partir de su definición en el dominio del tiempo o de la frecuencia⁽³¹⁾.

Los valores representativos de la Carga de Viento se obtendrán a partir de la determinación del Estado de Viento de Proyecto en la localización geográfica considerada, para cada una de las fases de proyecto e hipótesis de trabajo.

El Estado de Viento de Proyecto quedará definido por los parámetros velocidad del viento y dirección. Se determinará a partir del análisis estadístico unidimensional de la variable velocidad del viento utilizada como representativa de un Estado de Viento (*media, máxima asociada a diversos intervalos de medición, o estimada a partir de observaciones desde buques en ruta⁽³²⁾*), considerando la dirección de actuación, para dos tipos de situaciones:

(30) Ver Apartado 3.3. EFECTOS DINAMICOS de la ROM 0.2-90.- ACCIONES EN EL PROYECTO DE OBRAS MARITIMAS Y PORTUARIAS.

(31) Ver Apartados 3.3. EFECTOS DINAMICOS, 2.1.2.2.1. DESCRIPCION ESTADISTICA DEL VIENTO y 2.1.2.2.2. DESCRIPCION ESPECTRAL DEL VIENTO.

(32) Ver Apartado 2.1. CARACTERIZACION DEL VIENTO EN PERIODOS DE CORTA DURACION.

- Regímenes Extremos (para obtener el valor característico y el valor de combinación de la acción en fases de Construcción y de Servicio, excepto en la hipótesis de Condiciones Normales de Operación).
- Regímenes Medios (para obtener los valores representativos de la acción en fase de Servicio en la hipótesis de Condiciones Normales de Operación, así como los valores frecuentes y cuasi-permanentes de la acción).

Los regímenes medios y extremos serán obtenidos preferentemente a partir de datos de velocidad de viento registrados en la zona geográfica considerada, o en su lugar observados desde buques en ruta o estimados a partir de cartas meteorológicas³³⁾, y extrapolados a las condiciones físicas locales específicas del proyecto (*rugosidad superficial, altura, topografía local y ráfaga considerada en el cálculo*) por medio de los factores de velocidad de viento $F^{34)}$. Con objeto de facilitar su utilización práctica se recomienda, siempre que sea posible, obtener los regímenes correspondientes al parámetro Velocidad Básica del Viento o Velocidad de Referencia (V_b)³⁵⁾.

Con objeto de valorar la fiabilidad de los resultados obtenidos, éstos deberán contrastarse con la información elaborada equivalente incluida en los diferentes Códigos Nacionales e Internacionales de Viento existentes o suministrada por Institutos Meteorológicos.

A falta de información local mejor, los resultados recogidos en el Atlas de Viento del Litoral Español, incluidos en el Anejo I de esta Recomendación, podrán utilizarse para la determinación de Vientos de Proyecto en su ámbito de aplicación.

3.2.1.2. VELOCIDAD DEL VIENTO DE PROYECTO

3.2.1.2.1. VELOCIDAD DEL VIENTO DE PROYECTO EN CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTREMAS

Se considera que una estructura o instalación está sometida a condiciones climáticas extremas cuando ésta debe paralizar o limitar su operatividad mientras subsistan acciones climáticas superiores a los límites de explotación. Esta condición está asociada a las más severas condiciones climáticas para las cuales debe estar diseñada la estructura. Por lo tanto, cuando una estructura o instalación no tiene limitadas sus condiciones de explotación se considerará que ésta es su condición de proyecto (*Ver ROM 0.2-90*).

La velocidad del viento de proyecto para Fase de Construcción y para Fase de Servicio en Condiciones Climáticas Extremas y Excepcionales se determinará a partir de la Velocidad Básica del viento, en el punto y dirección considerados, correspondiente al periodo de retorno (T) asociado a la probabilidad de presentación o riesgo admisible (E) durante el periodo asignado en proyecto a la fase analizada (L_t), tomando en consideración las condiciones específicas de proyecto (*rugosidad superficial, altura, topografía local, y tipo de estructura*).

Los criterios generales para la consideración de riesgos máximos admisibles y vidas útiles mínimas para la valoración de cargas variables se recogen en la ROM 0.2-90, apartados 2.2. VIDA UTIL (L) y 3.2. CRITERIOS DE VALORACION DE ACCIONES, los cuales se irán desarrollando en las distintas Recomendaciones referentes a estructuras particulares.

La relación entre riesgo, vida útil y periodo de retorno viene dada por la expresión:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{L_t} \quad [3.2.1]$$

(33) Ver Apartado 2.2. CARACTERIZACION DEL VIENTO EN PERIODOS LARGOS DE TIEMPO.

(34) Ver Apartado 2.1.4. FACTORES DE VELOCIDAD DE VIENTO.

(35) Velocidad Media del Viento en un intervalo de 10 minutos, en condiciones de mar abierto (*Categoría de I rugosidad superficial*) y a 10 m de altura sobre la superficie (*Ver apartado 2.1.3. VELOCIDAD BASICA DEL VIENTO*).

que para periodos de retorno altos puede aproximarse por:

$$E = 1 - e^{-\frac{L_f}{T}} \Rightarrow T = -\frac{L_f}{\ln(1-E)} \quad [3.2.2]$$

La influencia de las condiciones específicas de proyecto en la definición de la velocidad del viento de proyecto se llevará a cabo por medio de los factores de velocidad de viento F , mediante la formulación siguiente:

$$V_{v,t(z)]_{T,\alpha} = V_{b]_{T,\alpha} \cdot F_A \cdot F_T \cdot F_R \quad [3.2.3]$$

siendo:

$V_{v,t(z)]_{T,\alpha}$: Velocidad del viento de proyecto en la dirección α asociada a un periodo de retorno T , correspondiente a un intervalo de medición o duración de ráfaga t y a una altura z .

$V_{b]_{T,\alpha}$: Velocidad básica del viento en la dirección α asociada a un periodo de retorno T .

F_A : Factor de Altura y de Rugosidad Superficial.

El valor del factor F_A para la altura y categoría de rugosidad superficial considerada puede obtenerse en el ábaco de la tabla 2.1.4.1.2. Las condiciones de aplicación de este factor se recogen en el apartado 2.1.4.1.

En el ámbito de aplicación de esta Recomendación deberá considerarse siempre Categoría I de rugosidad superficial, sin perjuicio de las modificaciones de categoría que puedan surgir cuando se tome en consideración la dirección de actuación del viento. Asimismo, en ningún caso se considerarán velocidades correspondientes a alturas menores a 10 m; es decir, para valores de $z < 10$ m se tomará el valor correspondiente a $z=10$ m.

Cuando la estructura o el flotador tenga una altura ≤ 30 m podrá simplificarmente no considerarse la variación del perfil de velocidades del viento con la altura, tomándose como velocidad de proyecto la correspondiente a 10 m de altura. Para alturas mayores podrá discretizarse el perfil de velocidades en zonas de velocidad uniforme, calculadas usando el factor F_A correspondiente a la altura del punto superior de cada parte. En ningún caso la discretización será en partes superiores a 30 metros de altura. Como regla general es recomendable tomar 10 m.

F_T : Factor Topográfico.

El valor del factor F_T para la altura y heterogeneidad topográfica de escala local consideradas puede obtenerse en la tabla 2.1.4.2.1. Las condiciones de aplicación de este factor se recogen en el apartado 2.1.4.2.

En el ámbito de aplicación de esta Recomendación se considera que los efectos de la topografía local pueden ser especialmente significativos en rías y estuarios muy encajados y profundos o en las proximidades de acantilados.

Cuando no se tome en consideración la dirección de actuación del viento se tomará el factor F_T correspondiente a la dirección en la que el efecto de la topografía local sea más desfavorable. En estos casos no se tendrá en cuenta la posibilidad de reducciones en la velocidad del viento por efectos topográficos ($F_T < 1$).

En ningún caso se considerarán factores topográficos para alturas menores a 10 m; es decir, para valores de $z < 10$ m se tomará el valor correspondiente a $z=10$ m. Cuando la estructura o flotador tengan una altura ≤ 30 m podrá simplificarmente no considerarse la variación del factor F_T con la altura, tomándose aquél correspondiente a 10 m de altura.

En los casos en que se discretice el perfil de velocidades según los criterios definidos en F_A para estructuras o flotadores de altura superior a 30 metros, se aplicará el factor F_T correspondiente a la altura del punto superior de cada parte.

F_R : Factor de Ráfaga Máxima.

El valor del factor F_R correspondiente a intervalos de medición o duraciones de ráfaga de 3 s, 5 s, 15 s y 1 minuto, para diferentes alturas y categorías de rugosidad superficial, puede obtenerse en la tabla 2.1.4.3.1. Las condiciones de aplicación de este factor se recogen en el apartado 2.1.4.3.

En el ámbito de aplicación de esta Recomendación, para la determinación del factor F_R deberá tomarse siempre Categoría I de rugosidad superficial, sin perjuicio de las modificaciones de categoría que pudieran surgir cuando se tome en consideración la dirección de actuación del viento.

En ningún caso se considerarán factores de ráfaga máxima correspondientes a alturas menores a 10 metros; es decir, para valores de $z < 10$ m se tomará el valor correspondiente a $z = 10$ m. Cuando la estructura o flotador tengan una altura ≤ 30 m podrá simplificarmente no considerarse la variación del factor F_R con la altura, tomándose aquél correspondiente a 10 metros de altura. Por tanto en estos casos, que son los más generales en el ámbito de aplicación de esta Recomendación, los factores de ráfaga máxima correspondientes a cada intervalo de medición o duración de ráfaga considerado serán:

<u>DURACION DE RAFAGA</u>	<u>F_R</u>
3 s	1.44
5 s	1.42
15 s	1.38
1 min	1.31

En los casos en que se discretice el perfil de velocidades según los criterios definidos en F_A para estructuras o flotadores de altura superior a 30 metros, se aplicará el factor F_R correspondiente a la altura del punto superior de cada parte.

Se adoptará como velocidad de proyecto la correspondiente al intervalo de medición o duración de ráfaga (t) más corto capaz de afectar a la estructura o elemento estructural considerado dando empujes o fuerzas de arrastre efectivos sobre la totalidad de la misma, o capaz de vencer la inercia de elementos o estructuras móviles o flotantes.

Para la determinación del intervalo de tiempo o duración de ráfaga t a considerar en función del tipo de estructura o elemento estructural analizado se atenderá a lo dispuesto en la tabla 3.2.1.2.1.

3.2.1.2.2. VELOCIDAD DEL VIENTO DE PROYECTO EN CONDICIONES NORMALES DE OPERACION

Se considera que una estructura o instalación está sometida a condiciones normales de operación cuando ésta funciona sin limitaciones, no viéndose afectada por las condiciones climáticas. A efectos del proyecto esta condición está asociada a las condiciones climáticas límite de operatividad de la instalación. Por lo tanto, esta condición de proyecto deberá considerarse únicamente cuando la estructura o instalación tenga limitada su operatividad (*Ver ROM 0.2-90*).

La velocidad del viento de proyecto para Fase de Servicio en Condiciones Normales de Operación se determinará a partir de la Velocidad Básica del viento, en el punto y dirección considerados, correspondiente al nivel de excedencia límite establecido en función de los criterios funcionales o de operatividad del proyecto, tomando en consideración las condiciones específicas de proyecto (*rugosidad superficial, altura, topografía local y tipo de estructura*). La influencia de las condiciones específicas de proyecto en la definición de la velocidad del viento de proyecto se llevará a cabo por medio de los factores de velocidad de viento F, según las condiciones establecidas en el apartado 3.2.1.2.1. Asimismo, la velocidad del viento de proyecto en Condiciones Normales de Operación también podrá fijarse directamente como aquella establecida como condición límite de operatividad para la situación y condiciones de explotación de la instalación o estructura analizada.

Al igual que en otras obras de ingeniería civil como puede ser el caso de los puentes móviles, en las estructuras e instalaciones portuarias esta condición de proyecto es especialmente importante, ya que en algunas instalaciones es usual que las condiciones de

TABLA 3.2.1.2.1. INTERVALO DE MEDICION O DURACION DE RAFAGA A CONSIDERAR PARA LA DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO DE PROYECTO EN FUNCION DEL TIPO ESTRUCTURAL ANALIZADO

TIPO ESTRUCTURAL	DURACION DE RAFAGA
ELEMENTOS E INSTALACIONES FIJAS	
– Elementos estructurales aislados. – Subestructuras (p.e cerramientos, cubiertas,...) y sus elementos de sujeción a la estructura resistente.	3 segundos
– Estructuras o partes de ella cuya mayor dimensión horizontal y vertical no sobrepasa los 50 m.	5 segundos
– Estructuras o partes de ella cuya mayor dimensión horizontal o vertical excede de 50 m.	15 segundos
ELEMENTOS E INSTALACIONES MOVILES	
– Equipamiento. – Equipos e instalaciones de manipulación y transporte de mercancías.	3 segundos
– Pequeñas embarcaciones y elementos flotantes hasta 25 m de eslora.	15 segundos
– Buques y estructuras flotantes de eslora mayor de 25 m.	1 minuto

explotación estén limitadas en función de criterios funcionales impuestos por la propiedad de la misma, por la actuación de equipos de manipulación de mercancías cuya operatividad está limitada por el fabricante, por no quedar garantizada la seguridad de la estructura del buque en ciertas condiciones climáticas, o por la no disponibilidad de elementos o equipos necesarios para garantizar una total operatividad de la instalación en cualquier condición climática (*p.e. disponibilidad o no de remolcadores con potencia suficiente para garantizar con seguridad la maniobra de atraque o desatraque en dichas condiciones climáticas*). Estas condiciones son particularmente importantes en el proyecto de obras de atraque y amarre, de obras de carena y varada, y de instalaciones de manipulación de mercancías.

Independientemente de los criterios de operatividad que se recomienden para cada tipo de instalación en futuras Recomendaciones específicas, sin perjuicio de otras y a falta de estudios más detallados o premisas de proyecto, para las instalaciones y estructuras portuarias más comunes podrán utilizarse las velocidades de viento límite de operatividad generales establecidas como condiciones límite de explotación en la ROM 0.2. Un resumen de las mismas se incluye en la tabla 3.2.1.2.2. Los valores incluidos en esa tabla se considerarán de aplicación únicamente cuando la acción del viento sea el efecto preponderante para la definición de la operatividad de la instalación, sin perjuicio de tener que tomar en consideración en los cálculos la existencia de otras acciones climáticas de actuación simultánea compatible con el mismo.

3.2.1.3. DIRECCION DEL VIENTO DE PROYECTO

En los casos más generales y con el objeto de reducir el proceso de cálculo podrá admitirse simplificadaamente del lado de la seguridad que el viento actúa horizontalmente con igual intensidad y frecuencia en todas las direcciones, pudiendo obtenerse la velocidad del viento de proyecto a partir del régimen escalar correspondiente. En estas condiciones se asociará a la velocidad de proyecto únicamente la dirección o direcciones que produzcan las acciones más desfavorables sobre la estructura analizada. La aplicación del criterio anterior conducirá ordinariamente al estudio de las estructuras e instalaciones bajo la actuación del viento en la

TABLA 3.2.1.2.2. VELOCIDADES DE VIENTO LIMITE DE OPERATIVIDAD USUALES EN INSTALACIONES Y ESTRUCTURAS PORTUARIAS NO CONSIDERANDO DIFERENCIACION DIRECCIONAL

1. DE EQUIPOS E INSTALACIONES DE MANIPULACION DE MERCANCIAS	
- Equipo o instalación general en servicio	: $V_{v,3s}(10\text{ m}) = 22\text{ m/s} (\approx 80\text{ km/h})$
- Equipo en servicio durante operaciones de carga o descarga de buques	: $V_{v,3s}(10\text{ m}) = 19\text{ m/s} (\approx 70\text{ km/h})$
2. DE BUQUES ATRACANDO	
- Buques de Eslora $\leq 25\text{ m}$.	: Sin límites de operatividad
- Buques de Eslora $> 25\text{ m}$.	
• Sin ayuda de remolcadores	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 20\text{ m/s} (\approx 70\text{ km/h})$
• Con ayuda de remolcadores*), pero sin modificar la configuración del buque	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 22\text{ m/s} (\approx 80\text{ km/h})$
• Con ayuda de remolcadores*), pero modificando la configuración del buque para reducir su superficie expuesta (lastrado,...)	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 28\text{ m/s} (\approx 100\text{ km/h})$
- Buques con mercancías peligrosas	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 14\text{ m/s} (\approx 50\text{ km/h})$
3. DE BUQUES AMARRADOS	
- Buques de Eslora $\leq 25\text{ m}$.	: Sin límites de operatividad
- Buques de Eslora $> 25\text{ m}$.	
• Durante operaciones de carga y descarga	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 17\text{ m/s} (\approx 60\text{ km/h})$
• Permanencia en el atraque**)	
a. En estructuras de atraque	
• Sin ayuda de remolcadores	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 20\text{ m/s} (\approx 70\text{ km/h})$
• Con ayuda de remolcadores*), pero sin modificar la configuración del buque	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 22\text{ m/s} (\approx 80\text{ km/h})$
• Con ayuda de remolcadores*), pero modificando la configuración del buque para reducir su superficie expuesta (lastrado,...)	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 28\text{ m/s} (\approx 100\text{ km/h})$
b. En monoboyas y campos de boyas	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 30\text{ m/s} (\approx 110\text{ km/h})$
4. DE INSTALACIONES DE CONSTRUCCION DE BUQUES, CARENA Y VARADA	
- Buque en maniobra	: $V_{v,1min}(10\text{ m}) = 11\text{ m/s} (\approx 40\text{ km/h})$
- Buque en seco	: Sin límites de operatividad
- Buque en seco durante operación de equipos de trabajo	: Igual a apartado 1

NOTAS: *) Se considerará con ayuda de remolcadores siempre que exista la disponibilidad de remolcadores capaces de desarrollar una tracción a punto fijo del 150% de la fuerza máxima resultante del viento sobre el buque, en las condiciones de oleaje y corriente de actuación simultánea compatible con dicho viento.

****)** Salvo en obras de atraque muy especializadas o para grandes buques se recomienda no limitar la permanencia en el atraque de los buques. En todo caso, si como criterio de explotación la permanencia en el atraque se limita, deberá señalarse explícitamente como premisa de proyecto una vez aprobado por el cliente o la autoridad competente, incluyéndose asimismo en los manuales de explotación y de seguridad del puerto o instalación portuaria.

dirección de sus ejes principales y en ambos sentidos. En casos especiales, como por ejemplo estructuras reticuladas abiertas, construcciones con caras dentadas o con estructuras oblicuas a sus caras exteriores, y en general estructuras con formas complejas, se considerará además su actuación en las direcciones sesgadas que resulten más desfavorables.

No obstante, la aplicación de la simplificación anterior puede dar lugar a sobredimensionamientos excesivos especialmente en los siguientes casos:

- La sensibilidad de la estructura o instalación considerada respecto a la acción del viento en diversas direcciones es muy diferente.
- La velocidad del viento de proyecto está significativamente modificada según las direcciones por efecto de diferentes rugosidades superficiales, por la presencia de accidentes topográficos de escala local (*rías, acantilados,...*) o por abrigos artificiales.
- Actúan simultáneamente con el viento otras acciones medioambientales o climáticas direccionalmente dependientes (*p.e. oleaje local de viento*).

Por tanto, en estos casos es recomendable realizar un análisis direccional más completo, obteniéndose las diversas velocidades del viento de proyecto para cada sector direccional de actuación a partir del régimen direccional correspondiente. El análisis direccional da lugar, en general, a menores velocidades del viento de proyecto que las obtenidas a partir de los regímenes escalares aunque a un mayor número de hipótesis de cálculo.

En aquellos casos que lo requieran podrá considerarse que la dirección de actuación del viento puede variar de $+10^\circ$ a -10° respecto a la horizontal.

3.2.1.4. VALORES REPRESENTATIVOS DE LA ACCION

Una vez definido el Estado de Viento de Proyecto en la localización geográfica considerada, para cada una de las fases de proyecto e hipótesis de trabajo, y por tanto la velocidad y dirección del viento de proyecto, los diferentes valores representativos de la acción del viento (Q_{Mak})³⁶⁾ serán preferentemente obtenidos a partir de las siguientes velocidades del viento:

- VALORES CARACTERISTICOS (Q_{Mak})

- *En Fases de Construcción y Servicio, excepto en la hipótesis de Condiciones Normales de Operación:*

$$V_{v,t}(z)]_{T,\alpha}$$

siendo T el periodo de retorno asociado a la probabilidad de presentación o riesgo admisible (E) durante el periodo asignado en proyecto a la fase analizada (L_p). Se determinará a partir del régimen extremal utilizado de la variable velocidad de viento (*escalar o direccional*), seleccionando aquella correspondiente a la estima central del régimen³⁷⁾.

En ausencia de información local más precisa y fiable, los valores característicos de las cargas de viento en el litoral español podrán obtenerse a partir del mapa de velocidad básica escalar del viento asociada a un periodo de retorno de 50 años ($V_{b|50 \text{ años}}$) que se incluye en la tabla 3.2.1.4.1. Este mapa ha sido desarrollado a partir de la interpretación de los resultados recogidos en el Atlas de Viento del Litoral Español, incluido en el Anejo I de esta Recomendación. La velocidad básica del viento asociada a cualquier otro periodo de retorno podrá obtenerse a partir de la anterior por medio de la formulación siguiente (*Ver figura 3.2.1.4.1*):

$$K_T = \frac{V_b]_T}{V_b]_{50 \text{ años}}} = \left(\frac{1 - 0.2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right)^{0.5}}{1 - 0.2 \cdot \ln [-\ln 0.98]} \approx \quad [3.2.4]$$

$$\approx 0.75 \cdot \sqrt{1 + 0.2 \ln (T)} \quad , \quad (T \text{ en años})$$

Asimismo en los casos necesarios, en el litoral español la velocidad básica del viento correspondiente a la dirección α asociada a un periodo de retorno T podrá obtenerse a partir de la velocidad básica escalar correspondiente a dicho periodo de retorno,

(36) Ver Apartado 3.2.3. de la ROM 0.2-90. VALORES REPRESENTATIVOS DE LAS CARGAS VARIABLES.

multiplicándola por el coeficiente direccional K_α correspondiente a dicha dirección en la zona considerada (*Ver Anejo I: Atlas de Viento en el Litoral Español*). Es decir:

$$V_b]_{T,\alpha} = V_b]_{50 \text{ años}} \cdot K_T \cdot K_\alpha \quad [3.2.5]$$

Los criterios para la adopción de riesgos admisibles y vidas útiles para la determinación de los valores característicos de las acciones variables se recogen en los apartados 2.2. y 3.2 de la ROM 0.2-90.

Como ejemplo, a la vista de lo recomendado en los apartados 2.2. y 3.2. de la ROM 0.2-90, los periodos de retorno para fase de servicio y condiciones extremas correspondientes a diversos tipos de obras serán, para infraestructuras rígidas de carácter general, los siguientes:

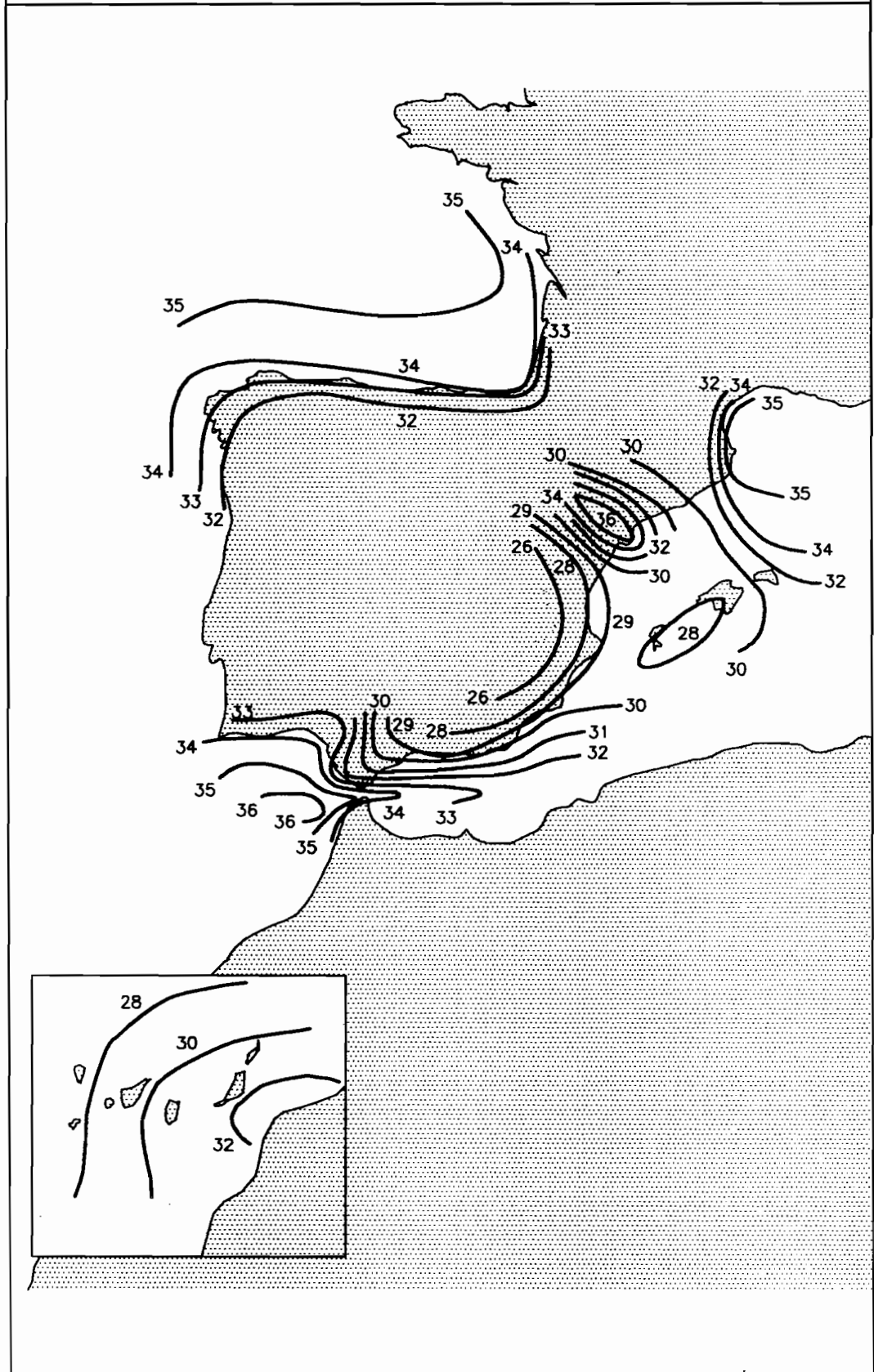
- **OBRAS E INSTALACIONES DE INTERES LOCAL O AUXILIARES** (*Vida útil = 25 años*)
 - Edificaciones Portuarias: T=155 años ($E=0.15$).
 - Instalaciones para manejo y manipulación de mercancías: T=113 años ($E=0.20$).
 - Obras Marítimas en puertos menores o deportivos (*muelles, pantalanes, ...*): T=240 - 113 años ($E=0.10-0.20$), en función de la repercusión económica en caso de inutilización de la obra.
- **OBRAS E INSTALACIONES DE INTERES GENERAL** (*Vida útil = 50 años*)
 - Obras Marítimas en grandes Puertos (*Obras de Atraque, Diques, ...*) T=475 - 225 años ($E=0.10-0.20$), en función de la repercusión económica en caso de inutilización de la obra.
- **OBRAS DE PROTECCION CONTRA INUNDACIONES** (*Vida útil = 100 años*)
 - Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales: T=2000 años ($E=0.05$).

(37) La ROM 0.2-90 considera que el valor característico de una acción variable medioambiental o climática, obtenida mediante criterios de riesgo a partir de un régimen extremal determinado a partir de datos estadísticos referentes a los parámetros que constituyen el origen físico de la acción (*altura de ola, velocidad del viento,...*), está ligado a Estados Límites Ultimos siempre que no seleccionemos el valor de la variable en la estima central del régimen sino en el correspondiente a un nivel de confianza del 90%. En estos casos, por tanto, la acción interviene sin ponderación ($\gamma_f=1$) en las combinaciones de carga de verificación de Estados Límites Ultimos. Estrictamente hablando, la acción obtenida correspondería al valor de cálculo de la acción más que al valor característico. La ROM 0.2-90 hizo este planteamiento tomando fundamentalmente en consideración la experiencia española de no ponderar o ponderar muy débilmente, en general, las acciones del oleaje o la altura de ola para el cálculo de obras marítimas, y por tanto pensando fundamentalmente en la especificidad de esta acción. Este método además permitiría, por medio de la banda de confianza, considerar indirecta y fácilmente coeficientes de ponderación variables en función de la incertidumbre asignada al régimen extremal de partida (*calidad estadística de la muestra, bondad del método de análisis extremal utilizado, extrapolación de resultados para periodos de retorno altos,...*). Aspecto por lo demás razonable y que cuenta con cierta tradición en la literatura técnica en el campo de la ingeniería marítima. Este planteamiento, demostrado correcto y absolutamente del lado de la seguridad para los periodos de retorno usuales en el cálculo de obras marítimas para la comprobación de Estados Límites Ultimos, omitía cual era el valor de servicio de la acción así definida, imprescindible para la comprobación de Estados Límites de Utilización y Estados Límites Ultimos controlados por el comportamiento del terreno. Obtener como simplificación el valor de servicio de la acción dividiendo por 1.5 no se considera correcto ya que el coeficiente incluido es manifiestamente variable como ya se ha justificado.

A la vista de las dificultades de aplicación de la ROM 0.2-90 para la comprobación de todos los Estados Límites en los que intervienen acciones climáticas o medioambientales y con el objeto de que no se hagan interpretaciones erróneas de la misma, la Comisión Técnica ha preferido definir el valor característico de las acciones climáticas extremas como el resto de las acciones, y por tanto ligadas al valor de servicio de la acción y no al valor último, no incluyendo como excepción ni a la acción del oleaje. Este planteamiento permite mantener una total homogeneidad sin excepciones con las definiciones establecidas en los Eurocódigos y en la Normativa española e internacional de materiales y acciones. Esto permitirá además la utilización conjunta sin dificultades de interpretación de toda la normativa vigente. Esto es especialmente importante en el caso de la acción del viento, con la existencia de códigos internacionales antiguos y consolidados. Para ello se considera como valor característico de toda acción climática en fase de construcción y servicio en condiciones extremas el correspondiente a la estima central del régimen. Las incertidumbres asociadas a éste, así como las inexactitudes en la determinación de las solicitaciones, las inexactitudes de la ejecución en la medida en que afectan a éstas y su incidencia sobre la seguridad se tendrán en cuenta mediante coeficientes de seguridad que definirán el valor de cálculo de la acción (*Ver apartado 3.2.1.5.*).

Estos criterios modifican los correspondientes incluidos en la ROM 0.2-90, y serán recogidos en revisiones posteriores de la misma.

TABLA 3.2.1.4.1. VELOCIDAD BASICA ESCALAR DEL VIENTO EN EL LITORAL ESPAÑOL, ASOCIADA A UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS [$V_{b|50 \text{ años}}$], (en m/s)



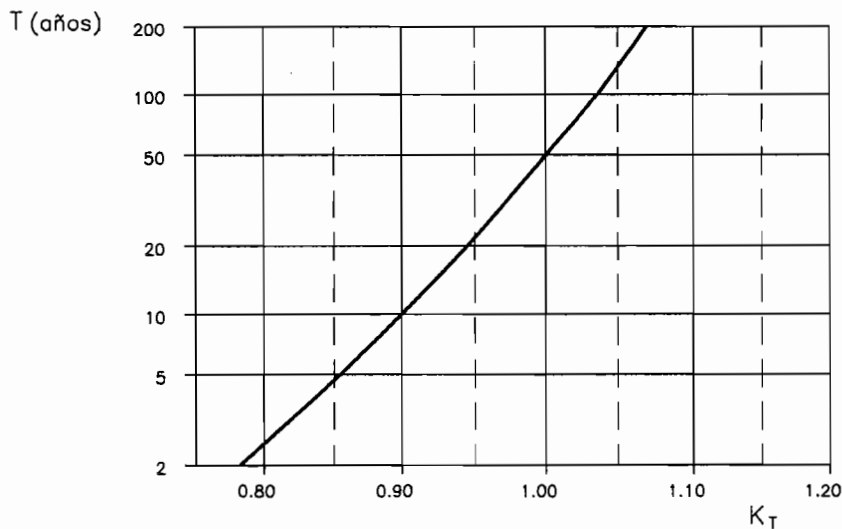


FIGURA 3.2.1.4.1. Factor de conversión de la velocidad del viento para periodos de retorno diferentes a 50 años.

- En Condiciones Normales de Operación:

$$V_{v,t}(z)]_{\text{limite de operatividad},\alpha} \not\geq V_{v,t}(z)]_{T,\alpha}$$

siendo el primer término de la desigualdad la velocidad del viento límite de operatividad en la dirección α para la hipótesis de trabajo considerada, y T el periodo de retorno adoptado para la definición del valor característico de la acción en condiciones extremas.

– VALORES DE COMBINACION ($\psi_0 \cdot Q_{M4k}$)

- En Fases de Construcción y Servicio, excepto en la hipótesis de Condiciones Normales de Operación:

$$V_{v,t}(z)]_{T/4,\alpha}$$

siendo T el periodo de retorno adoptado para la definición del valor característico de la acción en condiciones climáticas extremas. Es decir, la velocidad del viento correspondiente a un periodo de retorno igual a 1/4 del fijado para la determinación del valor característico de la acción.

En aquellos casos en que la acción no pueda ser fijada mediante base estadística podrá tomarse $\psi_0 = 0.7^{(38)}$.

(38) Este puede ser el caso en zonas geográficas en las que no se disponga de regímenes o mapas de velocidad de viento asociados a periodos de retorno. Es decir cuando el valor característico de la acción de viento se obtenga a partir de valores deterministas (*valores nominales*) de la velocidad del viento como en la vigente Norma Española NBE-AE-88. "Acciones en la Edificación". Se hace notar que el valor de ψ_0 se aplica al valor de la acción no a la velocidad del viento.

Lo definido en este apartado es válido únicamente cuando la acción variable preponderante no es una acción medioambiental o climática con el mismo origen físico que el viento (p.e. el oleaje local de viento). En ese caso el valor de combinación de la acción de viento será el compatible con la acción climática preponderante.

- En Condiciones Normales de Operación:

$$V_{v,t}(z) \Big]_{\text{viento máximo de actuación simultánea compatible con la acción climática de efecto preponderante que limite la operatividad, } \alpha^{39)}$$

Si el viento no tiene el mismo origen físico que la acción climática preponderante para la condición de operatividad considerada, se tomará aquel valor de la velocidad del viento que conjuntamente con la acción preponderante limita la operatividad de la instalación.

- VALOR FRECUENTE ($\psi_1 \cdot Q_{M4k}$)

$$V_{v,t}(z) \Big]_{0.95, \alpha}$$

Es decir, la velocidad de viento asociada a una probabilidad de no excedencia del 95% en el año medio, considerando en caso necesario una dirección α de actuación. Este valor puede obtenerse por medio del régimen medio de velocidad del viento correspondiente y la frecuencia de presentación sectorial (Ver fórmula 2.2.5).

En ausencia de información local más precisa y fiable, los valores frecuentes de las cargas de viento en el litoral español podrán obtenerse a partir del mapa de velocidad básica escalar incluido en la tabla 3.2.1.4.2. Este mapa ha sido desarrollado a partir de la interpretación de los resultados recogidos en el Atlas de Viento del Litoral Español (Ver Anejo I).

En aquellos casos en que la acción no pueda ser fijada mediante base estadística podrá tomarse del lado de la seguridad $\psi_1 = 0.3$, pudiendo variar en función de la zona geográfica considerada. De la observación de los resultados recogidos en el Atlas de Viento del Litoral Español puede concluirse que en la costa española el valor de ψ_1 está más próximo a 0.2.⁴⁰⁾

- VALOR CUASI-PERMANENTE ($\psi_2 \cdot Q_{M4k}$)

$$V_{v,t}(z) \Big]_{0.50, \alpha}$$

Es decir, la velocidad del viento asociada a una probabilidad de no excedencia del 50% en el año medio, considerando en caso necesario una dirección α de actuación.

Dado el rango de valores que se obtienen, simplificadoamente es admisible tomar $V_{v,t}(z) \Big]_{0.50, \alpha} = 0$. Por tanto, de igual forma en aquellos casos en que la acción no pueda ser fijada mediante base estadística podrá tomarse $\psi_2 = 0$.

3.2.1.5. VALORES DE CALCULO DE LA ACCION

El valor de cálculo de la acción de viento a considerar en cada una de las combinaciones de acciones⁴¹⁾ será obtenido a partir de la ponderación de uno de sus Valores Representativos (Valor Característico Q_{M4k} , Valor de Combinación $\psi_0 \cdot Q_{M4k}$, Valor Frecuente $\psi_1 \cdot Q_{M4k}$, Valor Cuasi-permanente $\psi_2 \cdot Q_{M4k}$) mediante los oportunos Coeficientes de Seguridad ($\gamma_{\#}$).

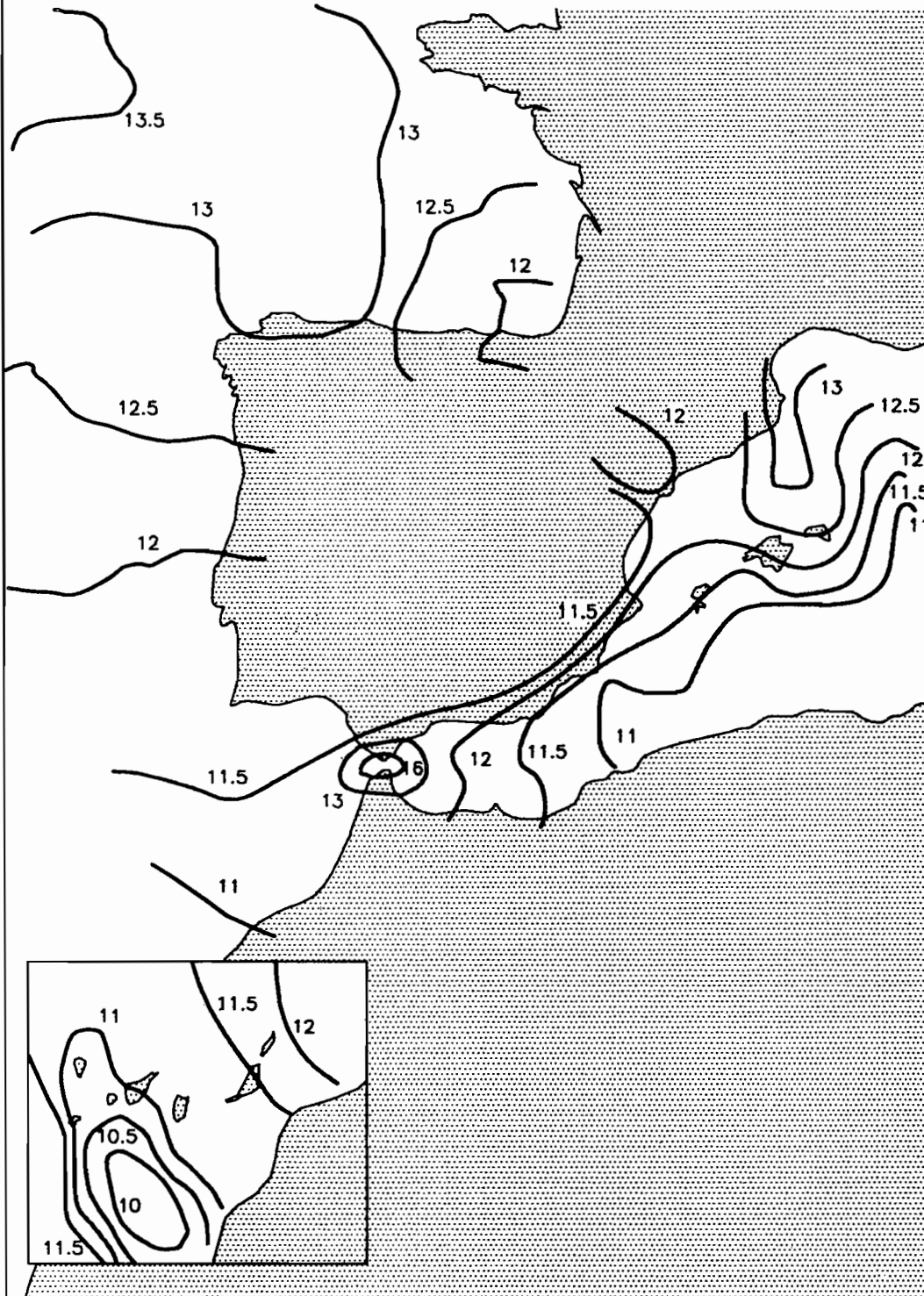
(39) P.e. si el oleaje local de viento (oleaje Sea) es la acción climática preponderante, el viento máximo de actuación simultánea compatible es aquél que puede producir dicho oleaje tomando en consideración las condiciones físicas del área de generación (Ver apartado I.7.3. y ROM 0.3).

(40) Se hace notar que el valor de ψ_1 se aplica al valor de la acción no a la velocidad de viento.

(41) Ver Parte 4. BASES DE CALCULO de la ROM 0.2. ACCIONES EN EL PROYECTO DE OBRAS MARITIMAS Y PORTUARIAS, y ROM 0.5. RECOMENDACIONES GEOTECNICAS PARA OBRAS MARITIMAS.

(42) Los coeficientes de seguridad para la obtención de los valores de cálculo de la acción de viento incluidos en la tabla 3.2.1.5.1. modifican parcialmente los incluidos en la ROM 0.2-90 para acciones medioambientales o climáticas determinadas mediante base estadística (apartado 4.2.2. de la ROM 0.2-90). Esto es debido a la nueva definición del valor característico de una acción climática definida mediante base estadística incluida en esta Recomendación. (Ver apartado 3.2.1.4). Estos criterios serán recogidos en revisiones posteriores de la ROM 0.2.

TABLA 3.2.1.4.2. VELOCIDAD BASICA ESCALAR DEL VIENTO EN EL LITORAL ESPAÑOL PARA LA DETERMINACION DEL VALOR FRECUENTE DE LA ACCION DEL VIENTO $[V_{b|0.95}]$, (en m/s)



Para las estructuras en el ámbito de aplicación de esta Recomendación, los factores de seguridad a aplicar para la comprobación de Estados Límites Últimos en fase de construcción y servicio se recogen en la tabla 3.2.1.5.1.⁴²⁾ en función del Estado Límite analizado y la hipótesis de carga considerada según lo dispuesto en la Parte 4. Bases de Cálculo de la ROM 0.2-90. Para la comprobación del Estado límite Último de Fatiga y de los Estados Límites de Utilización se considerará $\gamma_f = 1$.

Dada, en general, la gran incertidumbre asociada en la actualidad a los regímenes extremos empleados para la determinación de acciones variables climáticas en condiciones extremas, debido fundamentalmente al poco tiempo efectivo de registro analizado usualmente, a la baja calidad estadística de los datos registrados y a que los métodos de análisis extremal en uso no están aún totalmente contrastados, puede hacerse imprescindible la introducción de coeficientes de seguridad γ_{fr} mayores que los fijados en la tabla 3.2.1.5.1. en aquellos casos en que la incertidumbre asociada al régimen extremal disponible sea grande. Esto puede ser especialmente significativo para periodos de retorno de proyecto grandes en función del tiempo efectivo de registro analizado. Lo que trata de garantizar este coeficiente de seguridad mayor es que, cuando la posibilidad de que se presenten acciones que se aparten del valor adoptado como característico es alta, quede margen de seguridad suficiente para cubrir el resto de factores que intervienen en la definición del coeficiente de seguridad (*inexactitudes en la determinación de las solicitaciones, imprecisiones en la ejecución,...*). Evidentemente ésto es aplicable siempre y cuando se considere suficientemente fiable el régimen extremal de partida.

Por todo lo anterior, para la comprobación de estados límites últimos por el método de coeficientes de seguridad parciales deberá garantizarse que el valor de cálculo de una acción climática en condiciones extremas obtenida mediante un régimen extremal de base estadística no es menor que el obtenido a partir del parámetro físico origen de la acción tomando la estima superior correspondiente a un nivel de confianza del 90% para el periodo de retorno de proyecto.

Para la definición de los valores de cálculo de las cargas de viento en el litoral español a partir del mapa de viento de la tabla 3.2.1.4.1. serán de aplicación los coeficientes de seguridad incluidos en la tabla 3.2.1.5.1.

3.2.2. ACCION DEL VIENTO SOBRE ESTRUCTURAS Y FLOTADORES

3.2.2.1. PRESION DINAMICA DEL VIENTO

La acción del viento sobre estructuras y flotadores puede representarse tanto por las presiones actuantes sobre cada una de las superficies de los mismos como por la fuerza total resultante. En los dos casos la acción del viento será obtenida a partir del parámetro Presión Dinámica del Viento asociada a la velocidad del viento de proyecto $[q_{v,t}(z)]$. Este parámetro también se denomina Presión Básica del Viento.

Se define como Presión Dinámica del Viento a la presión unitaria producida por el viento en aquellos puntos donde su velocidad se anula. Se considera que la presión dinámica del viento actúa perpendicularmente a la superficie. Para una velocidad del viento de proyecto dada $[V_{v,t}(z)]$ se determina por medio de la formulación siguiente:

$$q_{v,t}(z) = \frac{\rho}{2} \cdot V_{v,t}^2(z) \quad [3.2.6]$$

siendo:

$q_{v,t}(z)$: Presión dinámica del viento asociada a la velocidad de proyecto $V_{v,t}(z)$.

ρ : Densidad del aire. Su valor es función de la humedad, temperatura y presión atmosférica. Simplificadamente podrá tomarse como $1,225 \text{ kg/m}^3$. No obstante, cuando la estructura o el flotador considerado se encuentre en zonas muy expuestas en las proximidades de áreas muy batidas por el oleaje, en las que sea conocido o previsible que el viento pueda arrastrar abundante contenido de agua (*roción*), deberán considerarse aumentos en la densidad correspondiente al fluido equivalente hasta un máximo de 15 kg/m^3 .

$V_{v,t}(z)$: Velocidad del viento de proyecto.

En el Sistema Internacional de Unidades la formulación anterior podrá expresarse en los casos generales:

$$q_{v,t}(z) = 0.6125 V_{v,t}^2(z) \text{ , } q_{v,t}(z) \text{ en Pa y } V_{v,t}(z) \text{ en m/s}$$

La Tabla 3.2.2.1.1. permite obtener directamente la presión dinámica asociada a una velocidad del viento dada.

TABLA 3.2.1.5.1. COEFICIENTES DE SEGURIDAD PARA LA OBTENCION DE LOS VALORES DE CALCULO DE LA ACCION DEL VIENTO APLICABLES EN LA COMPROBACION DE ESTADOS LIMITES ULTIMOS

<i>ESTADO LIMITE ULTIMO</i>	<i>ACCION</i>	<i>SITUACIONES PERSISTENTES Y TRANSITORIAS¹⁾</i> <i>(γ_{fq})</i>	<i>SITUACIONES ACCIDENTALES²⁾</i> <i>(γ_{fa})</i>
E.L. DE EQUILIBRIO	– Viento en Condiciones Normales de Operación	1.50 (1.10) ³⁾	—
	– Viento en Condiciones Extremas	1.50	1.00
E.L. DE AGOTAMIENTO ESTRUCTURAL, INESTABILIDAD DE 2º ORDEN Y COLAPSO PROGRESIVO	– Viento en Condiciones Normales de Operación	1.50 (1.35) ⁴⁾	—
	– Viento en Condiciones Extremas	1.50	1.00
E.L. CONTROLADOS POR EL COMPORTAMIENTO DEL TERRENO, UTILIZANDO EL METODO DE LOS COEFICIENTES PARCIALES	– Viento en Condiciones Normales de Operación	1.30 (1.00) ⁵⁾	—
	– Viento en Condiciones Extremas	1.30	1.00
E.L. CONTROLADOS POR EL COMPORTAMIENTO DEL TERRENO, UTILIZANDO EL METODO DE SEGURIDAD PROPUESTO POR LA ROM 0.5-94	– Viento en Condiciones Normales de Operación	1.00	—
	– Viento en Condiciones Extremas	1.00	1.00

- NOTAS:**
1. Para Fases de Construcción y Servicio en Condiciones Normales de Operación, en Condiciones Extremas, y Reparación.
 2. Para Fase de Servicio en Condiciones Excepcionales, y Fase de Servicio después de una Situación Excepcional ($A_k=0$).
 3. El proyectista podrá aplicar un coeficiente 1.10 siempre que considere que en servicio queda completamente garantizado el cumplimiento de los límites de operatividad.
 4. En condiciones normales de operación podrá adoptarse un coeficiente de 1.35 para el dimensionamiento de elementos secundarios que puedan llegar al agotamiento sin afectar a la estructura principal, con el objetivo de garantizar los límites de operatividad fijados para la misma (p.e. dimensionamiento de los sistemas de amarre, de los anclajes de los bollardos, ...). Asimismo, el proyectista podrá aplicar dicho coeficiente para el calculo estructural siempre que considere que en servicio queda completamente garantizado el cumplimiento de los límites de operatividad.
 5. El proyectista podrá aplicar un coeficiente de 1.0 siempre que considere que en servicio queda completamente garantizado el cumplimiento de los límites de operatividad.

TABLA 3.2.2.1.1. PRESION DINAMICA DEL VIENTO ASOCIADA A UNA VELOCIDAD DEL VIENTO DADA

$V_{v,t}$ (m/s)	$q_{v,t}$ (Pa)
10	61.3
12	88.2
14	120.1
16	156.8
18	198.5
20	245.0
22	296.5
24	352.8
26	414.1
28	480.2
30	551.3
32	627.2
34	708.1
36	793.8
38	884.5
40	980.0
42	1080.5
44	1185.8
46	1296.1
48	1411.2
50	1531.3
52	1656.2
54	1786.1
56	1920.8
58	2060.5
60	2205.0
62	2354.5
64	2508.8
66	2668.1
68	2832.2
70	3001.3

3.2.2.2. ACCION DEL VIENTO SOBRE UNA SUPERFICIE. FUERZAS DE PRESION

El viento produce sobre cada elemento superficial de una estructura o de un flotador, situado tanto a barlovento como a sotavento, una sobrecarga unitaria (p), actuando en dirección normal a la superficie, de valor:

$$p = C_p \cdot q_{v,t}(z) \quad [3.2.7]$$

siendo:

$q_{v,t}(z)$: Presión dinámica asociada a la velocidad del viento considerada para las condiciones específicas de proyecto ($V_{v,t}(z)$)⁴³.

C_p : Coeficiente Eólico de Presión (*Adimensional*).
Este coeficiente es positivo cuando se produce un efecto de presión y negativo cuando se produce un efecto de succión. Es variable para cada elemento superficial considerado en función de la configuración y posición del elemento superficial, y de la dirección de incidencia del viento. A su vez, éste es diferente en función de que el elemento superficial sea exterior o interior a una construcción y de que esté situado a barlovento o sotavento. En el caso de que el elemento superficial sea interior a una construcción su valor dependerá, además de los parámetros citados, de la importancia y distribución de las aberturas por el contorno de la construcción. Es decir, podemos distinguir los siguientes coeficientes eólicos (*Ver figura 3.2.2.2.1*):

(43) Ver Apartado 3.2.1.2. VELOCIDAD DEL VIENTO DE PROYECTO.

$C_{pe,b}$: Coeficiente Eólico para cara exterior a barlovento.
 $C_{pe,s}$: Coeficiente Eólico para cara exterior a sotavento.
 $C_{pi,b}$: Coeficiente Eólico para cara interior a barlovento.
 $C_{pi,s}$: Coeficiente Eólico para cara interior a sotavento.

El coeficiente eólico neto ($C_{p,net}$) será igual a la diferencia entre los coeficientes eólicos correspondientes a cada una de las caras de la superficie analizada.

Podrán diferenciarse los siguientes casos:

- Una cara de la superficie analizada es exterior y la otra es interior (p.e. *cerámico exterior de una construcción no estanca que presente un volumen interior*):

$$C_{p,net} = C_p = C_{pe,b} - C_{pi,b} \text{ ó } C_{p,net} = C_p = C_{pe,s} - C_{pi,s}$$

- Las dos caras de la superficie analizada son exteriores (p.e. *muro o valla de separación*):

$$C_{p,net} = C_p = C_{pe,b} - C_{pe,s}$$

- Las dos caras de la superficie analizada son interiores (p.e. *partición interior de una construcción no estanca que presente un volumen interior*):

$$C_{p,net} = C_p = C_{pi,b} - C_{pi,s}$$

Algunos ejemplos ilustrativos se incluyen en la figura 3.2.2.1.

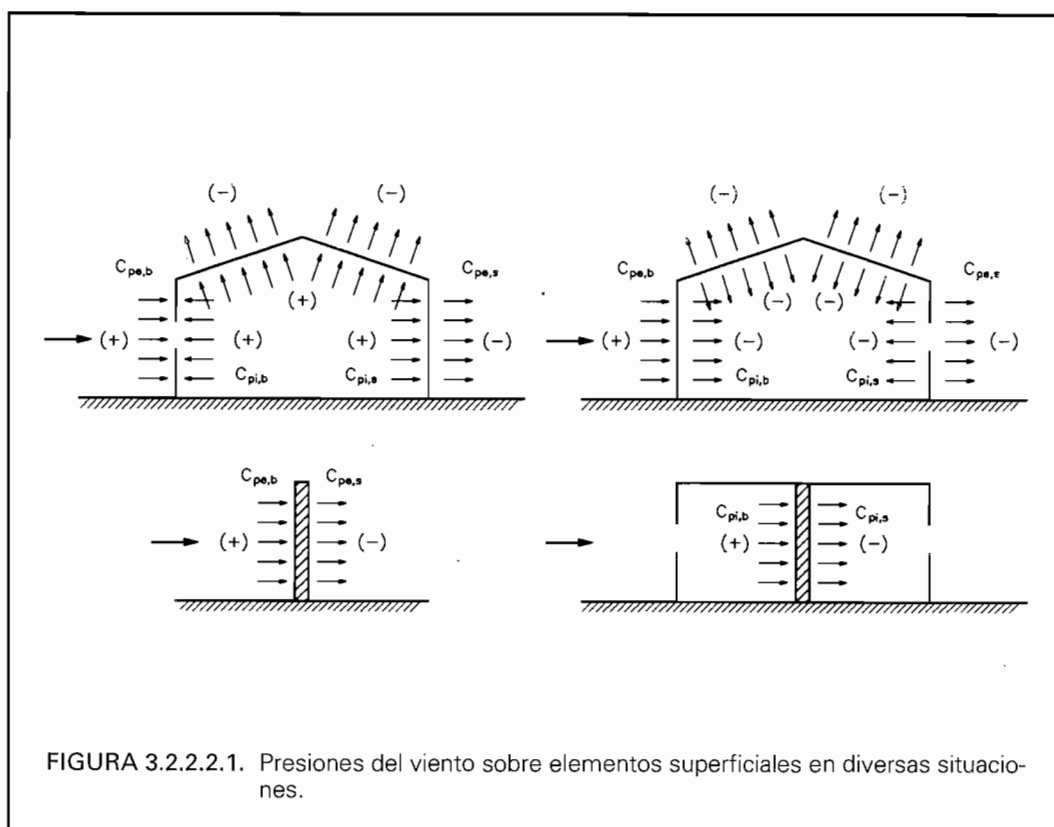


FIGURA 3.2.2.1. Presiones del viento sobre elementos superficiales en diversas situaciones.

El valor de los Coeficientes Eólicos tanto exteriores como interiores, para la configuración y posición del elemento estructural considerado y dirección de actuación del viento, podrán obtenerse de los Códigos y Normas vigentes, nacionales e internacionales, correspondientes a la acción del viento sobre las estructuras⁴⁴⁾. No obstante, para los casos más usuales que se presentan en las

(44) En España Norma NBE-AE/88 "Acciones en la Edificación" y Eurocódigo 1 "Bases de Proyecto y Acciones sobre las Estructuras. Parte 2.3. Acción del Viento".

construcciones portuarias estos coeficientes pueden obtenerse en las tablas 3.2.2.2.1 a 3.2.2.2.13. de esta Recomendación.

En general, las presiones sobre cada una de las superficies envolvente de las construcciones se considerarán uniformes, salvo en aquellos casos en los que se señala expresamente subdividiendo la superficie en áreas de presión uniforme con coeficientes eólicos diferenciados. Pese a lo anterior, en las zonas de dichas superficies con discontinuidades marcadas (*p.e. aristas de las paredes y de las cubiertas, relieves en fachada,...*) se desarrollan presiones localizadas importantes, para cuyo cálculo se incluyen en las tablas los coeficientes eólicos locales correspondientes ($C_{pe,j}$). Estas presiones deben ser tenidas únicamente en cuenta para el cálculo de elementos estructurales secundarios situados en dichas zonas.


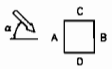
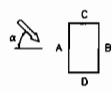

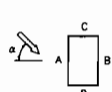

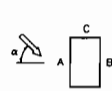
La carga total del viento sobre una estructura, elemento estructural o construcción se obtendrá como suma vectorial de las fuerzas netas resultantes de la presión del viento sobre cada una de las superficies de la misma (A_j). Es decir:

$$R_v = \sum C_{p,j} \cdot q_{v,j}(z) \cdot A_j \quad [3.2.8]$$

Un valor negativo de R_v indica que la fuerza resultante es de succión.

Las presiones de viento sobre elementos superficiales valoradas según lo dispuesto en este apartado son válidas únicamente para superficies suficientemente rígidas que permitan despreciar los efectos de las vibraciones debidas a la acción del viento. A estos efectos, se considerarán superficies rígidas aquellas con frecuencias propias de vibración superiores a 5 Hz.

TABLA 3.2.2.2.1. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA PAREDES LATERALES DE CONSTRUCCIONES DE PLANTA RECTANGULAR

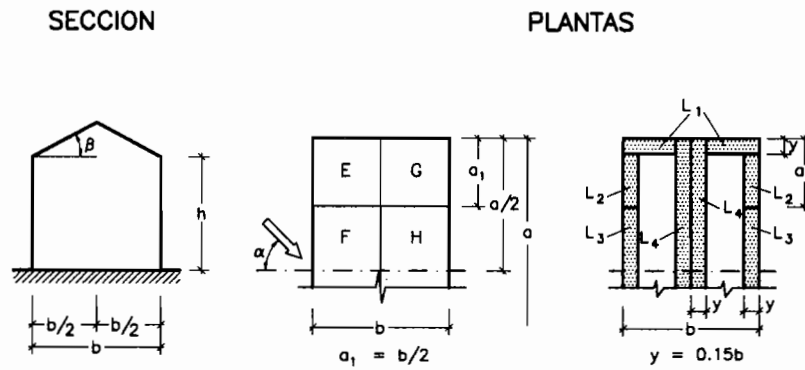
RELACIONES GEOMETRICAS DE LA CONSTRUCCION		PLANTA	DIRECCION DEL VIENTO (α)	C_{pe}				$C_{pe,l}$ 
$\frac{h}{b}$	$\frac{a}{b}$			A	B	C	D	
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0°	+0,7	-0,2	-0,5	-0,5	-0,8
			90°	-0,5	-0,5	+0,7	-0,2	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0°	+0,7	-0,25	-0,6	-0,6	-1,0
			90°	-0,5	-0,5	+0,7	-0,1	
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0°	+0,7	-0,25	-0,6	-0,6	-1,1
			90°	-0,6	-0,6	+0,7	-0,25	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0°	+0,7	-0,3	-0,7	-0,7	-1,1
			90°	-0,5	-0,5	+0,7	-0,1	
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 < \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$		0°	+0,8	-0,25	-0,8	-0,8	-1,2
			90°	-0,8	-0,8	+0,8	-0,25	
	$\frac{3}{2} < \frac{a}{b} \leq 4$		0°	+0,7	-0,4	-0,7	-0,7	-1,2
			90°	-0,5	-0,5	+0,8	-0,1	

LEYENDA: h: altura de la construcción.
a: mayor dimensión horizontal en planta de la construcción.
b: menor dimensión horizontal en planta de la construcción.

NOTA:  Zona afectada por presiones locales.

TABLA 3.2.2.2. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CUBIERTAS A DOS AGUAS DE CONSTRUCCIONES DE PLAN-TA RECTANGULAR

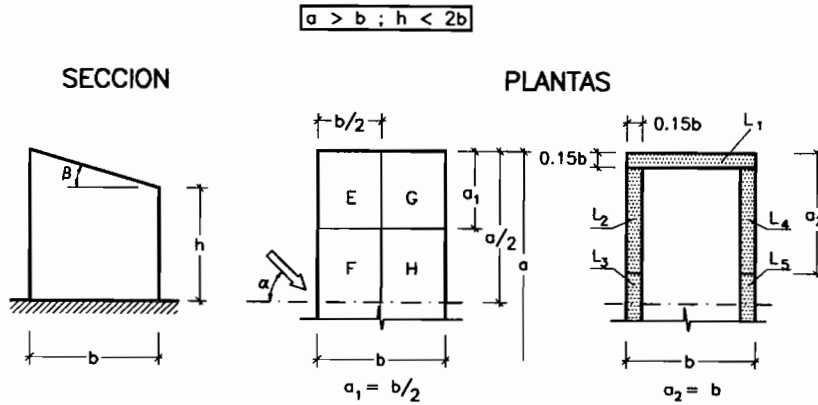
$a > b$



RELACIONES GEOMETRICAS DE LA CONSTRUCCION (h/b)	INCLINACION DE LA CUBIERTA (β)	C_{pe}				$C_{pe,l}$			
		DIRECCION DEL VIENTO							
		$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$		L_1	L_2	L_3	L_4
		E,F	G,H	E,G	F,H				
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,5	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	0°	-0,7	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	
	5°	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7				

- NOTAS:
- Para valores intermedios de β podrá interpolarse linealmente.
 - En aquellos casos en los que no se incluye el valor de $C_{pe,l}$ deberá aplicarse el valor correspondiente de C_{pe} .
 - Zona afectada por presiones locales.

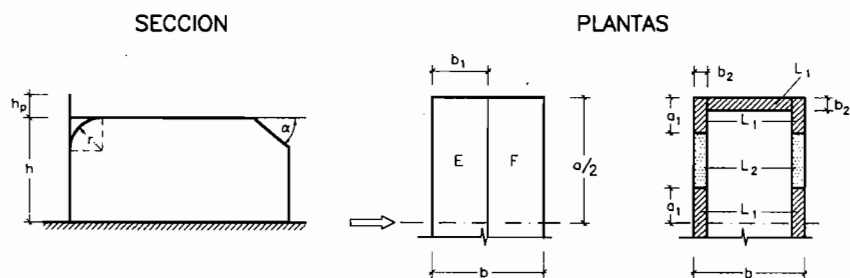
TABLA 3.2.2.2.3. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CUBIERTAS A UN AGUA DE CONSTRUCCIONES DE PLANTA RECTANGULAR



INCLINACION DE LA CUBIERTA (β)	C_{pe}										$C_{pe,l}$				
	DIRECCION DEL VIENTO														
	$\alpha=0^\circ$		$\alpha=45^\circ$		$\alpha=90^\circ$		$\alpha=135^\circ$		$\alpha=180^\circ$						
	E,F	G,H	E,F	G,H	E,G	F,H	E,F	G,H	E,F	G,H	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
5° a 10°	-1,0	-0,5	-1,0	-0,9	-1,0	-0,5	-0,9	-1,0	-0,5	-1,0	-2,0	-2,0	-1,5	-2,0	-1,5
15°	-0,9	-0,5	-1,0	-0,7	-1,0	-0,5	-0,6	-1,0	-0,3	-1,0	-2,0	-1,8	-0,9	-1,8	-1,4
20°	-0,8	-0,5	-1,0	-0,6	-0,9	-0,5	-0,5	-1,0	-0,2	-1,0	-2,0	-1,8		-1,8	-1,4
25°	-0,7	-0,5	-1,0	-0,6	-0,8	-0,5	-0,3	-0,9	-0,1	-0,9	-2,0	-1,8			
30°	-0,5	-0,5	-1,0	-0,6	-0,8	-0,5	-0,1	-0,6	0	-0,6	-2,0	-1,8			

- NOTAS:
- Para valores intermedios de β podrá interpolarse linealmente.
 - En aquellos casos en los que no se incluye el valor de $C_{pe,l}$ deberá aplicarse el valor correspondiente de C_{pe} .
 - Zona afectada por presiones locales.

TABLA 3.2.2.2.4. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CUBIERTAS PLANAS¹⁾ DE CONSTRUCCIONES DE PLANTA RECTANGULAR



$a < 2h$	$b_1 = 0.5a$	$b_2 = 0.1a$	$a_1 = 0.25a$
$a > 2h$	$b_1 = h$	$b_2 = 0.2h$	$a_1 = 0.5h$

TIPO DE ALERO		C_{pe}		$C_{pe,l}$	
		E	F	L_1	L_2
RECTO		-0,7	$\pm 0,2$	-2,5	-2,0
CON PRETIL	$h_p/h = 0,025$	-0,7	$\pm 0,2$	-2,2	-1,8
	$h_p/h = 0,05$	-0,7	$\pm 0,2$	-2,0	-1,6
	$h_p/h = 0,10$	-0,7	$\pm 0,2$	-1,8	-1,4
CURVO	$r/h = 0,05$	-0,4	$\pm 0,2$	-1,5	-1,8
	$r/h = 0,10$	-0,3	$\pm 0,2$	-1,2	-1,4
	$r/h = 0,20$	-0,3	$\pm 0,2$	-0,8	-0,8
EN MANSARDA	$\alpha = 30^\circ$	-0,3	$\pm 0,2$	-1,5	-1,5
	$\alpha = 45^\circ$	-0,4	$\pm 0,2$	-1,8	-1,9
	$\alpha = 60^\circ$	-0,5	$\pm 0,2$	-1,9	-1,9

NOTAS: 1) A los efectos de esta tabla se considerarán cubiertas planas las que tengan una pendiente en el interior del intervalo $-4^\circ \leq \beta \leq +4^\circ$.


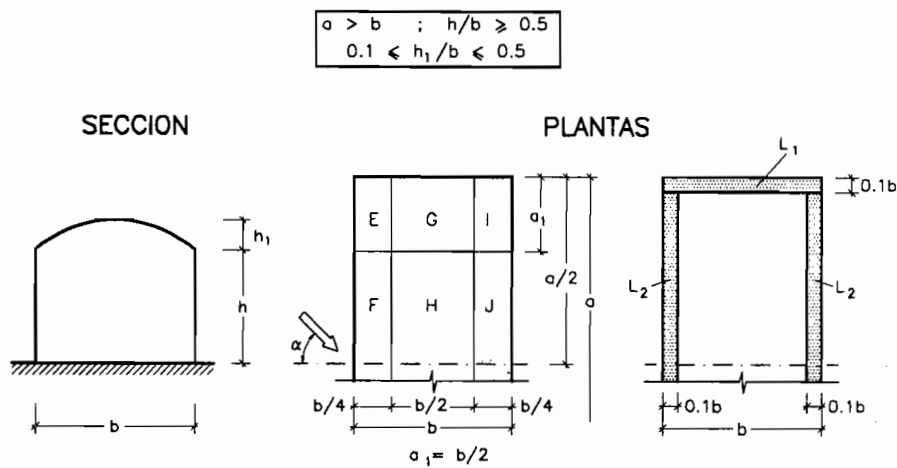
- Para cubiertas a un agua con una pendiente entre 4° y 5° los valores de los coeficientes eólicos podrán obtenerse por interpolación entre los correspondientes en esta tabla y los correspondientes a cubierta a un agua para $\beta=5^\circ$ (Tabla 3.2.2.2.3).
- Para valores intermedios de h_p/h y r/h en cubiertas con pretil o con alero curvo podrá interpolarse linealmente.
- Para valores intermedios entre $\alpha=30^\circ$ y 60° en cubierta plana con mansarda podrá interpolarse linealmente. Para valores de $\alpha > 60^\circ$ la interpolación se realizará entre los valores correspondientes a $\alpha=60^\circ$ y los correspondientes a alero recto.
- En el área F deberán considerarse ambos valores positivos y negativos.
- Sobre las mansardas serán de aplicación los coeficientes eólicos locales correspondientes a cubiertas a dos aguas (Tabla 3.2.2.2.2) en función del ángulo que forma la mansarda.
- Sobre el alero curvo serán de aplicación los coeficientes eólicos resultado de la interpolación lineal a lo largo de la curva entre los valores correspondientes a la cubierta y a la pared.
-  Zona afectada por presiones locales.

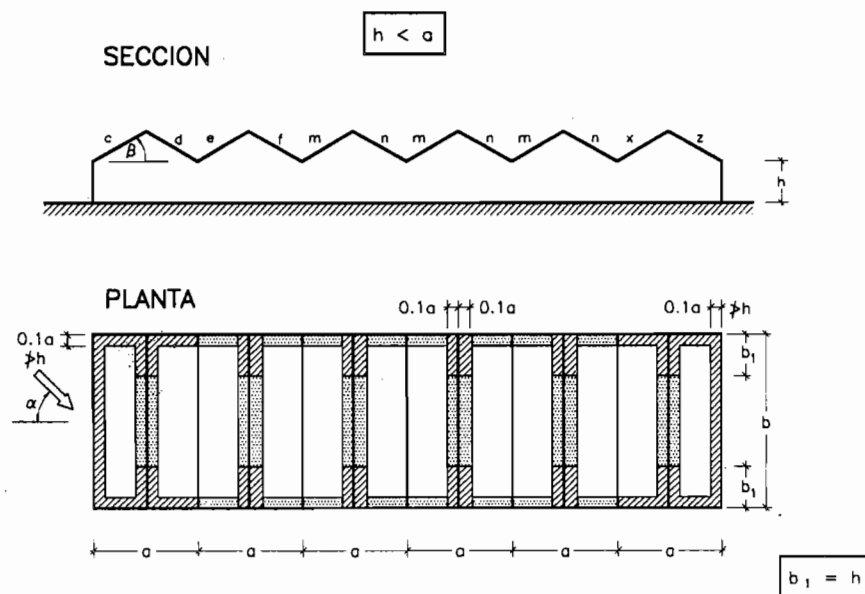
TABLA 3.2.2.5. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CUBIERTAS CILINDRICAS CON DIRECTRIZ CIRCULAR, ELIPTICA O PARABOLICA, DE CONSTRUCCIONES DE PLANTA RECTANGULAR



RELACIONES GEOMETRICAS DE LA CONSTRUCCION	C_{pe}					$C_{pe,l}$	
	DIRECCION DEL VIENTO						
	$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 90^\circ$			
	h_1/b	E,F	G,H	I,J	E,G,I	F,H,J	L_1
0,1	-0,9	-0,8	-0,5	-0,8	-0,6	-1,6	-1,8
0,2	-0,9 ó 0*	-0,9	-0,5	-0,8	-0,6	-1,6	-1,8
0,3	-0,3 ó +0,2*	-1,0	-0,5	-0,8	-0,6	-1,6	-0,6
0,4	+0,4	-1,1	-0,5	-0,8	-0,6	-1,6	
0,5	+0,7	-1,2	-0,5	-0,8	-0,6	-1,6	

- NOTAS: (*) Debe considerarse el valor más desfavorable.
- En aquellos casos en los que no se incluye el valor de $C_{pe,l}$ deberá aplicarse el valor correspondiente de C_{pe} .
 - Zona afectada por presiones locales.

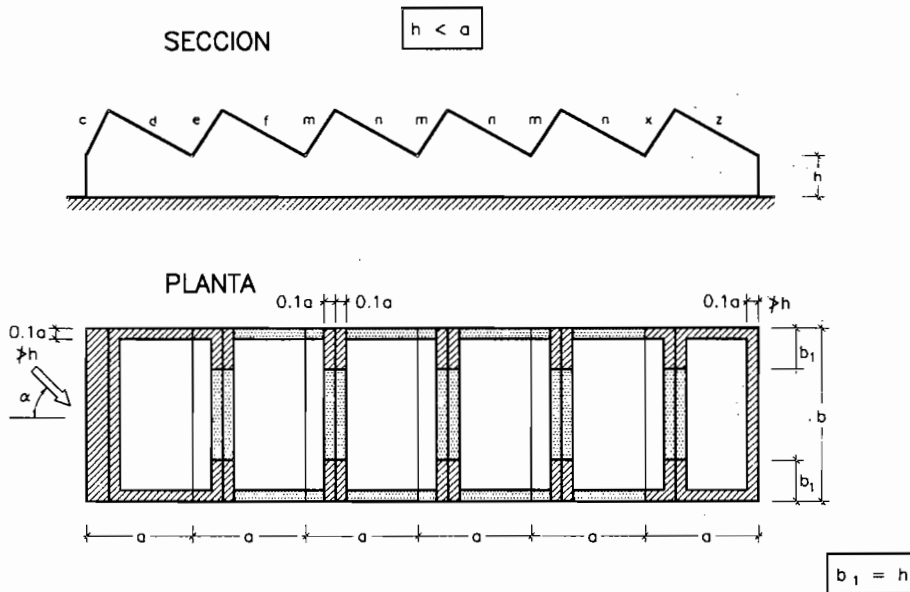
TABLA 3.2.2.2.6. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CUBIERTAS MULTIPLES A DOS AGUAS DE CONSTRUCCIONES DE PLANTA RECTANGULAR (todos los vanos iguales)



		C_{pe}										$C_{pe,l}$	
		DIRECCION DEL VIENTO ($\alpha = 0^\circ$)							DIRECCION DEL VIENTO ($\alpha = 90^\circ$)				
INCLINACION DE LAS CUBIERTAS (β)	APLICADO EN CADA VERTIENTE							APLICADO POR BANDAS ($\beta \leq 45^\circ$)			▨	□	
	c	d	e	f	m	n	x	z	b_1	b_2			b_3
5° a 10°	-1,1	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,8	-0,6	-0,2	-2,0	-1,5
20°	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,5					
30°	-0,2	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2	-0,3	-0,2	-0,5					
45°	+0,3	-0,6	-0,6	-0,4	-0,2	-0,4	-0,2	-0,5					

NOTAS: Zona afectada por presiones locales.

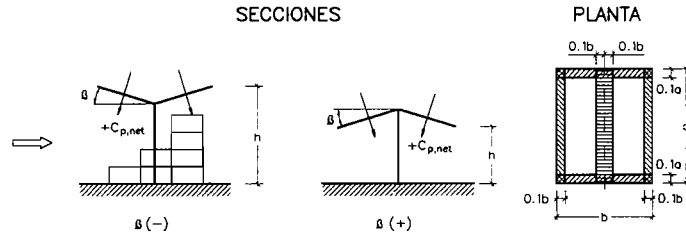
TABLA 3.2.2.2.7. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CUBIERTAS MÚLTIPLES EN DIENTES DE SIERRA DE CONSTRUCCIONES DE PLANTA RECTANGULAR (todos los vanos iguales)



C_{pe}											$C_{pe,l}$	
APLICADO EN CADA VERTIENTE								APLICADO POR BANDAS				
c	d	e	f	m	n	x	z	DIRECCION DEL VIENTO ($\alpha = 90^\circ$)				
DIRECCION DEL VIENTO ($\alpha = 0^\circ$)								b_1	b_2	b_3		
+0,6	-0,7	-0,7	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	-0,3	-0,8	-0,6	-0,2	-2,0	-1,5
DIRECCION DEL VIENTO ($\alpha = 180^\circ$)												
-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,6	-0,1					

NOTAS: Zona afectada por presiones locales.

TABLA 3.2.2.8. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION NETOS, $C_{p,net}$, PARA CUBIERTAS AISLADAS A DOS AGUAS EN CONSTRUCCIONES SIN PAREDES LATERALES PERMANENTES



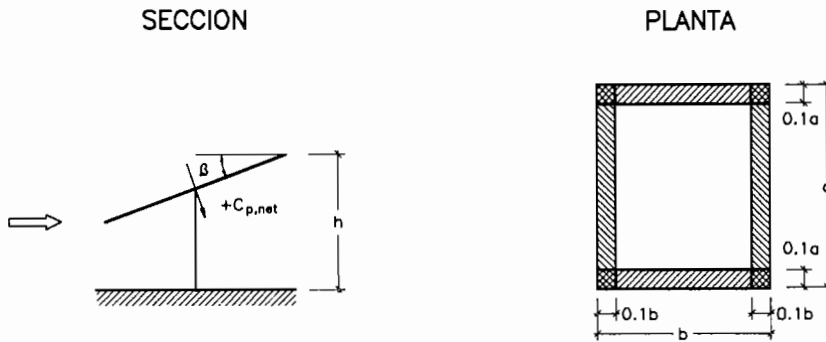
$$0.25 \leq \frac{h}{b} < 1 \quad 3b > a > b$$

	INCLINACION DE LA CUBIERTA (β)	FACTOR DE OPACIDAD ¹⁾ (ϕ)	COEFICIENTES EOLICOS NETOS MAXIMOS Y MINIMOS ²⁾				
			$C_{p,net}$	$C_{p,net}$: (presiones locales)			
VALORES MAXIMOS	-20°	TODOS LOS VALORES DE ϕ	+0,7	+0,8	+1,6	+0,6	+1,7
	-15°		+0,5	+0,6	+1,5	+0,7	+1,4
	-10°		+0,4	+0,6	+1,4	+0,8	+1,1
	-5°		+0,3	+0,5	+1,5	+0,8	+0,8
	+5°		+0,3	+0,6	+1,8	+1,3	+0,4
	+10°		+0,4	+0,7	+1,8	+1,4	+0,4
	+15°		+0,4	+0,9	+1,9	+1,4	+0,4
	+20°		+0,6	+1,1	+1,9	+1,5	+0,4
	+25°		+0,7	+1,2	+1,9	+1,6	+0,5
	+30°		+0,9	+1,3	+1,9	+1,6	+0,7
VALORES MINIMOS	-20°	$\phi=0$	-0,7	-0,9	-1,3	-1,6	-0,6
		$\phi=1$	-0,9	-1,2	-1,7	-1,9	-1,2
	-15°	$\phi=0$	-0,6	-0,8	-1,3	-1,6	-0,6
		$\phi=1$	-0,8	-1,1	-1,7	-1,9	-1,2
	-10°	$\phi=0$	-0,6	-0,8	-1,3	-1,5	-0,6
		$\phi=1$	-0,8	-1,1	-1,7	-1,9	-1,3
	-5°	$\phi=0$	-0,5	-0,7	-1,3	-1,6	-0,6
		$\phi=1$	-0,8	-1,5	-1,7	-1,9	-1,4
	+5°	$\phi=0$	-0,6	-0,6	-1,4	-1,4	-1,1
		$\phi=1$	-0,9	-1,3	-1,8	-1,8	-2,1
+10°	$\phi=0$	-0,7	-0,7	-1,5	-1,4	-1,4	
	$\phi=1$	-1,1	-1,4	-2,0	-1,8	-2,4	
+15°	$\phi=0$	-0,8	-0,9	-1,7	-1,4	-1,8	
	$\phi=1$	-1,2	-1,5	-2,2	-1,9	-2,8	
+20°	$\phi=0$	-0,9	-1,2	-1,8	-1,4	-2,0	
	$\phi=1$	-1,3	-1,7	-2,3	-1,9	-3,0	
+25°	$\phi=0$	-1,0	-1,4	-1,9	-1,4	-2,0	
	$\phi=1$	-1,4	-1,9	-2,4	-2,1	-3,0	
+30°	$\phi=0$	-1,0	-1,4	-1,9	-1,4	-2,0	
	$\phi=1$	-1,4	-2,1	-2,6	-2,2	-3,0	

NOTAS:

- 1) Se define como factor de opacidad (ϕ) al cociente entre el área de posible obstrucción bajo la cubierta (p.e. mercancías almacenadas) y el área bruta bajo la cubierta, ambas medidas en la dirección normal al viento. Por tanto, $\phi=0$ representa que bajo la cubierta no hay obstrucciones, y por el contrario $\phi=1$ representa una construcción completamente bloqueada hasta el alero. Valores de $C_{p,net}$ correspondientes a factores de opacidad intermedios podrán obtenerse por interpolación lineal entre los dos extremos señalados, siendo de aplicación únicamente para el área a barlovento de la posición de máximo bloqueo. A estos efectos, a sotavento de la posición de máximo bloqueo se considerará siempre $\phi=0$.
- 2) Cada vertiente de la cubierta deberá ser calculada para resistir las fuerzas resultantes usando indistintamente los coeficientes eólicos netos máximos y mínimos. A su vez, la totalidad de la cubierta deberá ser proyectada para resistir las fuerzas resultantes aplicando en una vertiente el coeficiente eólico máximo y en la otra el mínimo. A estos efectos se considerará que el centro de presiones coincide con el centro de cada vertiente.
- 3) Para el proyecto de este tipo de construcciones deberán generalmente tenerse en cuenta adicionalmente la fuerza total de presión asociada al área efectiva de la cubierta expuesta al viento, tomando $C_f=1.3$, (Ver apartado 3.2.2.3.1) y las fuerzas de rozamiento (Ver apartado 3.2.2.3.2).

TABLA 3.2.2.2.9. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION NETOS, $C_{p,net}$ PARA CUBIERTAS AISLADAS A UN AGUA EN CONSTRUCCIONES SIN PAREDES LATERALES PERMANENTES

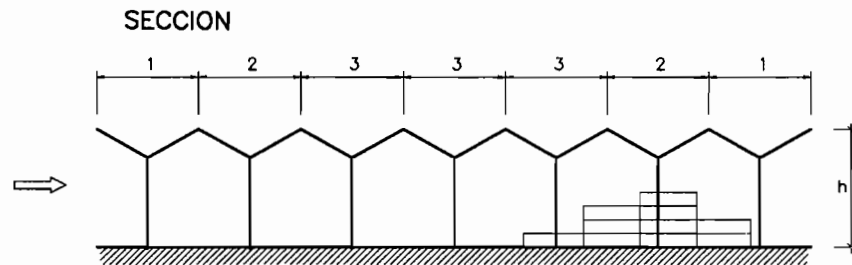


$$0.25 \leq \frac{h}{b} < 1 \quad 3b > a > b$$

	INCLINACION DE LA CUBIERTA (β)	FACTOR DE OPACIDAD (ϕ)	COEFICIENTES EOLICOS NETOS MAXIMOS Y MINIMOS			
			$C_{p,net}$	$C_{p,net,l}$ (presiones locales)		
VALORES MAXIMOS	0°	TODOS LOS VALORES DE ϕ	+0,2	+0,5	+1,8	+1,1
	5°		+0,4	+0,8	+2,1	+1,3
	10°		+0,5	+1,2	+2,4	+1,6
	15°		+0,7	+1,4	+2,7	+1,8
	20°		+0,8	+1,7	+2,9	+2,1
	25°		+1,0	+2,0	+3,1	+2,3
	30°		+1,2	+2,2	+3,2	+2,4
VALORES MINIMOS	0°	$\phi=0$	-0,5	-0,6	-1,3	-1,4
		$\phi=1$	-1,0	-1,2	-1,8	-1,9
	5°	$\phi=0$	-0,7	-1,1	-1,7	-1,8
		$\phi=1$	-1,1	-1,6	-2,2	-2,3
	10°	$\phi=0$	-0,9	-1,5	-2,0	-2,1
		$\phi=1$	-1,3	-2,1	-2,6	-2,7
	15°	$\phi=0$	-1,1	-1,8	-2,4	-2,5
		$\phi=1$	-1,4	-2,3	-2,9	-3,0
	20°	$\phi=0$	-1,3	-2,2	-2,8	-2,9
		$\phi=1$	-1,5	-2,6	-3,1	-3,2
	25°	$\phi=0$	-1,6	-2,6	-3,2	-3,2
		$\phi=1$	-1,7	-2,8	-3,5	-3,5
	30°	$\phi=0$	-1,8	-3,0	-3,8	-3,6
		$\phi=1$	-1,8	-3,0	-3,8	-3,6

NOTAS: Deberán tomarse en consideración las notas de la tabla 3.2.2.2.8. No obstante, en este caso deberá considerarse que el centro de presiones esta situado a una distancia igual a 0.3b medida desde el borde de barlovento de la construcción.

TABLA 3.2.2.2.10. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION NETOS, $C_{p,net}$, PARA CUBIERTAS AISLADAS MULTIPLES A DOS AGUAS EN CONSTRUCCIONES SIN PAREDES LATERALES PERMANENTES (todas las crujías iguales)



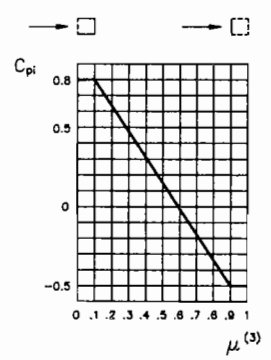
LAS FUERZAS DE PRESION SOBRE CADA UNA DE LAS VERTIENTES DE CUBIERTAS AISLADAS MULTIPLES SE DETERMINARAN APLICANDO LOS FACTORES SIGUIENTES A LOS COEFICIENTES $C_{p,net}$ CORRESPONDIENTES A CUBIERTAS AISLADAS A DOS AGUAS (Ver tabla 3.2.2.2.8).

CRUJIA	SITUACION	PARA TODOS LOS VALORES DE ϕ	
		Para coeficiente $C_{p,net}$ máximo	Para Coeficiente $C_{p,net}$ mínimo
1	Crujías de los extremos	1,00	0,81
2	Segunda crujía de cada extremo	0,87	0,64
3	Tercera crujía y siguientes	0,68	0,63

TABLA 3.2.2.2.11. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, $C_{p,e}$, PARA PAREDES LATERALES EN CONSTRUCCIONES DE PLAN-TA EN L, T e Y

PLANTA	$C_{p,e}$					
	A	B	C	D	E	F
	+0,8	-0,5	-1,3	+0,8	-0,6	+0,8
	+0,8	-0,5	-1,3	+0,8	+0,8	+0,8
	+0,9	-0,6	-1	-0,75	-0,75	—
	+0,8	—	0	-1	-0,5	—

TABLA 3.2.2.2.12. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION INTERIOR, C_{pi} , EN CONSTRUCCIONES NO ESTANCAS¹⁾ DE PLANTA RECTANGULAR NO COMPARTIMENTADAS INTERIORMENTE

TIPO DE CONSTRUCCION	$C_{p,i}$
1. CONSTRUCCIONES EN LAS QUE ES POCO PROBABLE LA EXISTENCIA DE ABERTURAS EN LAS PAREDES DURANTE LA ACTUACION DEL VIENTO DE PROYECTO	+0,2 ó -0,3 ²⁾
2. CONSTRUCCIONES CON ABERTURAS EN LAS PAREDES DURANTE LA ACTUACION DEL VIENTO DE PROYECTO	
2.1. CON ABERTURAS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS ENTRE TODAS LAS PAREDES	-0,30
2.2. CON ABERTURAS NO UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDAS ENTRE TODAS LAS PAREDES (<i>salvo tipo de construcción 2.3.</i>)	
2.3. CON ABERTURAS EN UNA SOLA PARED O, SI EXISTEN EN VARIAS, EN UNA SEAN PREDOMINANTES ⁴⁾	$0,75 \cdot C_{pe}$ siendo C_{pe} el coeficiente eólico exterior correspondiente a la pared que contiene las aberturas predominantes ⁵⁾

- NOTAS:**
- 1) Se considerará que una construcción es no estanca si alguna de las paredes exteriores de la misma tiene un porcentaje de aberturas superior al 5% respecto del área total de la misma, o si posee una permeabilidad equivalente al aire.
 - 2) Debe considerarse el valor que sea más desfavorable en cada caso.
 - 3) μ (*Factor de Abertura*) = $\frac{\sum \text{Area de las aberturas situadas en la pared de sotavento y en las paredes laterales paralelas a la dirección del viento}}{\sum \text{Area de las aberturas situadas en todas las paredes}}$.
 - 4) Se considerará que las aberturas en una pared son predominantes si la razón entre el área de aberturas en dicha pared y la suma de áreas del resto de aberturas es superior a 10.
 - 5) En aquellos casos en los que la abertura predominante esté situada en una zona afectada por un coeficiente eólico local $C_{pe,l}$, se considerará éste para la determinación del coeficiente eólico interior correspondiente.

TABLA 3.2.2.2.13. COEFICIENTES EOLICOS DE PRESION EXTERIOR, C_{pe} , PARA CONSTRUCCIONES CILINDRICAS (para viento actuando perpendicularmente al eje del cilindro)

θ	Superficie rugosa		Superficie lisa	
	$h/b=10$	$h/b \leq 2,5$	$h/b=10$	$h/b \leq 2,5$
0°	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
10°	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
20°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
30°	+0,4	+0,4	+0,35	+0,35
40°	0	0	0	0
50°	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
60°	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
70°	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
80°	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
90°	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
100°	-0,8	-0,65	-1,1	-0,85
120°	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
140°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
160°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
180°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

- NOTAS:**
- Los coeficientes incluidos en esta tabla son aplicables tanto a construcciones cilíndricas de eje vertical (p.e. silos o chimeneas) como de eje horizontal (p.e. tanques) siempre y cuando la distancia entre el suelo y la generatriz inferior del cilindro sea mayor que el diámetro del mismo.
 - Los coeficientes incluidos en esta tabla serán de aplicación únicamente para el caso de flujo de aire en régimen supercrítico [$\overline{V}_v \cdot b \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$]. Para las velocidades usuales de proyecto esta condición se cumple para construcciones con $b > 0.3 \text{ m}$.
 - Para valores intermedios de h/b podrá interpolarse linealmente.
 - En aquellos casos en que haya circulación de aire alrededor de los extremos de la construcción cilíndrica, deberá tomarse el valor de la esbeltez correspondiente a la mitad de h .
 - Si la construcción cilíndrica tiene alguno de sus extremos abiertos podrán considerarse los siguientes coeficientes eólicos de presión interior.

$$C_{pi}]_{h/b \geq 0.3} = -0.8$$

$$C_{pi}]_{h/b < 0.3} = -0.5$$

LEYENDA: h : Altura de la construcción cilíndrica vertical o longitud de la construcción cilíndrica horizontal.
 b : Diámetro de la construcción cilíndrica.

3.2.2.3. ACCION DEL VIENTO SOBRE UNA ESTRUCTURA. FUERZAS TOTALES

3.2.2.3.1. FUERZA TOTAL DE PRESION

La carga total del viento sobre un elemento estructural o sobre la totalidad de una estructura o instalación, resultante de las fuerzas de presión que actúan en sus diferentes elementos superficiales, también podrá calcularse mediante la formulación siguiente:

$$R_v = C_f \cdot q_{v,t}(z) \cdot A_e \quad [3.2.9]$$

siendo:

R_v : Fuerza resultante de presión.
La dirección de actuación de esta fuerza no tiene por qué coincidir con la dirección de actuación del viento. En cada caso deberá definirse el punto de aplicación y la dirección de la resultante. Usualmente estos parámetros se definen asociados al coeficiente eólico de fuerza C_f correspondiente, suministrándose conjuntamente con éste. (Ver tablas 3.2.2.3.2 a 3.2.2.3.7)

C_f : Factor de Forma o Coeficiente Eólico de Fuerza correspondiente a la estructura analizada (*Adimensional*). Este Coeficiente es variable en función de la dirección de actuación del viento. Habitualmente se dispone únicamente de los coeficientes correspondientes a viento actuando en las direcciones de los ejes principales del elemento o estructura analizada. No obstante, a partir de dichos coeficientes también podrá en algunos casos determinarse la fuerza resultante para viento actuando en cualquier dirección por medio de la formulación [3.2.10] a [3.2.13].

Los valores de los Coeficientes Eólicos de Fuerza podrán obtenerse de los Códigos y Normas vigentes, nacionales e internacionales, correspondientes a la acción del viento sobre las estructuras⁴⁴). No obstante, para los casos más generales que se presentan en las obras marítimas y portuarias estos coeficientes pueden obtenerse en las tablas 3.2.2.3.2. a 3.2.2.3.7. de esta Recomendación.

$q_{v,t}(z)$: Presión dinámica asociada a la velocidad del viento considerada para las condiciones específicas de proyecto [$V_{v,t}(z)$].

A_e : Area frontal efectiva asociada a C_f . Generalmente coincide con el área proyección de la estructura sobre un plano normal a la dirección de actuación del viento.

En aquellos casos en que sea necesario tomar en consideración la variación del perfil de velocidades del viento con la altura (Ver apartado 3.2.1.2.1), la fuerza resultante de presión podrá obtenerse como sumatorio de las resultantes parciales obtenidas al dividir el área frontal efectiva en tramos de presión dinámica constante. El coeficiente C_f a aplicar en cada tramo será el mismo y coincidente con el correspondiente a la estructura considerada globalmente.

Cuando únicamente se disponga de los factores de forma correspondientes a viento actuando en las direcciones de los ejes principales del elemento o estructura analizada, la determinación de la fuerza resultante para viento actuando en cualquier dirección α podrá llevarse a cabo por medio del siguiente método simplificado, siempre que la altura del elemento estructural analizado sea pequeña (≤ 30 m), la estructura o instalación sea predominantemente maciza, prácticamente simétrica aunque no con simetría radial, y esté situada en áreas de Categoría I de rugosidad superficial (Ver figura 3.2.2.3.1):

$$R_v = \sqrt{R_{vx}^2 + R_{vy}^2} \quad [3.2.10]$$

donde:

$$R_{vx} = (C_{fx} \cdot \cos\alpha) \cdot q_{v,t} \cdot A_{ex} \quad [3.2.11]$$

$$R_{vy} = (C_{fy} \cdot \sen\alpha) \cdot q_{v,t} \cdot A_{ey} \quad [3.2.12]$$

siendo:

R_v : Fuerza resultante de presión.

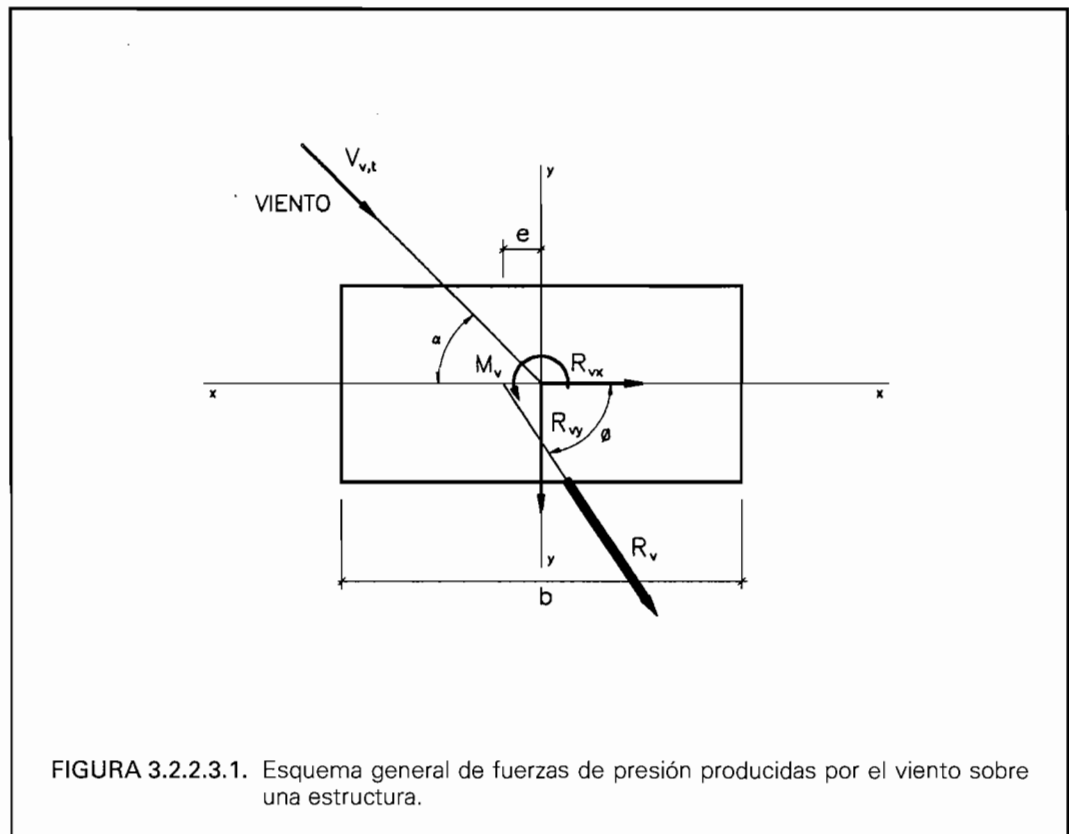
R_{vx} : Componente según la dirección del eje x de la fuerza resultante.

- R_{vy} : Componente según la dirección del eje y de la fuerza resultante.
- C_{fx} : Coeficiente de forma para el viento actuando en la dirección del eje x.
- C_{fy} : Coeficiente de forma para el viento actuando en la dirección del eje y.
- α : Angulo formado entre el eje x y la dirección de actuación del viento.
- $q_{v,t}$: Presión dinámica asociada a la velocidad del viento considerada para las condiciones específicas de proyecto.
- A_{ex} : Area efectiva de la estructura sobre un plano normal al eje x.
- A_{ey} : Area efectiva de la estructura sobre un plano normal al eje y.
- x: Eje principal mayor.

En estos casos, deberá considerarse que la fuerza resultante no pasa por el centro de gravedad de la estructura sino a una distancia (e) del mismo, dando lugar a un momento resultante de torsión (M_v) aplicado sobre el eje que pasa por el centro de gravedad de la estructura, de valor:

$$M_v = e \cdot R_v \quad [3.2.13]$$

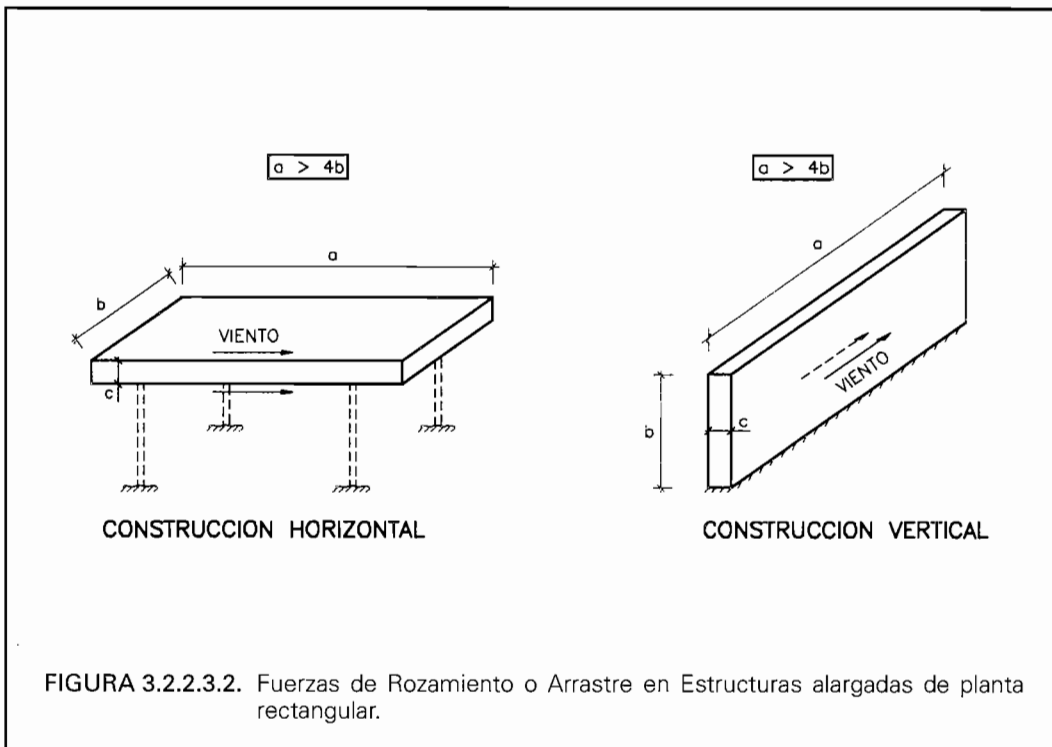
A estos efectos y a falta de otros datos, se recomienda considerar una excentricidad mínima $e = 0.1b$, siendo b la dimensión de la sección transversal de la estructura en la dirección del eje principal mayor.



3.2.2.3.2. FUERZA TOTAL DE ROZAMIENTO

En aquellos elementos estructurales o instalaciones con grandes superficies en la dirección de actuación del viento será necesario tomar en consideración la existencia de fuerzas de rozamiento o arrastre producidas por el viento (R_{vr}).

Estas fuerzas deberán tenerse en cuenta únicamente en construcciones horizontales y verticales alargadas en la dirección de actuación del viento, y especialmente en aquellas con alta capacidad de flexión en dicha dirección (p.e. construcciones sin paredes laterales permanentes: marquesinas, tinglados,...; plataformas sobre pilotes;...). A estos efectos, estructuras con planta rectangular se considerarán alargadas cuando $a/b > 4$, siendo (a) la dimensión de la estructura en la dirección del viento y (b) la mayor dimensión de la misma perpendicularmente a la dirección del viento. (Ver figura 3.2.2.3.2).



La carga total del viento sobre un elemento individual o sobre la totalidad de una estructura o instalación resultante de las fuerzas de rozamiento que actúan en sus diferentes elementos superficiales, podrá calcularse mediante la formulación siguiente:

$$R_{vr} = C_{fr} \cdot q_{v,t}(z) \cdot A_{er} \quad [3.2.14]$$

siendo:

R_{vr} : Fuerza resultante de Rozamiento o Arrastre.
La dirección de actuación de la fuerza coincide con la dirección de actuación del viento.

C_{fr} : Coeficiente Eólico de Rozamiento o Arrastre correspondiente a la estructura analizada (*Adimensional*).
Este coeficiente es función de la forma y de la rugosidad superficial de la estructura analizada.

Los valores de los Coeficientes Eólicos de Rozamiento podrán obtenerse de los Códigos y Normas vigentes, nacionales e internacionales, correspondientes a la acción del viento sobre las estructuras⁴⁴. Para estructuras planas de planta rectangular podrán utilizarse los coeficientes de la tabla 3.2.2.3.1.

$q_{v,t}(z)$: Presión dinámica asociada a la velocidad de viento considerada para las condiciones específicas de proyecto [$V_{v,t}(z)$].

A_{er} : Área efectiva de rozamiento de la estructura en la dirección de actuación del viento. Para estructuras planas exentas de planta rectangular se tomará (*Ver figura 3.2.2.3.2.*):

– En construcciones horizontales:

$$A_{er} = 2 \cdot b \cdot (a - 4b) + 2 \cdot c \cdot (a - 4b) \quad \neq 0 \quad [3.2.15]$$

– En construcciones verticales:

$$A_{er} = 2 \cdot b \cdot (a - 4b) + c \cdot (a - 4b) \quad \neq 0 \quad [3.2.16]$$

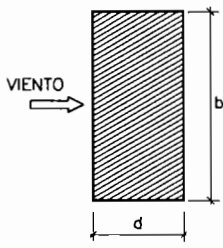
Para estructuras planas no exentas, las fórmulas [3.2.15] y [3.2.16] deberán adaptarse convenientemente tomando en consideración únicamente aquellas superficies expuestas a la acción del viento.

Cuando sea necesario tomar en consideración la variación del perfil de velocidades del viento con la altura o la estructura considerada tenga características superficiales no homogéneas, la fuerza resultante de rozamiento podrá obtenerse como sumatorio de las resultantes parciales obtenidas al dividir el área efectiva de rozamiento de la estructura en la dirección de actuación del viento en tramos de presión dinámica constante y/o características superficiales homogéneas. En cada tramo de características superficiales homogéneas será de aplicación el coeficiente C_{fr} que le corresponda.

TABLA 3.2.2.3.1. COEFICIENTES EOLICOS DE ROZAMIENTO O ARRASTRE PARA ESTRUCTURAS PLANAS DE PLANTA RECTANGULAR

<i>TIPO DE SUPERFICIE</i>	C_{fr}
– Superficies lisas sin nervaduras o ondulaciones en la dirección del viento (<i>p.e. acero u hormigón liso</i>)	0.01
– Superficies rugosas u onduladas en la dirección del viento (<i>p.e. hormigón rugoso u hormigón asfáltico</i>)	0.02
– Superficies muy rugosas o con grandes ondulaciones o nervaduras en la dirección del viento	0.04

TABLA 3.2.2.3.2. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA, C_f , PARA CONSTRUCCIONES MACIZAS PRISMATICAS DE SECCION RECTANGULAR UNIFORME Y EJE VERTICAL (viento actuando en la dirección de los ejes principales)

PLANTA	b/d	ESBELTEZ $\lambda = h/b$							
		$\leq 0,5$	1	2	4	6	10	20	∞
	1/4	0,70	0,70	0,75	0,75	0,75	0,80	0,90	1,20
	1/3	0,70	0,75	0,75	0,75	0,80	1,00	1,10	1,30
	1/2	0,75	0,75	0,80	0,85	0,90	1,20	1,30	1,60
	2/3	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,30	1,50	1,80
	1	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,20	1,40	2,10
	1,5	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,60	2,00	2,40
	2	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,60	2,00	2,30
	3	1,10	1,20	1,25	1,35	1,40	1,70	1,90	2,20
	4	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	2,10

NOTAS:

1. Se considerará que la fuerza de presión resultante tiene la dirección del viento.
2. La esbeltez λ o relación h/b se refiere a la cara de la construcción perpendicular a la dirección del viento.
3. Los coeficientes C_f incluidos en esta tabla son directamente aplicables para construcciones sobre el suelo o sobre otra construcción con una superficie suficientemente extensa que dé lugar a condiciones de contorno semejantes a las del suelo. Si la construcción está limitada superiormente por otra construcción de superficie suficientemente extensa (*p.e. plataforma elevada sobre pilares*) podrá aplicarse esta tabla tomándose como esbeltez λ la correspondiente a la mitad de la altura. Asimismo, si la construcción está confinada por dos construcciones de superficie suficientemente extensa deberá considerarse esbeltez ∞ .
4. Aunque esta tabla es para construcciones macizas, también es admisible su aplicación para construcciones abiertas superiormente (*p.e. chimeneas*) siempre que su esbeltez sea superior a 10.

LEYENDA:

b = Dimensión horizontal de la construcción normal a la dirección del viento.
d = Dimensión horizontal de la construcción medida en la dirección del viento.
h = Altura de la construcción.

TABLA 3.2.2.3.3. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA, C_f , PARA DIVERSAS CONSTRUCCIONES MACIZAS PRISMATICAS DE SECCION UNIFORME Y EJE VERTICAL


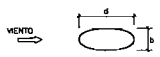
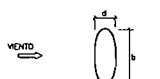
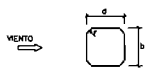
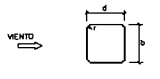
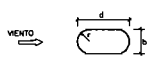
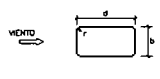
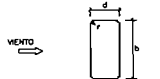
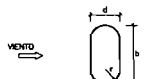









PLANTA		$\bar{V}_v \cdot b^{(3)}$ (m^2/s)	ESBELTEZ $\lambda = h/b^{(2)}$						
			$\leq 0,5$	1	2	5	10	20	∞
	CUALQUIER SUPERFICIE	< 6	0,70	0,70	0,70	0,8	0,9	1,0	1,2
	SUPERFICIE RUGOSA	≥ 6							
	SUPERFICIE LISA	≥ 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
	$b/d=1/2$	< 10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
		≥ 10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	$b/d=2$	< 8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,7
		≥ 8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
	$b/d=1$ $r/b=1/3$	< 4	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0
		≥ 4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
	$b/d=1$ $r/b=1/6$	< 10	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,3
		≥ 10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
	$b/d=1/2$ $r/b=1/2$	< 3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
		≥ 3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
	$b/d=1/2$ $r/b=1/6$	CUALQUIER VALOR	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
	$b/d=2$ $r/b=1/12$	CUALQUIER VALOR	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,5	1,9
	$b/d=2$ $r/b=1/4$	< 6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2	1,6
		≥ 6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6

TABLA 3.2.2.3.3. (Continuación)

PLANTA	$\bar{V}_v \cdot b^{(3)}$ (m ² /s)	ESBELTEZ $\lambda = h/b$ ⁽²⁾						
		$\leq 0,5$	1	2	5	10	20	∞
 $r/a=1/3$	<10	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5
	≥ 10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
 $r/a=1/12$	CUALQUIER VALOR	0,9	0,9	0,9	1,1	1,2	1,3	1,6
 $r/a=1/48$	CUALQUIER VALOR	0,9	0,9	0,9	1,1	1,2	1,3	1,6
 $r/b=1/4$	<11	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	≥ 11	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
 $r/b=1/12$	CUALQUIER VALOR	0,8	0,8	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4
 $r/b=1/48$	CUALQUIER VALOR	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
 $r/b=1/4$	<8	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
	≥ 8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
 $1/48 < r/b < 1/12$	CUALQUIER VALOR	1,2	1,2	1,2	1,4	1,6	1,7	2,1
 DODECAGONO	<12	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
	≥ 12	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,1

NOTAS:

1. Se considerará que la fuerza de viento resultante tiene la dirección del viento.
2. La esbeltez λ o relación h/b se refiere a la cara de la construcción perpendicular a la dirección del viento.
3. $Re = \bar{V}_v \cdot b/\nu$, siendo Re el número de Reynolds y ν la viscosidad cinemática del aire ($\nu = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Por tanto, el parámetro $\bar{V}_v \cdot b$ es un indicador de las características del flujo de aire a través de la construcción.
4. Para aquellos casos en que el valor de los coeficientes es función de las características del flujo de aire a través de la construcción, se recomienda tomar en consideración valores de \bar{V}_v menores que los correspondientes al Estado de Viento de proyecto, ya que eventualmente podrían dar lugar a fuerzas mayores.
5. Serán de aplicación a esta tabla las Notas 3 y 4 de la tabla 3.2.2.3.2.

LEYENDA:

h = Altura de la construcción.

TABLA 3.2.2.3.4. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA (C_{fx} y C_{fy}) PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CARAS PLANAS Y ESBELTEZ INFINITA ($\lambda=\infty$) (viento actuando perpendicularmente al eje longitudinal del elemento estructural)

α	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}
0°	+1,9	+0,95	+1,8	+1,8	+1,75	+0,1	+1,6	0	+2,0	0	+2,05	0
45°	+1,8	+0,8	+2,1	+1,8	+0,85	+0,85	+1,5	-0,1	+1,2	+0,9	+1,85	+0,6
90°	+2,0	+1,7	-1,9	-1,0	+0,1	+1,75	-0,95	+0,7	-1,6	+2,15	0	+0,6
135°	-1,8	-0,1	-2,0	+0,3	-0,75	+0,75	-0,5	+1,05	-1,1	+2,4	-1,6	+0,4
180°	-2,0	+0,1	-1,4	-1,4	-1,75	-0,1	-1,5	0	-1,7	$\pm 2,1$	-1,8	0

α	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}	C_{fx}	C_{fy}
0°	+1,4	0	+2,05	0	+1,6	0	+2,0	0	+2,1	0	+2,0	0
45°	+1,2	+1,6	+1,95	+0,6	+1,5	+1,5	+1,8	+0,1	+1,4	+0,7	+1,55	+1,55
90°	0	+2,2	+0,5	+0,9	0	+1,9	0	+0,1	0	+0,75	0	+2,0

LEYENDA:

R_{vx} : Componente según la dirección del eje x de la fuerza resultante de presión de viento. $R_{vx} = C_{fx} \cdot q \cdot l \cdot b$

R_{vy} : Componente según la dirección del eje y de la fuerza resultante de presión de viento. $R_{vy} = C_{fy} \cdot q \cdot l \cdot b$

l: Dimensión longitudinal del elemento estructural.

NOTAS:

- Las fuerzas R_{vx} y R_{vy} pueden considerarse uniformemente distribuidas a lo largo del eje longitudinal del elemento estructural.
- Los signos más o menos de los coeficientes eólicos de fuerza indican respectivamente que las fuerzas resultantes tienen igual sentido o sentido contrario que el indicado en las figuras.
- Para elementos estructurales de esbeltez finita podrán utilizarse los coeficientes eólicos de fuerza incluidos en esta tabla multiplicándolos por un factor de reducción k. El factor k puede obtenerse de la tabla adjunta para elementos estructurales de caras planas o de sección circular en función de la esbeltez $\lambda = l / b_{\alpha}$, siendo l la mayor dimensión de la superficie proyección de la estructura en un plano perpendicular a la dirección del viento, y b_{α} la menor dimensión de la misma superficie. Para aquellos elementos estructurales confinados por un plano en un extremo, a los efectos de la determinación de k se considerará que tienen una esbeltez doble. Por el contrario, si están confinados por planos en los dos extremos se considerará que tienen una esbeltez infinita.

$\lambda = l / b_{\alpha}$	k							
	2	5	10	20	40	50	100	∞
Elementos de Caras Planas	0.62	0.66	0.69	0.81	0.87	0.90	0.95	1.0
Elementos de Sección Circular (Flujo subcrítico) 45)	0.58	0.62	0.68	0.74	0.82	0.87	0.98	1.0
Elementos de Sección Circular (Flujo supercrítico) 45)	0.80	0.80	0.82	0.90	0.98	0.99	1.00	1.0

TABLA 3.2.2.3.5. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA C_f , PARA ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE SECCION CIRCULAR Y ESBELTEZ INFINITA ($\lambda=\infty$), DE SUPERFICIE LISA O DEBILMENTE RUGOSA¹⁾ (viento actuando perpendicularmente al eje longitudinal del elemento estructural)

CARACTERISTICAS DEL FLUJO DE AIRE		C_f
Flujo Subcrítico ⁴⁵⁾	$\bar{V}_v \cdot b < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ $Re < 4.1 \cdot 10^5$	1.2
Flujo Supercrítico ⁴⁵⁾	$6 \leq \bar{V}_v \cdot b < 12 \text{ m}^2/\text{s}$ $4.1 \cdot 10^5 \leq Re < 8.2 \cdot 10^5$	0.6
	$12 \leq \bar{V}_v \cdot b < 33 \text{ m}^2/\text{s}$ $8.2 \cdot 10^5 \leq Re < 22.6 \cdot 10^5$	0.7
	$\bar{V}_v \cdot b \geq 33 \text{ m}^2/\text{s}$ $Re \geq 22.6 \cdot 10^5$	0.8

LEYENDA:

b: Diámetro de la sección circular.

l: Dimensión longitudinal del elemento estructural.

\bar{V}_v : Velocidad media del viento considerada para las condiciones específicas de proyecto.

Re: Número de Reynolds ($Re = \bar{V}_v \cdot b / \nu$). En esta tabla se ha considerado la viscosidad cinemática del aire (ν) en condiciones estándar ($1.46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

NOTAS:

- La dimensión de la rugosidad no excede el 1% del diámetro (b).
 - Se considerará que la fuerza de viento resultante tiene la dirección del viento, pudiéndose considerar uniformemente distribuida a lo largo del eje longitudinal del elemento estructural.
 - Para elementos estructurales de esbeltez finita ($\lambda=l/b$) podrán utilizarse los coeficientes eólicos de fuerza incluidos en esta tabla multiplicándolos por un factor de reducción k. El factor k puede obtenerse en la tabla 3.2.2.3.4., siguiendo las condiciones de aplicación incluidas en la misma.
 - Se recomienda tomar en consideración valores de \bar{V}_v menores que los correspondientes al Estado de Viento de proyecto ya que eventualmente podrían dar lugar a fuerzas mayores.

(45) El flujo de aire puede caracterizarse por medio del número de Reynolds (Re), el cual se define tomando en consideración la velocidad media del viento (\bar{V}_v), la viscosidad cinemática del aire (ν) y el diámetro del elemento estructural analizado (b). Es decir: $Re = \bar{V}_v \cdot b / \nu$, pudiendo tomarse ν igual a $1.46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Cuando se prevean raciones ν podrá alcanzar un valor máximo de $1.75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

A los efectos de esta Recomendación se considerará flujo en régimen subcrítico si $Re < 4.1 \cdot 10^5$, y flujo en régimen supercrítico si $Re \geq 4.1 \cdot 10^5$.

TABLA 3.2.2.3.6. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA C_f , PARA TIRANTES, CABLES Y CABOS DE ESBELTEZ INFINITA ($\lambda=\infty$) (viento actuando perpendicularmente al plano longitudinal del elemento)

	CARACTERISTICAS DEL FLUJO DE AIRE	CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE	C_f
CABLES Y CABOS	$\bar{V}_v \cdot b < 0.6 \text{ m}^2/\text{s}$	Trenzados finos	1.20
		Trenzados gruesos	1.30
CABLES Y CABOS	$\bar{V}_v \cdot b \geq 0.6 \text{ m}^2/\text{s}$	Trenzados finos	0.90
		Trenzados gruesos	1.10
TIRANTES	$\bar{V}_v \cdot b < 6 \text{ m}^2/\text{s}$	Lisa	1.20
		Moderadamente rugosa	1.20
	$\bar{V}_v \cdot b \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	Lisa	0.50
		Moderadamente rugosa	0.70

LEYENDA:

b: Diámetro de la sección.

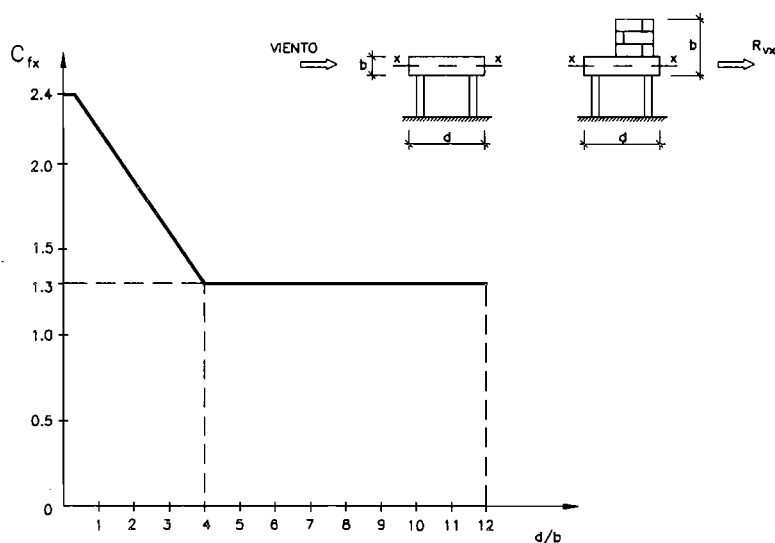
l: Dimensión longitudinal.

\bar{V}_v : Velocidad media del viento considerada para las condiciones específicas de proyecto.

NOTAS:

- Se considerará que la fuerza de viento resultante tienen la dirección del viento, distribuyéndose uniformemente a lo largo de la longitud del elemento.
- Para elementos estructurales de esbeltez finita ($\lambda=l/b$) podrán utilizarse los coeficientes eólicos de fuerza incluidos en esta tabla multiplicándolos por un factor de reducción k.
El factor k puede obtenerse en la tabla 3.2.2.3.4., siguiendo las condiciones de aplicación incluidas en la misma.
- Se recomienda tomar en consideración valores \bar{V}_v menores que los correspondientes al Estado de Viento de proyecto, ya que eventualmente podrían dar lugar a fuerzas mayores.

TABLA 3.2.2.3.7. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA (C_{fx}), PARA SUPERESTRUCTURAS DE PANTALANES, PLATAFORMAS, PUENTES Y DUQUES DE ALBA SOBRE PILAS O PILOTES, DE ESBELTEZ INFINITA ($\lambda=l/b=\infty$) (viento actuando perpendicularmente al eje longitudinal de la superestructura)



LEYENDA:

- R_{vx} : Componente en la dirección de actuación del viento de la fuerza resultante de presión de viento.
 $R_{vx} = C_{fx} \cdot q \cdot A_e$
- R_{vy} : Componente en la dirección del eje longitudinal de la estructura de la fuerza resultante de presión de viento. Simplificadamente podrá considerarse que esta fuerza tiene el siguiente valor:
 $R_{vy} = 0.25 \cdot R_{vx}$
- A_e : Área frontal efectiva. Coincidirá con el área proyección de la superestructura sobre el plano normal a la dirección de actuación del viento. Para su valoración se considerarán todos los elementos sólidos que forman parte de la misma como la plataforma de rodadura, las vigas, las defensas, etc.; incluyendo la superficie expuesta por el tráfico rodado, los equipos de manipulación de mercancías y las mercancías estacionadas. Para la determinación de la superficie expuesta por estos últimos elementos se atenderá a lo dispuesto en el apartado 3.2.2.7.
- l : Dimensión longitudinal de la superestructura.

NOTAS:

- Para superestructuras de esbeltez finita ($\lambda=l/b$) podrán utilizarse los coeficientes eólicos de fuerza incluidos en esta tabla multiplicándolos por un factor de reducción k . El factor k puede obtenerse en la tabla 3.2.2.3.4., siguiendo las condiciones de aplicación incluidas en la misma.

3.2.2.4. EFECTO DE OPACIDAD AL VIENTO

Cuando una construcción está formada por varios elementos estructurales individuales situados en un plano normal a la dirección del viento (*p.e. estructuras reticuladas planas o una alineación de pilares o pilotes*) deberá tomarse en consideración la existencia de un efecto de opacidad al viento, o de macización aparente de la construcción, que tiende a incrementar la fuerza resultante sobre cada elemento estructural individual respecto a la calculada según lo dispuesto en el apartado 3.2.2.3.1., y por tanto también la resultante sobre la totalidad de la construcción.

En este caso, la fuerza resultante sobre la totalidad de la construcción o instalación considerada podrá determinarse mediante la formulación siguiente:

$$R_{v,opac} = C_{fe} \cdot q_{v,t}(z) \cdot A_{opac} \cdot \phi = C_{fe} \cdot q_{v,t}(z) \cdot (\Sigma A_e) \quad [3.2.17]$$

siendo:

$R_{v,opac}$: Fuerza resultante de presión debido a la actuación del viento sobre la totalidad de la estructura, considerando la existencia de un efecto global de opacidad al viento. En el caso analizado de dirección de actuación del viento normal al plano en que se sitúan los elementos estructurales individuales, se considerará que la dirección de actuación de la fuerza coincide con la dirección de actuación del viento.

$q_{v,t}(z)$: Presión dinámica asociada a la velocidad de viento considerada para las condiciones específicas de proyecto $[V_{v,t}(z)]$.

A_{opac} : Área de toda la superficie (*maciza o no*) limitada por el contorno exterior de la estructura considerada, proyectada sobre un plano normal a la dirección de actuación del viento.

ΣA_e : Área efectiva total. Es decir, suma de las áreas efectivas, o áreas de las proyecciones de los elementos estructurales sobre un plano perpendicular a la dirección de actuación del viento, correspondientes a cada uno de los elementos estructurales individuales.

ϕ : Índice de Huecos o Factor de Opacidad, definido como cociente entre ΣA_e y A_{opac} . Es decir:

$$\phi = (\Sigma A_e) / A_{opac} \quad [3.2.18]$$

C_{fe} : Factor de Forma o Coeficiente Eólico de Fuerza Efectivo. En la tabla 3.2.2.4.1. se dan los coeficientes eólicos de fuerza efectivos para estructuras formadas por diversos elementos estructurales aislados del mismo tipo, en función del índice de huecos o factor de opacidad (ϕ). Se diferencian para elementos estructurales de superficies planas y para elementos de sección circular, tomando en consideración en este último caso las características del flujo de aire a través de la sección circular (*régimen laminar subcrítico o supercrítico*)⁽⁴⁵⁾.

Cuando la estructura esté formada por elementos estructurales de diversos tipos, es decir por elementos de superficies planas conjuntamente con elementos de sección circular de igual o diferente diámetro, o por elementos de sección circular con diámetros diferentes, la fuerza resultante sobre la totalidad de la estructura podrá obtenerse utilizando un coeficiente eólico de fuerza efectivo igual a:

$$C_{fe} = \frac{1}{\Sigma A_e} [C_{fe,plan} \cdot \Sigma A_{e,plan} + C_{fe,circ.subc} \cdot \Sigma A_{e,circ.subc} + C_{fe,circ.superc} \cdot \Sigma A_{e,circ.superc}] \quad [3.2.19]$$

siendo:

$C_{fe,plan}$: Coeficiente eólico de fuerza efectivo correspondiente a los elementos estructurales de superficies planas, obtenido de la tabla 3.2.2.4.1. tomando el índice de huecos de la estructura ϕ .

$$[\phi = \Sigma A_e / A_{opac} = (\Sigma A_{e,plan} + \Sigma A_{e,circ.subc} + \Sigma A_{e,circ.superc}) / A_{opac}]$$

$C_{fe,circ.subc}$: Coeficiente eólico de fuerza efectivo correspondiente a los elementos estructurales de sección circular en régimen de flujo subcrítico, obtenido de la tabla 3.2.2.4.1. tomando el índice de huecos de la estructura ϕ .

(45) El flujo de aire puede caracterizarse por medio del número de Reynolds (Re), el cual se define tomando en consideración la velocidad media del viento (V_v), la viscosidad cinemática del aire (ν) y el diámetro del elemento estructural analizado (b). Es decir: $Re = V_v \cdot b / \nu$, pudiendo tomarse ν igual a $1.46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Cuando se prevean rocesiones ν podrá alcanzar un valor máximo de $1.75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. A los efectos de esta Recomendación se considerará flujo en régimen subcrítico si $Re < 4.1 \cdot 10^5$, y flujo en régimen supercrítico si $Re \geq 4.1 \cdot 10^5$.

- $C_{fe,circ.superc}$: Coeficiente eólico de fuerza efectivo correspondiente a los elementos estructurales de sección circular en régimen de flujo supercrítico, obtenido de la tabla 3.2.2.4.1. tomando el índice de huecos de la estructura ϕ .
- $\Sigma A_{e,plan}$: Área efectiva correspondiente a los elementos estructurales de superficies planas.
- $\Sigma A_{e,circ.subc}$: Área efectiva correspondiente a los elementos estructurales de sección circular en régimen de flujo subcrítico.
- $\Sigma A_{e,circ.superc}$: Área efectiva correspondiente a los elementos estructurales de sección circular en régimen de flujo supercrítico.

La fuerza resultante sobre cada uno de los elementos estructurales aislados podrá obtenerse considerando el coeficiente eólico de fuerza efectivo correspondiente al tipo de elemento estructural analizado para el índice de huecos (ϕ) de la estructura (tabla 3.2.2.4.1), y el área efectiva del mismo.

Del análisis de la tabla 3.2.2.4.1. puede concluirse que, para factores de opacidad bajos, la fuerza resultante prácticamente es coincidente con la obtenida calculando separadamente las fuerzas que actúan sobre cada uno de los elementos estructurales supuestos aislados.

Dado que los coeficientes eólicos de fuerza efectivos para secciones circulares en régimen de flujo subcrítico son, en general, superiores a los correspondientes a régimen supercrítico, se recomienda tomar en consideración valores de la velocidad media del viento menores que los correspondientes al Estado de Viento de proyecto, ya que eventualmente al cambiar de régimen de flujo podrían dar lugar a fuerzas mayores.

En los casos en que el viento no actúe perpendicularmente al plano definido por los elementos estructurales individuales, la componente en la dirección perpendicular a dicho plano de la fuerza resultante de presión ($R_{vx,opac}$) podrá obtenerse estimativamente a partir de la fórmula [3.2.17] considerando un coeficiente eólico efectivo igual a $C_{fe} \cdot \cos\alpha$, siendo C_{fe} el coeficiente efectivo definido para el caso de incidencia perpendicular del viento y α el ángulo formado entre la dirección del viento y la normal al plano formado por la estructura analizada. Para la aplicación de la fórmula citada se considerarán las áreas efectivas sobre el plano perpendicular a la componente calculada.

TABLA 3.2.2.4.1. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA EFECTIVOS PARA CONSIDERAR EL EFECTO DE OPACIDAD AL VIENTO EN CONSTRUCCIONES FORMADAS POR ELEMENTOS ESTRUCTURALES INDIVIDUALES SITUADOS EN UN PLANO NORMAL A LA DIRECCION DEL VIENTO

ϕ	C_{fe}		
	Elementos de Superficies Planas	Elementos de Sección Circular	
		Flujo Subcrítico $Re < 4.1 \cdot 10^5$	Flujo Supercrítico $Re \geq 4.1 \cdot 10^5$
0.1	1.9	1.2	0.7
0.2	1.8	1.2	0.8
0.3	1.7	1.2	0.8
0.4	1.7	1.1	0.8
0.5	1.6	1.1	0.8
0.75	1.6	1.5	1.4
→ 1.0	2.0	2.0	2.0

NOTAS: Para valores intermedios de ϕ podrá interpolarse linealmente.

3.2.2.5. EFECTO SOMBRA

Cuando una estructura está formada por dos o más alineaciones, paralelas o no, de elementos estructurales (*p.e. estructuras reticuladas planas dispuestas paralelamente o vigas principales de plataformas y puentes*), situadas una detrás de otra en la dirección de actuación del viento, deberá tomarse en consideración la existencia de un efecto sombra en los elementos estructurales situados a sotavento. Este efecto tiende a reducir la resultante de la acción del viento sobre los elementos que se encuentran protegidos por la primera alineación.

Las fuerzas resultantes de presión del viento sobre la alineación situada a barlovento, y sobre aquellas partes de las siguientes alineaciones que no estén protegidas, se determinarán según los criterios definidos en los apartados 3.2.2.3.1. y 3.2.2.4. Por el contrario, la fuerza resultante de presión del viento sobre los elementos protegidos podrá determinarse multiplicando la fuerza obtenida considerando que no están protegidos por un factor de reducción η denominado Factor de Sombra. Es decir:

$$R_{v,som} = R_v \cdot \eta \quad \text{ó} \quad R_{v,som} = R_{v,opac} \cdot \eta \quad [3.2.20]$$

El factor de sombra a utilizar es función del índice de huecos o factor de opacidad (ϕ) de la alineación situada a barlovento, del tipo de elementos estructurales que forman dicha alineación y de la separación existente entre ambas alineaciones. Los valores del factor de sombra η pueden determinarse según los criterios definidos en la tabla 3.2.2.5.1.

Cuando existan más de dos alineaciones estructurales en la dirección de actuación del viento, con similar geometría y separación entre ellas, la fuerza resultante de presión del viento sobre la tercera alineación y siguientes se tomará igual a la determinada para la segunda alineación.

La acción del viento sobre la totalidad de la estructura o instalación se obtendrá como suma de las fuerzas resultantes correspondientes a cada una de las alineaciones.

3.2.2.6. CASO PARTICULAR: ESTRUCTURAS RETICULADAS EN FORMA DE TORRE

Para el caso particular de estructuras reticuladas en forma de torre de sección uniforme cuadrada o triangular equilátera se han desarrollado tablas específicas para la obtención del Coeficiente Eólico de Fuerza Efectivo correspondiente a estos tipos estructurales de uso muy generalizado, con el objeto de simplificar los cálculos necesarios para obtener la fuerza resultante de presión del viento sobre estas estructuras a partir de los apartados 3.2.2.4. y 3.2.2.5.

La carga total del viento sobre dicho tipo estructural, resultante de las fuerzas de presión que actúan en sus diferentes elementos superficiales, será una fuerza en la dirección de actuación del viento cuyo valor podrá obtenerse por medio de la formulación siguiente:

$$R_v = C_{fe} \cdot q_{v,t}(z) \cdot \Sigma A_e \quad [3.2.21]$$

siendo:

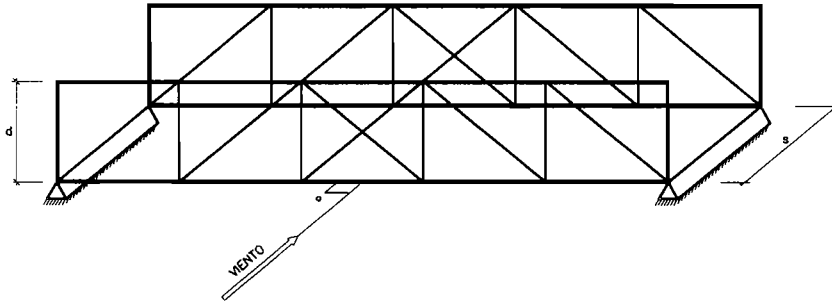
ΣA_e : Área efectiva total correspondiente a la cara sobre la que actúa el viento (*Ver apartado 3.2.2.4*).

C_{fe} : Coeficiente Eólico de Fuerza Efectivo.
En las tablas 3.2.2.6.1. a 3.2.2.6.3. se dan los coeficientes eólicos de fuerza efectivos para estructuras reticuladas en forma de torre de sección uniforme cuadrada o triangular equilátera, en función del índice de huecos y del tipo de elementos estructurales individuales que constituyen la cara sobre la que actúa el viento, así como de la dirección de actuación del viento.

3.2.2.7. ACCION DEL VIENTO SOBRE MERCANCIAS ESTACIONADAS, TRAFICO RODADO, Y EQUIPOS DE MANIPULACIÓN DE MERCANCIAS

Las cargas de viento sobre las mercancías estacionadas o almacenadas se determinarán aplicando los criterios generales recogidos en los apartados 3.2.2.2. a 3.2.2.5. Las superficies expuestas al viento se fijarán, teniendo en cuenta las condiciones de explotación establecidas en la zona considerada, para las alturas máximas previstas de las mercancías almacenadas o estacionadas. Si estas alturas no quedan definidas por la propia geometría del proyecto o por prescripciones específicas del Cliente o de la Autoridad Competente, se

TABLA 3.2.2.5.1. FACTOR DE SOMBRA, η , EN CONSTRUCCIONES FORMADAS POR ELEMENTOS ESTRUCTURALES SITUADOS EN DIFERENTES PLANOS EN LA DIRECCION DE ACTUACION DEL VIENTO



FACTOR DE ESPACIAMIENTO (μ)	VALORES DE η PARA UN INDICE DE HUECOS O FACTOR DE OPACIDAD AERODINAMICO β , DE:							
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	≥ 0.8
≤ 1.0	1.0	0.96	0.90	0.80	0.68	0.54	0.44	0.37
2.0	1.0	0.97	0.91	0.82	0.71	0.58	0.49	0.43
3.0	1.0	0.97	0.92	0.84	0.74	0.63	0.54	0.48
4.0	1.0	0.98	0.93	0.86	0.77	0.67	0.59	0.54
5.0	1.0	0.98	0.94	0.88	0.80	0.71	0.64	0.60
≥ 6.0	1.0	0.99	0.95	0.90	0.83	0.75	0.69	0.66

LEYENDA:

1. μ : Factor de Espaciamento.

Se define como cociente entre la distancia que separa los planos paralelos formados por los elementos estructurales pertenecientes a cada una de las alineaciones (s), y la menor dimensión de la superficie limitada por el contorno exterior de la estructura situada a barlovento, proyectada sobre un plano normal a la dirección de actuación del viento (d). Si la superficie envolvente no es rectangular deberá considerarse un contorno ficticio con esta forma que pueda admitirse como equivalente a los efectos de sombra de la estructura a sotavento ($\mu = s/d$).

En aquellos casos en que los planos formados por los elementos estructurales no sean paralelos o el viento no actúe perpendicularmente al plano definido por los elementos estructurales, el factor de espaciamento deberá ser calculado a partir del valor medio de la distancia que separa los planos en la dirección del viento.

2. β : Índice de Huecos o Factor de Opacidad Aerodinámico.

Se define mediante la siguiente formulación: $\beta = \xi \cdot \phi$



siendo:

ϕ = Factor de Opacidad correspondiente a la primera alineación o estructura situada a barlovento.

ξ = Constante, tomando los siguientes valores:


- 1.6 si la primera alineación está constituida únicamente por elementos estructurales de superficies planas.
- 1.2 si la primera alineación está constituida por elementos estructurales de sección circular en régimen de flujo subcrítico⁴⁵⁾, o por elementos de superficies planas conjuntamente con los de sección circular citados.
- 0.5 si la primera alineación está constituida por elementos estructurales de sección circular en régimen de flujo supercrítico⁴⁵⁾, o por elementos de superficies planas conjuntamente con los de sección circular citados.

TABLA 3.2.2.6.1. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA EFECTIVOS CORRESPONDIENTES A ESTRUCTURAS RETICULADAS EN FORMA DE TORRE DE SECCION UNIFORME CUADRADA O TRIANGULAR EQUILATERA, CONSTITUIDAS POR ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE SUPERFICIES PLANAS

ϕ	C_{fe}		
	TORRES DE SECCION CUADRADA 	TORRES DE SECCION TRIANGULAR 	
	Viento actuando en dirección normal a una cara	Viento actuando en el plano bisector del diedro entre dos caras	Viento actuando en cualquier dirección
0,1	3,8	4,6	3,1
0,2	3,3	4,0	2,7
0,3	2,8	3,4	2,3
0,4	2,3	2,8	1,9
0,5	2,1	2,5	1,5
0,6	1,9	2,5	1,5
0,7	1,8	2,6	1,5
0,8	1,7	2,7	1,5
0,9	1,9	2,9	1,9
→ 1,0	2,0	3,1	2,0


NOTAS: Para valores intermedios de ϕ podrá interpolarse linealmente.

TABLA 3.2.2.6.2. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA EFECTIVOS CORRESPONDIENTES A ESTRUCTURAS RETICULADAS EN FORMA DE TORRE DE SECCION UNIFORME CUADRADA, CONSTITUIDAS POR ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE SECCION CIRCULAR

ϕ	C_{fe} 			
	Todos los elementos estructurales en régimen subcrítico: $\bar{V}_v \cdot b < 6 \text{ m}^2/\text{s}$		Todos los elementos estructurales en régimen supercrítico: $\bar{V}_v \cdot b \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	
	Viento actuando en dirección normal a una cara	Viento actuando en el plano bisector del diedro entre dos caras	Viento actuando en dirección normal a una cara	Viento actuando en el plano bisector del diedro entre dos caras
0,05	2,4	2,5	1,1	1,2
0,1	2,2	2,3	1,2	1,3
0,2	1,9	2,1	1,3	1,6
0,3	1,7	1,9	1,4	1,6
0,4	1,6	1,9	1,4	1,6
0,5	1,4	1,9	1,4	1,6

NOTAS: – b: Diámetro de cada elemento estructural del que se compone la torre.
 – Para valores intermedios de ϕ podrá interpolarse linealmente.
 – En el caso de torres constituidas por elementos estructurales de diversos tipos podrá estimarse un coeficiente eólico efectivo utilizando un procedimiento equivalente al definido en la fórmula [3.2.19] del apartado 3.2.2.4.

TABLA 3.2.2.6.3. COEFICIENTES EOLICOS DE FUERZA EFECTIVOS CORRESPONDIENTES A ESTRUCTURAS RETICULADAS EN FORMA DE TORRE DE SECCION UNIFORME TRIANGULAR EQUILATERA, CONSTITUIDAS POR ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE SECCION CIRCULAR

ϕ	C_{fe} 	
	<i>Todos los elementos estructurales en régimen subcrítico:</i> $\bar{V}_v \cdot b < 6 \text{ m}^2/\text{s}$	<i>Todos los elementos estructurales en régimen supercrítico:</i> $\bar{V}_v \cdot b \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$
	<i>Viento actuando en cualquier dirección</i>	<i>Viento actuando en cualquier dirección</i>
0,05	1,8	0,8
0,1	1,7	0,8
0,2	1,6	1,1
0,3	1,5	1,1
0,4	1,5	1,1
0,5	1,4	1,2

NOTAS: – b: Diámetro de cada elemento estructural del que se compone la torre.
 – Para valores intermedios de ϕ podrá interpolarse linealmente.
 – En el caso de torres constituidas por elementos estructurales de diversos tipos podrá estimarse un coeficiente eólico efectivo utilizando un procedimiento equivalente al definido en la fórmula [3.2.19] del apartado 3.2.2.4.

tomarán los valores usuales de las mismas en explanadas exteriores indicados en la tabla 3.4.2.3.1.2.⁴⁶⁾ de la ROM 0.2-90. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias.

En general, no se considerarán específicamente cargas producidas por el viento sobre tráfico rodado convencional. Esto es debido a que los Códigos y Normas de Acciones que definen sobrecargas de tráfico rodado convencional ⁴⁷⁾ suelen indicar que las mismas cubren ampliamente las variaciones inducidas por el viento en condiciones normales de operación. Asimismo no se considera la hipótesis de viento en condiciones climáticas extremas al suponerse la retirada del tráfico rodado convencional una vez superadas las condiciones límite de operación.

Por el contrario, se tomarán en consideración las cargas de viento sobre tráfico ferroviario tanto en condiciones normales de operación como en condiciones climáticas extremas. La determinación de las mismas se llevará a cabo aplicando los criterios generales recogidos en los apartados 3.2.2.2. a 3.2.2.5., considerando que la sección real del tren equivale, en la longitud correspondiente a tramo cargado, a un rectángulo de 3.5 m de altura sobre el nivel superior del carril por 3.0 metros de ancho. En ausencia de criterios específicos, el viento límite de operatividad para estos casos se tomará coincidente con el fijado para los equipos de manipulación de mercancías ⁴⁸⁾.

La determinación de cargas de viento sobre equipos de manipulación de mercancías (p.e. grúas pórtico sobre carriles, carretillas portacontenedores, o grúas automóviles) se realizará aplicando los criterios generales recogidos en los apartados 3.2.2.2. a 3.2.2.5. de esta Recomendación a cada uno de los elementos estructurales que los componen, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- (46) TABLA 3.4.2.3.1.2. Alturas máximas usuales de almacenamiento o estacionamiento de mercancías en áreas portuarias.
- (47) Ver Apartado 3.4.2.3.3. Sobrecargas de Tráfico de la ROM 0.2-90, y la Instrucción Relativa a las Acciones a Considerar en el Proyecto de Puentes de Carretera/1972.
- (48) Ver TABLA 3.2.1.2.2. Velocidades de viento límite de operatividad usuales en instalaciones y estructuras portuarias no considerando diferenciación direccional.

- En equipos fijos o de rodadura restringida (*equipos sobre carriles o sobre bandas de rodadura*), se considerará que una vez superadas las condiciones de viento límite de operatividad⁴⁸⁾ el equipo paraliza sus actividades adoptando la posición replegada de menor superficie expuesta a la acción del viento.
- En equipos sin movilidad restringida (*p.e. equipos sobre neumáticos*), se considerará que al alcanzarse las condiciones de viento límite de operatividad⁴⁸⁾ los equipos se resguardan en zonas protegidas o auxiliares, no considerándose la hipótesis de viento en condiciones climáticas extremas.

En los equipos con cargas suspendidas o izadas se considerará que, en condiciones normales de operación, el equipo soporta a efectos del cálculo de la acción del viento una carga prismática que presenta una superficie expuesta de 1m²/t para valores de carga inferiores a 5 t, 0.5 m²/t para valores de carga entre 5 y 25 t, y de 15 m² para cargas superiores, salvo que las condiciones de explotación o el Cliente indiquen expresamente otra cosa. Para el caso particular de manipulación de contenedores se considerará una superficie expuesta de 30 m². Para estos casos deberá tomarse un coeficiente eólico de fuerza, C_f, igual a 1.

Al igual que lo señalado para tráfico rodado convencional, en general podrán desprejarse las cargas de viento en condiciones normales de operación transmitidas por equipos de manipulación de mercancías de movilidad no restringida, debido a que estas cargas no son significativas con respecto a las acciones horizontales producidas por la consideración de efectos dinámicos⁴⁹⁾.

Las cargas debidas al viento transmitidas por los equipos de manipulación de mercancías de movilidad restringida más usuales en las zonas portuarias (*grúas pórtico y grúas portacontenedores*) pueden obtenerse en las tablas 3.4.2.3.2.1, 3.4.2.3.2.2. y 3.4.2.3.2.5. de la ROM 0.2-90. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias, tanto para condiciones normales de operación como para condiciones climáticas extremas.

3.2.2.8. ACCION DEL VIENTO SOBRE UN FLOTADOR AMARRADO O FONDEADO. FUERZAS DE ARRASTRE

La carga total de arrastre resultante de la actuación del viento sobre un flotador o elemento estructural flotante (*buque, barcaza, boya, pantalán flotante, dique flotante, ...*) amarrado o fondeado podrá calcularse de forma general mediante la formulación de Hughes:

$$R_{vt} = \frac{(C_{vx} \cdot \cos^2 \alpha \cdot A_{ex} + C_{vy} \cdot \sin^2 \alpha \cdot A_{ey})}{\cos(\phi - \alpha)} \cdot q_{vt}(z) \quad [3.2.22]$$

siendo:

- R_{vt}: Fuerza total de arrastre resultante de la acción del viento sobre el flotador (*incluye conjuntamente efectos de presión y de rozamiento*).
En cada caso deberá determinarse el punto de aplicación y dirección de la fuerza resultante. Estos parámetros se definirán mediante una excentricidad (*e*) respecto al centro de gravedad del flotador y el ángulo que forma la resultante con el eje longitudinal del mismo (*x-x*) (*φ*). (*Ver figura 3.2.2.8.1*).
Con carácter general y a falta de datos o estudios específicos, para flotadores prácticamente simétricos aunque no con simetría radial (*p.e. pontona o dique flotante*) podrá considerarse una excentricidad respecto a su centro de gravedad en la dirección del eje longitudinal del orden de 0.1·*b*, siendo *b* la dimensión de la sección longitudinal del flotador en la dirección de dicho eje.
- C_{vx}: Factor de Arrastre para el viento actuando en la dirección del eje x (*eje longitudinal del flotador*).
- C_{vy}: Factor de Arrastre para el viento actuando en la dirección del eje y (*eje transversal del flotador*).
- α: Angulo formado entre el eje longitudinal del flotador y la dirección de actuación del viento.
- A_{ex}: Area expuesta al viento de la proyección del flotador sobre un plano normal al eje x, incluyendo obra muerta y superestructura (*area de la proyección transversal por encima del nivel del agua*). A los efectos de la determinación de este área se considerará situación de calma, despreciándose los efectos sobre la misma de los posibles

(49) Ver Apartado 3.4.2.3.2. Sobrecargas de equipos e instalaciones de manipulación de mercancías de la ROM 0.2-90.

movimientos del flotador debidos a la acción conjunta de todas las fuerzas exteriores de actuación simultánea compatible (*viento, oleaje y corrientes*) sobre el mismo.

A_{ey} : Área expuesta al viento de la proyección del flotador sobre un plano normal al eje y , incluyendo obra muerta y superestructura (*area de la proyección longitudinal por encima del nivel del agua*). A los efectos de la determinación de este área se considerará situación de calma.

ϕ : Angulo formado entre el eje longitudinal del flotador y la dirección de actuación de la fuerza. Podrá aproximarse mediante la formulación siguiente:

$$\operatorname{tg} \phi = [A_{ey}/A_{ex}] \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad [3.2.23]$$

$q_{v,t}$: Presión dinámica asociada a la velocidad de viento considerada para las condiciones específicas de proyecto $[V_{v,t}(z)]^{50}$.
Para el cálculo de $q_{v,t}$ se valorará la posibilidad de roces según los criterios expuestos en el apartado 3.2.2.1. Presión Dinámica del Viento.

3.2.2.8.1. ACCION DEL VIENTO SOBRE UN BUQUE

La magnitud de los coeficientes C_{vx} y C_{vy} para buques es muy variable en función de las características y forma del mismo por encima del nivel del agua, y de su estado de carga. Para buques aislados, como primera aproximación podrán tomarse los siguientes valores medios:

$C_{vx} = 0.80$ para viento de proa ($\alpha = 0^\circ$)
 $= 1.00$ para viento de popa ($\alpha = 180^\circ$)

$C_{vy} = 1.25$ para viento transversal ($\alpha = 90^\circ$)

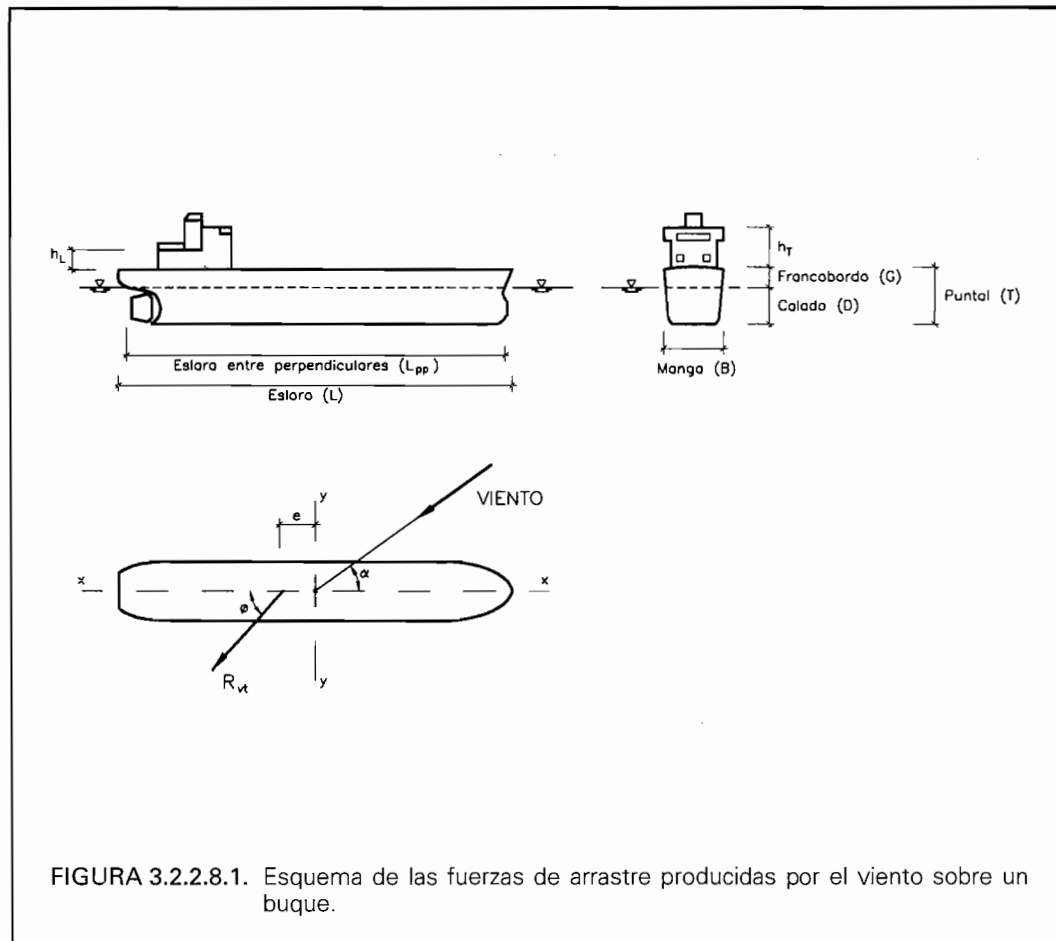


FIGURA 3.2.2.8.1. Esquema de las fuerzas de arrastre producidas por el viento sobre un buque.

(50) Ver Apartado 3.2.1.2. VELOCIDAD DEL VIENTO DE PROYECTO.

No obstante, si no se dispone de una información más precisa de los Factores de Arrastre para los distintos tipos de buques y estados de carga, para la determinación de la fuerza total de arrastre resultante de la actuación del viento sobre un buque amarrado podrá admitirse la siguiente simplificación de la ecuación de Hughes del lado de la seguridad:

$$R_{vt} = C_v [\cos^2 \alpha \cdot A_{ex} + \sin^2 \alpha \cdot A_{ey}] \cdot q_{v,t}(z) \quad [3.2.24]$$

tomando $C_v = 1.3$ para cualquier forma del buque y dirección de actuación del viento. Para barcasas y gabarras se tomará $C_v = 1.0$.

La magnitud de la superficie del buque expuesta a la acción del viento es asimismo muy variable en función del tipo de buque y de su estado de carga. A falta de valores conocidos, las áreas transversales y longitudinales podrán aproximarse mediante las expresiones siguientes (Ver figura 3.2.2.8.1):

$$A_{ex} = B \cdot (G + h_T) \quad [3.2.25]$$

$$A_{ey} = L_{pp} \cdot (G + h_L) \quad [3.2.26]$$

siendo:

B: Manga del buque.

G: Francobordo del buque (*Puntal-Calado*).

L_{pp} : Eslora entre perpendiculares.

h_T : Altura media de la superficie de la superestructura del buque por encima de la cubierta, proyectada sobre un plano normal al eje longitudinal del buque.

h_L : Altura media de la superficie de la superestructura del buque por encima de la cubierta, proyectada sobre un plano paralelo al plano longitudinal del buque.

Los valores usuales de los parámetros citados para los diferentes tipos de buques, tanto a plena carga como en lastre o en carga parcial, pueden ser obtenidos a partir de las tablas 3.4.2.3.5.1. Dimensiones Medias de los Buques a plena carga, y 3.4.2.3.5.9. Esfuerzos resultantes de las Presiones del Viento sobre los Buques, de la ROM 0.2-90. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias.

El punto de aplicación de la fuerza total de arrastre resultante de la acción del viento se situará en el eje longitudinal del buque, con una excentricidad respecto del centro de gravedad del mismo igual a:

$$e = K_e \cdot L \quad [3.2.27]$$

siendo:

L: Eslora del Buque.

K_e : Coeficiente de Excentricidad (*adimensional*).

A falta de datos específicos, los valores del coeficiente de excentricidad podrán aproximarse a partir de la tabla 3.2.2.8.1., en función de la distribución de la superestructura en el buque, para diferentes direcciones de actuación del viento (α) y estados de carga.

Cuando dos buques estén amarrados simultáneamente a ambos lados de una obra de atraque (*p.e. espigón o pantalán*), la fuerza de arrastre resultante de la actuación de viento transversal sobre el buque a resguardo podrá aproximarse mediante la aplicación del efecto sombra definido en el apartado 3.2.2.5. de esta Recomendación. A estos efectos, para la definición del índice de espaciamento (μ) se tomará $d = G + h_L$. Asimismo se tomará un índice de huecos aerodinámico $\beta = 1.6$. Simplificadamente, si los dos buques son iguales o de características similares y están amarrados a ambos lados de una obra de atraque de ancho menor o igual a 30 metros, la fuerza de arrastre resultante de la actuación de viento transversal sobre el buque a resguardo podrá aproximarse del lado de la seguridad al 50 % de la obtenida para el buque expuesto.

Asimismo, podrá admitirse que la fuerza de arrastre resultante de la actuación de viento transversal ($\alpha = 90^\circ$) sobre n buques de características similares abarloados es igual a $(1+n/10) \cdot R_{vt}$, siendo R_{vt} la resultante sobre el buque aislado.

TABLA 3.2.2.8.1. VALORES DEL COEFICIENTE DE EXCENTRICIDAD (K_e) PARA LA DETERMINACION DEL PUNTO DE APLICACION DE LA FUERZA TOTAL DE ARRASTRE RESULTANTE DE LA ACCION DEL VIENTO SOBRE UN BUQUE

<i>BUQUES CON SUPERESTRUCTURA CENTRADA</i>		
α (en °)	K_e	
	<i>En Lastre</i>	<i>A Plena Carga</i>
0	0	0
30	0.15	0.10
60	0.05	0.03
90	-0.02	-0.02
120	-0.10	-0.10
150	-0.20	-0.20
180	0	0

<i>BUQUES CON SUPERESTRUCTURA A POPA</i>		
α (en °)	K_e	
	<i>En Lastre</i>	<i>A Plena Carga</i>
0	0	0
30	0.16	-0.10
60	0.05	-0.12
90	-0.04	-0.16
120	-0.18	-0.27
150	-0.33	-0.37
180	0	0

3.2.2.8.2. ACCION DEL VIENTO SOBRE UNA ESTRUCTURA FLOTANTE PRISMÁTICA

A falta de datos específicos, para estructuras flotantes prismáticas prácticamente simétricas aunque no con simetría radial (*pontonas, monoboyas, diques de abrigo, cajoneros o diques secos flotantes. Ver figura 3.2.2.8.2*) podrán tomarse como Factores de Arrastre (C_{vx} y C_{vy}) los Coeficientes Eólicos de Fuerza incluidos en la tabla 3.2.2.3.2., considerando las dimensiones geométricas correspondientes a la zona no sumergida.

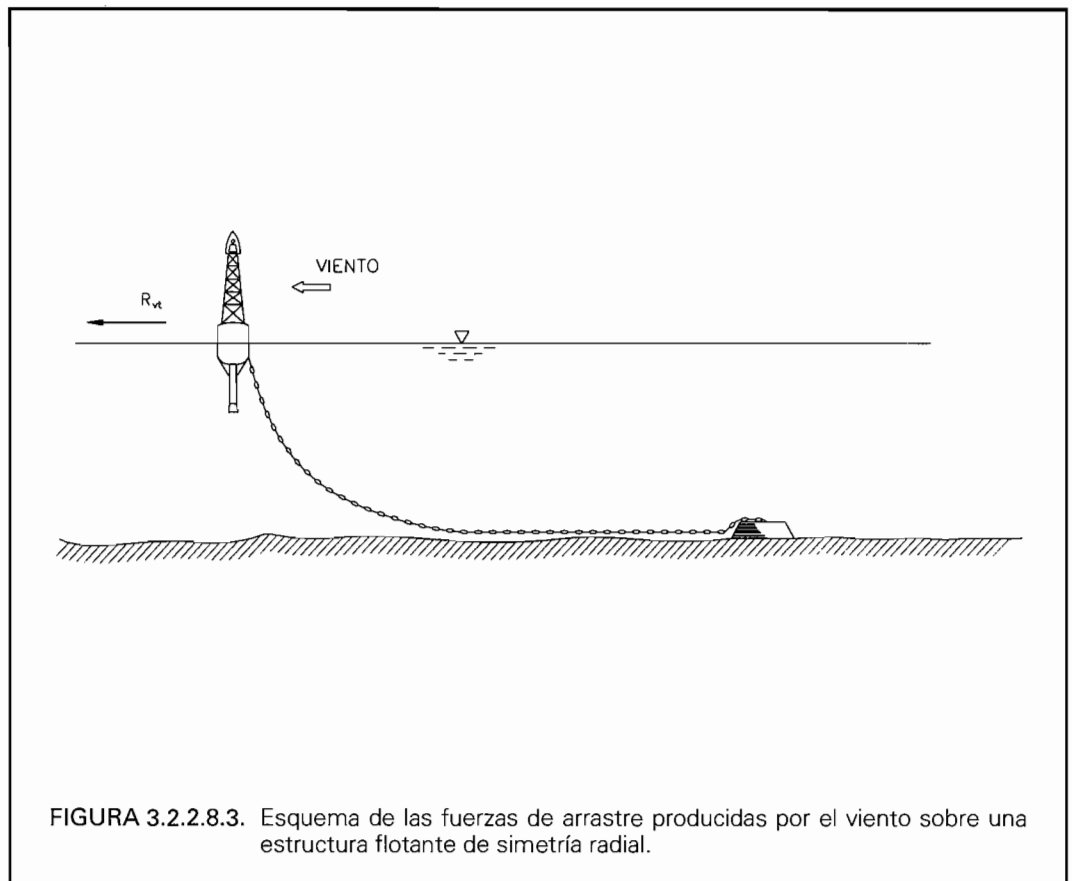
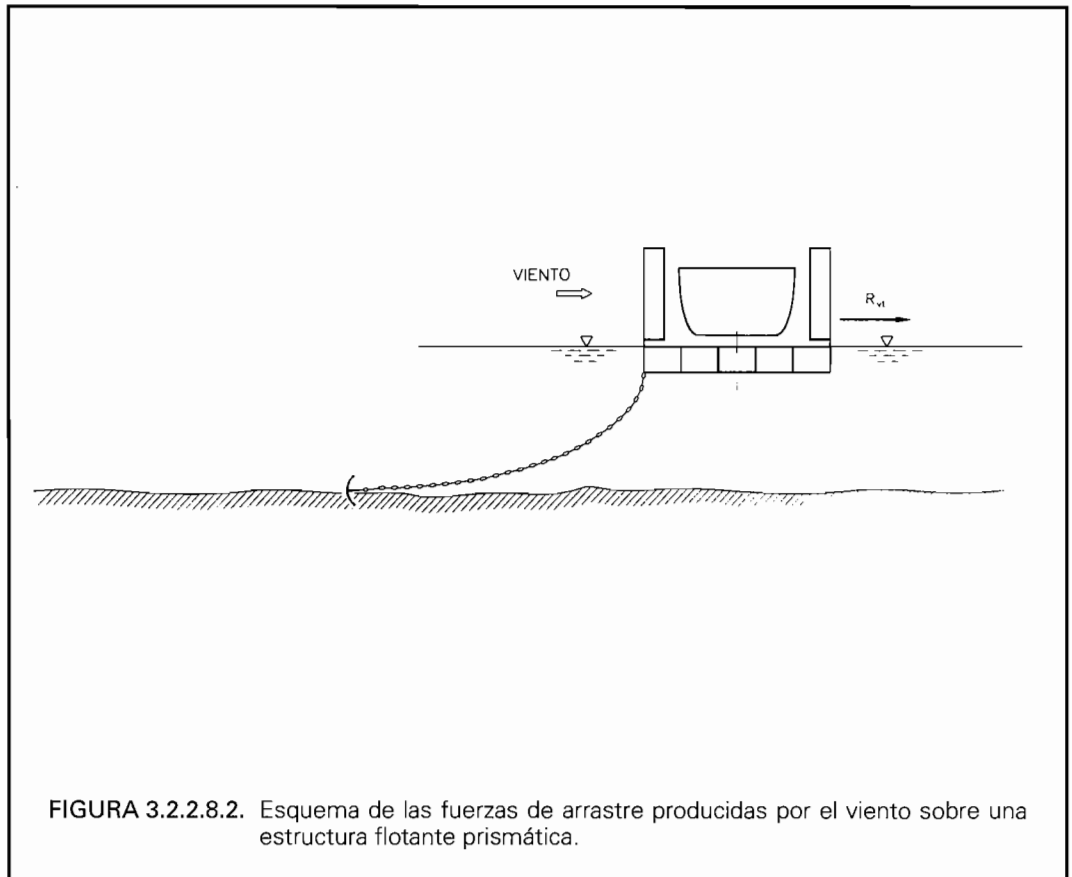
3.2.2.8.3. ACCION DEL VIENTO SOBRE UNA ESTRUCTURA FLOTANTE DE SIMETRÍA RADIAL

Para estructuras flotantes con simetría prácticamente radial (*p.e. boyas o balizas. Ver figura 3.2.2.8.3*), la ecuación de Hughes que determina la carga total de arrastre resultante de la actuación del viento sobre el flotador se simplifica, quedando:

$$R_{vt} = C_v \cdot A_e \cdot q_{v,t}(z) \quad [3.2.28]$$

A falta de datos específicos podrán tomarse simplídicamente los siguientes valores para el Factor de Arrastre C_v :

- 0.7 para superficies cilíndricas.
- 0.5 para superficies esféricas.
- 1.3 para superficies cónicas o piramidales.
- 1.9 para superficies en celosía.



3.3. EFECTOS DINAMICOS

3.3.1. CONSIDERACION DE EFECTOS DINAMICOS DEBIDOS A LA ACCION DEL VIENTO

Para un punto y un Estado de Viento dado la velocidad del viento en las capas límites puede considerarse compuesta por una componente media constante [\bar{V}_v] y por una componente aleatoria de fluctuación en la dirección del flujo, estacionaria, de distribución gaussiana y valor medio cero [$V_v(t)$]⁵¹⁾. Como mediante este modelo descriptivo la velocidad de fluctuación del viento puede considerarse formada por la superposición de un número infinito de ondas componentes monocromáticas de fluctuación alrededor de la velocidad media, de amplitud y frecuencia diferenciadas, la acción del viento puede considerarse como una carga de tipo frecuencial⁵²⁾.

Una carga de tipo frecuencial dará lugar a efectos dinámicos si su aplicación da origen a aceleraciones significativas en la estructura o elemento estructural analizado, y por tanto a fuerzas de inercia de orden de magnitud comparable o mayor a la de las fuerzas estáticas presentes. Esto se produce fundamentalmente en estructuras de baja capacidad de amortiguamiento si en las frecuencias naturales de la estructura correspondientes a los modos de oscilación en alguna dirección o género (*flexión o torsión*), la componente correspondiente de dicha carga frecuencial tiene un valor significativo.

Para la mayor parte de las estructuras y especialmente para las específicamente marítimas y portuarias, de carácter en general masivo, las componentes de la acción del viento con capacidad resonante son pequeñas, pudiéndose considerar que en estos casos la respuesta dinámica de la estructura no es significativa y, por tanto, simplificándose la acción del viento a una carga estática según lo definido en el apartado 3.2. No obstante, algunas de estas estructuras durante la fase de construcción pueden estar en situación más crítica a efectos dinámicos, al presentar frecuencias propias de oscilación más pequeñas que en servicio.

En el apartado 2.1.2.2.2. Descripción Espectral del Viento se analiza el rango de frecuencias con valores energéticos significativos presentes en un Estado de Viento, observándose que se desarrollan fundamentalmente en el interior de una amplia banda entre 0.003 y 0.5 Hz. Si comparamos el espectro de energía del viento reducido tipo correspondiente a la velocidad de fluctuación con algunas bandas de frecuencias propias de oscilación que se presentan en las construcciones más usuales en las que el viento es una acción no despreciable (*Ver figura 3.3.1.1*), puede concluirse que son esperables efectos dinámicos significativos debidos al viento principalmente en estructuras, elementos estructurales y construcciones altos y esbeltos, especialmente cuando pueden oscilar en modo voladizo (*rascacielos, plataformas o construcciones en alta mar, faros, mástiles, chimeneas, torres de control de tráfico marítimo, torres de alumbrado, ...*); en los elementos estructurales esbeltos que forman parte de estructuras en celosía o de equipos e instalaciones de manipulación de mercancías; en los tableros de puentes de gran luz; y en algunos sistemas de amarre de estructuras flotantes en función de la disposición del amarre y de las condiciones de oleaje.

Con carácter indicativo se especifican las siguientes estructuras o elementos estructurales, tanto en fase de servicio como en fase de construcción, en los que deberá comprobarse la posibilidad de efectos dinámicos debidos a la actuación del viento, siempre que se encuentren en condiciones climáticas expuestas:

- Estructuras o elementos estructurales que formen parte de las mismas cuyas frecuencias naturales o propias correspondientes al primer modo de oscilación a flexión en el plano paralelo al de actuación del viento, o a torsión de eje perpendicular a la dirección del viento, sean menores que 0.5 Hz.

$$f_n < 0.5 \text{ Hz}$$

La frecuencia propia correspondiente al modo fundamental de oscilación a flexión o torsión de las estructuras deberá ser determinada, teóricamente o experimentalmente, analizando las vibraciones libres no amortiguadas del modelo estructural considerado mediante la metodología tradicional del cálculo dinámico. Para las estructuras tipo más simples podrá determinarse de forma aproximada por medio de fórmulas analíticas o empíricas simplificadas de validez reconocida. Algunas de estas fórmulas se incluyen en la tabla 3.3.1.1.

(51) Ver Apartado 2.1.2.2.1. Descripción Estadística del Viento.

(52) Ver Apartado 3.3. Efectos Dinámicos de la ROM 0.2-90. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias.

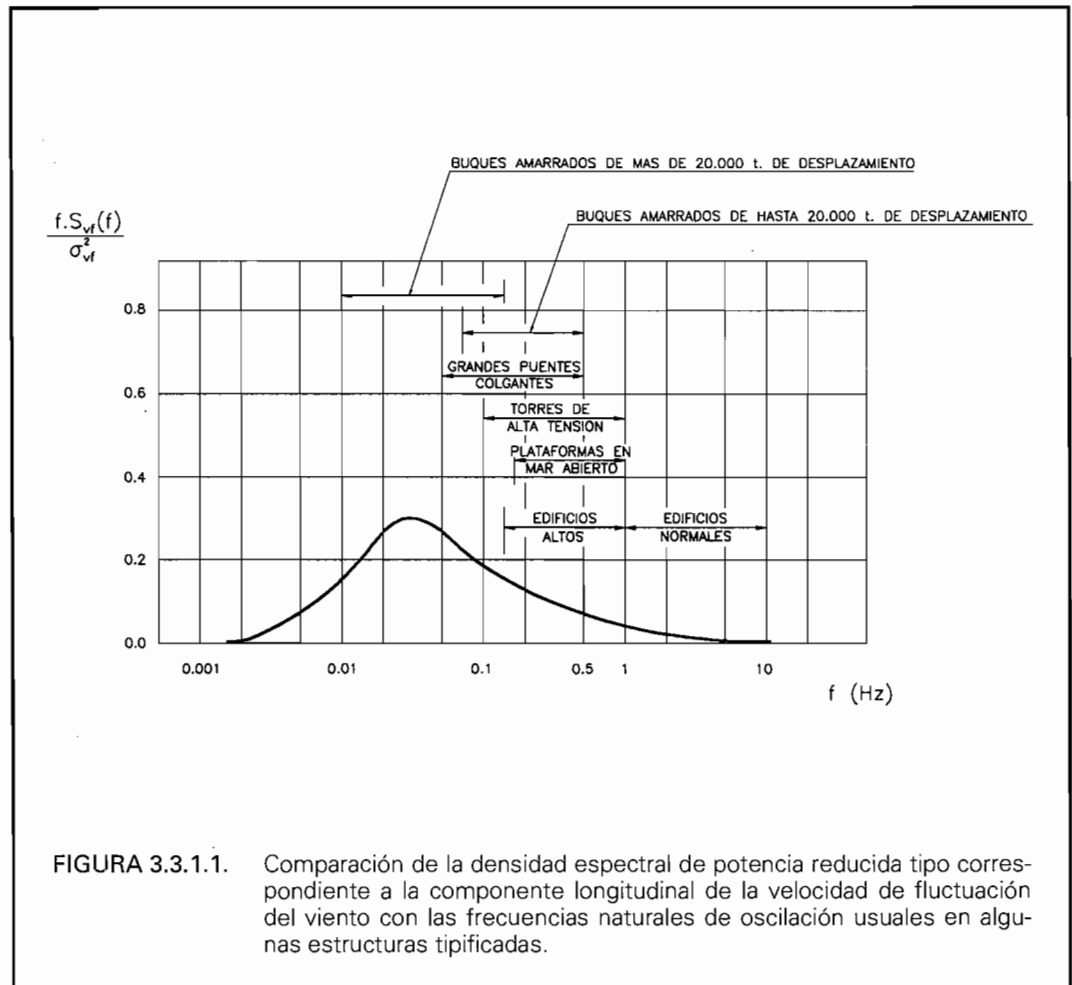


FIGURA 3.3.1.1. Comparación de la densidad espectral de potencia reducida tipo correspondiente a la componente longitudinal de la velocidad de fluctuación del viento con las frecuencias naturales de oscilación usuales en algunas estructuras tipificadas.

Simplificadamente puede considerarse que estructuras verticales en voladizo de esbeltez⁵³⁾ $\lambda \geq 5$ en el plano perpendicular a la dirección de actuación del viento es muy probable que presenten frecuencias propias correspondientes al primer modo de oscilación a flexión menores de 0.5 Hz, siempre que tengan una altura superior o igual a 50 m o, si están parcialmente sumergidas, estén cimentadas a una profundidad mayor o igual a 30 m. Por lo tanto, en este tipo de estructuras deberá comprobarse especialmente la posibilidad de efectos dinámicos debidos a la actuación del viento.

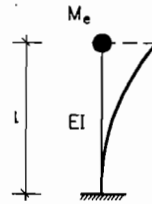
- Estructuras o elementos estructurales de las mismas cuyas frecuencias propias correspondientes al primer o segundo modo de oscilación a flexión en el plano perpendicular a la dirección de actuación del viento, o al primer modo de oscilación a torsión de eje perpendicular a la dirección del viento, coincidan con la frecuencia de la fuerza cíclica producida por la formación de remolinos en la estela generada por la interposición de la estructura al flujo de viento incidente, para una velocidad media del viento igual o menor a la correspondiente al viento de proyecto. (Ver apartado 3.3.4). Las estructuras altas y esbeltas muy lineales (*mástiles, chimeneas, torres de faros,...*) así como aquellas sustentadas sobre grandes pilas o pilotes (*plataformas en alta mar, torres de vigilancia,...*), con frecuencias de oscilación bajas ($\leq 1\text{Hz}$), es muy probable que satisfagan las condiciones señaladas.
- Estructuras susceptibles de inestabilidades aerodinámicas (*acoplamiento de oscilaciones flexión-torsión, interacción ráfaga-estructura,...*) a partir de una velocidad del viento igual o menor a la correspondiente al viento de proyecto. Estructuras con frecuencia propia de oscilación a torsión próxima a la frecuencia propia correspondiente a algún modo de oscilación a flexión en el plano transversal al de ac-

(53) $\lambda = l/b_{\alpha}$, siendo l la mayor dimensión de la superficie proyección de la estructura en un plano perpendicular a la dirección del viento, y b_{α} la menor dimensión de la misma superficie.

TABLA 3.3.1.1. FRECUENCIAS PROPIAS CORRESPONDIENTES AL MODO FUNDAMENTAL A FLEXION DE ESTRUCTURAS TIPO QUE PRESENTAN UN PLANO DE SIMETRIA VERTICAL EN LA DIRECCION DE ACTUACION DEL VIENTO (CONSTRUCCIONES VERTICALES Y HORIZONTALES)

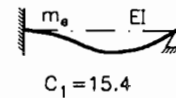
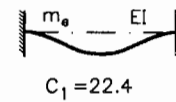
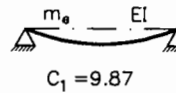
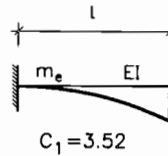
A. MASA CONCENTRADA EN EL EXTREMO DE UN SOPORTE DE MASA DESPRECIABLE

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{M_e \cdot l^3}}$$



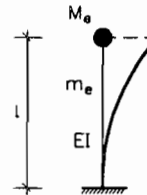
B. MASA UNIFORMEMENTE REPARTIDA EN TODA LA LONGITUD

$$f_n = \frac{C_1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{m_e \cdot l^4}}$$



C. MASA CONCENTRADA EN EL EXTREMO DE UN SOPORTE DE MASA UNIFORMEMENTE REPARTIDA

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{(M_e + \frac{33}{140} m_e \cdot l) \cdot l^3}}$$



D. MASAS SUPUESTAS CONCENTRADAS EN DIVERSOS NIVELES DE UN SOPORTE DE MASA DESPRECIABLE

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \sum_{i=1}^n M_{ei} \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n M_{ei} \cdot Y_i^2}}$$

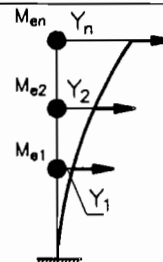


TABLA 3.3.1.1. (Continuación)

NOTAS: En primera aproximación y como orden de magnitud, para la determinación de frecuencias propias correspondientes a estructuras no incluidas en la presente tabla podrá asimilarse cualquier construcción a alguno de los casos en ella incluidos.

LEYENDA:

- E: Módulo de deformación del material del soporte o de la estructura (N/m^2).
- I: Momento de inercia de la sección del soporte o de la estructura (m^4).
- M_e : Masa concentrada equivalente (kg).
- m_e : Masa equivalente de la estructura por unidad de longitud (kg/m). La masa equivalente, tanto concentrada como por unidad de longitud, deberá incluir la masa de la estructura así como la masa de líquido eventualmente contenido en su interior. En estructuras parcialmente sumergidas deberá incluirse como masa añadida el efecto inercial del agua que rodea a la estructura. La masa añadida a considerar debido al agua externa movilizada por la estructura dependerá fundamentalmente de la geometría de la misma y de la dirección de la oscilación. Para los casos de estructuras prismáticas, la masa añadida por unidad de longitud debido al agua movilizada puede obtenerse simplificada de la tabla 3.3.1.2. Para la determinación de la masa equivalente también deberá tenerse en cuenta la posible actuación de adherencias marinas, no tanto como causantes de aumentos máxicos sino en cuanto causantes de sobreespesores importantes que puedan incrementar la cantidad de masa de agua movilizada. Para la cuantificación de adherencias marinas en las aguas costeras españolas ver tabla 3.4.1.2.1. de la ROM 0.2-90.
- l: Longitud del soporte o de la estructura (m).
- Y_i : Flecha, correspondiente al punto de aplicación de la masa concentrada M_{ei} , producida por la actuación de las masas concentradas en calidad de fuerzas sobre la estructura en la dirección de la oscilación, suponiendo que las deformaciones permanecen en el dominio elástico (m).
- g: Aceleración de la gravedad ($9.8 m/s^2$).

tución del viento como cables, péndolas, tableros de puentes colgantes, y otras estructuras planas muy flexibles son especialmente susceptibles a estos efectos.

- Estructuras de formas complejas en las que la acción del viento constituya la sobrecarga preponderante.
- Sistemas de amarre de estructuras flotantes en función de la distribución de las líneas de amarre, de la flexibilidad de la estructura de amarre y de las condiciones de oleaje. Buques de gran desplazamiento amarrados a estructuras muy flexibles y mediante líneas de amarre muy elásticas suelen presentar frecuencias naturales de oscilación próximas a las frecuencias con valores energéticos significativos presentes en un Estado de Viento, por lo que son esperables efectos dinámicos en el sistema de amarre que pueden dar lugar a incrementos significativos en las cargas de amarre transmitidas.

3.3.2. CALCULO DE LOS EFECTOS DINAMICOS CAUSADOS POR LA ACCION DEL VIENTO

Los efectos dinámicos causados por la acción del viento sobre las estructuras pueden dividirse principalmente en los siguientes tipos, en función del fenómeno físico que los origina:

TABLA 3.3.1.2. MASA AÑADIDA QUE VALORA EL EFECTO INERCIAL DEL AGUA EXTERNA MOVILIZADA POR UNA ESTRUCTURA SUMERGIDA PRISMÁTICA DE SECCION UNIFORME, EN FUNCION DE LA DIRECCION DE LA OSCILACION

TIPO DE SECCION		MASA AÑADIDA POR UNIDAD DE LONGITUD	
CIRCULAR		$\rho_w \cdot \pi \cdot a^2$	
ELIPTICA		$\rho_w \cdot \pi \cdot (b^2 \cdot \cos^2 \alpha_c + a^2 \cdot \sin^2 \alpha_c)$	
PLANA		$\rho_w \cdot \pi \cdot a^2$	
RECTANGULAR		$K_1 \cdot \rho_w \cdot \pi \cdot a^2$	
		a/b	K_1
		0.1	2.23
		0.2	1.98
		0.5	1.70
		1.0	1.51
		2.0	1.36
5.0	1.21		
10.0	1.14		
ROMBOIDAL		$K_2 \cdot \rho_w \cdot \pi \cdot a^2$	
		a/b	K_2
		0.2	0.61
		0.5	0.67
		1.0	0.76
2.0	0.85		
CUADRADA CON PLATABANDAS EN LAS ESQUINAS		$K_3 \cdot \rho_w \cdot \pi \cdot a^2$	
		c/a	K_3
		0.05	1.61
		0.10	1.72
		0.25	2.19

LEYENDA: - ρ_w : Densidad del agua.
 • Agua salada: $1.03 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
 • Agua dulce: $1.00 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

- Esfuerzos y deformaciones inducidos por los movimientos de oscilación de la estructura producidos por las fluctuaciones de la presión del viento incidente (*oscilaciones de flexión en la dirección de actuación del viento o de torsión de eje perpendicular a la dirección del viento*).
- Esfuerzos y deformaciones inducidos por los movimientos de oscilación de la estructura producidos por las fluctuaciones de presión originadas por la formación de remolinos en la estela generada por la interposición de la estructura al flujo de viento incidente (*remolinos de Von Karman*) (*oscilaciones de flexión en la dirección transversal a la de actuación del viento y excitación de modos locales de la estructura*).
- Esfuerzos y deformaciones inducidos por diversos tipos de inestabilidades aerodinámicas (*acoplamiento de las oscilaciones de flexión en el plano perpendicular al de actuación del viento con las oscilaciones de torsión de eje perpendicular a la dirección del viento producidas tanto por las fluctuaciones de presión del viento incidente como por la formación de remolinos de Von Karman, interacción ráfaga-estructura, etc...*).
- Esfuerzos y deformaciones inducidos en los sistemas de amarre de estructuras flotantes por los movimientos de oscilación del sistema elástico flotador/amarras/defensas.

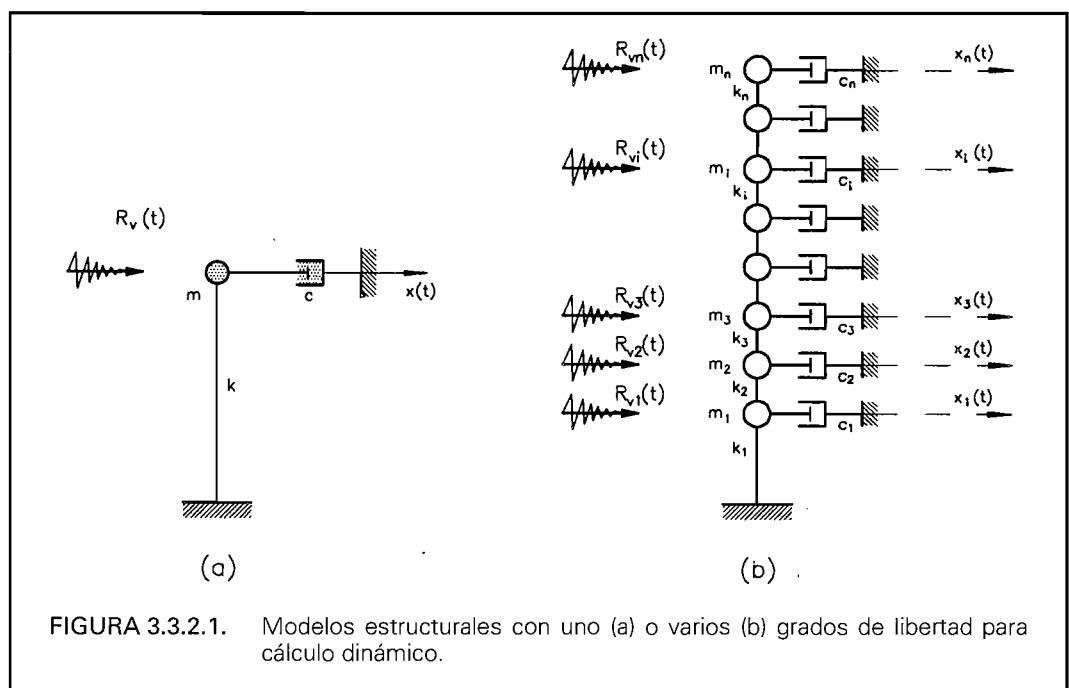
Cada uno de estos efectos deberá considerarse separadamente para el cálculo estructural, no superponiéndose los esfuerzos y deformaciones causados por cada uno de ellos.

La valoración y análisis del comportamiento dinámico de las estructuras debido a la acción del viento es muy complejo, pudiéndose realizar de forma general bien mediante modelos matemáticos o bien mediante modelos experimentales. No obstante, para algunos casos se han desarrollado métodos simplificados suficientemente aproximados que permiten considerar efectos dinámicos utilizando métodos de cálculo estático, representando las acciones dinámicas mediante acciones estáticas que producen efectos equivalentes tanto respecto a esfuerzos como a desplazamientos (*Ver apartado 3.3.3.3*).

Los modelos matemáticos resuelven mediante métodos numéricos o analíticos las ecuaciones de equilibrio dinámico sobre un determinado modelo estructural discretizado equivalente "terreno/estructura/equipos/fluido adyacente" de n grados de libertad, que represente de forma adecuada las características inerciales, de rigidez y de amortiguamiento de la estructura analizada. La resolución de este sistema de ecuaciones podrá realizarse mediante integración directa de las ecuaciones, en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, o mediante un cálculo de superposición modal espectral.

Si la estructura considerada puede asimilarse a un modelo con un solo grado de libertad, la ecuación de equilibrio dinámico o ecuación del movimiento en régimen elástico puede expresarse como (*Ver figura 3.3.2.1*):

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = R_v(t) \quad [3.3.1]$$



siendo:

- m, k y c constantes que representan respectivamente la masa, la rigidez y las características de amortiguamiento del modelo estructural adoptado.
- $x(t)$, $\dot{x}(t)$ y $\ddot{x}(t)$ respectivamente el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la masa m en la dirección de la fuerza excitadora.
- $R_v(t)$ la fuerza dinámica debida a la acción del viento.

En el caso de que la estructura considerada deba ser asimilada a un modelo con n grados de libertad (Ver figura 3.3.2.1), la ecuación [3.3.1] se convierte en un sistema de n ecuaciones, que puede expresarse en forma matricial como:

$$[M] \ddot{\vec{X}}(t) + [C] \dot{\vec{X}}(t) + [K] \vec{X}(t) = \vec{R}_v(t) \quad [3.3.2]$$

siendo:

- $[M]$, $[C]$ y $[K]$ las matrices de masas, amortiguamiento y rigidez respectivamente.
- $\vec{X}(t)$, $\dot{\vec{X}}(t)$, $\ddot{\vec{X}}(t)$ los vectores de desplazamientos, velocidades y aceleraciones nodales respectivamente.
- $\vec{R}_v(t)$: Vector de cargas debidas al viento que actúan en cada punto nodal.

Si diferenciamos una respuesta media en el tiempo coincidente con la respuesta estática de la estructura para la componente media de la carga de viento ($\overline{[X]} = \overline{[R_v]} / [K]$), las ecuaciones de equilibrio dinámico pueden escribirse únicamente en términos de la componente de fluctuación alrededor del valor medio:

$$[M] \ddot{\vec{x}}(t) + [C] \dot{\vec{x}}(t) + [K] \vec{x}(t) = \vec{r}_v(t) \quad [3.3.3]$$

siendo:

- Vector de Desplazamientos: $\dot{\vec{X}}(t) = \overline{[\dot{X}]} + \dot{\vec{x}}(t)$ [3.3.4]

- Vector de Cargas debidas al Viento: $\dot{\vec{R}}_v(t) = \overline{[\dot{R}_v]} + \dot{\vec{r}}_v(t)$ [3.3.5]

El cálculo de los efectos dinámicos causados por la acción del viento deberá efectuarse sucesivamente para el viento actuando en las dos direcciones principales de oscilación a flexión del elemento estructural analizado y en ambos sentidos. No obstante, en el caso de estructuras de directriz horizontal el cálculo se reducirá para viento actuando únicamente en la dirección principal horizontal de oscilación a flexión.

La gran variedad de tipos estructurales existentes entre las obras marítimas y portuarias en los que pueden ser esperables efectos dinámicos significativos debidos a la acción del viento hace de difícil sistematización todos los aspectos referentes a la modelización estructural de los mismos. En cualquier caso, se utilizarán los métodos de discretización habituales en dinámica estructural y, en particular, para la definición de las matrices de masas y de rigidez serán utilizables las técnicas más habituales empleadas para obtener modelos estructurales discretos (*método de las masas concentradas, método de los elementos finitos,...*). La elección de uno u otro método y de su grado de refinamiento será función de las características y complejidad de la estructura analizada, así como del grado de precisión necesario en el cálculo. El método de las masas concentradas es el que se utiliza generalmente en los modelos más simplificados de cálculo en régimen elástico.

Como puede observarse en las ecuaciones de equilibrio dinámico, las fuerzas de amortiguamiento que se introducen son de origen viscoso (*proporcionales a la velocidad*) a pesar de que la evidencia experimental indica que el amortiguamiento en las estructuras no es de tipo viscoso sino fundamentalmente de tipo histerético (*ciclos de histéresis del material para tensiones más allá del límite elástico*). La razón más importante de su utilización práctica es su simplicidad para el cálculo, admitiéndose que dicho amortiguamiento caracteriza el amortiguamiento estructural real de toda la estructura. El modelado del amortiguamiento se hará de acuerdo con los métodos generalmente aceptados de cálculo dinámico de estructuras. En particular, en cálculo lineal se admite la obtención de matrices de amortiguamiento ortogonales mediante la expresión de amortiguamiento proporcional de Rayleigh:

$$[C] = \alpha_1 [M] + \alpha_2 [K] \quad [3.3.6]$$

definiéndose los coeficientes α_1 y α_2 a partir de las fracciones de amortiguamiento crítico para el primer y segundo modo de oscilación a flexión de la estructura analizada (ζ_i) mediante las expresiones:

$$\zeta_i = \frac{\alpha_1}{4 \cdot \pi \cdot f_{ni}} + \alpha_2 \cdot \pi \cdot f_{ni} \quad i = 1, 2 \quad [3.3.7]$$

siendo f_{ni} la frecuencia propia de la estructura correspondiente al modo de oscilación i (en Hz).

Se recomienda, siempre que sea posible, la obtención experimental de los factores de amortiguamiento. En ausencia de información más precisa, pueden tomarse simplificadaamente los valores de la fracción de amortiguamiento crítico incluidos en la tabla 3.3.2.1., en función de la frecuencia natural correspondiente al modo de oscilación a flexión considerado y del tipo de material del que está formada la estructura analizada.

Salvo casos adecuadamente justificados (*estructuras en celosía muy esbeltas o cables*), no se considerará el amortiguamiento aerodinámico.

En estructuras que contengan un fluido en su interior, así como en las estructuras parcialmente sumergidas, deberá incluirse en el modelo estructural dinámico el efecto de la interacción estructura-fluido. Esto podrá hacerse aumentando la masa de la estructura con objeto de tomar en consideración el efecto inercial del fluido, y también modificando las características de amortiguamiento de la misma. La masa añadida a considerar debido al agua externa movilizada en estructuras parcialmente sumergidas dependerá fundamentalmente de la geometría de la misma y de la dirección de la oscilación. Para los casos de estructuras prismáticas de sección uniforme, la masa añadida por unidad de longitud debido al agua movilizada puede obtenerse simplificadaamente en la tabla 3.3.1.2. En estructuras parcialmente sumergidas también deberá tenerse en cuenta la posible aparición de adherencias marinas (*crustáceos, algas, moluscos, etc...*) sobre la estructura, no tanto como causantes de aumentos máxicos no contemplados inicialmente sino en cuanto causantes de sobreesesores importantes que pueden incrementar la valoración de la masa añadida a considerar debido al agua externa movilizada⁵⁴).

TABLA 3.3.2.1. VALORES TIPIFICADOS DE LA FRACCIÓN DE AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO (ζ)	
MATERIAL DEL QUE ESTA FORMADA LA ESTRUCTURA	ζ
ESTRUCTURAS DE ACERO	$0.008 \cdot f_n \geq 0.008$
ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	$0.008 \cdot f_n + 0.008 \geq 0.016$
ESTRUCTURAS MIXTAS	$0.012 \cdot f_n \geq 0.012$

LEYENDA: f_n : Frecuencia propia de la estructura correspondiente al modo de oscilación a flexión considerado (en Hz).

NOTAS: Para estructuras en gran parte sumergidas podrán adoptarse los valores incluidos en la tabla sumándoles 0.015.

No se considera dentro del alcance de esta Recomendación el análisis detallado de las técnicas habituales relativas a la elaboración de modelos estructurales para su aplicación al cálculo dinámico, ni tampoco de los métodos de cálculo propiamente dichos. En esta Recomendación se considera básicamente la definición numérica de la acción dinámica del viento $[R_v(t)]$ a introducir en los diferentes modelos que resuelven el problema. Para más información sobre cálculo dinámico de estructuras deberá consultarse bibliografía

(54) Para la cuantificación de adherencias marinas en las aguas costeras españolas ver tabla 3.4.1.2.1. de la ROM 0.2-90.

especializada. No obstante, en otros documentos del Programa ROM como la ROM 0.3. Acciones Climáticas I: Oleaje y la ROM 0.6. Acción Sísmica se incluyen algunos aspectos referentes al modelado de las distintas tipologías estructurales específicamente marítimas y portuarias, así como los modelos simplificados de las mismas que se pueden adoptar en algunos casos para el análisis dinámico. Asimismo en la ROM 0.5-94. Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas se indican algunos aspectos de interés en lo referente a la modelización de la interacción suelo-estructura bajo efectos dinámicos (Ver apartado 3.10.3. El Cálculo Dinámico).

En los casos de elementos estructurales complejos o de difícil modelización estructural, formas aerodinámicas especiales, influencia importante de estructuras próximas que puedan distorsionar el flujo de viento, y para el análisis de sistemas muy completos y heterogéneos, cualquier modelo matemático deberá ser obligatoriamente contrastado con ensayos en modelo físico, bien en túnel de viento, simulando adecuadamente la variación del perfil de velocidad media del viento con la altura y las características de la turbulencia en función de la rugosidad superficial del área considerada, o bien mediante mediciones "in situ" en prototipo o en estructuras existentes de idénticas características. Asimismo deberán utilizarse ensayos para definir los parámetros resistentes dinámicos en el caso de comportamientos complejos de la estructura (*deformaciones en el rango no elástico, amortiguamientos histeréticos importantes, interacciones modales, etc...*).

3.3.3. DEFINICION NUMERICA DE LA ACCION DINAMICA PRODUCIDA POR LAS FLUCTUACIONES DE LA PRESION DEL VIENTO INCIDENTE

En función de que la resolución de las ecuaciones de equilibrio dinámico se realice en el dominio del tiempo o de la frecuencia, o mediante un método de superposición modal, la definición numérica de la acción dinámica del viento deberá hacerse a partir de su descripción estadística o de su descripción espectral.

3.3.3.1. TRATAMIENTO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Si se utiliza un tratamiento en el dominio del tiempo, la acción dinámica producida por las fluctuaciones de la presión del viento incidente se determinará a partir de un registro temporal de velocidad del viento instantánea $[V_v(t)]$ obtenido en el emplazamiento (*anemograma*) o generado artificialmente a partir de un espectro teórico tipo de validez reconocida (Ver apartado 2.1.2.2.2. Descripción Espectral del Viento), y representativo del Estado de Viento de proyecto⁵⁵). La velocidad instantánea del viento puede considerarse compuesta por una velocidad media no dependiente del tiempo y por una velocidad de fluctuación o de ráfaga:

$$V_v(t) = \bar{V}_v + V_{vf}(t) \quad [3.3.8]$$

La velocidad de fluctuación en el dominio del tiempo podrá expresarse matemáticamente aplicando el análisis de Fourier de ondas compuestas al anemograma o a partir de la función de densidad espectral de la velocidad de fluctuación mediante un proceso de inversión frecuencia-tiempo⁵⁶).

A partir de las premisas anteriores, para un tratamiento en el dominio del tiempo es admisible que la acción dinámica producida por las fluctuaciones de la presión del viento incidente sobre una estructura pueda expresarse simplificada como:

$$R_v(t) = \bar{R}_v + r_v(t) \quad [3.3.9]$$

siendo:

$$- \bar{R}_v \text{ (Componente media)} = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\bar{V}_v)^2 \cdot A_e \quad [3.3.10] \quad 57)$$

$$- r_v(t) \text{ (Componente de Fluctuación)} = \beta \cdot C_f \cdot \rho \cdot \bar{V}_v \cdot V_{vf}(t) \cdot A_e \quad [3.3.11]$$

donde:

C_f : Factor de Forma o Coeficiente Eólico de Fuerza (Ver apartado 3.2.2.3.1).

(55) Registro temporal con velocidad media igual a la velocidad básica del viento de proyecto corregida con objeto de tomar en consideración las condiciones específicas de proyecto (*rugosidad superficial, altura y topografía local*).

(56) Ver Apartado 2.1.2.2.2. Descripción Espectral del Viento.

- A_e : Área frontal efectiva asociada a C_f (Ver apartado 3.2.2.3.1).
 β : Coeficiente de Influencia Aerodinámica. Este coeficiente se introduce en la fórmula [3.3.11] para tener en cuenta la influencia de la relación entre la escala de la turbulencia y las dimensiones de la estructura. Los valores de β para una aplicación particular deben ser determinados mediante ensayos en modelo físico en túnel de viento. Para algunas formas simples estos ya han sido determinados experimentalmente, pudiéndose encontrar en la bibliografía especializada. En ausencia de datos más precisos, podrá adoptarse del lado de la seguridad $\beta=1$.

Los cálculos deberán realizarse para un mínimo de tres anemogramas o registros temporales distintos representativos del Estado de Viento de Proyecto.

3.3.3.2. TRATAMIENTO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El tratamiento en el dominio de la frecuencia puede ser utilizado únicamente para análisis lineal, al contrario que el tratamiento en el dominio del tiempo que permite, en caso necesario, resolver las ecuaciones de equilibrio dinámico particularizadas para tener en cuenta aspectos no lineales tanto geométricos como del material. Como ventaja, este tipo de tratamiento requiere esfuerzos de cálculo menores.

Si se utiliza un tratamiento en el dominio de la frecuencia, la componente de fluctuación de la acción del viento se expresará en términos de densidad espectral de potencia $[S_{r_v}(f)]$, definida mediante la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de $r_v(t)$ ⁽⁵⁸⁾. La densidad espectral de potencia para la componente de fluctuación de la acción del viento (*Espectro de Fuerza del Viento*) podrá obtenerse a partir del espectro de ráfaga mediante la relación:

$$S_{r_v}(f) = [\beta(f)]^2 \cdot \frac{4 \cdot (\overline{R_v})^2}{(\overline{V_v})^2} \cdot S_{v_f}(f) \quad [3.3.12]$$

siendo:

S_{v_f} : Espectro de Energía del Viento o Espectro de ráfaga.
 Sin perjuicio de otras formulaciones de validez reconocida para el lugar considerado, en los cálculos es admisible utilizar de forma general el Espectro Teórico Tipo de Davenport y Harris (1971) para la velocidad media del viento de proyecto, como aproximación a los espectros reales correspondientes a la velocidad de fluctuación del viento (Ver apartado 2.1.2.2.2).

$\overline{R_v}$: Componente media de la fuerza del viento (Ver apartado 3.3.3.1)

$\overline{V_v}$: Velocidad media del viento de proyecto.

$\beta(f)$: Coeficiente de Influencia Aerodinámica. Este coeficiente se introduce en la formulación para tener en cuenta la influencia de la relación entre la escala de la turbulencia y las dimensiones de la estructura. Los valores de $\beta(f)$ para una aplicación particular deben ser determinados preferiblemente mediante ensayos en modelo físico en túnel de viento. Para algunas formas simples éstos ya han sido determinados experimentalmente, pudiéndose encontrar en la bibliografía especializada. En ausencia de otra información, para estructuras prismáticas rectangulares con relación $b/d > 2$ (Ver

(57) Debe señalarse que la componente media de la fuerza de viento definida en la fórmula [3.3.10] está asociada a la velocidad media del viento de proyecto, por lo que no coincide con la carga de viento definida cuando no se consideran efectos dinámicos. Se recuerda que cuando no son esperables efectos dinámicos significativos, la carga estática asimilada está asociada a la velocidad de proyecto correspondiente a la duración de ráfaga (t) más corta capaz de afectar a la estructura o elemento estructural considerado dando empujes o fuerzas de arrastre efectivos sobre la totalidad de la misma, o capaz de vencer la inercia de elementos o estructuras móviles o flotantes; velocidad que siempre es mayor que la velocidad media. (Ver apartado 3.2.1.2. Velocidad del Viento de Proyecto).

(58) Como se admite que, al igual que para la distribución de velocidades de fluctuación del viento, la distribución de la componente de fluctuación de la acción es gaussiana de media cero, la integral de la función de densidad espectral de potencia correspondiente a la componente de fluctuación de la acción extendida a todo el rango de frecuencias es la varianza de la distribución. Es decir:

$$\sigma_v^2 = \int_0^{\infty} S_{r_v}(f) \cdot df = \overline{[r_v(t)]^2}$$

figura de la tabla 3.2.2.3.2) y viento actuando perpendicularmente a la superficie, podrá tomarse:

$$\beta(f) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2 \cdot f \cdot \sqrt{A_e}}{V_v}\right)^{\frac{4}{3}}\right]} \quad (\text{Bearman, 1969}) \quad [3.3.13]$$

siendo A_e el área frontal efectiva.

En este caso, la respuesta de la estructura debido a la componente de fluctuación de la acción podrá obtenerse en términos estadísticos (*valor medio, valor medio cuadrático,...*) por medio de funciones de densidad espectral de potencia correspondientes a la respuesta analizada [*Espectros de Respuesta $S_x(f)$*]. En general podrá admitirse que el efecto máximo (*máximo esfuerzo resultante, máxima deformación, ...*) debido a la componente de fluctuación del viento es igual a $g \cdot \sigma_x$ (Davenport, 1964), siendo:

- g: Factor de pico o de fluctuación máxima.
Este factor es función de las características del perfil de viento y de las propiedades de la estructura (*frecuencia natural, amortiguamiento,...*). No obstante varía poco y puede tomarse igual a 3.5 con carácter general.
- σ_x : Desviación típica de la fluctuación del efecto considerado. Es decir, la raíz cuadrada del área del espectro de respuesta correspondiente.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_x(f) \cdot df} \quad [3.3.14]$$

Los espectros de respuesta se obtienen a partir del espectro de fuerza por medio de funciones de transferencia [$T(f)$] que representan el comportamiento de la estructura y que relacionan cualquier respuesta de la estructura (*desplazamientos o esfuerzos*) con la fuerza excitadora. La relación entre el espectro de fuerza y el espectro de respuesta puede expresarse como:

$$S_x(f) = |T(f)|^2 \cdot S_v(f) \quad [3.3.15]$$

siendo $|T(f)|^2$ el módulo de la función de transferencia⁵⁹⁾.

El efecto total del viento sobre la estructura se obtendrá añadiendo al efecto debido a la componente de fluctuación el debido a la componente media.

3.3.3.3. FUERZAS ESTATICAS EQUIVALENTES

Para algunas estructuras sencillas en cuanto a geometría, rigidez y distribución de masas se han desarrollado algunos métodos simplificados que permiten considerar efectos dinámicos utilizando métodos de cálculo estático, representando las acciones dinámicas producidas por el viento mediante acciones estáticas que producen efectos equivalentes tanto respecto a esfuerzos como a desplazamientos. Estos métodos tienen la ventaja de que permiten introducir la acción dinámica en el sistema habitual de cálculo estático, simplificando el proceso de cálculo.

La equivalencia suele referirse a la igualdad entre los desplazamientos máximos provocados por la acción dinámica y los debidos a las cargas equivalentes. En estas condiciones, las acciones estáticas equivalentes podrán obtenerse mediante la aplicación de factores de mayoración ψ_d , denominados factores dinámicos de carga, a la componente media de la acción de viento⁶⁰⁾.

$$R_{v,equiv} = \psi_d \cdot \overline{R_v} \ll R_v \quad 61) \quad [3.3.16]$$

(59) Por ejemplo, para un sistema de 1 grado de libertad, el módulo de la función de transferencia correspondiente a los desplazamientos x será:

$$|T(f)|^2 = \frac{1}{k^2} \cdot \frac{1}{[1 - (f/f_n)^2]^2 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot (f/f_n)^2}$$

siendo:

- f_n : frecuencia propia de la estructura.
- ζ : fracción de amortiguamiento crítico de la estructura.

(60) La componente media de la acción del viento se define en la fórmula [3.3.10] (Apartado 3.3.3.1)

Dichos factores dinámicos dependen tanto de las características del viento (*velocidad media, perfil de velocidades, espectro de ráfaga,...*) como de las propiedades y características de la estructura considerada (*rigidez, modos de oscilación, frecuencia natural y características de amortiguamiento*). Diversos autores han obtenido diferentes formulaciones empíricas para el factor dinámico en estructuras tipificadas, desarrolladas asumiendo simplificada y diversas formas predominantes de vibración de geometría sencilla. Cada una de estas formulaciones es aplicable únicamente a la estructura tipificada correspondiente, siempre y cuando la deformación de la misma sea esencialmente según el modo fundamental de oscilación y se considere admisible un comportamiento elástico.

Sin perjuicio de otras formulaciones de validez reconocida, para estructuras verticales no sumergidas parcialmente con área frontal efectiva rectangular de altura h y ancho b , cuya deformación sea esencialmente según el modo fundamental de oscilación a flexión, podrá adoptarse un factor dinámico de carga de viento ψ_d definido por:

$$\psi_d = 1 + 3.5 \cdot r \cdot \sqrt{A + (JS/\zeta)} \quad (\text{Vickery, 1971}) \quad [3.3.17]$$

siendo:

- r: Factor de rugosidad.
- A: Factor de excitación.
- J: Factor espectral.
- S: Factor de reducción.
- ζ : Fracción de amortiguamiento crítico de la estructura⁶²⁾.

Los valores de los parámetros r , A , J y S en función de las características del viento y de la estructura analizada pueden obtenerse en la tabla 3.3.3.1.

A falta de una justificación detallada sobre la importancia de los efectos dinámicos en sistemas de amarre de estructuras flotantes debidos a la actuación del viento o si, cuando éstos se prevén significativos, no se calculan por resolución de las ecuaciones del movimiento sobre el modelo estructural equivalente "flotador/amarras/defensas/estructura resistente" o en modelo físico, podrá considerarse simplificada y que la carga transmitida a la estructura resistente y a los equipos de amarre y defensa es igual a 1.5 veces la teórica calculada aplicando cualquiera de los métodos de transmisión estática definidos en la ROM 0.2-90⁶³⁾.

Cuando el efecto dinámico de la acción de viento se tome en consideración por medio de fuerzas estáticas equivalentes, los coeficientes de seguridad a utilizar para obtener los valores de cálculo de la acción serán los mismos que los señalados para el análisis estático. Por el contrario, cuando se efectúe un análisis dinámico específico, el coeficiente de seguridad aplicado estará acorde con el procedimiento de cálculo. El proyectista deberá justificar en estos casos el criterio de seguridad adoptado.

3.3.4. DEFINICION NUMERICA DE LA ACCION DINAMICA PRODUCIDA POR LAS FLUCTUACIONES DE PRESION ORIGINADAS POR LA FORMACION DE REMOLINOS EN LA ESTELA GENERADA POR LA INTERPOSICION DE UNA ESTRUCTURA AL FLUJO DE VIENTO INCIDENTE

3.3.4.1. DESCRIPCION DEL FENOMENO

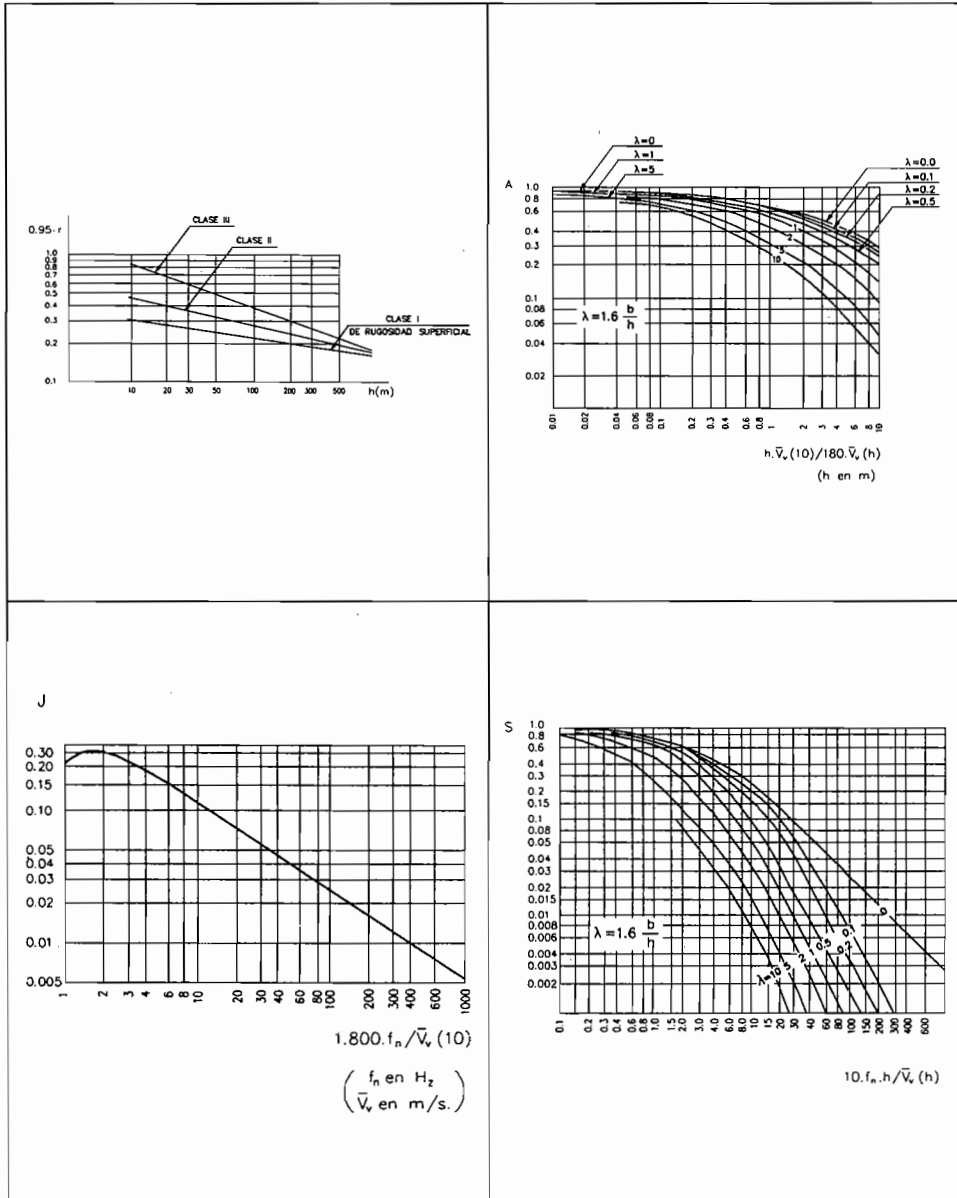
Igual que en el caso de otros flujos como el oleaje o las corrientes, el viento actuando sobre una estructura esbelta en dirección normal a su eje longitudinal puede provocar oscilaciones significativas de la misma en la dirección de actuación del viento, en la dirección perpendicular, o vibraciones de sus paredes debido a los remolinos que se forman en los puntos de despegue de la estela generada por la interposición de la estructura al flujo de viento. Los remolinos, denominados de Von Karman, aparecen alternativamente a cada lado de la estructura prácticamente en periodos regulares, y por tanto a espaciamientos regulares, de tal forma que los remolinos en un lado se sitúan en el punto medio entre dos remolinos del lado opuesto. (Ver figura 3.3.4.1.1)

(61) R_v : Fuerza resultante de presión de viento no considerando efectos dinámicos significativos, definida según el apartado 3.2.2.3.1.

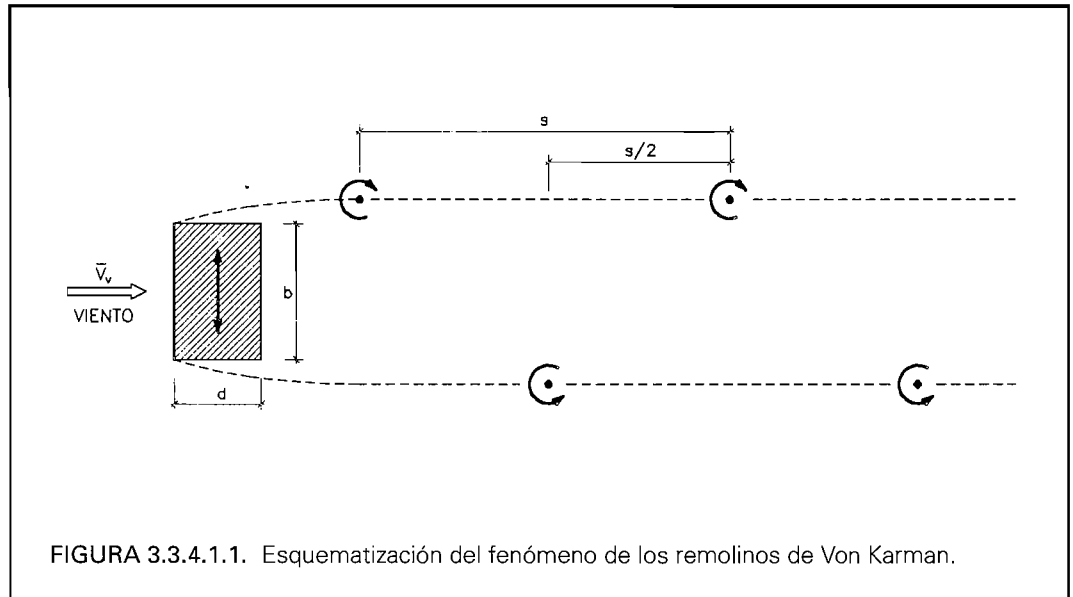
(62) A falta de otros datos, pueden tomarse simplificada y los valores de la Fracción de Amortiguamiento Crítico incluidos en la tabla 3.3.2.1.

(63) Ver apartado 3.4.2.3.5.b. CARGAS DE AMARRE de la ROM 0.2-90.

TABLA 3.3.3.3.1. ABACOS PARA LA OBTENCION DE LOS PARAMETROS r , A , J Y S DE LA FORMULA DE VICKERY (1971) PARA LA DETERMINACION DEL FACTOR DINAMICO ψ_D EN ESTRUCTURAS VERTICALES, NO SUMERGIDAS PARCIALMENTE, CON AREA FRONTAL EFECTIVA RECTANGULAR



LEYENDA: h : Altura del área frontal efectiva de la estructura.
 b : Ancho del área frontal efectiva de la estructura.
 f_n : Frecuencia propia de la estructura correspondiente al modo fundamental de oscilación a flexión en la dirección de actuación del viento.
 $\bar{V}_v(10)$: Velocidad media del Viento de Proyecto a 10 metros de altura sobre la superficie.
 $\bar{V}_v(h)$: Velocidad media del Viento de Proyecto a una altura h sobre la superficie.



En el caso del viento puede considerarse que este fenómeno provoca fundamentalmente una presión fluctuante sobre las superficies laterales de la construcción, y por tanto una fuerza resultante de carácter prácticamente cíclico en la dirección perpendicular a la de actuación del viento.

La frecuencia de dicha fuerza, que coincide con la de aparición de los remolinos, depende principalmente de la velocidad media del viento y de la forma y dimensiones de la sección transversal de la estructura interpuesta, pudiéndose calcular mediante la expresión:

$$f = \frac{S_t \cdot \bar{V}_v(h)}{b} \quad [3.3.18]$$

siendo:

$\bar{V}_v(h)$: Velocidad media del viento a una altura h correspondiente al punto superior de la estructura considerada.

b : Máxima dimensión de la sección transversal de la estructura en la dirección perpendicular a la de actuación del viento. (Ver figura 3.3.4.1.1).

S_t : Número de Strouhal (Adimensional).
Los valores de S_t dependen fundamentalmente de la forma de la sección transversal de la estructura y de la dirección y características del flujo de viento a través de la misma (número de Reynolds). Para las secciones estructurales más usuales pueden tomarse los valores de la tabla 3.3.4.1.1.







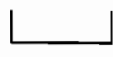
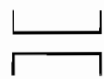


A su vez, la amplitud de la fuerza irá aumentando a medida que su frecuencia se aproxima a la frecuencia natural de oscilación de la estructura.

Se considerará que este fenómeno da lugar a efectos dinámicos significativos en una estructura, y por tanto deberá tomarse en consideración para su dimensionamiento, a partir de la velocidad media del viento para la cual la frecuencia de la fuerza producida por la aparición de los remolinos coincide con la frecuencia de la estructura correspondiente al primer o segundo modo de oscilación a flexión en el plano perpendicular a la dirección del viento, o al primer modo de oscilación a torsión de eje perpendicular a la dirección del viento (f_n). Es decir, cuando:

$$\bar{V}_v(h) \geq V_{v,crit} = \frac{f_n \cdot b}{S_t} \quad [3.3.19]$$

Por lo tanto, este fenómeno únicamente será relevante para el dimensionamiento de la estructura considerada si la velocidad media asociada al viento de proyecto es mayor que la velocidad crítica definida en [3.3.19].

TABLA 3.3.4.1.1. NUMERO DE STROUHAL PARA DIFERENTES SECCIONES TRANSVERSALES

DIRECCION DEL VIENTO	SECCION TRANSVERSAL	S_t	DIRECCION DEL VIENTO	SECCION TRANSVERSAL	S_t
→	 $10^3 \leq Re \leq 10^5$ $Re \geq 2 \cdot 10^6$	0.2 *)	→	 $d/b \leq 1$ $2 \leq d/b \leq 3$ $d/b = 3.5$ $d/b > 5$	0.12 *)
		0.3			0.06 0.15 0.11
→		0.12	↔		0.15
↓		0.14	↓		0.11
→		0.15	→		0.13
↓		0.15	↓		0.14
↓		0.14	↕		0.15
↑		0.16			
←		0.10	→		0.15
↑		0.14			
↘		0.14			

NOTAS: *) Para valores intermedios del número de Reynolds o de los intervalos d/b podrá interpolarse linealmente.

LEYENDA: Re (Número de Reynolds) = $\bar{V}_v \cdot b / \nu \approx 0.7 \cdot 10^5 \cdot \bar{V}_v \cdot b$; para \bar{V}_v en m/s y b en m.

Los remolinos de Von Karman son una de las causas más usuales y conocidas de efectos dinámicos producidos por la acción del viento. Las estructuras altas y esbeltas muy lineales (*faros, mástiles, chimeneas,...*), así como aquellas sustentadas sobre grandes pilas o pilotes (*plataformas en alta mar, torres de vigilancia,...*) son especialmente vulnerables a este efecto, particularmente cuando pueden oscilar en modo voladizo. Asimismo, los elementos estructurales esbeltos de estructuras en celosía y los tableros de puentes de gran luz pueden también ser vulnerables a este fenómeno. En algunos casos la fase de construcción puede ser especialmente crítica al presentar las estructuras configuraciones constructivas cuyas frecuencias de oscilación son más pequeñas que las de servicio.

3.3.4.2. FUERZAS ESTATICAS EQUIVALENTES

Debido a que los efectos dinámicos resultantes de los remolinos de Von Karman son de difícil valoración tanto analítica como experimentalmente, en general deberá evitarse que los elementos estructurales tengan frecuencias de oscilación próximas a la de la fuerza resultante provocada por los mismos para velocidades medias del viento menores que la velocidad media del viento de proyecto. Esto podrá hacerse siempre que sea posible modificando adecuadamente las frecuencias naturales de oscilación de las estructuras, aumentando sus características de amortiguamiento, o eligiendo secciones estructurales o dispositivos añadidos que reduzcan la frecuencia de aparición de remolinos⁶⁴.

No obstante, si se considera la posibilidad de efectos dinámicos significativos causados por remolinos de Von Karman, la estructura podrá calcularse orientativamente con una presión equivalente de carácter estático uniformemente repartida, actuando en dirección normal a la dirección de actuación del viento sobre la superficie de la proyección del contorno exterior de la construcción sobre un plano paralelo a la dirección de actuación del viento.

Para estructuras verticales aisladas y de sección transversal constante, oscilando a flexión en la dirección perpendicular a la dirección de actuación del viento, podrá adoptarse la presión estática equivalente dada por la expresión:

$$p_{equiv,remol} = \pm C_{p,remol} \cdot q_{v,remol} = \pm C_{p,remol} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{v,crit}^2 \quad [3.3.20]$$

Es decir:

$$p_{equiv,remol} = \pm C_{p,remol} \cdot \frac{V_{v,crit}^2}{1.63} \quad (\text{en S.I. de Unidades}) \quad [3.3.21]$$

siendo:

$V_{v,crit}$: Velocidad crítica. Se define en la fórmula [3.3.19].

$C_{p,remol}$: Coeficiente Eólico de presión estático equivalente. Este coeficiente se define matemáticamente mediante la expresión:

$$C_{p,remol} = 4 \cdot \varphi \cdot \sqrt{\frac{S_s \cdot B_s}{\zeta}} \quad [3.3.22]$$

donde:

φ : Factor de mayoración. Toma en consideración la amplificación del efecto resultante debido a los movimientos de la estructura producidos por los remolinos. El valor de este factor puede obtenerse a partir de la tabla 3.3.4.2.1. en función del desplazamiento horizontal del punto superior de la estructura (y_{sup}) en la dirección perpendicular a la de actuación del viento producido por una presión igual a la $p_{equiv,remol}$ correspondiente a $\varphi = 1$, y de la máxima dimensión de la sección transversal de la estructura en la dirección de actuación del viento (d) (Ver figura 3.3.4.1.1).

S_s : Factor de intensidad de la turbulencia de la estela. Se define en función del número de Reynolds correspondiente a la velocidad crítica. (Ver tabla 3.3.4.2.1)⁶⁵.

B_s : Factor de reducción. Toma en consideración la no simultaneidad de los valores máximos de las fluctuaciones de presión a lo largo de toda la estructura. El valor de este factor puede obtenerse de la tabla 3.3.4.2.1. en función de la relación d/l , siendo l la longitud vertical de la estructura expuesta a la acción del viento.

ζ : Fracción de amortiguamiento crítico de la estructura⁶⁶.

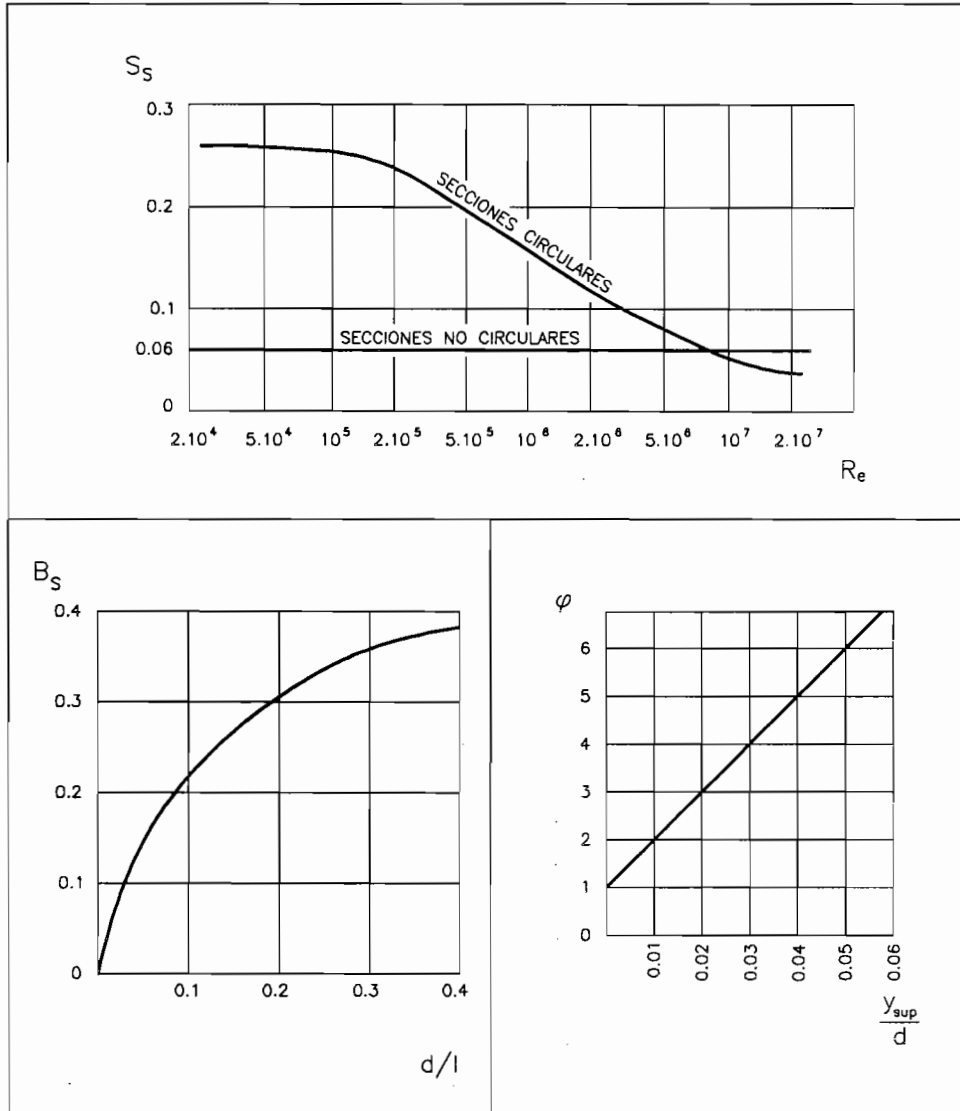
Cuando se trate de estructuras idénticas alineadas en la dirección del viento, a partir de la segunda construcción se considerarán presiones estáticas equivalentes mayoradas respecto a las definidas para la estructura aislada, con el objeto de tomar en consideración el efecto de los remolinos generados en las estructuras precedentes. Podrá tomarse un coeficiente de mayoración igual a 2 si la separación entre elementos es menor que 7b y un coeficiente obtenido por interpolación lineal entre 2 y 1 si la separación está comprendida entre 7b y 14b, siendo b la máxima dimensión de la sección transversal de la estructura en la dirección perpendicular a la de actuación del viento.

(64) P.e. las secciones rectangulares o en T se comportan mejor ante este fenómeno que las secciones circulares, al corresponderles un número S_t menor. (Ver Tabla 3.3.4.1.1). Asimismo la colocación en el tercio superior de la estructura de aletas verticales o helicoidales de sección rectangular son métodos eficaces para reducir la frecuencia de aparición de remolinos.

(65) Para la definición del número de Reynolds, ver leyenda de la tabla 3.3.4.1.1.

(66) A falta de otros datos, pueden tomarse simplícidamente los valores de la Fracción de Amortiguamiento Crítico incluidos en la tabla 3.3.2.1.

TABLA 3.3.4.2.1. ABACOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PARAMETROS INCLUIDOS EN LA FORMULA DE LA PRESIÓN ESTÁTICA EQUIVALENTE PARA EL CÁLCULO DE LOS EFECTOS DINÁMICOS PRODUCIDOS POR LOS REMOLINOS DE VON KARMAN



3.3.5. ANÁLISIS DE FATIGA

En aquellas estructuras o elementos estructurales con efectos dinámicos significativos debidos a la actuación del viento se presentan variaciones repetidas de sus estados tensionales que pueden hacer necesaria la comprobación del Estado Límite de Fatiga⁽⁶⁷⁾. En estos casos, la comprobación de la resistencia a fatiga deberá tomarse en consideración en aquellas estructuras o elementos estructurales para los cuales el viento sea la acción de efecto predominante y además la contribución de la componente de fluctuación de la carga del viento de proyecto a las tensiones máximas de tracción o compresión en servicio, incluyendo la amplificación dinámica, sea superior al 40 % respecto a las tensiones máximas totales correspondientes a las combinaciones de acciones que le sean de aplicación.

(67) Ver Parte 4. ROM 0.2-90.

Por tanto, es previsible que deban realizarse análisis de fatiga especialmente en aquellas estructuras sometidas a efectos dinámicos producidos por las fluctuaciones de presión originadas por la formación de remolinos en la estela generada por la interposición de la estructura al flujo de viento incidente.

Los principales parámetros dependientes directamente de la acción del viento necesarios para la comprobación del E.L.U. de Fatiga en una estructura son:

- La magnitud de las máximas fluctuaciones tensionales que produce la componente de fluctuación del viento en relación a los valores medios, para diferentes velocidades medias del viento. Podrá obtenerse por medio de los métodos de análisis dinámico descritos en los apartados precedentes.
- El número de fluctuaciones correspondientes a cada nivel tensional adoptado. Para ello deberán tenerse en cuenta todos los Estados de Viento en la dirección considerada que actuarán sobre la estructura resistente durante su vida útil, conjuntamente con la respuesta dinámica de la estructura a los mismos. La distribución de Estados de Viento durante la vida útil en un emplazamiento determinado podrá obtenerse a partir de los regímenes medios anuales de velocidad de viento en la zona considerada.

